



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

LUIS FELIPE DE OLIVEIRA BERGAMIM

**INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS,
ANALÓGICOS E RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA EM
TRANSISTORES DE ALTA MOBILIDADE DE ELÉTRONS**

Sorocaba

2022

LUIS FELIPE DE OLIVEIRA BERGAMIM

**INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS,
ANALÓGICOS E RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA EM
TRANSISTORES DE ALTA MOBILIDADE DE ELÉTRONS**

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

Orientadora: Profa. Dra. Maria Glória Caño Andrade

Sorocaba

2022

B493i Bergamim, Luis Felipe de Oliveira
Investigação de Parâmetros Elétricos, Analógicos e Ruído de
Baixa Frequência em Transistores de Alta Mobilidade de
Elétrons / Luis Felipe de Oliveira Bergamim. -- Sorocaba, 2022
116 p.

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

1. Microeletrônica. 2. Transistores. 3. Semicondutores. I.
Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

ATESTADO DE APROVAÇÃO - DEFESA

Atestamos que **LUIS FELIPE DE OLIVEIRA BERGAMIM**, RA nº: PGE190233, RG nº 47.553.065-2, expedido pela SSP/SP, defendeu, no dia 28/04/2022, a dissertação intitulada **INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS, ANALÓGICOS E RUÍDOS DE BAIXA FREQUÊNCIA EM TRANSISTORES DE ALTA MOBILIDADE DE ELÉTRONS**, junto ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Curso de Mestrado Acadêmico, tendo sido 'APROVADO'.

Atestamos ainda que a obtenção do título dependerá de homologação pelo Órgão Colegiado competente.

Sorocaba, 28 de abril de 2022

Marcos Dionizio Silva

*Supervisor Técnico de Seção – Substituto
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação*

“Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Tadeu Bergamim, Solange Bergamim e irmão Pedro Bergamim, das quais palavras não são suficientes neste plano para descrever minha gratidão a esses.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a amiga e professora Maria Glória Caño de Andrade, a qual, desde 2015, me suporta com seus ensinamentos, conselhos e conversas, o que contribuiu pela oportunidade, orientação, motivação e apoio na realização deste trabalho.

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

Ao plano espiritual, a minha mentora e todos os amigos que estão sempre comigo me auxiliando e intuindo para tomar as decisões corretas.

Aos meus pais Antônio Tadeu Bergamim, Solange Bergamim, irmão Pedro Bergamim, avós Ângelo Bergamim *“in memorian”*, Rosa Bergamim, Agenor da Silva e Eurípedas de Oliveira, aos meus tios André Moreira, Danila Nakashima, João Aurélio e Cirlei Govoni e todos os primos e primas pelo amor e suporte imensurável.

À minha namorada Marcella de Sant’Ana por toda paciência, amor, conselhos e ensinamentos. Assim como seus pais Marcelo de Sant’Ana e Aparecida de Sant’Ana.

Ao meu gato *Nap* *“in memorian”* por todo amor, proteção e ensinamentos que me disponibilizou enquanto vida. E ao meu gato *Lyn*, por todo amor, proteção e ensinamentos.

A todos meus amigos e aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

*Who cares when someone's time runs out?
If a moment is all we are
Who cares if one more light goes out?
In a sky of a million stars
Well... I do*

Chester Bennington

RESUMO

BERGAMIM, L. F. O. **Investigação de parâmetros elétricos, analógicos e ruído de baixa frequência em transistores de alta mobilidade de elétrons**. Dissertação – Instituto de Ciência e Tecnologia do Campus de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2021.

Neste trabalho, propriedades analógicas e a densidade espectral de potência (PSD) de ruído de baixa frequência de transistores AlGaIn/GaN (Nitreto de Gálio e Alumínio/Nitreto de Gálio) de alta mobilidade de elétrons (HEMT) são experimentalmente investigados com a variação no comprimento (L) e na largura (W) do canal em diferentes temperaturas para qualificação de seu desempenho.

Importantes figuras de mérito para o desempenho analógico, tais como Eficiência do transistor (g_m/I_D), condutância de saída (g_d), tensão Early (V_A) e ganho intrínseco de tensão (A_v) serão analisadas na faixa de temperaturas (T) de 25°C até 200°C. Adicionalmente, o ruído de baixa frequência é analisado na faixa de temperatura de aproximadamente 5°C até 100°C, a fim de se entender os mecanismos físicos envolvidos no tipo de dispositivo.

Os resultados analógicos indicam que, devido à mudança no potencial de Fermi e da mobilidade dos elétrons, ocorrem variações nos parâmetros analógicos com o aumento de temperatura e variação do comprimento do canal, respectivamente.

Com base na análise do ruído, é visto que a variação significativa em sua densidade espectral é dominada pelo ruído flicker (1/f), originado de flutuações no número de portadores. Além disso, observou-se do aumento de ruído de dispositivos com menor comprimento de canal. As características de ruído de baixa frequência (LF) indicam que os dispositivos HEMT podem ser candidatos promissores para aplicações que requerem alta potência de saída, largura de banda ampla e alto ganho, como é o caso de aplicações analógicas, sistemas de medição e rádio frequência (RF).

PALAVRAS-CHAVE: Microeletrônica, Transistores, Semicondutores.

ABSTRACT

BERGAMIM, L. F. O. **Investigation of electrical, analogy and low frequency noise parameters in high electron mobility transistors.** Dissertação – Instituto de Ciência e Tecnologia do Campus de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2021.

In this work, analog properties, and noise power spectral density (PSD) of the high electron mobility (HEMT) AlGaIn/GaN (Gallium Aluminum Nitride/Gallium Nitride) transistors are experimentally investigated with the variation in the channel length (L) and width (W) at different temperatures to qualify their performance.

Important figures of merit for analog performance such as Transistor Efficiency (g_m/I_D), Output Conductance (g_d), Early Voltage (V_A) and Intrinsic Voltage Gain (A_V) will be analyzed in the temperature range (T) from 25°C to 200°C. Additionally, the origin of the low frequency noise is analyzed in the temperature range of approximately 5°C to 100°C in order to understand the physical mechanisms involved in device.

Analog results indicate that, due to the change in Fermi potential and electron mobility, variations in analog parameters are observed with increasing temperature and channel length variation.

Based on the noise analyses, it is seen that the significant variation in the spectral density of noise is dominated by flicker noise ($1/f$), originated from fluctuations in the number of carriers. In addition, an increase in noise was observed in devices with shorter channel lengths. The low frequency (LF) noise characteristics indicate that HEMT devices can be promising candidates for applications that require high output power, wide bandwidth, and high gain, such as analog, measurement systems, and radio frequency applications. (RF).

KEYWORDS: Microelectronics, Transistors, Semiconductors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Versão mais básica de um HEMT de AlGaAs/GaAs.....	26
Figura 2 – Perfil da energia de bandas de um HEMT com heterojunção.....	31
Figura 3 - Seção transversal de um AlGaN/GaN HEMT.	33
Figura 4 - Perfil do diagrama de banda de condução e banda de valência sob aplicação de uma tensão de polarização aplicada entre a porta e a fonte (V_{GS}) em um HEMT (AlGaAs/GaAs).	34
Figura 5 – Desenho esquemático de parâmetros geométricos do AlGaN/GaN HEMT.	35
Figura 6 – Características de saída (a) e de transferência (b) dos AlGaN/GaN HEMTs.	36
Figura 7 - Exemplo de obtenção de tensão de limiar pelo método de extrapolação.	38
Figura 8 - Eficiência do dispositivo (g_m/I_D) em função da corrente normalizada ($I_D/[W/L]$).	40
Figura 9 - Tensão Early obtida pela curva de intersecção de V_D em I_D	41
Figura 10 - Diferença de comprimento de canal induzindo a redução de barreira (DIBL).	43
Figura 11 - Curva tensão de limiar por temperatura (V_T vs Temperatura).	45
Figura 12 - Variação da corrente de dreno perante temperatura para diferentes valores de tensão de dreno para um dispositivo AlGaN/GaN HEMT.	46
Figura 13 - S_{id}/I_D^2 em função de I_D (a) S_{id}/g_m^2 em função de V_G (b).	48
Figura 14 - Curva $I_D \times V_{DS}$ para a região do triodo.	50
Figura 15 - Curva $I_D \times V_D$ para a região do Triodo para a Saturação.....	51
Figura 16 – Principais características e aplicações de dispositivos HEMT.	52
Figura 17 - Região da lâmina que contém os transistores analisados	55
Figura 18 - Pasta com arquivos de texto com dados referentes à placa E15.....	57
Figura 19 - Arquivo de dados coletados de um dispositivo AlGaN/GaN HEMT.....	57
Figura 20 - Estrutura esquemática dos transistores de alta mobilidade de elétrons AlGaN/GaN (HEMTs) crescidos em substrato de Si.	58
Figura 21 - Ambiente de Programação preparado em Python para compilação gráfica.	59
Figura 22 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaN/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu m$ e $V_{DS} = 0,05V$	60
Figura 23 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaN/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu m$ e $V_{DS} = 0,05V$	61
Figura 24 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaN/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu m$ e $V_{DS} = 2V$	61

Figura 25 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$	62
Figura 26 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$	62
Figura 27 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$	63
Figura 28 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$	63
Figura 29 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05\text{V}$ e $W = 10\mu\text{m}$	64
Figura 30 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$	64
Figura 31 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2\text{V}$ e $W = 10\mu\text{m}$	65
Figura 32 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$	65
Figura 33 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4\text{V}$ e $W = 10\mu\text{m}$	66
Figura 34 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$	67
Figura 35 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$	67
Figura 36 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$	68
Figura 37 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$	68
Figura 38 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$	69
Figura 39 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$	69
Figura 40 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$	70

Figura 41 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05V$ e $W = 10\mu m$	70
Figura 42 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 1\mu m$	71
Figura 43 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 10\mu m$	71
Figura 44 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4V$ e $W = 1\mu m$	72
Figura 45 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4V$ e $W = 10\mu m$	72
Figura 46 - I_D versus V_D para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, W de $1\mu m$, L de $0,2\mu m$ e $V_{GS} = 0,8V$	73
Figura 47 - I_D versus V_D para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, W de $10\mu m$, L de $0,2\mu m$ e $V_{GS} = 0,8V$	74
Figura 48 - Tensões de limiar de HEMTs AlGaIn/GaN com diferentes comprimentos de canal para diferentes regiões de operação e largura do canal igual a $1\mu m$	75
Figura 49 - Tensões de limiar de HEMTs AlGaIn/GaN com diferentes comprimentos de canal para diferentes regiões de operação e largura do canal igual a $10\mu m$	75
Figura 50 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $1\mu m$ e polarização de V_D de $0,05V$	76
Figura 51 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu m$ e polarização de V_D de $0,05V$	77
Figura 52 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $1\mu m$ e polarização de V_D de $2V$	77
Figura 53 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu m$ e polarização de V_D de $2V$	78
Figura 54 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $1\mu m$ e polarização de V_D de $4V$	78
Figura 55 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu m$ e polarização de V_D de $4V$	79
Figura 56 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu m$ e $V_{DS} = 0,05V$	80

Figura 57 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 10µm e $V_{DS} = 0,05V$	81
Figura 58 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 1µm e $V_{DS} = 2V$	81
Figura 59 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 10µm e $V_{DS} = 2V$	82
Figura 60 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 1µm e $V_{DS} = 4V$	82
Figura 61 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 10µm e $V_{DS} = 4V$	83
Figura 62 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 1V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 1\mu m$	84
Figura 63 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 1V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 10\mu m$	84
Figura 64 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 4V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 1\mu m$	85
Figura 65 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 4V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 10\mu m$	85
Figura 66 – Condutância de saída versus L para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 1µm, $V_{DS} = 4V$ e $V_{GS} = 0,8V$	86
Figura 67 - Condutância de saída versus L para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 10µm, $V_{DS} = 4V$ e $V_{GS} = 0,8V$	87
Figura 68 – Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 1µm.	88
Figura 69 – Corrente de porta (I_G) versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 1µm.	88
Figura 70 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 10µm.	89

Figura 71 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 10µm.	89
Figura 72 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de 1µm.	90
Figura 73 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de 1µm.	90
Figura 74 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno (I_D) para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de 10µm.	91
Figura 75 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de 10µm.	91
Figura 76 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de 1µm.	92
Figura 77 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de 1µm.	92
Figura 78 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de 10µm.	93
Figura 79 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de 10µm.	93
Figura 80 - Tensão Early versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 1µm.	94
Figura 81 - Tensão Early versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 10µm.	95
Figura 82 - Ganho intrínseco versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 1µm.	95
Figura 83 - Ganho intrínseco versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 10µm.	96
Figura 84 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).	97
Figura 85 - Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).	98

Figura 86 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).	98
Figura 87 - Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 1\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).	99
Figura 88 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 1\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).	99
Figura 89 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).	100
Figura 90 – Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.	101
Figura 91 – Densidade espectral de ruído normalizada versus corrente de dreno com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas. As linhas são proporcionais com g_m^2/I_D^2 para cada dispositivo.	102
Figura 92 – Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.	102
Figura 93 – Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.	103
Figura 94 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C	103
Figura 95 – Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C	104
Figura 96 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de símbolos de cada transistor HEMT	56
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ALE	Gravura de Camada Atômica; “Atomic Layer Etching”
AlGaAs	Arseneto de Gálio e Alumínio
AlGaIn	Nitreto de Gálio e Alumínio
AlInN	Nitreto de Índio e Alumínio
AlN	Nitreto de Alumínio
Au	Ouro
AlCu	Liga de Ouro e Cobre
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Safira)
BCl ₃	Tricloreto de Boro
CMF	Flutuações de Mobilidade Correlacionadas; “Correlated Mobility Fluctuations”
CMOS	Semicondutor de Óxido-Metal Complementar; "Complementary Metal Oxide Semiconductor"
CNF	Flutuações do Número de Portadores; “Carrier Number Fluctuations”
2-DEG	Gás de Elétrons Bidimensional; “Two-Dimensional Electron Gas”
D	Dreno
DIBL	Redução da Barreira de Potencial do Dreno; “Drain-Induced Barrier Lowering”
DPD	Pré-distribuição Digital; “Digital Pre-Distribution”
<i>f</i>	Frequência
Freq	Frequência
FBJ	Junção de Polarização Direta; “Forward Bias Junction”
FET	Transistor de Efeito de Campo; “Field Effect Transistor”
G	Porta
GaAs	Arseneto de Gálio
GaN	Nitreto de Gálio
GR	Geração e Recombinação
HEMT	Transistor de alta mobilidade de elétrons; “High-electron-mobility transistor”
HMF	Flutuações de Mobilidade Hooge; “Hooge Mobility Fluctuations”
InAlN	Nitreto de Alumínio e Índio
Imec	Centro Interuniversitário de Microeletrônica; “Interuniversity Microelectronic Center”

InN	Nitreto de Índio
LF	Baixa Frequência; “Low Frequency”
MBE	Epitaxia de Feixe Molecular; “Molecular Beam Epitaxy”
MESFET	Transistor de Efeito de Campo Metal-Semicondutor; “Metal–Semiconductor Field-Effect Transistor”
MIS	Metal-isolante-semicondutor; “Metal-insulator-semiconductor”
MOS	Metal-Óxido-Semicondutor; “Metal-Oxide-Semiconductor”
MOCVD	Deposição de Metal Orgânico por Vapor Químico; “Metal-Organic Chemical Vapor Deposition”
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor
Ni	Nitrogênio
O ₂	Dióxido de Oxigênio
O ₃	Trióxido de Oxigênio
RTN	Ruído Telegráfico Aleatório “Random Telegraph Noise”
RF	Rádio Frequência
Pt	Platina
PSD	Densidade do Espectro de Potência; “Power Spectrum Density”
Pd	Paládio
SiO ₂	Dióxido de Silício
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
SCE	Efeito de Canal Curto; “Short Channel Effect”
Ti	Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VPE	Epitaxia de Fase de Vapor; “Vapor Phase Epitaxy”

LISTA DE SÍMBOLOS

A_v	Ganho intrínseco de tensão (dB)
α	Acoplamento capacitivo (F)
α_H	Parâmetro Hooge (μm^2)
C_{ox}	Capacitância do Óxido (F)
C_G	Capacitância da porta (F)
D	Fator de difusão do diodo
d	Espessura da camada ativa de AlGaAs (μm)
dg	Distância da porta ao 2-DEG (μm)
$D(E)$	Densidade de estados energéticos (E)
dP_{out}	Densidade de potência (W/kg)
E_g	Energia da banda proibida do material (eV)
E_F	Posição do nível de Fermi (eV)
ϵ_{si}	Permissividade do silício (F/m)
$f(E)$	Função de distribuição Fermi-Dirac
f	Frequência (Hz)
g_{dSAT}	Condutância de Saída em saturação (A)
g_d	Condutância de Saída (S)
g_m	Transcondutância (S)
$g_{m(max)}$	Transcondutância máxima (S)
I_{ESP}	Corrente de espelhamento (A)
I_{DSAT}	Corrente de dreno em saturação (A)
I	Corrente (A)
I_0	Corrente de saturação reversa (A)
I_{DS}	Corrente entre dreno e fonte (A)
I_D	Corrente de dreno (A)
$I_{D,max}$	Corrente de dreno máxima (A)
I_G	Corrente de porta (A)
I_S	Corrente de fonte (A)
K_p	Transcondutância para um modelo de sinal grande (S)
K	Constante de Boltzmann
L	Comprimento de canal do transistor (μm)

L_G	Comprimento efetivo do canal (μm)
L_{gd}	Comprimento efetivo entre a porta e o dreno do transistor (μm)
L_{gs}	Comprimento efetivo entre a fonte e porta do transistor (μm)
m	Massa efetiva dos elétrons (kg)
n	Concentração de elétrons (cm^{-3})
n_B	Fator de corpo (m)
n_{2D}	Densidade do portador na região 2-DEG ($/\text{cm}^3$)
N_{it}	Densidade de estado da interface (eV)
N_a	Concentração de dopagem no substrato (cm^{-3})
q	Carga elementar do elétron (C)
S	Inclinação de Sublimiar (V/dec)
S_{Vd}	Ruído de Tensão de Dreno (V^2/Hz)
S_{Id}	Ruído de Corrente de Dreno (A^2/Hz)
S_{Vg}	Ruído de Tensão de Gate (Porta) (V^2/Hz)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
μ_n	Mobilidade do elétron ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
V_{BD}	Tensão de ruptura (V)
V_{D1}	Tensão de dreno em linear (V)
V_{D2}	Tensão de dreno em saturação (V)
v_{sat}	Velocidade de deriva de saturação (cm/s)
V_D	Tensão de dreno (V)
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte (V)
V_G	Tensão de entrada aplicada à porta do dispositivo (V)
V_{GS}	Tensão entre porta e fonte (V)
V_{SB}	Potencial entre fonte e substrato (V)
V_T	Tensão de limiar (V)
V_{T1}	Tensão de limiar em linear (V)
V_{T2}	Tensão de limiar em saturação (V)
V_A	Tensão Early (V)
V_K	Tensão de joelho (V)
V_S	Velocidade do portador (cm/s)
W	Largura de canal em transistor (μm)
Z	Impedância (ohms)

$1/f$	Ruído flicker (A^2/Hz)
ϕ_F	Potencial de Fermi (V)
Φ	Altura da barreira de potencial (eV)
Φ_B	Altura de barreira Schottky de porta (eV)
Δ	Borda da banda de condução (eV)
ΔE_c	Descontinuidade de banda de condução na interface (eV)
μ	Mobilidade do elétron ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)
ε	Constante dielétrica do semiconductor
ϕ_T	Constante de tensão térmica
α_H	Parâmetro Hooge

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO.....	24
1.2	ESTRUTURA	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRIA.....	25
2.1	TRANSISTOR HEMT	25
2.1.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS HEMTS	27
2.1.2	HETEROESTRUTURA.....	31
2.1.3	ESTRUTURA EPITAXIAL.....	32
2.2	PARÂMETROS DO DISPOSITIVO HEMT	35
2.2.1	TRANSCONDUTÂNCIA.....	36
2.2.2	TENSÃO DE LIMIAR (V_T).....	37
2.2.3	CONDUTÂNCIA DE SAÍDA (g_d)	39
2.2.4	RAZÃO g_m/I_D	39
2.2.5	TENSÃO EARLY (V_A)	41
2.2.6	GANHO INTRÍNSICO DE TENSÃO (A_v).....	42
2.2.7	REDUÇÃO DA BARREIRA INDUZIDA PELO DRENO (DIBL).....	42
2.3	EFEITOS DE TEMPERATURA	44
2.4	RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA	46
2.4.1	RUÍDO DE GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO (GR).....	47
2.4.2	RUÍDO FLICKER ($1/f$).....	47
2.4.3	DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (PSD).....	49
2.4.4	REGIMES DE OPERAÇÃO HEMTs.....	49
2.5	APLICAÇÕES E VANTAGENS	51
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
3.1	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	55
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA	58
3.1.2	COMPILAÇÃO MASSIVA EM PYTHON	59
3.2	ANÁLISE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE PORTA.....	60
3.2.1	CORRENTE DE DRENO.....	60
3.2.2	TRANSCONDUTÂNCIA.....	66
3.3	ANÁLISE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE DRENO	73
3.3.1	CORRENTE DE DRENO.....	73
3.4	ANÁLISE EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO CANAL	74
3.4.1	TENSÃO DE LIMIAR.....	74

3.4.2	TRANSCONDUCTÂNCIA.....	80
3.4.3	REDUÇÃO DA BARREIRA INDUZIDA PELO DRENO (DIBL).....	83
3.4.4	CONDUTÂNCIA DE SAÍDA	86
3.5	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA	87
3.5.1	EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO	87
3.5.2	TENSÃO EARLY	94
3.5.3	GANHO INTRÍNSELCO.....	95
3.6	ANÁLISE DE RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA.....	96
3.6.1	DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA DE RUÍDO.....	97
4	CONCLUSÕES DO TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS.....	105
5	PUBLICAÇÕES DO AUTOR	107
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

O transistor de alta mobilidade de elétrons (High Electron Mobility Transistor - HEMT) tem sido uma escolha altamente considerada para aplicações de alta frequência, alta potência e altas temperaturas, sendo um importante dispositivo utilizado em circuitos digitais e circuitos de micro-ondas em aplicações que requerem uma resposta de baixo ruído. Sua ampla gama de funcionalidades também inclui computação, telecomunicações e instrumentação. É amplamente utilizado no tratamento de rádio frequência (RF), onde o alto desempenho é uma condição limitante para frequências de RF muito altas (GHz) (AKITA et al., 2001; CHEN et al., 2019).

Durante a última década, os HEMTs fabricados de nitreto de gálio e nitreto de gálio-alumínio (AlGaIn/GaN) têm sido intensamente estudados devido a suas propriedades elétricas fundamentais, tornando-se candidatos extremamente promissores para aplicações que requerem ondas de baixa frequência, devido à sua distinta mobilidade de elétrons, potência e alta tensão de ruptura (BAG et al., 2015; VIMALA et al., 2016; AADIT et al., 2017). Em particular, a introdução de heteroestruturas AlGaIn/GaN tem recebido muita atenção nos últimos anos e contribuído para o estabelecimento de HEMTs que são fabricados com GaN (JONES et al., 2016; BALIGA et al., 2013).

Este dispositivo é, em muitos aspectos, semelhante a um MOSFET de canal n (transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor). No entanto, composto de várias camadas de diferentes semicondutores. Além disso, como no MOSFET, a corrente de entre os terminais da fonte e do dreno (I_D) é controlada pela tensão aplicada entre os terminais de porta e fonte (V_{GS}) (TAKAKURA et al., 2020).

O ruído de baixa frequência (LF) além de ser um parâmetro importante para análise de circuitos e sistemas analógicos é também uma poderosa ferramenta para diagnóstico de falhas, qualidade e confiabilidade de dispositivos semicondutores entre eles os dispositivos HEMTs baseados em GaN/AlGaIn (SILVESTRI et al., 2013; RZIN et al., 2015; RAO et al., 2010).

O comprimento do canal de um transistor impacta diretamente na resistência do canal e as características da corrente de dreno são afetadas pela temperatura (ZHANG et al., 2013). Nesta dissertação, transistores AlGaIn/GaN HEMT com diferentes larguras (W) e comprimentos (L) de canal foram analisados em vista de figuras de mérito analógicas e de ruído de baixa frequência para qualificação de sua performance em diferentes temperaturas de operação (aproximadamente 5°C até 200°C).

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal desta dissertação é o estudo do comportamento de dispositivos AlGaIn/GaN HEMT através de análises elétricas, de parâmetros analógicos e do ruído de baixa frequência perante diferentes dimensões de canal (W e L), polarizações e temperaturas de operação.

1.2 ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. No capítulo 2, está apresentada uma fundamentação teórica.

No capítulo 3, desenvolvem-se as explicações em função dos métodos experimentais para obtenção dos resultados. Apresentam-se as figuras de mérito analógicas em diferentes temperaturas, comprimento do canal e o ruído de baixa frequência. Elencam-se as discussões perante os resultados obtidos.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para os trabalhos futuros.

No capítulo 5, encontram-se uma relação das principais publicações geradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 FUNDAMENTAMENTAÇÃO TEÓRIA

Neste capítulo é apresentado uma breve revisão da literatura sobre os conceitos, aplicações, parâmetros elétricos, figuras de mérito analógicos e ruído de baixa frequência de transistores de alta mobilidade de elétrons.

2.1 TRANSISTOR HEMT

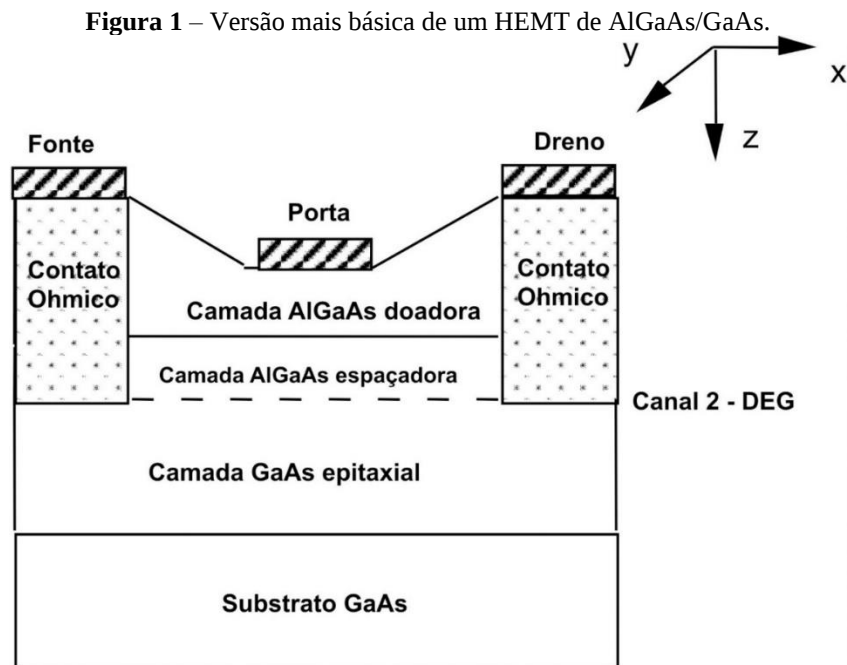
O silício (Si) é o semicondutor mais utilizado em dispositivos para aplicações em alta e baixa potência (ROCCAFORTE *et al.*, 2019). Entretanto, limitações das propriedades físicas intrínsecas impedirão que no futuro os dispositivos baseados nesse material sejam as opções da eletrônica de potência para alguns domínios. A crescente demanda por aplicações de alta eficiência, alta potência, alta frequência e alta temperatura tem desafiado a busca por alternativas ao Silício (Si), sendo que os compostos semicondutores de banda larga, tais como Carboneto de Silício (SiC) e Nitreto de Gálio (GaN) são alternativas bastantes promissoras para tais aplicações. (ALVES *et al.*, 2016).

O silício é largamente utilizado na fabricação dos Transistores de Efeito de Campo (FET) baseados em estruturas de MOS (Metal/Óxido/Semicondutor) ou seja, os MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), considerados os mais comuns transistores de efeito de campo, tanto utilizados tanto para aplicações digitais como analógicas. Quando os MOSFETs convencionais são utilizados em aplicações de baixo ruído e alta densidade de potência, estes dispositivos necessitam de canais com comprimento muito curtos para que a maioria dos portadores enfrentem um mínimo de dispersão de impurezas e a degradação do desempenho seja reduzida. A impossibilidade de uma maior redução do seu comprimento de canal resulta em uma grande limitação de projetos. Além disso, possuem também limitações de desempenho de comutação, velocidade de processamento, dissipação de calor e densidade de escalamento, apresentando excessivo consumo de energia (AADIT *et al.*, 2017; NEWAR; BHAJANA, 2017).

Devido à necessidade de uma melhor eficiência energética, novas tecnologias têm emergido a fim de superar as limitações dos dispositivos baseados em Si (ROCCAFORTE *et al.*, 2019). Foi assim que em 1979, Dr. Takashi Mimura, funcionário do Laboratório Fujitsu, desenvolveu o transistor de alta mobilidade de elétrons (HEMT-High Electron Mobility Transistor), utilizando o GaAs (Arseneto de Gálio) como uma alternativa ao MOSFET padrão de Si (PATENTE JAPONESA, 1987).

O dispositivo HEMT é similar a um MOSFET, sendo constituído, porém, por diversas camadas de semicondutores compostos ao invés de Si. Esse transistor de efeito de campo combina uma junção entre dois materiais com larguras de bandas diferentes, isto é, exibem uma heterojunção. Quando uma heterojunção é desenvolvida, tanto a banda de condução como a banda de valência curvam-se, em todo o material, para alinhar o nível de Fermi (MIMURA, TAKASHI, 2005; ROMERO *et al.*, 2015).

Na versão mais tradicional do dispositivo HEMT, o substrato de silício é substituído por uma camada de GaAs epitaxial não dopada e o óxido de silício é substituído por uma camada de arseneto de gálio e alumínio (AlGaAs) tipo-n (Figura 1) (ROMERO *et al.*, 2015).



Fonte - ROMERO; RAGI; MANZOLI, 2015.

Materiais como o SiC e GaN têm sido bastante utilizados nos dispositivos HEMTs nos últimos anos (ALVES *et al.*, 2016). O GaN vem sendo considerado uma das melhores opções de ligas semicondutores para utilização em HEMTs, principalmente devido a sua boa eficiência energética e seu excelente desempenho em alta potência (ROCCAFORTE *et al.*, 2019; MIMURA, TAKASHI, 2005; MIMURA, 2002). O GaN é um semicondutor de banda larga e têm uma alta tensão de ruptura e alta densidade de corrente, que são características importantes para uso como dispositivos de alta potência e frequência (HADHEMI, 2017):

O HEMT possui alta mobilidade de elétrons devido à geração do gás de elétrons 2-D (2-DEG) (KIM, 2021; ROCCAFORTE *et al.*, 2019). Este gás de elétrons é formado devido à camada de AlGaAs dopado tipo-n ser crescida no topo de uma camada de GaAs epitaxial não dopado, gerando entre os dois materiais uma heterointerface (ROMERO *et al.*, 2015). Nesta região, existe uma alta mobilidade de elétrons decorrente da diferença entre a polarização espontânea e polarização piezoelétrica (HSU *et al.*, 2021) de transferência de elétrons livres do AlGaAs para o GaAs, produzindo um encurvamento da banda de condução (ROMERO *et al.*, 2015).

Dispositivos HEMT construídos a partir de AlGaAs/GaN podem ser operados em condições de altas frequência, potência e temperatura, com um excelente desempenho, além de possuírem elevada tensão de ruptura e alta velocidade de saturação dos elétrons (ZENG *et al.*, 2018; AADIT, 2017).

2.1.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS HEMTS

As técnicas e processos de fabricação de HEMTs dependem, principalmente, da estrutura do dispositivo e do tipo de material de cada camada e envolve várias etapas de processo: fabricação da estrutura da mesa; deposição dos terminais de fonte e dreno; formação da liga (difusão) e deposição do terminal de porta.

Resumidamente, a fabricação de um dispositivo HEMT baseado em GaN começa com a gravação (máscara) e limpeza do substrato sobre o qual é realizado o crescimento epitaxial. Em seguida, é realizada a construção de um *buffer*, com ou sem dopagem no substrato. A heteroestrutura GaN/AlGaAs é construída, sendo que a deposição deve ser realizada mantendo-se uma boa qualidade para que assim o dispositivo demonstre bom funcionamento.

Então, é realizado o isolamento da mesa entre os dispositivos por diferentes processos de litografia e corrosão. O dreno e os metais são então depositados pelo método de evaporação e processos de *lift-off*, sendo posteriormente realizado um processo de recozimento para formação do contato ôhmico do dreno e da fonte. Finalmente, o metal da porta é depositado usando uma sequência semelhante para os outros dois terminais (LIANG, 2020).

Em relação aos substratos, pode-se afirmar que aqueles com alta condutividade térmica são os mais desejáveis na fabricação de HEMTs, devido à maior possibilidade de dissipação do calor interno. O manuseio adequado do calor é um fator importante e que deve ser levado em consideração no desenvolvimento e modelagem destes dispositivos (RODRÍGUEZ et al., 2015). Quanto menor a condutividade térmica do substrato, maior é a degradação esperada na corrente do dreno, assim como uma redução na transcondutância, sendo, por este motivo, importante a utilização de um substrato adequado na fabricação de HEMTs (RODRÍGUEZ et al., 2015).

Os HEMTs podem ser obtidos com diferentes tipos de substratos, incluindo o silício (Si), safira (Al_2O_3), carboneto de silício (SiC) ou nitreto de Gálio (GaN) (HSU et al., 2021). Entre estes, SiC é considerado mais eficiente para a fabricação desses dispositivos com alta qualidade. Em um GaN HEMT tradicional é utilizado uma heteroestrutura AlGaIn/GaN. A espessura de AlGaIn normalmente tem cerca de 20-25nm, e a espessura do canal de GaN é de cerca de 1-5 μm , dependendo da tensão de ruptura desejada (LIU et al., 2021). Em relação ao contato dos dispositivos AlGaIn/GaN HEMTs, podem ser de dois tipos; ôhmico ou Schottky. Os ôhmicos podem ser fabricados para a fonte e dreno dos dispositivos AlGaIn/GaN HEMTs utilizando vários métodos, entre os quais estão o tunelamento assistido por armadilha induzida, micro-ondas e o recozimento térmico rápido. Os contatos Schottky nos AlGaIn/GaN HEMTs são o processo vital. A desvantagem dos contatos Schottky nos AlGaIn/GaN HEMTs é a grande corrente de fuga reversa, tornando o dispositivo difícil de funcionar com eficiência. A redução da corrente de fuga de porta reversa dos AlGaIn/GaN HEMTs é essencial para o alto desempenho do dispositivo (NAHHAS, 2019).

Para aumentar a potência dos transistores HEMT, é necessário aumentar a densidade de corrente I_D e a tensão de ruptura V_{BD} . Para tal, é necessário aumentar a densidade dos elétrons no canal 2-DEG, o que aumenta a diferença de polarização na interface barreira/canal. Já, para aumentar a frequência de corte nestes dispositivos, é necessário reduzir o comprimento da porta (GASSOUMI et al., 2019).

A tecnologia comum de processamento HEMT é considerada complicada e demorada. Muitas questões relativas ao material AlGaIn/GaN e à estrutura do dispositivo precisam ser estudadas com mais detalhes, sendo que algumas delas só podem ser respondidas de maneira satisfatória com a caracterização completa do dispositivo. Portanto, um dispositivo HEMT simples e de rápida preparação é especialmente útil e, para tal, um Round-HEMT foi escolhido por Kordos et al. (2000) para caracterizar as estruturas InGaAs/InP 2-DEG. O Round-HEMT apresenta o layout dos contatos metálicos em uma geometria circular. O contato da porta é formado como um anel fechado e os contatos entre a fonte e o dreno são colocados dentro e fora da porta. A principal vantagem deste dispositivo é que apenas são necessárias duas etapas de processamento, a metalização ôhmica e a Schottky.

As heteroestruturas de AlGaIn/GaN empregadas foram crescidas em um substrato de safira utilizando a técnica de MOCVD. Consistem em uma camada de nucleação de 20nm crescida a baixa temperatura, seguida por uma camada de GaN não-dopado de 2-3 μ m de espessura e de cerca de 20nm de espessura de uma camada de AlGaIn com 15-20 % de AlN. As medidas de efeito Hall de temperatura ambiente produziram as seguintes propriedades 2-DEG: concentração dos carregadores de chapa de $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ e mobilidade Hall de 1200 cm^2/vs .

A metalização mais aplicada para contatos ôhmicos em GaN é Ti/Al, a qual precisa ser recozida a uma temperatura relativamente alta de 850-900°C. Uma camada de cobertura de Au é comumente usada para evitar a oxidação do Ti/Al e uma camada de barreira de Ni ou Pt é inserida entre Al e Au. Por outro lado, Ni ou Pt são usados para a preparação dos contatos Schottky devido a sua mais alta função de trabalho de metal no n-GaN (SCHMITZ et al., 1998).

Ti/Al/Ni/Au recozido a 800°C por 60s foi utilizado para a fonte ôhmica e contatos de drenagem e Ni/Au como o metal de porta. O comprimento e largura da porta são 0,7-0,9 e 100 μ m, respectivamente, e o espaçamento entre o dreno e a fonte de 4 μ m. Uma corrente de pico de 210mA/mm e uma transcondutância extrínseca máxima de 110mS/mm foram obtidas, valores típicos para AlGaIn/GaN HEMTs com contatos similares.

A descrição de um dispositivo Round-HEMT é interessante devido a ser utilizado para estudar a bem conhecida dispersão DC/RF dos dispositivos AlGaIn/GaN HEMT usando medidas de pulso. Um método adicional para identificar a presença de centros de armadilhamentos é a aplicação de medidas espectrais da fotoresposta do dispositivo.

O obstáculo que limita os dispositivos HEMTs para aplicações em alta frequência é o efeito de canal curto (SCE), decorrente, principalmente, do pobre confinamento de elétrons e da falta de isolamento do *buffer*. Entretanto, os HEMTs fabricados com InAlN/GaN têm demonstrado excelentes desempenhos para aplicações em alta frequência (HAN et al., 2017; PINCHBECK et al., 2021).

Para alcançar a operação em alta frequência e com alta transcondutância, normalmente é reduzido o comprimento da porta, resultando em efeitos de canal curto, o qual é caracterizado quando o tamanho do canal do transistor tem dimensões comparáveis a região de depleção do terminal fonte e dreno. Há também uma redução da barreira induzida pelo dreno (DIBL), onde a tensão de limiar (V_T) muda com o viés do dreno. Para melhorar a transcondutância do dispositivo e suprimir DIBL dos HEMTs pode-se empregar uma porta de metal dupla com estrutura e função de trabalho diferentes. Com o emprego desta porta dupla há uma melhora notável na velocidade do elétron sob a porta, levando a uma maior corrente de saída e da transcondutância, com uma supressão na DIBL destes dispositivos (CHUGH et al., 2018; JUNG et al., 2020; PINCHBECK et al., 2021).

Pinchbeck et al. (2021) relataram uma melhora na transcondutância de até 9% em dispositivos AlGaIn/GaN HEMTs de porta dupla utilizando titânio (Ti) e paládio (Pd), em comparação com os dispositivos convencionais de porta única de metal. Investigando o efeito que o comprimento da porta possui no desempenho do dispositivo, os autores relataram que aquele com o comprimento de porta menor mostrou um ganho de transcondutância e uma diminuição do efeito DIBL.

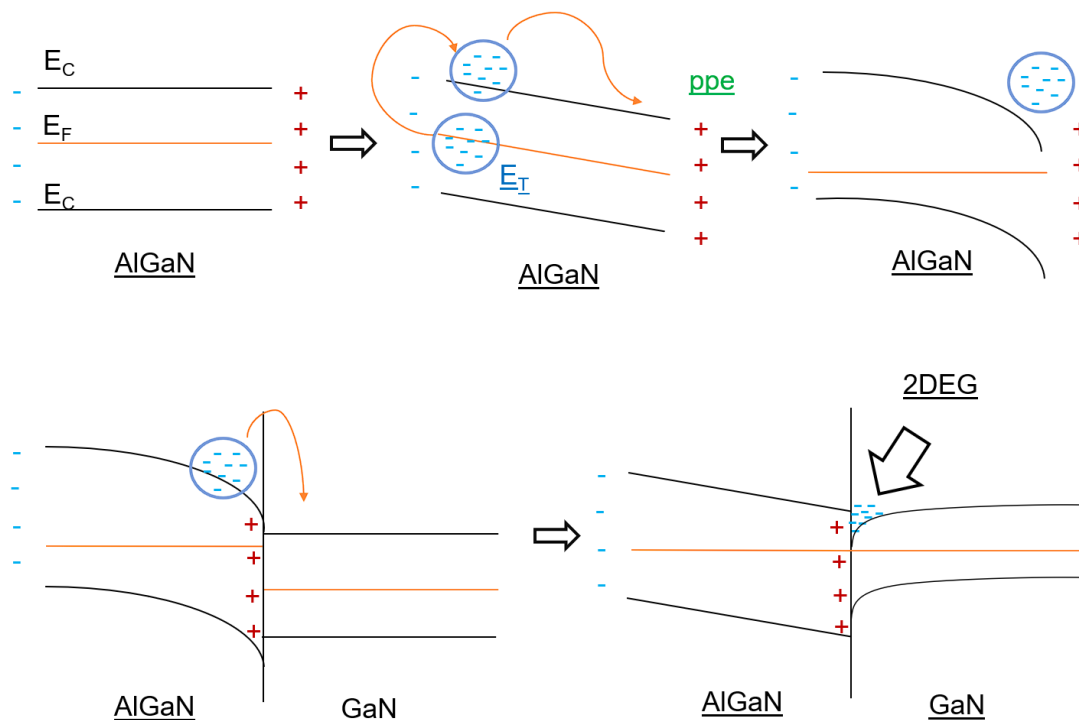
HAN et al. (2017) investigaram a influência de uma barreira de 0,64mm de espessura de Al, 0,36mm de IN e 3nm de N no desempenho de um dispositivo InAlN / GaN HEMT. Comparado com um dispositivo InAlN/GaN HEMT convencional, com uma barreira traseira AlInN, houve um aumento significativo no confinamento de elétrons e na eficiência de modulação da porta, o que ajudou a suprimir o efeito de canal curto, além de melhorar o desempenho de radiofrequência. Demonstrou, assim, ser um potencial material de barreira, uma vez que melhorou o desempenho de dispositivos altamente dimensionados, e para os futuros HEMTs de canal InN, suprimindo o colapso de corrente devido a um melhor confinamento de elétrons e com menor densidade total de elétrons do que os dispositivos convencionais.

2.1.2 HETEROESTRUTURA

Quando uma heterojunção é formada, devido às diferentes bandas de energias, as bandas de condução e de valência, em todo o material, curvam-se para formar um nível de Fermi contínuo, como pode ser visto na Figura 2. O elemento de banda larga tem elétrons em excesso na faixa de condução, pois é dopado com átomos de doadores. O material da banda estreita tem estados de banda de condução com menor energia. Assim, os elétrons difundem-se do material com largura de banda maior para o material de com largura de banda menor, devido aos estados com menor energia (AADIT, 2017). Os processos de deriva e difusão continuam até que se equilibrem, criando uma junção em equilíbrio como uma junção p-n. Essa difusão de portadores leva ao acúmulo de elétrons ao longo da interface das duas regiões. Estes elétrons acumulados são o 2-DEG (HADHEMI, 2017).

A Figura 2 mostra o perfil sequencial da energia de bandas do material AlGaN com aproximação do diagrama de bandas do do material GaN, onde ocorre o curvamento das bandas na heterojunção.

Figura 2 – Perfil da energia de bandas de um HEMT com heterojunção.



Fonte – Autor

Nota-se pela Figura 2 que, tanto a banda de condução (E_C) como a banda de valência (E_V) curvam-se em relação ao nível de Fermi (E_F), resultando em um bom preenchimento da camada de gás 2-DEG e, eventualmente, um canal de condução é formado (AADIT, 2017). Considerando que a maioria dos elétrons ocupa a primeira sub-banda de energia, a densidade do portador na região 2-DEG é dada pela equação (1) (HADHEMI, 2017):

$$n_{2D} = \int_0^{\infty} D(E)f(E)dE \quad (1)$$

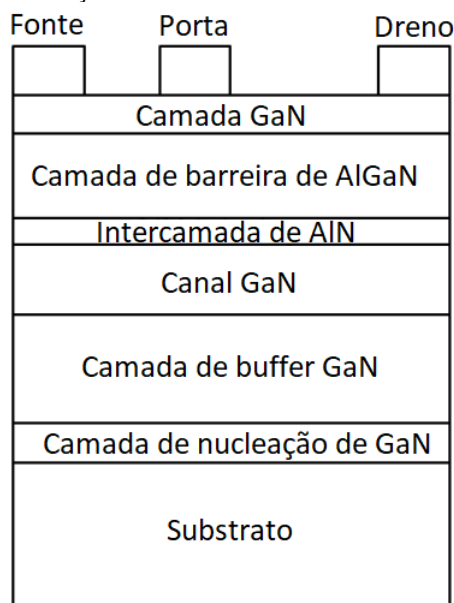
$$= \frac{m}{\Phi^2} q \frac{\Delta}{q}$$

Onde $D(E)$ é a densidade de estados energéticos. $f(E)$ é a função de distribuição Fermi-Dirac, m é a massa efetiva dos elétrons, Φ é a altura da barreira de potencial entre a camada de GaN e o substrato e Δ são as cargas que atravessarão uma determinada área da borda da banda de condução abaixo do nível de Fermi na interface AlGaIn / GaN.

2.1.3 ESTRUTURA EPITAXIAL

Como relatado por Romero et al. (2015), semelhante ao que ocorre em MOSFET tradicional, no dispositivo HEMT (AlGaIn/GaN) a corrente entre os terminais de fonte e dreno são controladas pela tensão aplicada entre os terminais de porta e fonte. Quando uma tensão positiva é aplicada ao contato ôhmico do dreno, esta também é alterada pela barreira Schottky. Isto se deve ao fato de que a corrente entre os terminais de dreno e fonte atravessa o canal 2-DEG. A Figura 3 apresenta a seção transversal de um dispositivo HEMT (AlGaIn/GaN).

Figura 3 - Seção transversal de um AlGaIn/GaN HEMT.



Fonte – Adaptado de HADHEMI, 2017.

De acordo com a Figura 3, verifica-se que a estrutura do dispositivo se segrega em seis principais camadas, sendo estas (HADHEMI, 2017):

- Substrato: é a camada utilizada como base para realização do crescimento do dispositivo. A escolha do substrato depende do tamanho disponível, custo, condutividade térmica, constante de incompatibilidade de rede, dissipação de calor e aplicação do dispositivo.
- Camada de *buffer* de GaN: é involuntariamente dopada e composta de material de banda larga.
- Camada de barreira de AlGaIn: é uma camada dopada involuntariamente. Esta camada forma o contato Schottky com a porta do contato metálico e fornece os elétrons para a condução no canal. O AlGaIn/GaN HEMT pode estar sujeito a fenômenos parasitas que o impedirão de funcionar em condições ideais. Dessa forma, as camadas descritas abaixo podem ser adicionadas à camada de barreira de AlGaIn.
- Camada de nucleação: é uma camada intermediária entre a camada GaN e o substrato.
- Intercamada de AlN: a chamada camada espaçadora AlN é usada para melhorar a densidade de 2-DEG, a mobilidade e a corrente de dreno.

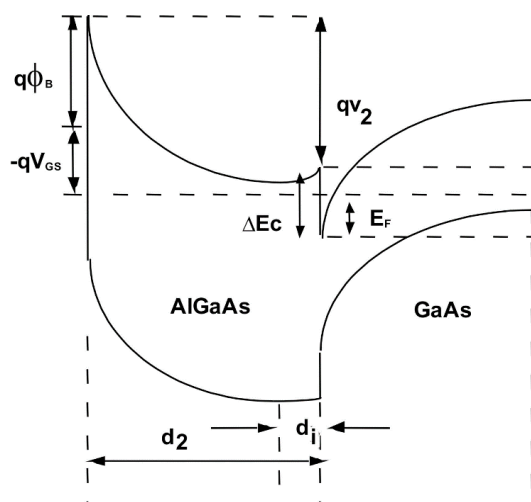
- Camada de GaN: permite proteger a camada ativa e reduzir a resistência de contato ao canal.

Na heterointerface (canal 2-DEG) entre os materiais AlGaAs e GaAs há uma transferência de elétrons livres, produzindo um encurvamento da banda de condução. Caso a largura da região próxima da heterointerface, onde os portadores estão confinados, seja suficientemente estreita, efeitos quânticos se tornam importantes e devem ser levados em consideração (HADHEMI, 2017).

Quando elétrons adquirem suficiente energia térmica para atingir a banda de condução, estes irão se transferir do AlGaAs para o GaAs, pois a banda de condução do GaAs possui energia menor que a do AlGaAs, sendo que tal processo de transferência satisfaz a condição de equilíbrio expressa pelo nível de Fermi. Este processo é constante ao longo da heterojunção e causa um aumento no campo elétrico e, assim, encurvamento do diagrama de bandas na região adjacente à interface AlGaAs/GaAs (ROMERO *et al.*, 2015).

A Figura 4 mostra, no diagrama de bandas de energia, as bandas de condução e de valência de uma heterojunção (AlGaAs/GaAs) em contato com uma barreira Schottky em um HEMT.

Figura 4 - Perfil do diagrama de banda de condução e banda de valência sob aplicação de uma tensão de polarização aplicada entre a porta e a fonte (V_{GS}) em um HEMT (AlGaAs/GaAs).



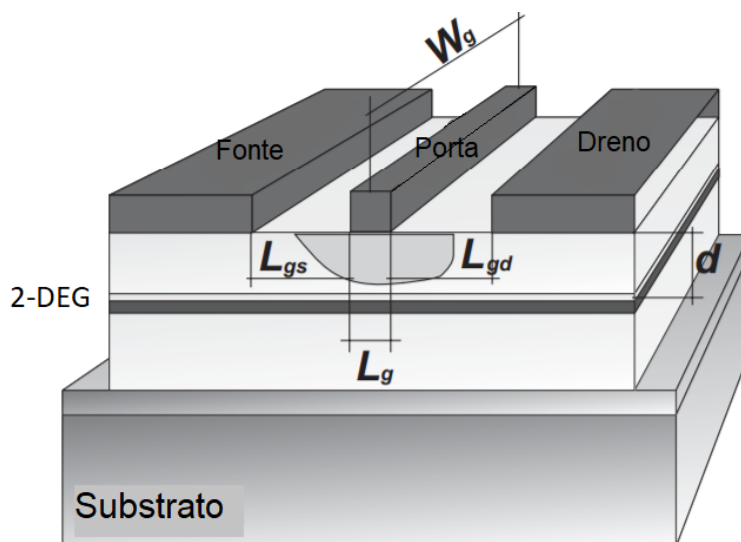
Fonte – Adaptado de ROMERO; RAGI; MANZOLI, 2015.

2.2 PARÂMETROS DO DISPOSITIVO HEMT

Nesta seção, serão descritos os principais parâmetros do dispositivo HEMT. Termos básicos importantes serão definidos para a avaliação do desempenho destes dispositivos.

A Figura 5 descreve alguns parâmetros geométricos básicos do HEMT: comprimento da porta (L_g), largura do transistor (W_g), espessura da camada ativa de AlGaAs (d), distância da fonte para a porta (L_{gs}) e da porta para o dreno (L_{gd}).

Figura 5 – Desenho esquemático de parâmetros geométricos do AlGaIn/GaN HEMT.



Fonte – Adaptado de JAVORKA, 2004.

As propriedades elétricas dos HEMTs podem ser caracterizadas pelas grandezas: corrente de dreno (I_D), tensão de limiar (V_T), inclinação de sublimiar (S), transcondutância (g_m) e condutância de saída (g_d).

2.2.1 TRANSCONDUTÂNCIA

Para operações em alta potência, os parâmetros básicos do HEMT são corrente máxima de dreno, transcondutância, tensão de limiar e densidade de potência, os quais podem ser extraídos das características de saída e de transferência de AlGaIn/GaN HEMTs (ZHAN, 2017) (Figura 6).

Figura 6 – Características de saída (a) e de transferência (b) dos AlGaIn/GaN HEMTs.



Fonte – Adaptado de ZHAN, 2017.

Nota-se, na Figura 6, a presença da resistência On (R_{ON}), que é valor entre tensão e corrente de dreno durante operação do dispositivo, além da tensão de breakdown ($V_{Breakdown}$), que simboliza a tensão limite na qual ocorre o início da ruptura do transistor.

A transcondutância (g_m) é um dos indicadores mais importantes da qualidade dos dispositivos HEMT. É definida como sendo a medida da variação da corrente de dreno com a tensão da porta e é relacionada com o ganho do dispositivo, podendo ser expressa pela equação (2):

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_G} / V_D = \text{constante} = \frac{\mu \epsilon W_G}{2L_G d} (V_G - V_T) \quad (2)$$

Onde: V_D é tensão de dreno com tensão na porta constante e I_D é a corrente de dreno, a qual está expressa na equação (3).

$$I_{D,max} = q v_{sat} n = \frac{\mu \epsilon W_G}{2L_G d} (V_G - V_T)^2 \quad (3)$$

Onde: q é a carga do elétron, v_{sat} é a velocidade de deriva de saturação, n é concentração de elétrons, μ é a mobilidade do elétron, ε é a constante dielétrica do semiconductor, W_G e L_G são a largura e comprimento do canal do semiconductor, dg é a distância da porta ao 2-DEG, V_G é a tensão aplicada na porta do dispositivo e V_T é a tensão de limiar.

2.2.2 TENSÃO DE LIMIAR (V_T)

A tensão de limiar (V_T) é definida como o mínimo valor de tensão aplicado à porta para que seja possível a criação de uma camada de inversão, permitindo a passagem de corrente. Dessa forma, determina quando o canal começa a conduzir, sendo expressa pela equação (4):

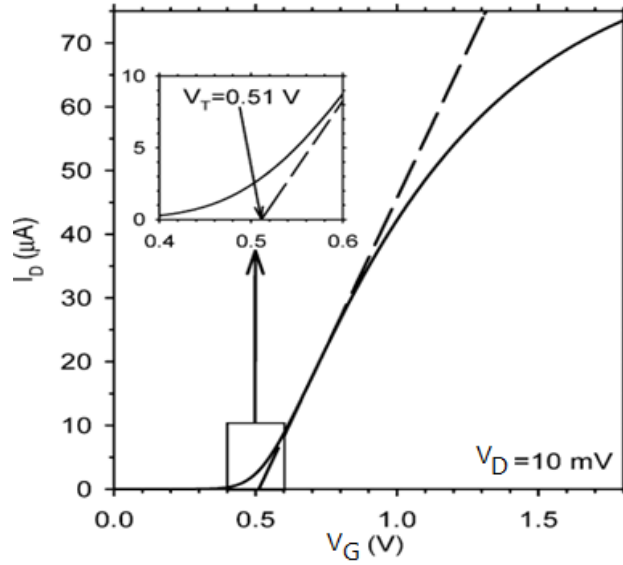
$$V_T = V_{G(g_m(max))} - \frac{I_{D(g_m(max))}}{g_m(max)} - \frac{V_D}{2} \quad (4)$$

Onde V_D é tensão de dreno.

Existem diversos métodos para extrair a tensão de limiar (V_T). No presente trabalho o método da extrapolação de Ortiz-Conde (2002) foi o utilizado, devido a ser amplamente empregado na caracterização de transistores (AGARWAL *et al.*, 2015).

O método da extrapolação consiste em encontrar a interceptação do eixo da tensão de porta (ou seja, onde $I_D = 0$) obtida da extrapolação linear da curva I_D - V_G em seu ponto de derivação (inclinação) máximo (ou seja, o ponto de transcondutância máxima de g_m), conforme ilustrado na Figura 7. O valor de V_T é calculado através da subtração de $V_D/2$ perante a interceptação do eixo da tensão de porta.

Figura 7 - Exemplo de obtenção de tensão de limiar pelo método de extrapolação.



Fonte – Adaptado de ORTIZ-CONDE, 2002.

A densidade de potência é uma avaliação da potência de saída dos dispositivos, sendo expressa pela equação (5):

$$dP_{out} = \frac{I_{D,max}(V_{BD}-V_K)}{8} \quad (5)$$

Onde V_{BD} é a tensão de ruptura e V_K é a tensão de joelho.

As equações 6 e 7 apresentam os modelos de corrente de Lim & Fossum (LIM, 1983) para obtenção da transcondutância na região linear e na saturação, respectivamente:

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_G} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} \quad (6)$$

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_G} = \frac{\mu_n C_{ox}}{(1 + \alpha)} \frac{W}{L} (V_G - V_T) \quad (7)$$

Onde: α representa o fator de acoplamento capacitivo, V_{DS} é a tensão entre dreno e fonte e C_{ox} é a capacitância do óxido.

2.2.3 CONDUTÂNCIA DE SAÍDA (g_d)

A condutância de saída (g_d) é um parâmetro analógico que relaciona a influência do campo elétrico aplicado entre a fonte e o dreno sobre o canal. É determinada por meio da derivada da corrente de dreno em função da tensão do dreno, sendo a tensão na porta constante, como mostrado na expressão (8). Dessa maneira, para menores valores de condutância de saída, menores variações na corrente de dreno serão obtidas com o aumento da tensão do dreno, o que indica uma maior estabilidade da corrente de dreno para variações na tensão de dreno, com consequente aumento do ganho intrínseco de tensão no transistor (BELLAKHDAR *et al.*, 2012).

$$g_d = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}, V_{GS=constante} \quad (8)$$

Altos valores de transcondutância (g_m) e de velocidade de saturação permitem alcançar altos valores de frequência de corte, a qual é definida como a maior frequência de um sinal de corrente ou tensão, num transistor onde ainda há ganho (MANZOLI, 1998). O ganho é definido como a razão entre as correntes de entrada no dreno e de saída na fonte. Esta relação é demonstrada na equação (9) (HADHEMI, 2017).

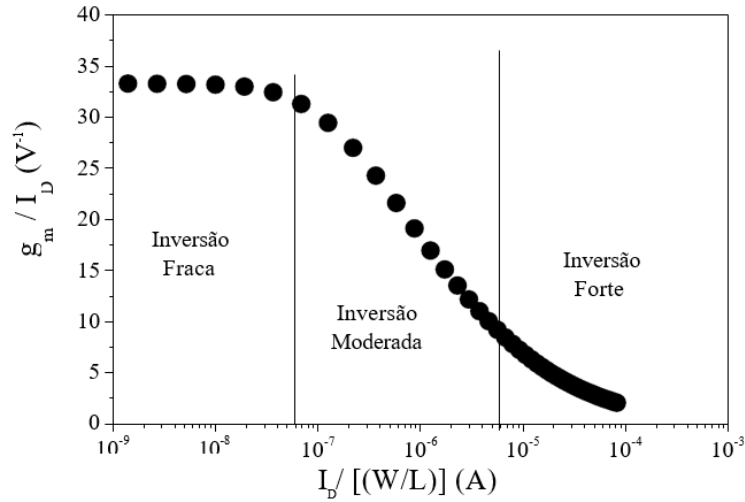
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_G} = \frac{V_S}{2\pi L_G} \quad (9)$$

Onde g_m é a transcondutância, C_G é a capacitância da porta, V_S é a velocidade do portador e L_G é o comprimento efetivo do canal.

2.2.4 RAZÃO g_m/I_D

A razão g_m/I_D indica a eficiência do dispositivo na conversão de corrente elétrica em transcondutância (SASAKI, 2016; ANDRADE, 2012; SILVEIRA, 1996). A razão g_m/I_D comumente é dada em função da corrente de dreno normalizada (Figura 8), de tal forma que não dependa das dimensões dos dispositivos. A razão g_m/I_D é vital em projetos analógicos, principalmente nas aplicações em baixa tensão e potência, nas quais é imperativo um ponto ótimo entre a inversão fraca e a inversão forte.

Figura 8 - Eficiência do dispositivo (g_m/I_D) em função da corrente normalizada ($I_D/[W/L]$).



Fonte – Adaptado de ANDRADE, 2012.

Em transistores MOSFETs, SOI e HEMTs, o valor máximo da razão g_m/I_D é alcançado durante a inversão fraca, podendo ser obtido na expressão (11) (SASAKI, 2016; ANDRADE, 2012).

$$\frac{g_m}{I_D} = \frac{q}{n_B \cdot K \cdot T} = \frac{\ln 10}{S} \quad (11)$$

Na equação 11, a variável q é definida como a carga do elétron, K é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) e n_B é o fator de corpo, sendo expresso pela equação (12).

$$n_B = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2}\phi_F + V_{SB}} \quad (12)$$

Onde: ϕ_F é o potencial de Fermi (parâmetro dependente do tipo de semiconductor e da concentração de dopantes) e V_{SB} é o potencial entre fonte e substrato.

A corrente (I_{DS}), tanto na saturação direta e inversão fraca, é expressa pela equação (13) (BARÚQUI, 2020):

$$I_{DS} = I_{ESP} e^{\frac{V_g - V_T - nV_s}{n\phi_T}} \quad (13)$$

Onde: ϕ_T é a constante de tensão térmica (26mV em temperatura ambiente).

Para os dispositivos operando na região de inversão forte, há uma redução da razão g_m/I_D com a elevação da corrente do dreno, alcançando o seu menor valor, o qual pode ser dado pela seguinte equação (14):

$$\frac{g_m}{I_D} = \sqrt{\frac{2\mu C_{ox} \frac{W}{L}}{n_B I_D}} \quad (14)$$

Das equações 11 e 14, pode-se observar que a razão g_m/I_D é dependente da tecnologia a partir das dimensões do transistor (W e L), do fator de corpo e da polarização.

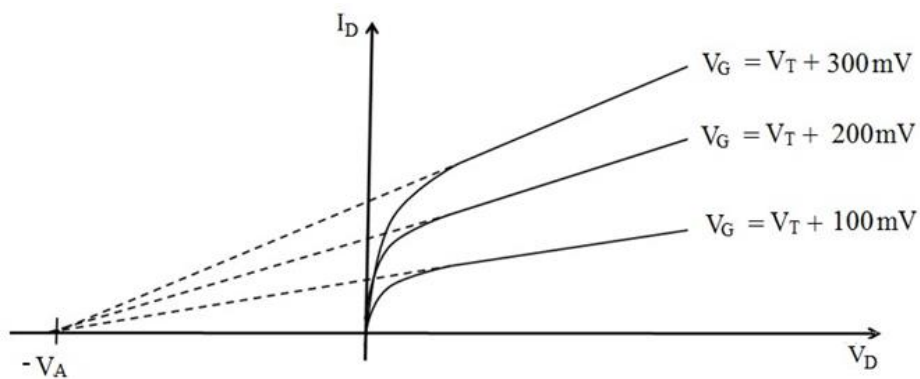
A corrente (I_{DS}) na Inversão Forte é dada pela equação (15) (BARÚQUI, 2020):

$$I_{DS} = \frac{\kappa_p W}{2nL} (V_g - V_T - nV_s)^2 \quad (15)$$

2.2.5 TENSÃO EARLY (V_A)

A tensão Early (V_A) é obtida através da extrapolação de uma reta tangente à curva de I_D (corrente de dreno) em função da tensão V_D (tensão entre dreno e fonte). É dada pela intersecção com o eixo V_D para $I_D = 0$, denominada tensão Early ($V_D = -V_A$), conforme Figura 9 (COLINGE, 2004).

Figura 9 - Tensão Early obtida pela curva de intersecção de V_D em I_D .



Fonte – Adaptado de COLINGE, 2004.

A tensão Early corresponde ao efeito da modulação do comprimento de canal devido à polarização entre o dreno e a fonte do transistor. No momento em que a tensão aplicada ao dreno é maior do que a tensão de saturação, a região de estrangulamento do canal próxima ao dreno aumenta, o que reduz o comprimento efetivo do canal, provocando um aumento na corrente de dreno na saturação (COLINGE, 2004). Tal parâmetro é expresso pela equação (16):

$$V_A \cong \frac{I_{DSAT}}{g_{DSAT}} \quad (16)$$

Onde I_{DSAT} é a corrente de dreno quando o transistor opera na região de saturação e g_{DSAT} é a condutância de saída também na saturação.

2.2.6 GANHO INTRÍNSECO DE TENSÃO (A_v)

O ganho intrínseco de tensão é definido como uma das principais características de circuitos analógicos, sobretudo para circuitos amplificadores. O A_v está relacionado com a eficiência do transistor no controle da corrente de dreno. O ganho máximo de A_v nos transistores é expresso pela equação (10) (SASAKI, 2016; ANDRADE, 2012).

$$A_v = \frac{g_m}{g_d} \cong \frac{g_m}{I_D} V_A \quad (10)$$

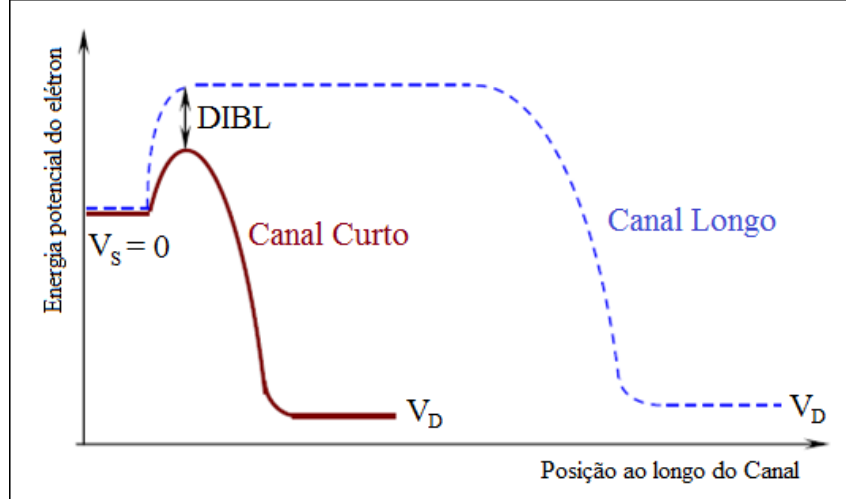
Dessa expressão, pode-se verificar que o ganho de tensão será maior quanto maior for a razão g_m/I_D , a tensão Early e a transcondutância, assim como quanto menor for a condutância de saída (ANDRADE, 2012).

2.2.7 REDUÇÃO DA BARREIRA INDUZIDA PELO DRENO (DIBL)

A redução da barreira induzida pelo dreno (DIBL) é um efeito decorrente do encurtamento do canal. O encurtamento do comprimento do canal de um dispositivo faz com que o número de cargas controladas pela fonte e dreno seja considerável em relação ao número de cargas controladas pela porta (DOS SANTOS, 2010).

No momento em que as larguras das regiões de depleção de fonte e de dreno aumentam perante o canal, efeito decorrente da polarização reversa aplicada no dreno, ocorre a redução da barreira do canal, com consequente diminuição da tensão de limiar. Tal situação é mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Diferença de comprimento de canal induzindo a redução de barreira (DIBL).



Fonte – Adaptado de ANDRADE, 2012.

A medida da variação em V_T (tensão de limiar) quando o dispositivo está na saturação, em relação à tensão de limiar, para um baixo valor de tensão de dreno, ou seja, quando um alto potencial é aplicado ao dreno é denominado de efeito DIBL, sendo expresso pela equação 17 (ANDRADE, 2012):

$$DIBL \left(\frac{mV}{V} \right) = \frac{V_{T1}(V_{D1}) - V_{T2}(V_{D2})}{V_{D2} - V_{D1}} \quad (17)$$

Para determinação do DIBL, a tensão de dreno em saturação (V_{D2}) deve ser maior que a tensão em regime linear (V_{D1}). V_{T1} e V_{T2} correspondem às tensões de limiar em regime limiar e em saturação, respectivamente.

2.3 EFEITOS DE TEMPERATURA

O efeito da temperatura em transistores é uma área extremamente importante para avaliação do desempenho desses dispositivos (CHEN *et al.*, 2020).

A dissipação de energia no dispositivo causa o efeito de auto aquecimento no canal, o qual não é desejável nestes dispositivos (CHEN *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2018). À medida que a temperatura aumenta, a fuga térmica do transistor torna-se mais proeminente. Se as variações de temperatura forem grandes, haverá uma redução na mobilidade, levando a um excessivo aquecimento localizado que pode danificar o transistor (BUTTAY *et al.*, 2013).

As principais mudanças que ocorrem num transistor com o aumento da temperatura são:

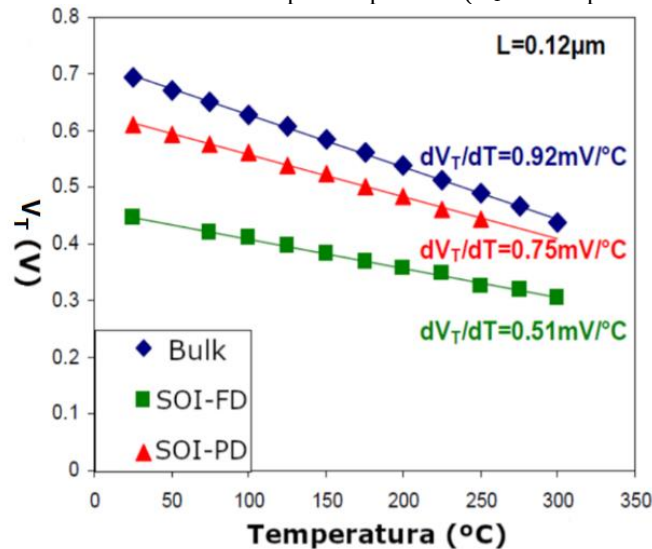
- Aumento no número de portadores no canal;
- Aumento da corrente de saturação reversa (I_0), definida como a corrente que surge sob condições de polarização reversa. Essa corrente terá seu valor em amplitude aproximadamente dobrado para cada aumento de 10°C na temperatura. A variação da corrente de saturação reversa (I_0) a partir da teoria do diodo é comumente utilizada. Townsend propôs a Equação 18 para o cálculo da I_0 de uma célula fotovoltaica, a qual descreve a dependência da temperatura (RUSCHEL, 2019, TOWNSEND, 1989).

$$I_0 = DT^3 e^{\frac{qE_g}{nKT}} \quad (18)$$

Onde: D é o fator de difusão do diodo (aproximadamente constante); E_g é a energia da banda proibida do material (considerada constante).

- Diminuição da tensão de limiar, a qual é inversamente proporcional à temperatura. A Figura 11 (V_T vs T) mostra o comportamento dos transistores de efeito de campo (FET) em função da temperatura.

Figura 11 - Curva tensão de limiar por temperatura (V_T vs Temperatura).



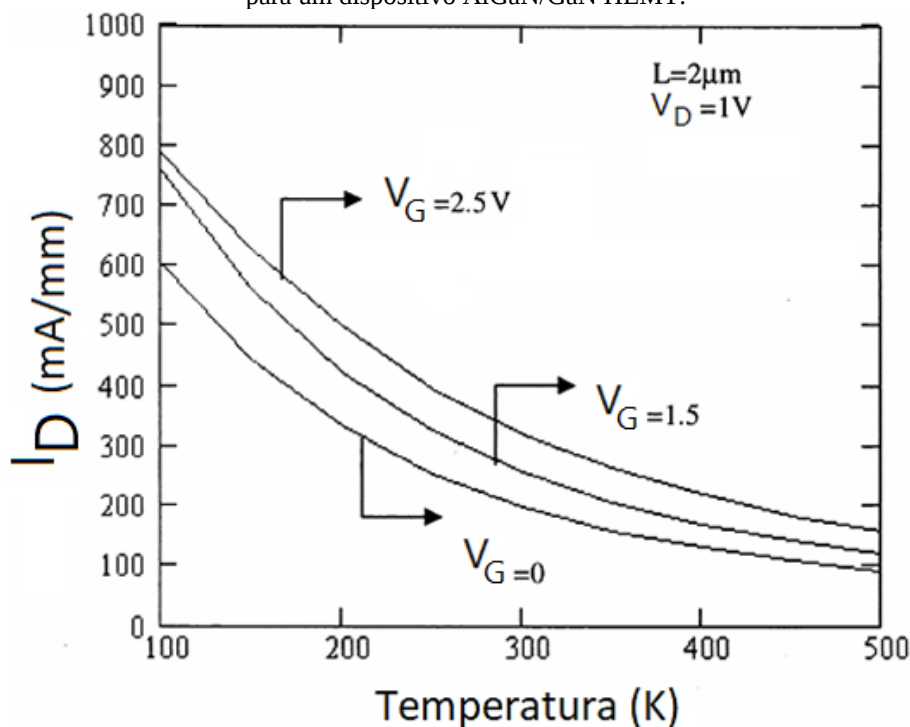
Fonte - Adaptado de VILAS BÔAS, 2020.

- Aumento da corrente de fuga que leva a erros, mau funcionamento e, no caso de grandes variações de temperatura, ao aparecimento de correntes (fuga) muito altas, com consequente aquecimento localizado excessivo e danos ao transistor.

Dispositivos HEMTs têm características térmicas superiores a outros transistores, visto que possuem alta condutividade térmica, podendo, assim, ser aplicados como dispositivos de micro-ondas (PARVESH, 2005). Observa-se que a corrente de dreno diminui à medida que a temperatura aumenta. Isto pode ser descrito devido à diminuição da mobilidade dos elétrons, a qual tem sido sugerida como o fator dominante na redução da corrente de dreno.

Na Figura 12, observa-se o comportamento da corrente de dreno (I_D) em função da temperatura para um transistor AlGaIn/GaN HEMT.

Figura 12 - Variação da corrente de dreno perante temperatura para diferentes valores de tensão de dreno para um dispositivo AlGaIn/GaN HEMT.



Fonte – Adaptado de PARVESH, 2005.

2.4 RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA

Os ruídos são definidos como variações espontâneas de tensão e corrente que ocorrem em dispositivos ou sistemas. O ruído de baixa frequência (RODRIGUEZ *et al.*, 2012; SIMOEN *et al.*, 2012) mais característicos no meio eletrônico são o ruído de geração e recombinação (GR) e o ruído *flicker* (KANDIAH, 1978). Além de serem considerados parâmetros para análise de circuitos e sistemas analógicos, são ferramentas importantes na análise de falhas, qualidade e confiabilidade dos dispositivos (CIOFI; NERI, 2000). Assim, as medições de ruído de baixa frequência pode ser usadas para investigar a qualidade do material/dispositivo, identificar defeitos de material e efeitos de armadilhas, além de investigar a confiabilidade dos HEMTs baseados em GaN. A utilização de uma camada de passivação de Si₃N₄ *in-situ*, além de possibilitar uma redução significativa da corrente de fuga da porta, também pode potencialmente melhorar o desempenho de ruído do dispositivo em baixa frequência (RZIN, et al., 2019).

O modelo de Hooge prediz que flutuações na mobilidade dos portadores geram o ruído. Assim, a equação 19 expressa a densidade espectral do ruído normalizada pelo quadrado da corrente de dreno:

$$\frac{S_{id}}{I_D^2} = \frac{q \cdot \alpha_H}{f \cdot W \cdot L \cdot Q_{inv}} \quad (19)$$

Onde: $Q_{inv} = C_{ox}(V_G - V_T)$ na região linear; α_H é o parâmetro Hooge (10^{-3} a 10^{-6}) e f é a frequência (PUT, 2010).

2.4.1 RUÍDO DE GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO (GR)

O ruído de geração e recombinação (GR) deriva de armadilhas que capturam e liberam portadores aleatoriamente (KANDIAH, 1978). O formato desse ruído segue o modelo de Lorentz que é constante em baixas frequências e com decréscimo correspondente ao inverso do quadrado da frequência ($1/f^2$) (DUTRA, 1981).

As armadilhas de interface ou também chamadas de “estados de interface” são decorrentes da introdução de uma perturbação na estrutura periódica do cristal do semicondutor devido à presença da interface AlGaIn/GaN, fazendo com que algumas ligações não sejam preenchidas, o que resulta em estados de energia no intervalo de banda na superfície do semicondutor. Eles podem ser positiva ou negativamente carregados, dependendo da energia em relação ao nível de Fermi, assim afetando o potencial da superfície (OLDHAM; MCLEAN, 2003, COLINGE; COLINGE, 2002).

2.4.2 RUÍDO FLICKER (1/f)

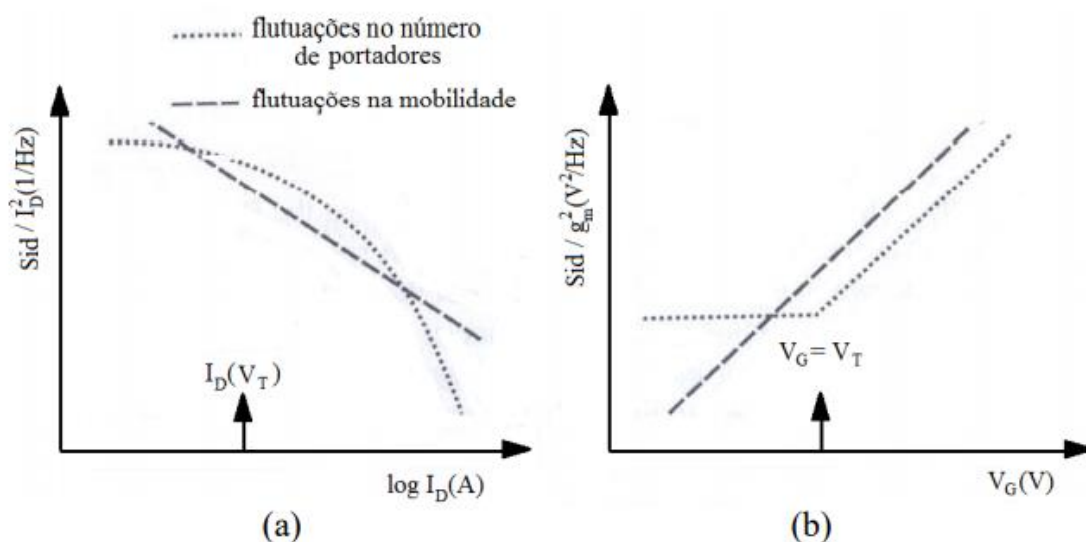
O ruído *flicker* é o tipo de ruído mais considerado na avaliação da qualidade de um dispositivo ou material semicondutor. Nesse ruído, as flutuações são decorrentes de oscilações de tensão e corrente, a qual é inversamente proporcional a f^γ , onde γ é aproximadamente 1.

Em suma, a geração do ruído *flicker* é explicada por dois diferentes mecanismos físicos: flutuações no número de portadores livres (MCWHORTER, 1957) e flutuações na mobilidade da camada de inversão (HOOGE, 1994). Esse tipo de ruído é decorrente dos efeitos de armadilhamento e desarmadilhamento de cargas do canal em defeitos encontrados na interface entre o canal de silício e o óxido de porta (CHRISTENSSON *et al.*, 1968).

A Figura 13 (a) apresenta uma curva típica da densidade espectral das componentes relativas à mobilidade e ao número de portadores do ruído normalizado pelo quadrado da corrente de dreno ($S_{Vg} = S_{Id}/I_D^2$). Considerando a curva referente às flutuações na mobilidade, é observada uma diminuição praticamente linear de S_{Id}/I_D^2 em relação ao $\log(I_D)$. Já, na curva das flutuações do número de portadores é observada uma curva constante na inversão fraca (patamar observado em valores baixos de I_D) e, em seguida, uma acentuada diminuição com o aumento da I_D .

Na Figura 13 (b), a qual representa a densidade espectral do ruído referenciado à S_{Id}/g_m^2 em relação à tensão de porta (V_G), é observado na curva das flutuações no número de portadores um patamar até a tensão de limiar e, em seguida, um aumento de S_{Vg} com o aumento de V_G . Já, para a curva das flutuações na mobilidade, é verificado um aumento linear com o aumento da polarização da porta (PUT, 2010; ANDRADE, 2012).

Figura 13 - S_{Id}/I_D^2 em função de I_D (a) S_{Id}/g_m^2 em função de V_G (b).



Fonte – ANDRADE, 2012.

2.4.3 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (PSD)

A densidade espectral de potência (PSD) é proporcional a $1/f$ em uma ampla faixa de frequências, sendo que o ruído $1/f$ é uma flutuação na condutividade dos materiais. A PSD pode ser descrita como uma superposição de componentes do ruído flicker, térmico e de Geração e Recombinação (GR), sendo encontrada em quase todos os materiais eletrônicos e dispositivos semicondutores, tais como filmes metálicos, soluções iônicas, MOSFETs e HEMTs (BHOUMILK, 2013; VIMALA; VIDYASHREE, 2016). Sendo assim, a PSD para dispositivos HEMT pode ser obtida pela corrente de dreno (I_D), seguindo a expressão de Hooge, dada na Equação 20. (VIMALA; VIDYASHREE, 2016).

$$S_{id} = \frac{I_D^2 \alpha_H}{f^n} \quad (20)$$

Onde, S_{id} é a densidade espectral de potência, I_D é a corrente do dreno, f é a frequência de operação, n é o número total de elétrons na banda de condução e α_H é o parâmetro de Hooge para o material do substrato.

2.4.4 REGIMES DE OPERAÇÃO HEMTs

Segundo Galup; Schneider (2018), os regimes de operação podem ser divididos em três diferentes regiões (Corte, Triodo, também chamada de Linear e de saturação), as quais são dependentes das tensões aplicadas em seus terminais. Aqui também é descrita a região entre o triodo e a saturação.

a) Região de Corte:

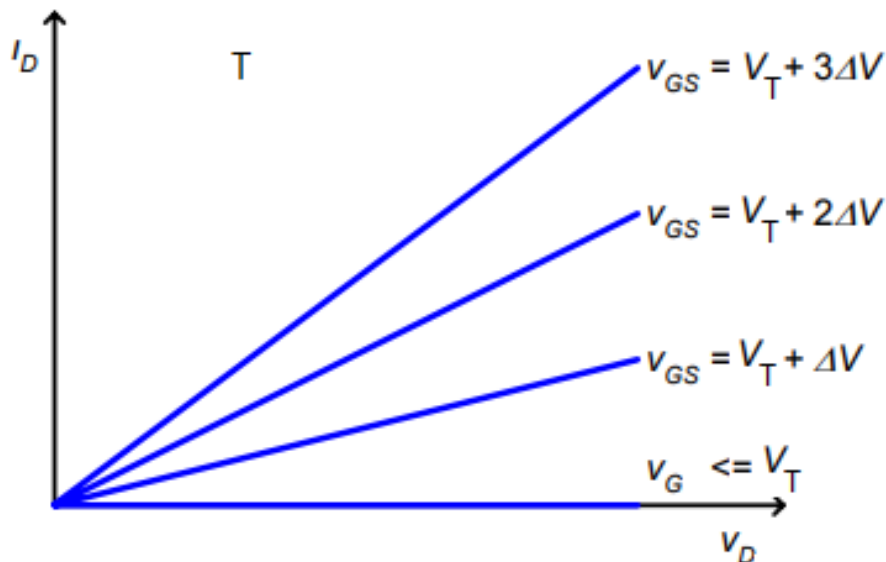
Nessa região $V_{GS} < V_T$, onde V_{GS} . O transistor permanece desligado e não há fluxo de corrente entre a fonte e o dreno quando é aplicada uma tensão entre a fonte e o dreno ($V_{DS} > 0$), tendo uma fraca corrente invertida.

b) Região de Triodo (ou região linear):

Nessa região, $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_T$, onde V_{DS} é a tensão entre dreno e fonte. Quando V_{GS} é suficientemente grande para induzir a formação de um canal, é aplicada uma tensão V_{DS} pequena:

- A corrente flui entre a fonte e o dreno;
- A magnitude da I_D depende da densidade de elétrons no canal que depende do V_{GS} (V_{GS} maior = maior densidade de elétrons);
- A condução do canal é proporcional ao $V_{GS} - V_T$ (chamado excesso de tensão de porta ou tensão efetiva ou *overdrive* de porta);
- A corrente é proporcional à $V_{GS} - V_T$ e V_{DS} , causando o fluxo da corrente;
- A curva $I_D \times V_{DS}$ (Figura 14) mostra que o transistor opera como um resistor linear de tensão controlada;
- Sendo que $I_D = I_S$ e $I_G = 0$ devido ao óxido de porta.

Figura 14 - Curva $I_D \times V_{DS}$ para a região do triodo.



Fonte – Autor.

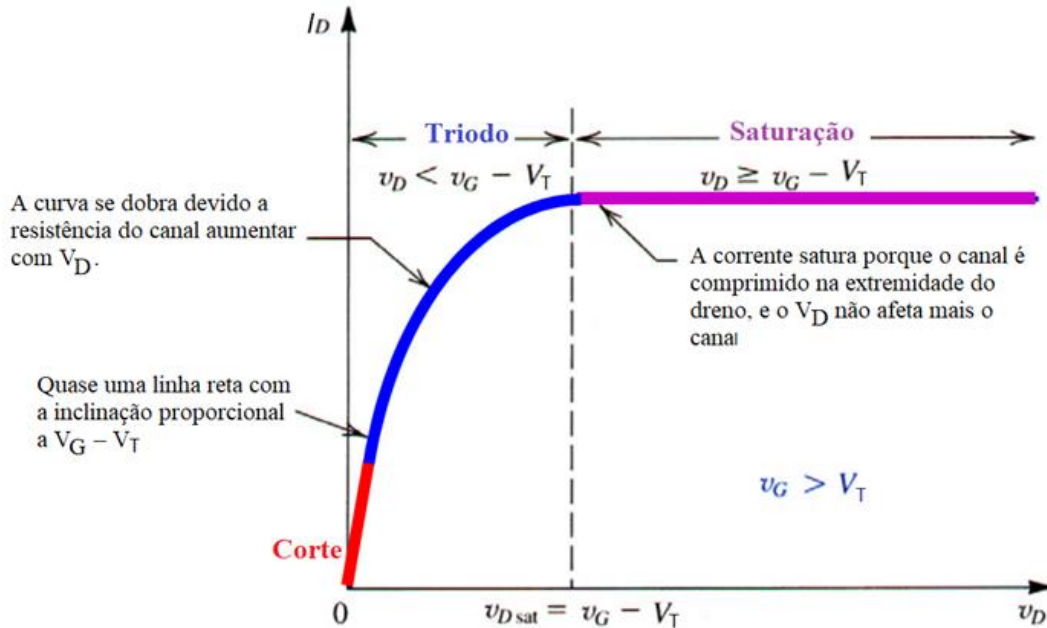
c) Região do Triodo para a Saturação:

Assume-se que o V_{GS} é um valor constante $> V_T$ e aumenta o V_{DS} :

- V_{DS} aparece como uma queda de tensão através do canal e em diferentes pontos ao longo do canal, a tensão é diferente;
- As tensões entre a porta e os pontos ao longo do canal também são diferentes, variando de V_{GS} na fonte para $V_{GS} - V_{DS}$ no dreno;
- O canal induzido é uma função da tensão através do óxido em diferentes pontos e assim a profundidade do canal varia através do comprimento do transistor;

- A curva $I_D \times V_{DS}$ (Figura 15) dobra-se à medida que o V_{DS} aumenta devido à menor profundidade do canal;
- Quando $V_{DS} = V_{GS} - V_T$, a profundidade do canal é quase zero no lado do dreno;
- A corrente permanece plana para tensões mais altas $V_{DS} > V_{GS} - V_T$;

Figura 15 - Curva $I_D \times V_D$ para a região do Triodo para a Saturação.



Fonte – Adaptado de UNESP, 2019.

d) Região de Saturação:

Conforme o V_{DS} aumenta, o canal fica cada vez menor no lado do dreno até que $V_D = V_G - V_T$, onde o canal está comprimido.

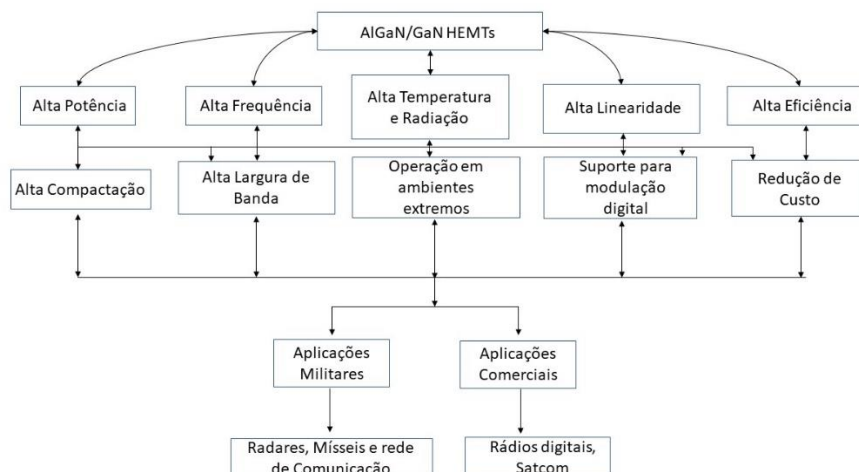
- Aumentar o V_D para além deste ponto (idealmente não) causa efeito sobre a forma do canal;
- A corrente permanece constante e diz que satura;
- Transistor entra em saturação no $V_{D(sat)} = V_G - V_T$

2.5 APLICAÇÕES E VANTAGENS

As propriedades físicas do Nitreto de Gálio (GaN) possibilitam a sua inserção em um mercado consumidor com uma abrangente lista de aplicações comerciais e militares, como osciladores, radares, celulares, satélite de comunicação, estações base, sitcom, espaço, rádios digitais e atenuadores (HADHEMI, 2017).

Dispositivos GaN HEMTs são utilizados, principalmente, em aplicações sem fio e eletrônicos de alta potência devido sua excelente eficiência em operação de alta frequência e altas tensões operacionais. A Figura 16 mostra as principais características e aplicações desses dispositivos.

Figura 16 – Principais características e aplicações de dispositivos HEMT.



Fonte – Adaptada de HADHEMI, 2017.

Além das aplicações de rádio frequência, GaN HEMTs também possuem grande aplicabilidade em comutação de energia de alta tensão, onde os transistores alternam entre seus estados desligado e ligado (HADHEMI, 2017).

As diversas vantagens dos dispositivos HEMTs são também atraentes para o futuro *design* de transmissores de comunicações celulares 5G. Devido ao aumento da demanda das taxas de dados, a quarta geração (4G) deverá ser substituída pela quinta geração (5G). Esta nova tecnologia 5G, não apenas revolucionará a indústria de telecomunicações, mas também servirá a uma ampla gama de setores verticais, incluindo robótica, automotiva, automação de processos fabris, saúde e educação. Em comparação com a rede 4G LTE atual, a futura rede 5G para eMBB visa uma taxa de pico de dados de 20Gb/s, o que representa uma melhoria em dez vezes. O sistema 5G opera essencialmente em alta frequência entre 24 e 71GHz e resolverá o déficit de espectro em sistemas de comunicação celular 4G, limitado a frequências abaixo de 6GHz (HARROUCHE; MEDJDOUB, 2020).

Assim, as redes 5G assegurarão aos futuros usuários uma cobertura mais ampla e eficiente, mais altas transferências de dados, como também um número expressivamente superior de conexões simultâneas. Atualmente as redes da 4ª geração utilizadas em certas regiões do Brasil são apropriadas a entregar uma velocidade média de conexão de cerca de 30 Mbps. Avalia-se que o 5G entregará velocidades 50 a 100 vezes mais altas, podendo alcançar até 10 Gbps (CASTRO, 2019).

Em 2014, alguns critérios foram estabelecidos pelo GSMA, uma organização internacional composta por mais de 1200 operadoras de rádio, internet e telefonia móvel, para conduzir o processo de implementação das redes 5G. Entre estes, destacam-se:

- Em relação ao consumo de energia, com as redes 5G deverá haver uma redução de até 90% do consumo de energia em relação às redes 4G atuais;
- Redução do tempo de conexão entre os aparelhos móveis, o qual deverá ser inferior a 5ms (milissegundos), face à latência de 30ms das redes 4G;
- Aumentar em 50 a 100 vezes o número dos aparelhos conectados por área;
- Aumentos drásticos na duração da bateria de dispositivos de rádio receptores.

Após a instalação da infraestrutura das redes 5G, a redução do consumo de energia poderá diminuir os custos futuros, além de torná-la mais ecológica. Portanto, HEMTs são os dispositivos indicados para aplicações em alta frequência, alta potência, alta temperatura ou baixo ruído. Dispositivos AlGaIn/GaN HEMTs estão sendo amplamente estudados, uma vez que suas propriedades elétricas fundamentais os tornam candidatos muito atraentes para aplicações em tecnologia 5G (BERGAMIM *et al.*, 2021).

Tome *et al.* (2020), propuseram um circuito analógico de alimentação para a compensação de efeitos de memória de longo prazo em amplificadores de potência baseados em GaN HEMT. Como método externo de compensação, o circuito proposto não impediu o acúmulo de carga dentro do HEMT, mas, ao invés disso, mascarou os efeitos resultantes desse acúmulo. Foi demonstrado um cenário de aplicação onde o circuito proposto foi utilizado em conjunção com um modelo de algoritmo de pré-distribuição digital (DPD) com memória polinomial de ordem reduzida para linearizar um amplificador de potência baseado em um GaN HEMT visando novas comunicações por rádio de quinta geração (5G).

Para operações bem-sucedidas de aparelhos móveis nos sistemas 5G, é necessário um dispositivo normalmente desligado que opere sob polarização positiva da porta, o que oferece vantagens de menor complexidade de circuito e custo de sistema, bem como potencial para uso no domínio de circuitos digitais. Nesse contexto, Kim, *et al.* (2019), visando operação com polarização positiva da porta, fabricaram dispositivos MIS (Metal-insulator-semiconductor) -HEMT usando o processo GaN MIS-HEMT. Além da adaptação de uma técnica de rebaixamento de porta, foi utilizado Al_2O_3 como isolador de porta para deslocar a tensão de limiar no GaN MIS-HEMTs. O amplificador de potência (PA) do circuito integrado monolítico de micro-ondas foi projetado e operado sob uma polarização positiva da porta para aparelhos móveis 5G e exibiram um máximo potência de saída de 29,5dBm, um ganho de potência de 11dB, e uma eficiência de potência adicional de 11% em frequências de 26 e 28GHz.

Muitos desafios têm sido superados no desenvolvimento de GaN HEMTs altamente confiáveis, rentáveis e com excelente desempenho. GaN HEMTs para o mercado de estações base tem sido desenvolvidos desde 2005 (NAKAJIMA, 2018). A vantagem da eficiência, com base em seu material, também atrairá projetistas de amplificadores de potência 5G.

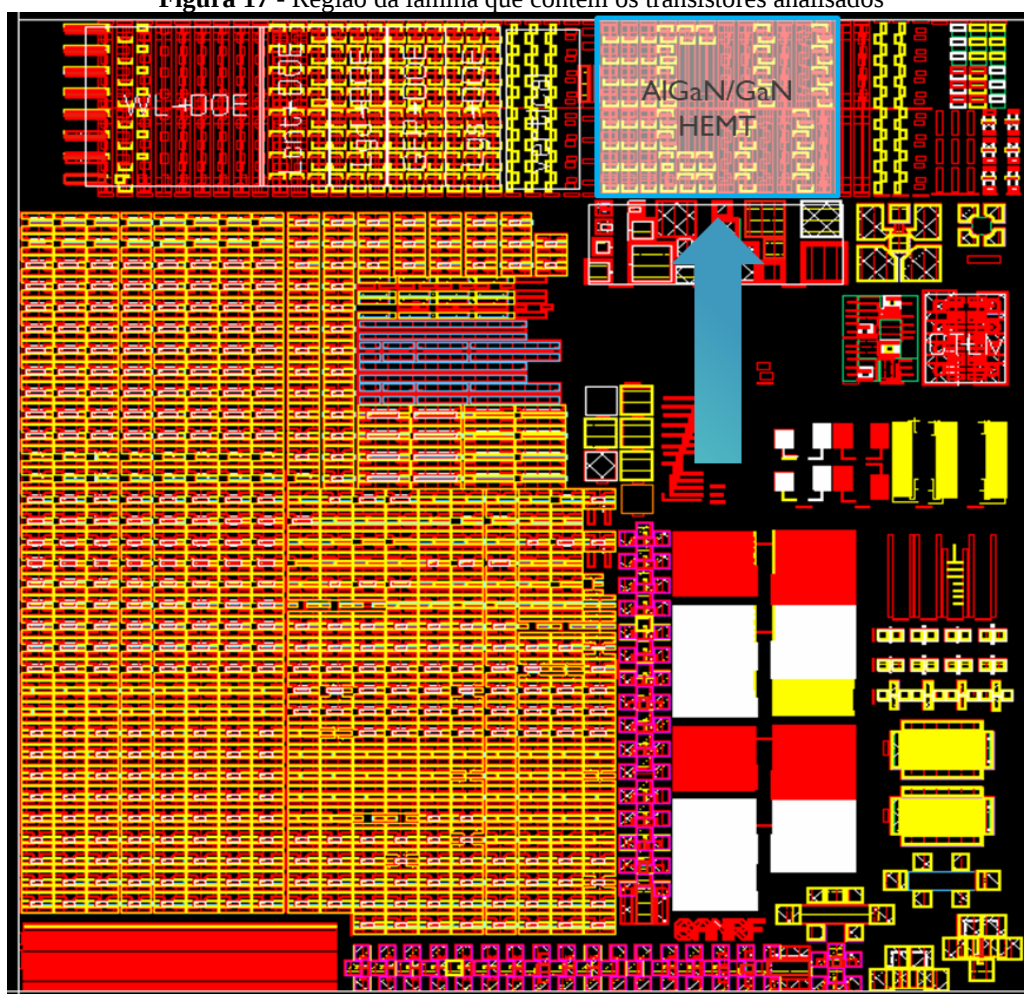
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os dispositivos analisados neste trabalho foram desenvolvidos e caracterizados eletricamente no *interuniversity microelectronics center* (imec) que é um centro de pesquisa de referência na área de microeletrônica, situado na cidade de Leuven, na Bélgica.

As medições foram feitas com os equipamentos da Keithley Instruments Inc., Modelo 2602 e modelo A-LFNA E4727A que aplica as tensões programadas em uma lâmina fabricada de material semiconductor e obtém os dados desejados. Essas lâminas são divididas em várias partes iguais “chip” ou *dye*, onde estão localizados os transistores HEMT, conforme ilustrado na Figura 17:

Figura 17 - Região da lâmina que contém os transistores analisados



Fonte – imec.

Dentro do “chip” estão contidos transistores de diversas dimensões com seus respectivos drenos, fontes e portas (códigos de RL1 a RL12). Além disso, cada lâmina foi identificada por um prefixo D, o qual representa a enumeração sequencial de cada lâmina utilizada. No caso, a lâmina utilizada apresentava o prefixo D18.

Para identificar os dispositivos analisados, utilizou-se um manual de descrição dessa lâmina fornecida pelo imec para identificar os tipos de transistores contidos em uma placa de silício. Esse manual contém os dados que identificam a disposição métrica do transistor, como L (comprimento de canal) e W (largura do canal). A Tabela 1 apresenta um resumo dos códigos de cada transistor analisado:

Tabela 1 - Resumo de símbolos de cada transistor HEMT

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 – Autor.

Relativo aos dados elétricos, obteve-se tanto os parâmetros de corrente de dreno, porta e fonte e tensão de dreno através de um valor de tensão na porta constante, quanto esses mesmos parâmetros de corrente, porém com a inclusão da tensão de porta como variável e tensão de dreno como constante. Em relação à extração do ruído, utilizou-se da alta tecnologia do equipamento para aferição dos valores de potência espectral de ruído de baixa frequência. Em vista dos valores de temperatura do dispositivo, como já relatado anteriormente, aferiu-se os transistores em temperaturas de 5°C até 200°C.

Após realizar cada medição, o equipamento agrupava os dados aferidos em arquivos de texto com disposição de conteúdo em linhas bem delimitadas. Cada dispositivo mensurado apresentava um arquivo de texto único. A Figura 18 demonstra uma parcela desses dados organizados em arquivos de texto, enquanto a Figura 19 demonstra o conteúdo dos arquivos. Nota-se que alguns arquivos apresentam tensão de dreno constante e, outros, tensão de porta constante.

Figura 18 - Pasta com arquivos de texto com dados referentes à placa E15

P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVd_Vgs_-4_IdVd0	29/01/2020 22:58	Text Document	15 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVd_Vgs_-5_IdVd0	29/01/2020 22:58	Text Document	15 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVg_Vds_0.05_IV0	29/01/2020 19:53	Text Document	19 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVg_Vds_0.5_IV0	29/01/2020 19:53	Text Document	18 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVg_Vds_1_IV0	29/01/2020 19:53	Text Document	18 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVg_Vds_2_IV0	29/01/2020 19:53	Text Document	18 KB
P193330_D13_T25C_56_RL11_D3_IdVg_Vds_3_IV0	29/01/2020 19:54	Text Document	17 KB

Fonte – Autor.

Figura 19 - Arquivo de dados coletados de um dispositivo AlGaIn/GaN HEMT

```

P193330_D13_T25C_56_RL11_D1_IdVd_Vgs_0.2_IdVd0 - Notepad
File Edit View
# chipmap : /imec/other/drec/medusa/maps/Al1_GaNRF_die_map_Fullwafer.txt
# chuck_temperature : 25.03
# comment : HEMT
# device_map : /imec/other/drec/medusa/maps/Al1_GaNRF_REL_DC_map_gloria.txt
# filename : P193330_D13_T25C_56_RL11_D1_IdVd_Vgs_0.2_IdVd0.txt
# filename.backup : 2020-01-30_01h35m06s904_canode79_pc7216_P193330_D13_T25C_56_RL11_D1_IdVd_Vgs_0.2_IdVd0.txt
# host : pc7216
# initchip : 20
# initdevice : RL11_D1
# instrument : Keithley Instruments Inc., Model 2602, 1084121, 1.4.2
# library_timestamp.X26ax : Fri Jul 31 14:29:00 2015
# library_timestamp.PA300 : Thu May 31 11:26:16 2018
# library_timestamp.common : Thu Jun 21 09:59:28 2018
# realtime : 1580344492.81703
# realtime_human : Thu Jan 30 01:34:52 2020
# runtime : 14.0595281124115
# smu_bulk : node[1].smub
# smu_drain : node[2].smua
# smu_gate : node[1].smua
# smu_source : node[2].smub
# temperature : 25C
# testchip : 56
# testchip.test_chip : 56
# testchip.x : 27920
# testchip.y : -73550
# testdevice : RL11_D1
# testdevice.test_device : RL11_D1
# testdevice.x : 250
# testdevice.y : 0
# user : canode79
# wafer : P193330_D13
# wafer.orientation : bottom

## bulk_t bulk_v bulk_i drain_t drain_v drain_i gate_t gate_v gate_i source_t source_v source_i
1 0.494923 0 -5.9604645e-14 0.47362301 0 -2.2426819e-07 0.45268899 0.2 3.6495926e-10 0.43132901 0 2.2488045e-07
Ln 15, Col 45
100% Unix (LF) UTF-8

```

Fonte – Autor.

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

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

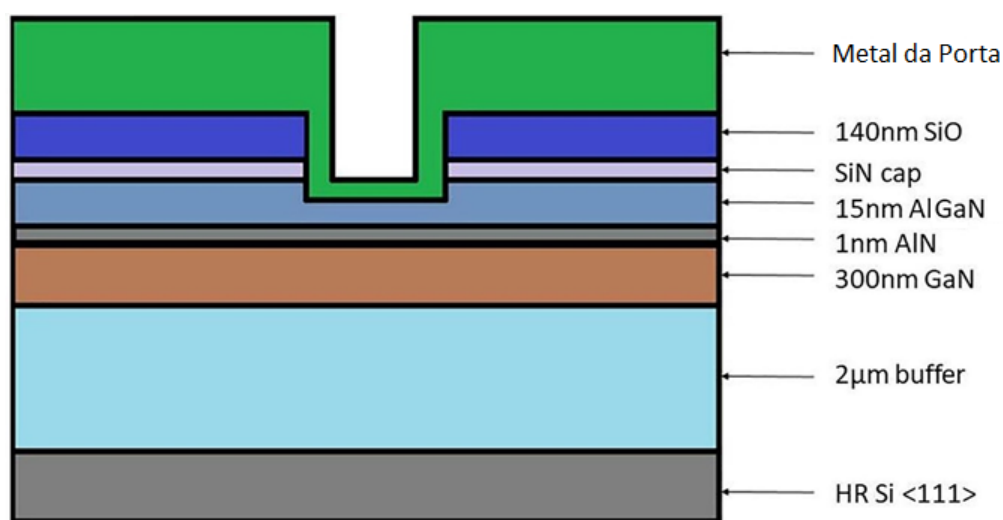
3.1.1 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Para a primeira etapa de desenvolvimento deste trabalho, focou-se na extração dos dados para análise dos comportamentos elétricos, analógicos e de ruído dos dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN. As heteroestruturas AlGaIn/GaN foram fabricadas em substrato de silício (111) de alta resistência $\langle 111 \rangle$ por deposição química de vapor de metal-orgânico (MOCVD). Essas estruturas compreendem um buffer de GaN/AlGaIn, um canal GaN de 300nm, um espaçador AlN de 1nm, uma barreira $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$ de 15nm de camada de proteção (cap layers) de Si_3N_4 para passivação superficial.

Os dispositivos foram processados utilizando um processo sem ouro “gate-first”. A camada AlGaIn acima do canal GaN foi processada utilizando um processo de gravura de camada atômica (ALE) baseado em uma oxidação autolimitante de plasma- O_2 e gravura de plasma- BCl_3 , o que produz uma baixa rugosidade de 0,22nm.

Uma seção transversal da estrutura do dispositivo é mostrada na Figura 20. As características de corrente-tensão foram realizadas em diferentes temperaturas variando entre 5°C e 200°C na lâmina com os dispositivos operando em $V_D = 4\text{V}$.

Figura 20 - Estrutura esquemática dos transistores de alta mobilidade de elétrons AlGaIn/GaN (HEMTs) crescidos em substrato de Si.



Fonte – Autor.

As medições de ruído foram executadas em nMOSHEMTs de 0,2 a 10 μ m de comprimento, utilizando o Keysight Advanced Low Frequency Noise Analyzer (ALFNA E4727A). O ruído foi medido em pelo menos 10 dispositivos por wafer em operação linear ($V_D = 50$ mV). O ruído de tensão PSD foi calculado a partir de S_{Id}/g_m^2 , onde S_{Id} é o ruído de corrente de dreno PSD e g_m é a transcondutância em cada ponto de operação.

Os dispositivos analisados apresentaram comprimentos de canal de 0,2; 0,4; 1 e 10 μ m e larguras de canal de 1 e 10 μ m. A tensão de limiar, conforme enunciado acima, foi extraída pelo método de extrapolação linear.

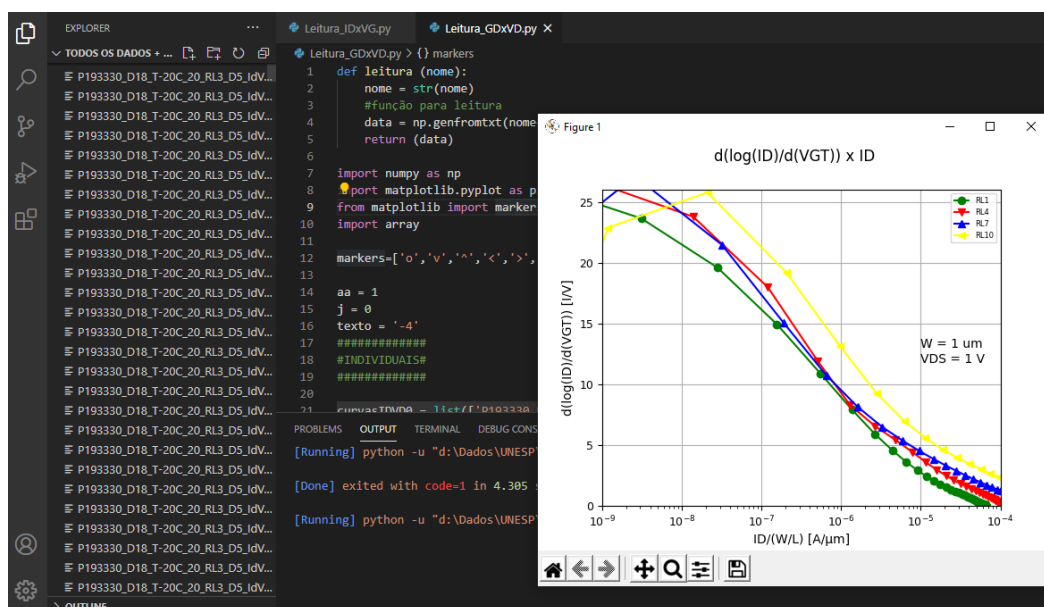
3.1.2 COMPILAÇÃO MASSIVA EM PYTHON

Com a extração de todos os dados pertinentes, procedeu-se a compilação gráfica, em ambiente de programação *Python* para averiguação do comportamento elétrico perante diferentes comprimentos de canal e temperaturas do dispositivo.

A linguagem *Python* foi escolhida devido a sua gama de bibliotecas de fácil acesso que possibilitam a realização da manipulação dos dados de forma fácil e dinâmica.

Na Figura 21, verifica-se um exemplo de extração gráfica utilizando a aplicação desenvolvida em *Python*.

Figura 21 - Ambiente de Programação preparado em Python para compilação gráfica.



Fonte – Autor.

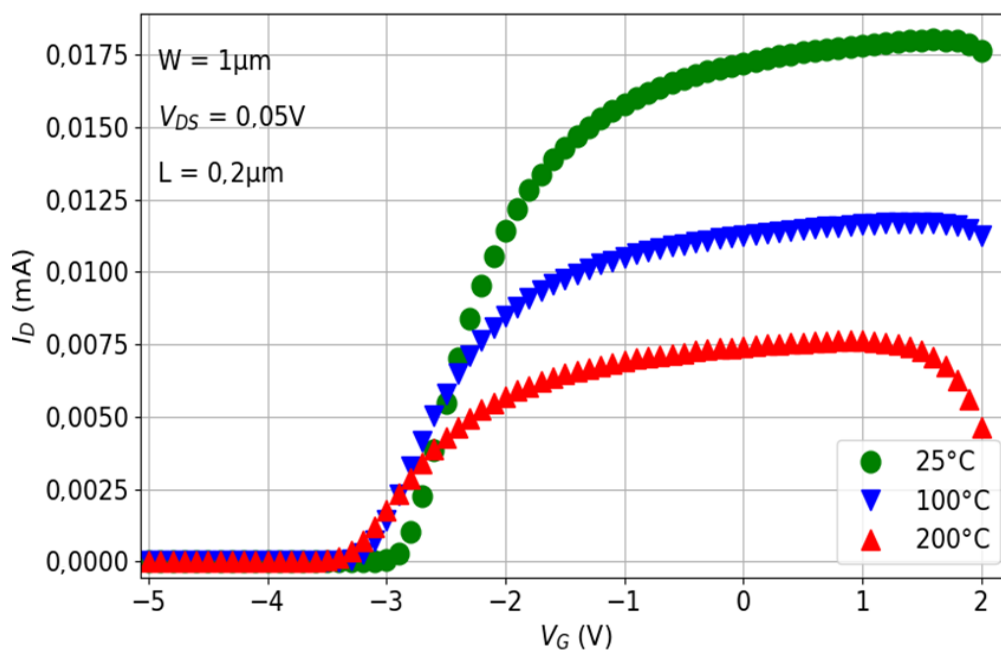
Após efetuar-se a compilação gráfica de todos os dados pertinentes, foi possível observar o comportamento dos dispositivos de diferentes comprimentos de canal e em diferentes cenários de temperaturas.

3.2 ANÁLISE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE PORTA

3.2.1 CORRENTE DE DRENO

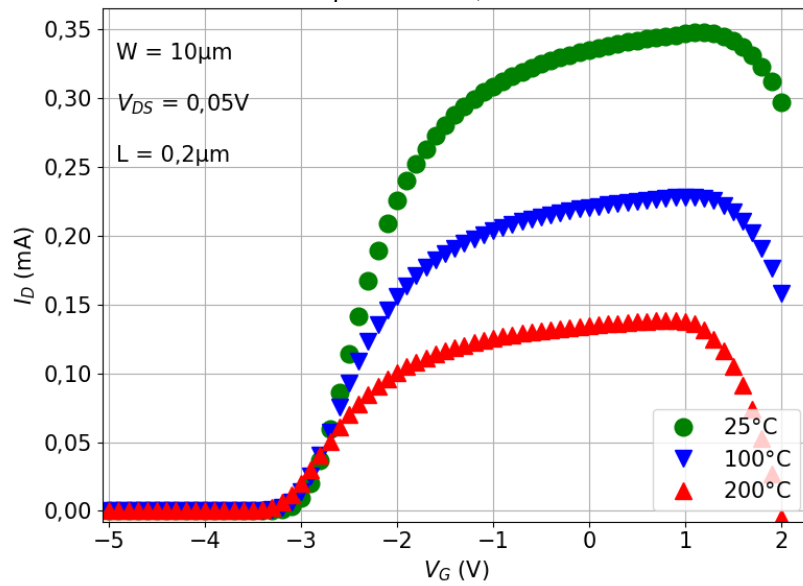
A corrente de dreno versus tensão de porta, para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas e larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$ com $V_{DS} = 0,05\text{V}$ é mostrada nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

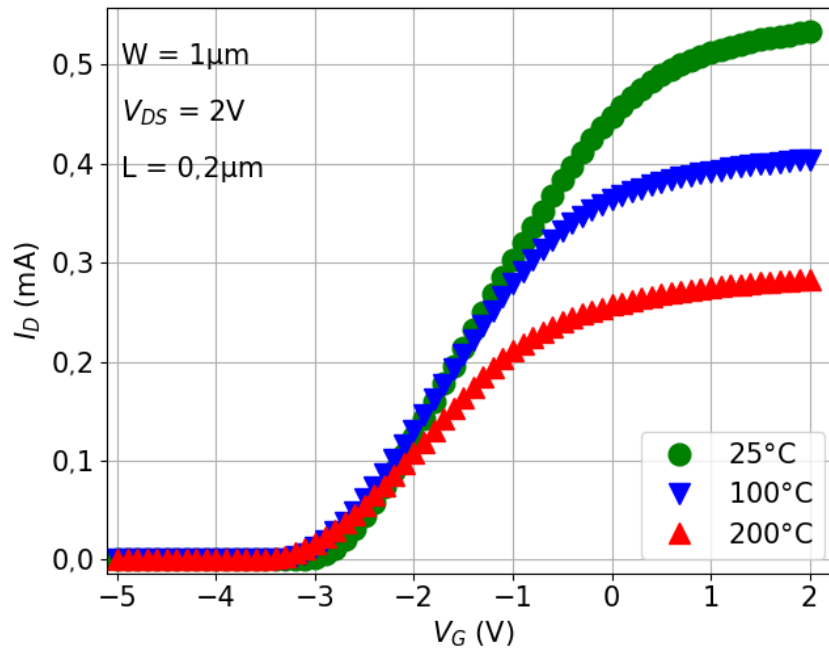
Figura 23 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

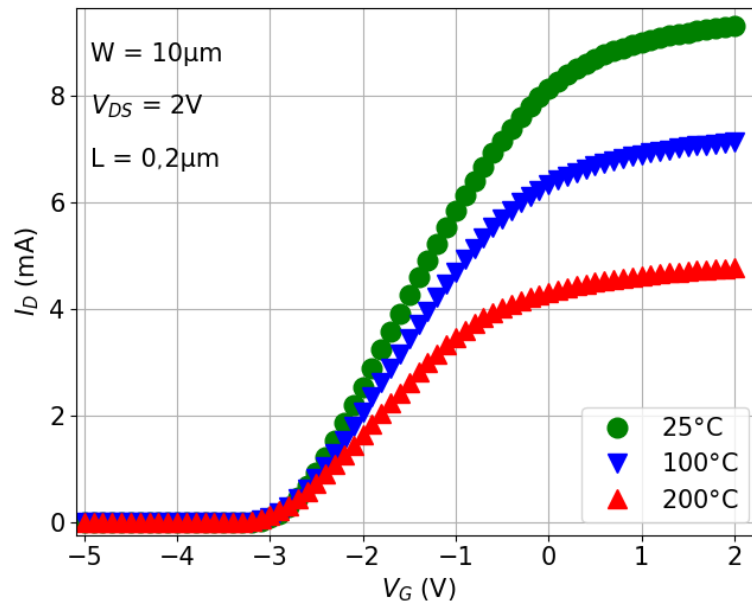
Da mesma forma, a corrente de dreno versus tensão de porta, para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$ para os dispositivos operando em $V_{DS} = 2\text{V}$ é mostrada nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

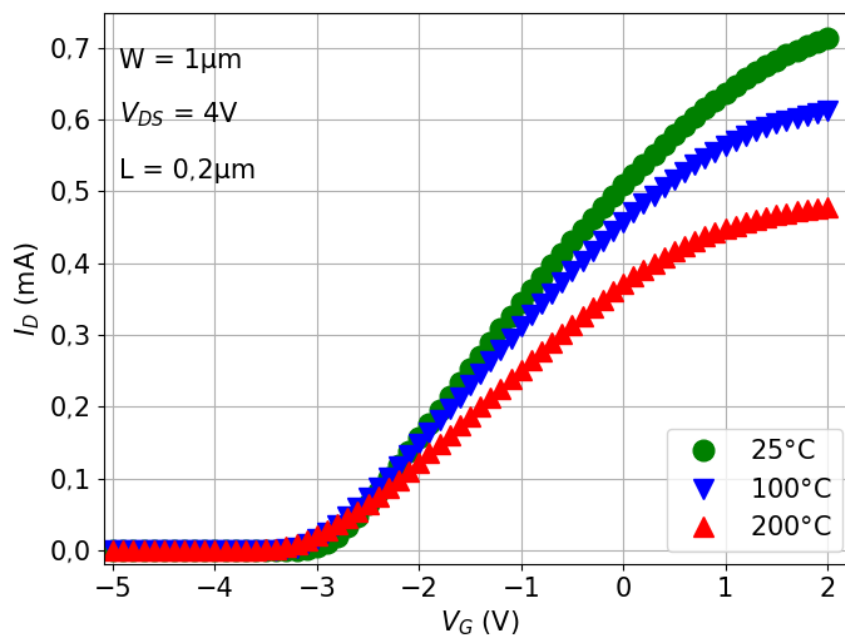
Figura 25 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

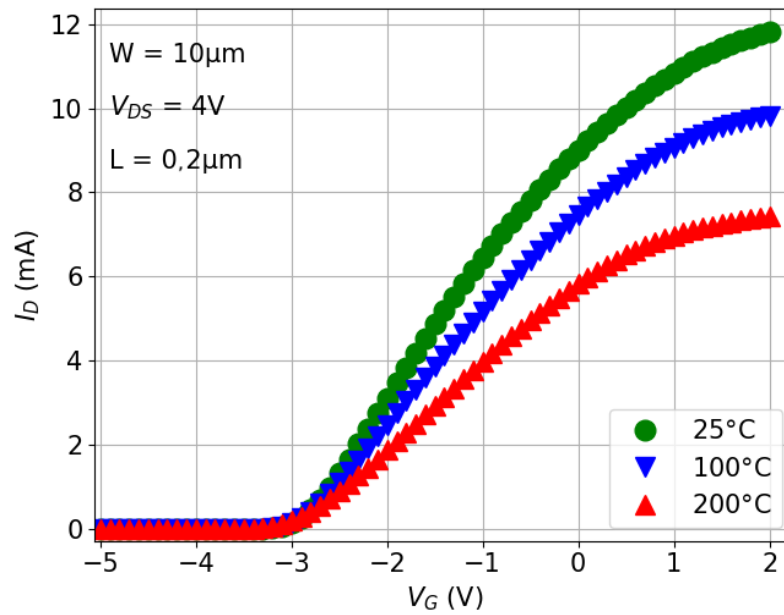
Finalmente, a corrente de dreno versus tensão de porta, para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$ para os dispositivos operando em $V_{DS} = 4\text{V}$ é mostrada nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

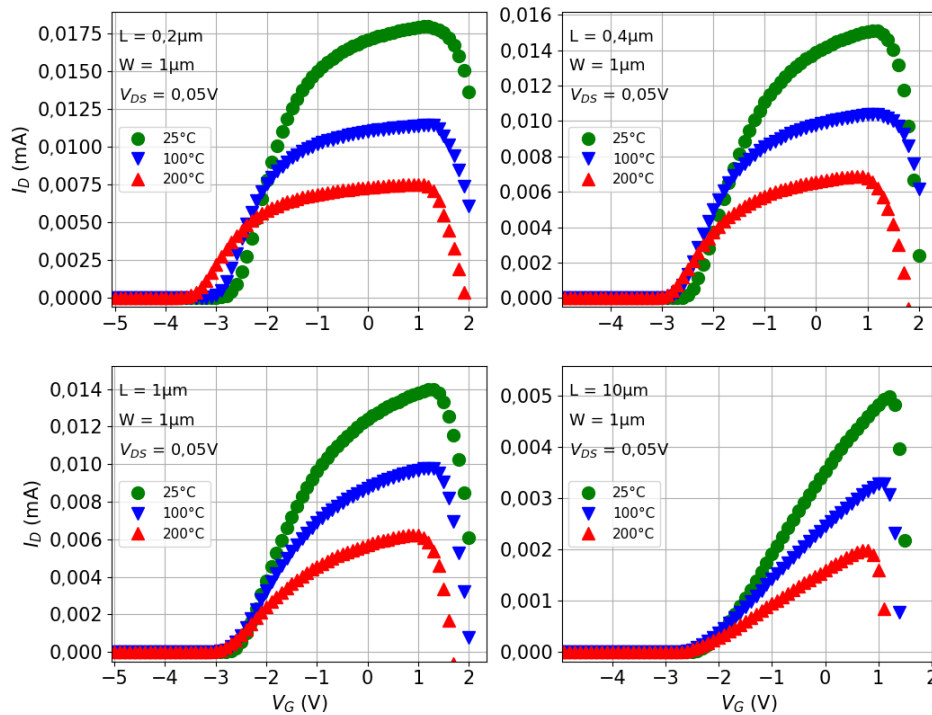
Figura 27 - I_D versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

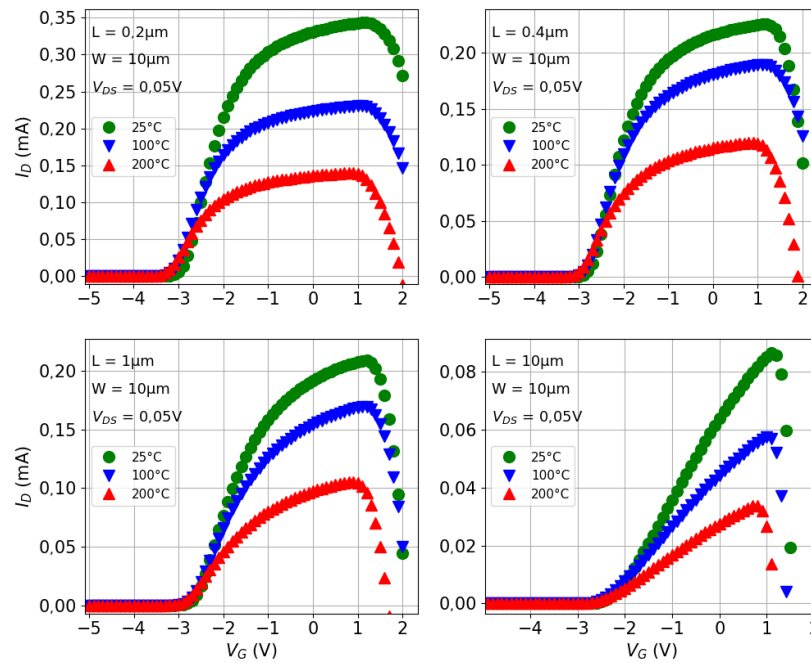
Em relação à variação do comprimento do canal, pode-se observar nas Figuras 28 e 29 os gráficos de I_D em função de V_G para uma tensão de dreno de $0,05\text{V}$ e larguras de canal de $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$.

Figura 28 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

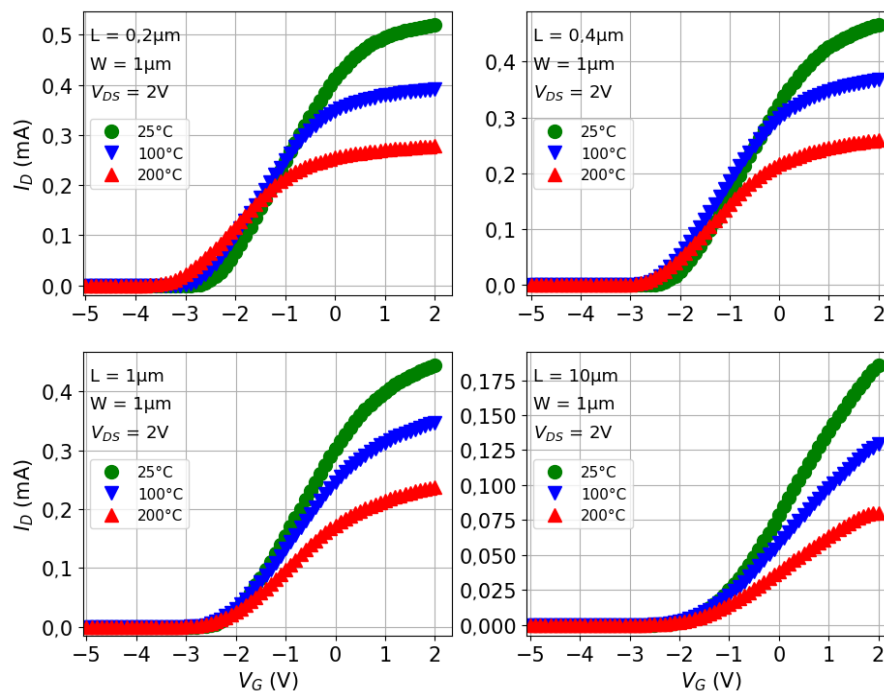
Figura 29 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05V$ e $W = 10\mu m$.



Fonte – Autor.

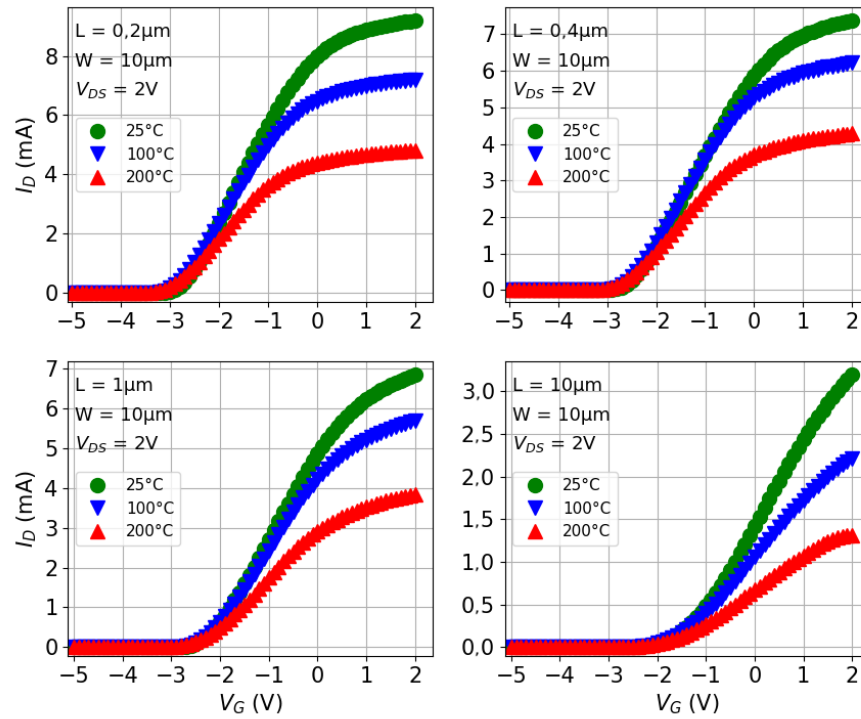
Da mesma forma, observa-se nas Figura 30 e 31, os gráficos de I_D em função de V_G para uma tensão de dreno de 2V e larguras de canal de $1\mu m$ e $10\mu m$.

Figura 30 - Corrente de dreno (I_D) versus tensão de porta (V_G) para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 1\mu m$.



Fonte – Autor.

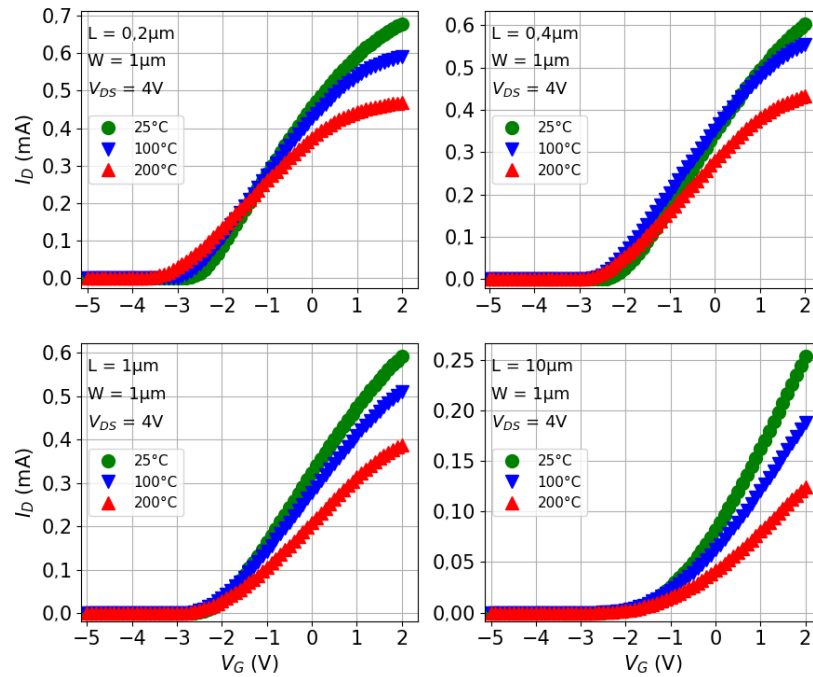
Figura 31 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 10\mu m$.



Fonte – Autor.

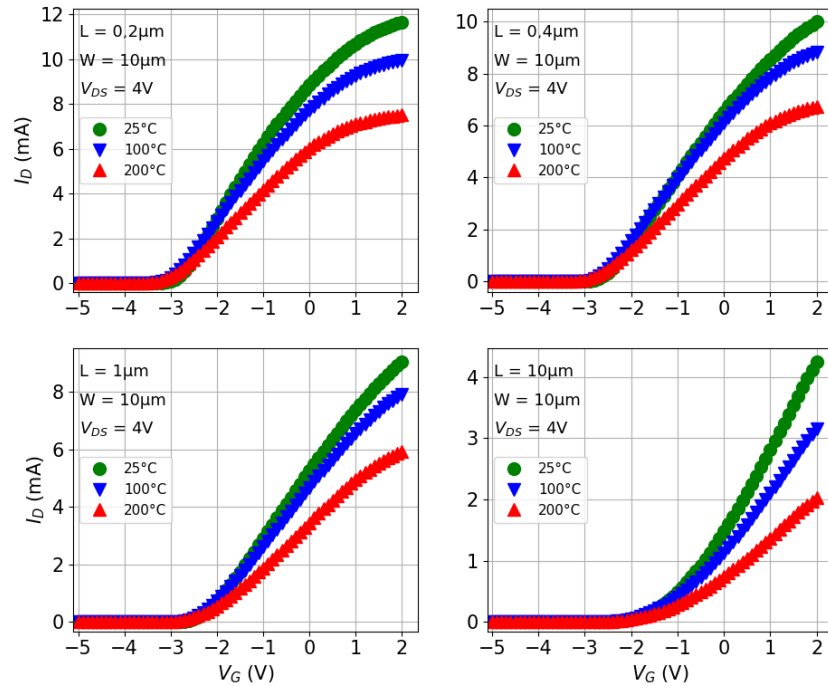
Finalmente, vê-se nas Figura 32 e 33 os gráficos de I_D em função de V_G para uma tensão de dreno de 4V e largura do canal de $1\mu m$ e $10\mu m$.

Figura 32 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4V$ e $W = 1\mu m$.



Fonte – Autor.

Figura 33 - Corrente de dreno versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4V$ e $W = 10\mu m$.



Fonte – Autor.

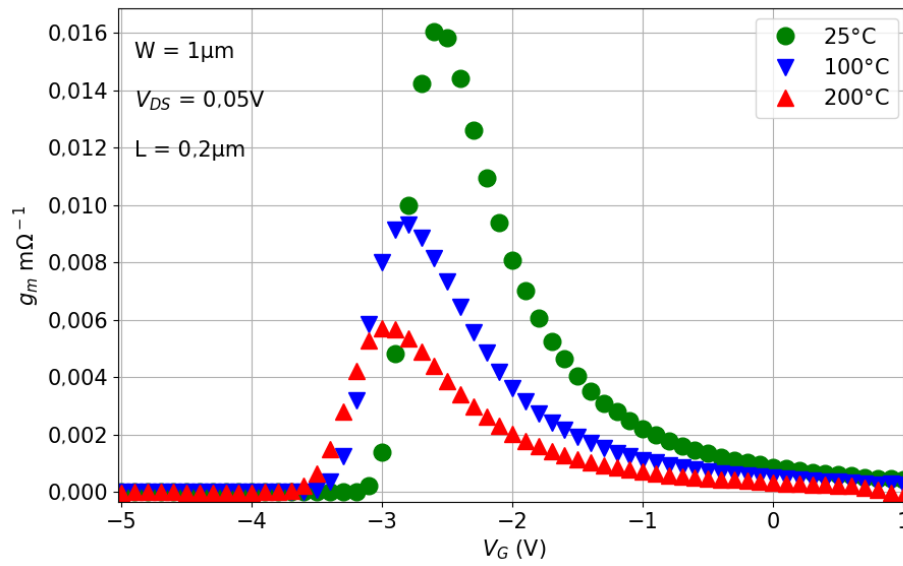
Observa-se que a corrente de dreno varia com o aumento da temperatura e comprimento do canal. Isso pode ser atribuído principalmente à degeneração (redução) da mobilidade do elétron no canal induzida pelo espalhamento térmico, que é a oscilação dos átomos em torno da posição de equilíbrio (TAN et al., 2006; BERGAMIM et al., 2021).

Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual de I_D conforme aumento de W . Além disso, como esperado, com o aumento da polarização de V_D , há um acréscimo do valor absoluto da corrente de dreno.

3.2.2 TRANSCONDUTÂNCIA

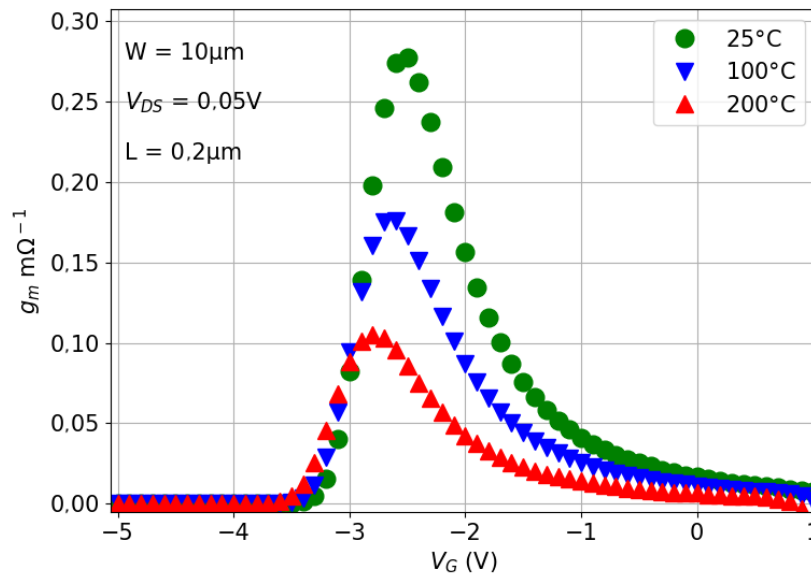
A variação da transcondutância versus tensão de porta, para $L = 0,2\mu m$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de 1 e $10\mu m$ com os dispositivos operando com $V_{DS} = 0,05V$ é mostrada nas figuras 34 e 35.

Figura 34 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

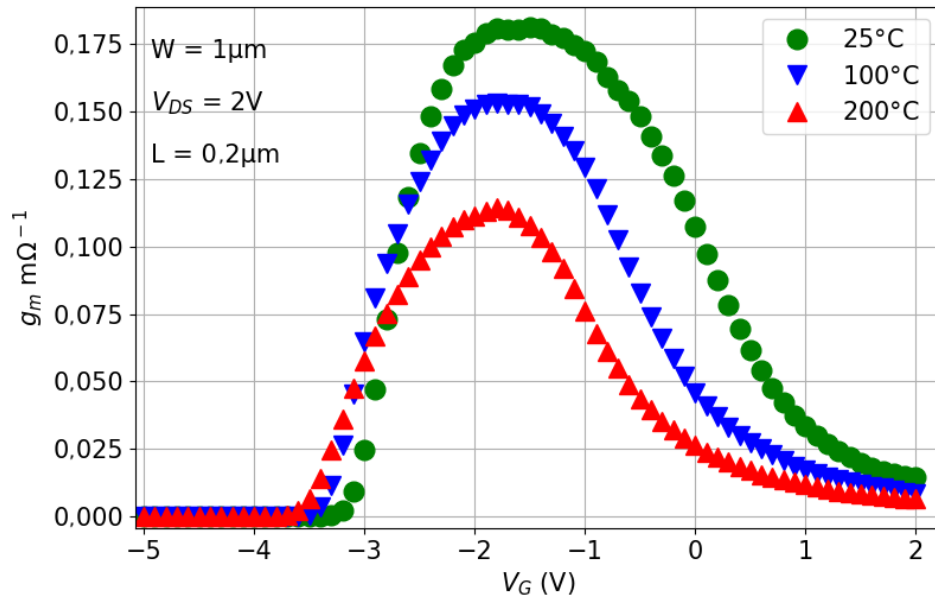
Figura 35 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

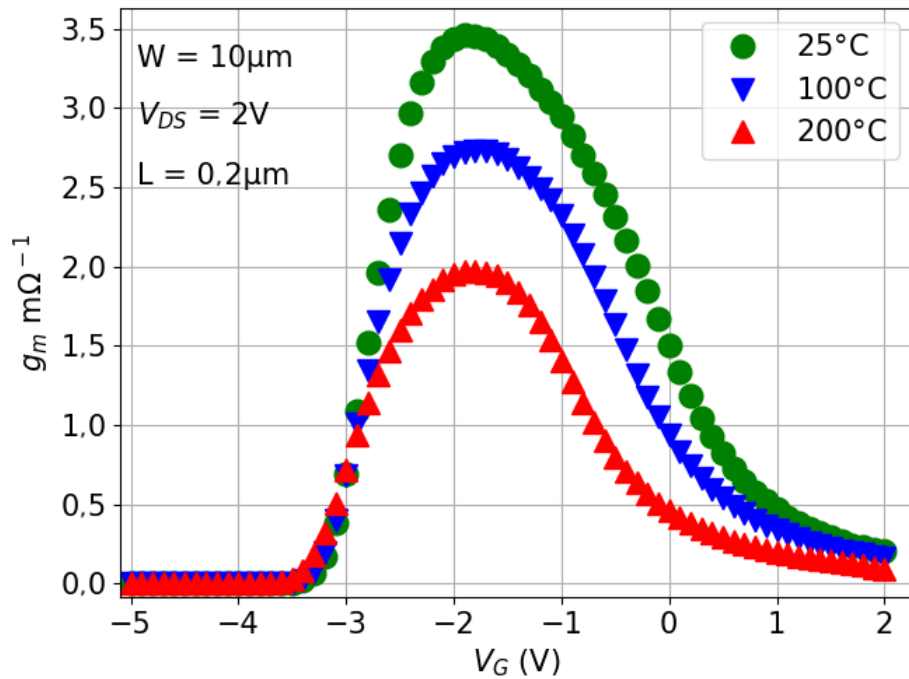
Da mesma forma, a variação da transcondutância (g_m) versus tensão de porta (V_G), para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$, com polarização de V_{DS} de 2V é mostrada nas figuras 36 e 37.

Figura 36 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

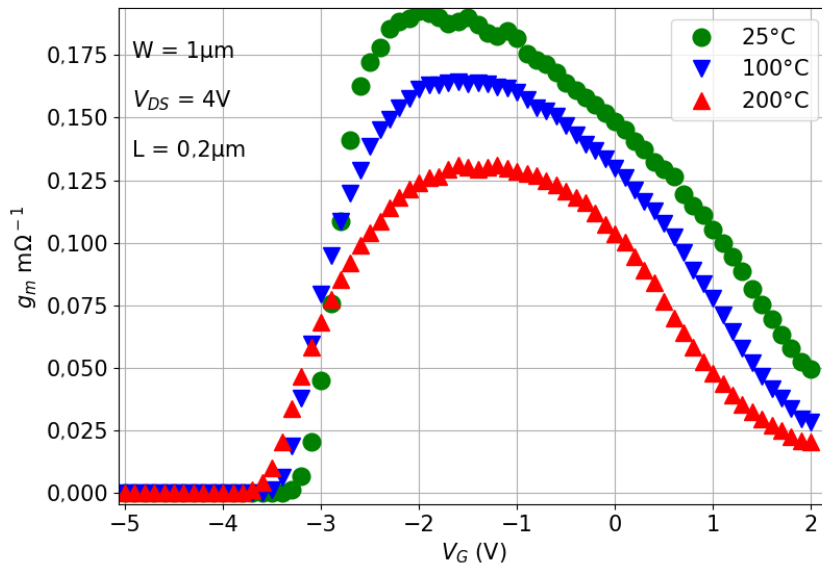
Figura 37 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

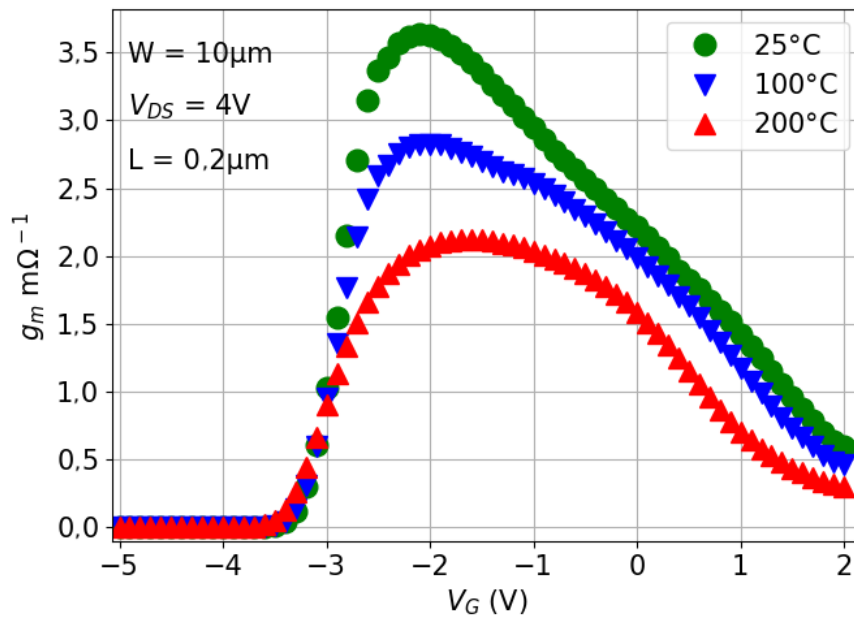
Finalmente, a variação da transcondutância versus tensão de porta, para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$ com polarização de $V_{DS} = 4\text{V}$ é mostrada nas figuras 38 e 39.

Figura 38 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

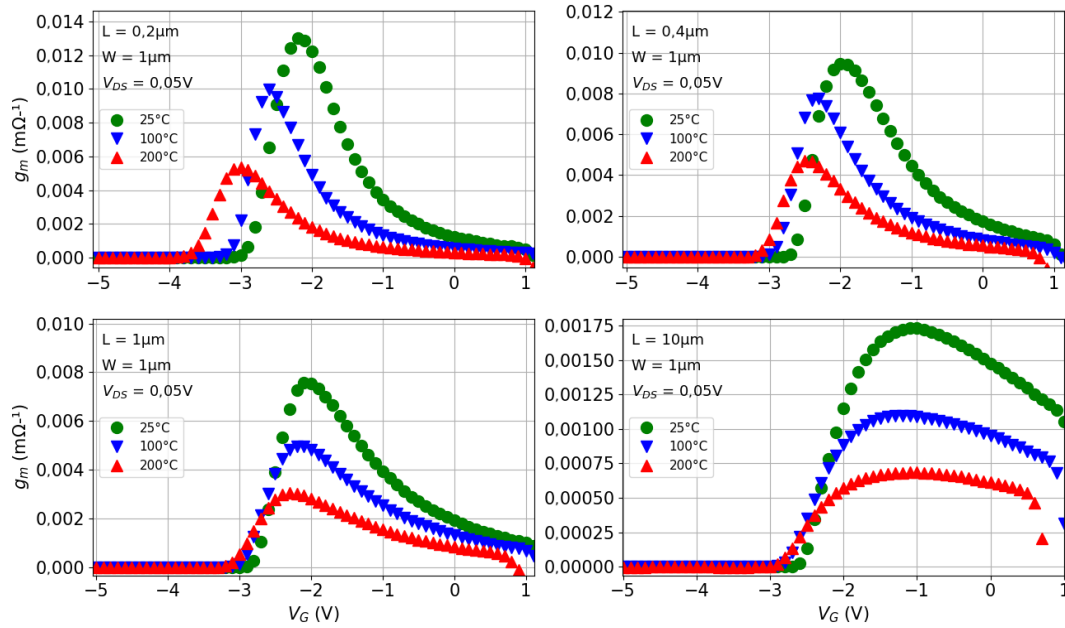
Figura 39 - g_m versus V_G para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

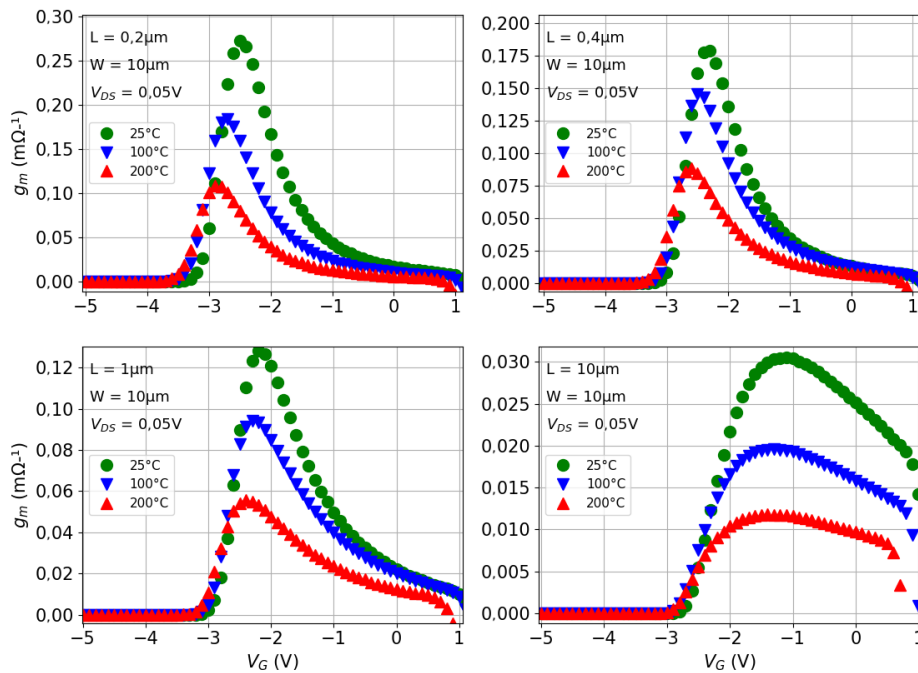
Em relação à variação do comprimento do canal, pode-se observar nas Figuras 40 e 41 os gráficos de g_m em função de V_G para uma tensão de dreno de $0,05\text{V}$ e larguras de canal de $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$.

Figura 40 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05V$ e $W = 1\mu m$.



Fonte – Autor.

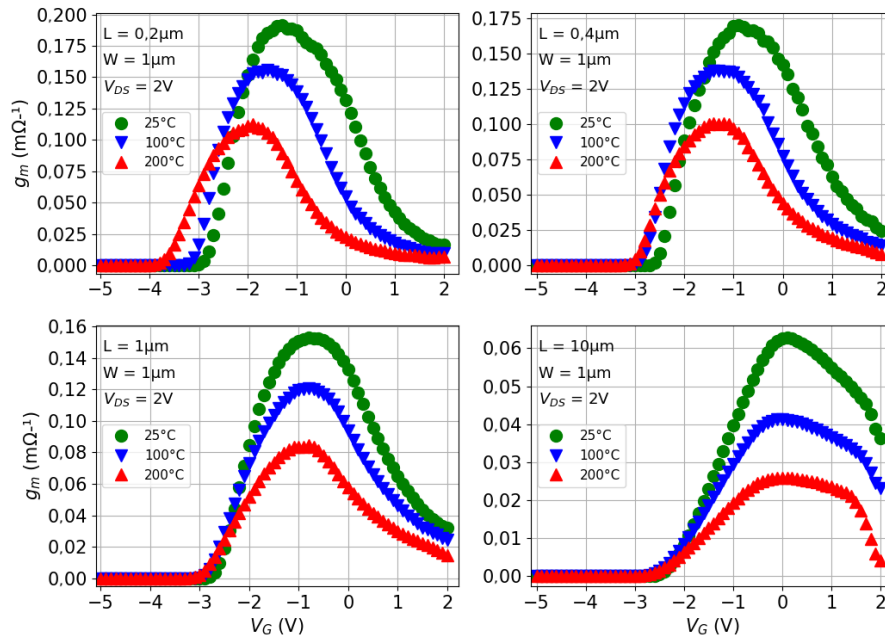
Figura 41 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 0,05V$ e $W = 10\mu m$.



Fonte – Autor.

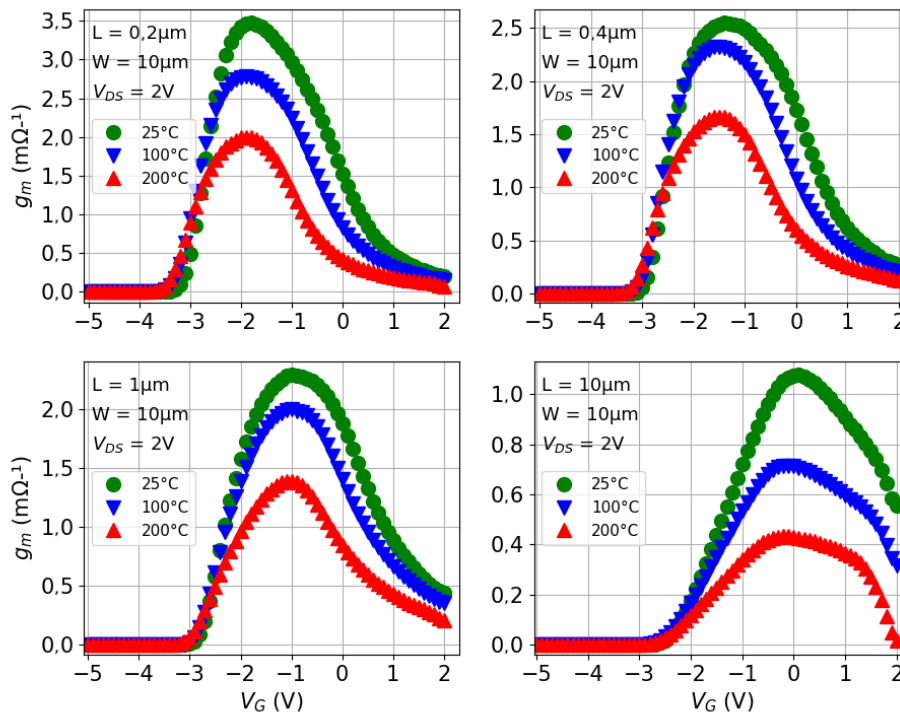
Da mesma forma, observa-se nas Figura 42 e 43 os gráficos de g_m em função de V_G para uma tensão de dreno de 2V e largura do canal de $1\mu m$ e $10\mu m$.

Figura 42 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 1\mu m$



Fonte – Autor.

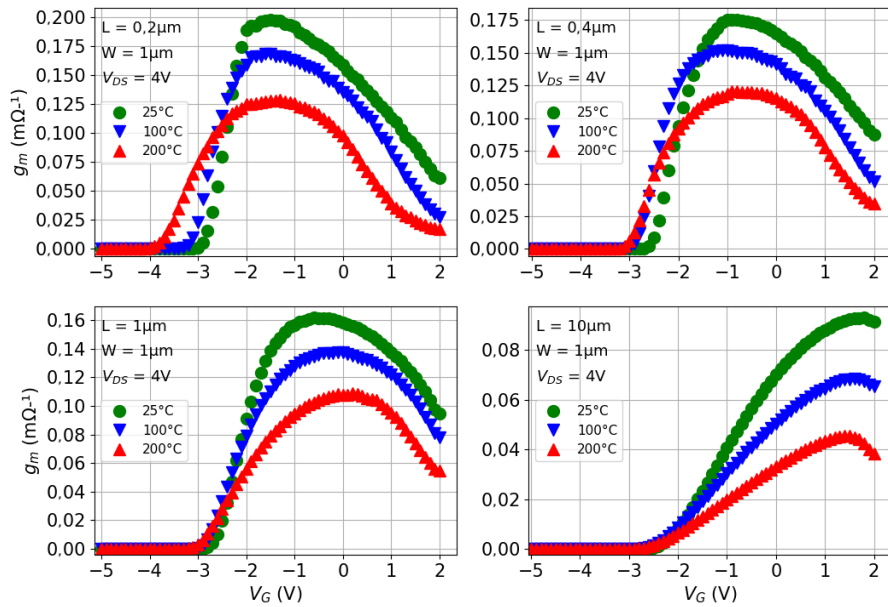
Figura 43 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 2V$ e $W = 10\mu m$.



Fonte – Autor.

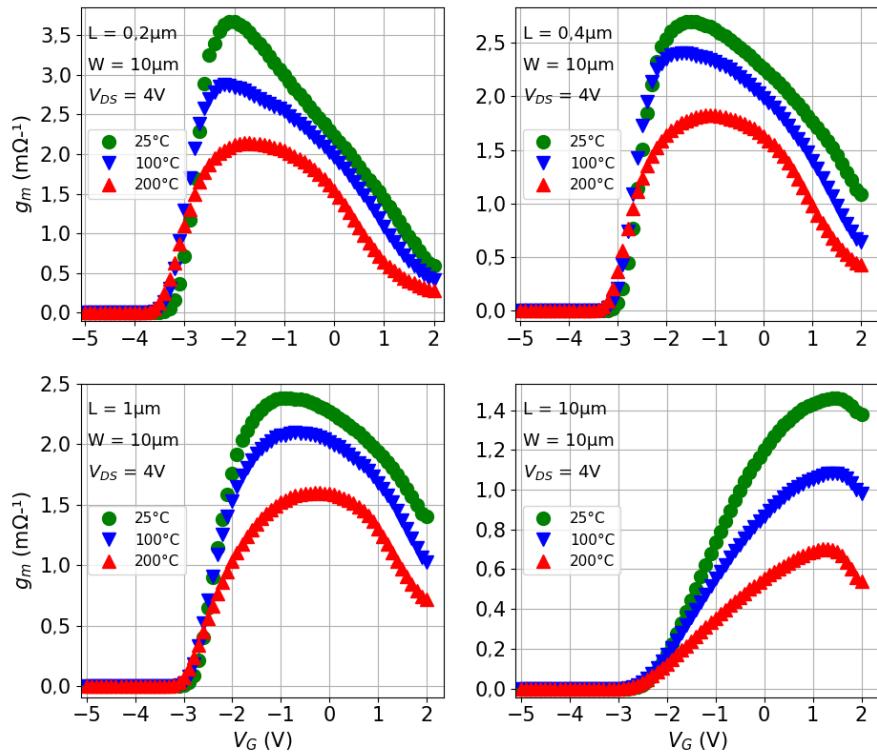
Finalmente, vê-se nas Figuras 44 e 45 os gráficos de g_m em função de V_G para uma tensão de dreno de 4V e larguras de canal de $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$.

Figura 44 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4\text{V}$ e $W = 1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Figura 45 - Transcondutância versus tensão de porta para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e comprimentos de canal para $V_{DS} = 4\text{V}$ e $W = 10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Como analisado na corrente de dreno, a transcondutância varia com o aumento da temperatura e aumento do comprimento do canal. Isso pode ser atribuído, também, à degeneração (redução) da mobilidade do elétron no canal induzida pelo espalhamento térmico que é a oscilação dos átomos em torno da posição de equilíbrio (TAN et al., 2006; BERGAMIM et al., 2021).

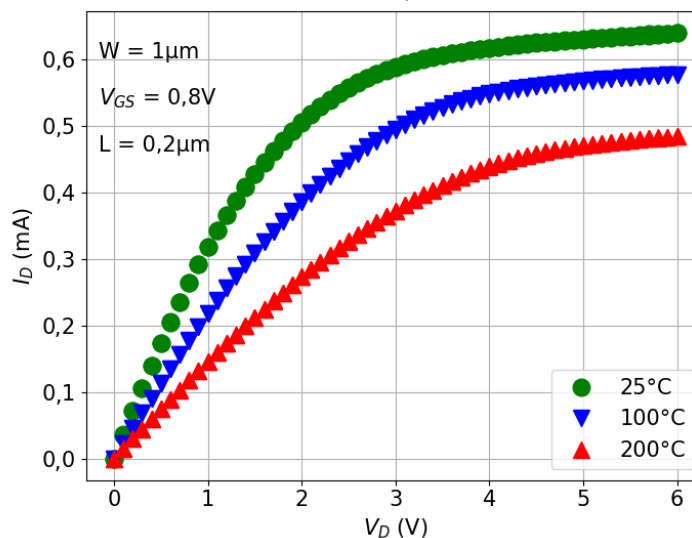
Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual de g_m conforme aumento de W . Além disso, como esperado, com aumento da polarização de V_D , há um acréscimo do valor absoluto da transcondutância.

3.3 ANÁLISE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE DRENO

3.3.1 CORRENTE DE DRENO

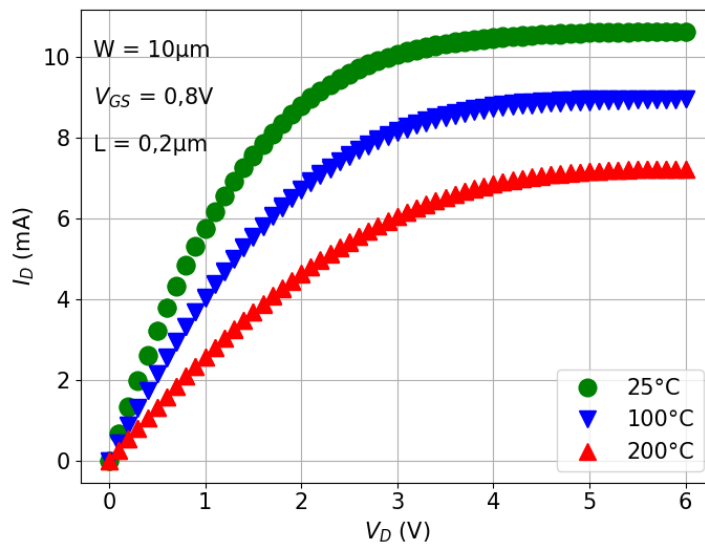
A corrente de dreno versus tensão de dreno para $L = 0,2\mu\text{m}$, em diferentes temperaturas para larguras de canal de $1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$ é mostrada nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - I_D versus V_D para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, W de $1\mu\text{m}$, L de $0,2\mu\text{m}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$.



Fonte – Autor.

Figura 47 - I_D versus V_D para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, W de $10\mu\text{m}$, L de $0,2\mu\text{m}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$.



Fonte – Autor.

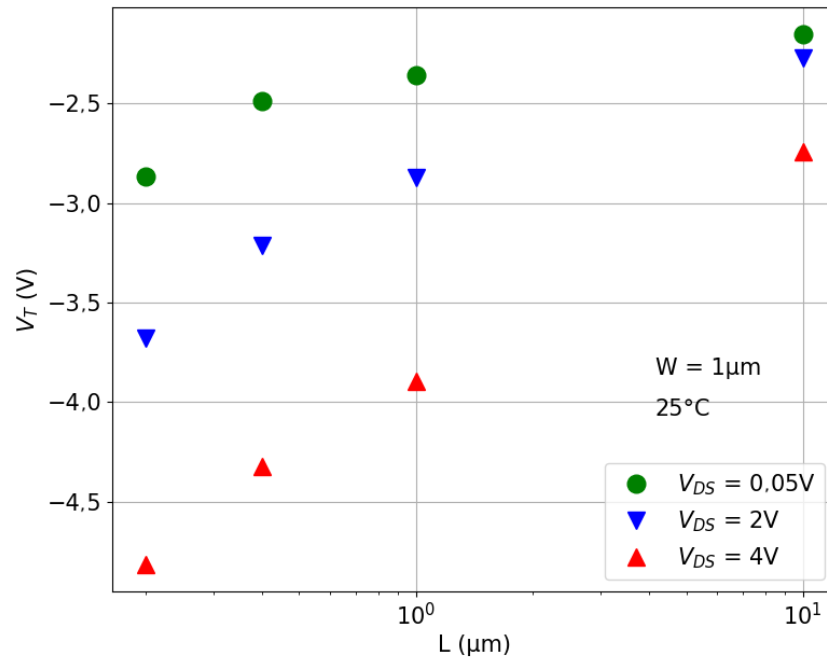
Nota-se uma relação de proporcionalidade inversa no valor de corrente de dreno para com a temperatura do dispositivo. À medida que a temperatura aumenta, há um retardo na mobilidade e, conseqüentemente, uma diminuição no valor da corrente de dreno.

3.4 ANÁLISE EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO CANAL

3.4.1 TENSÃO DE LIMIAR

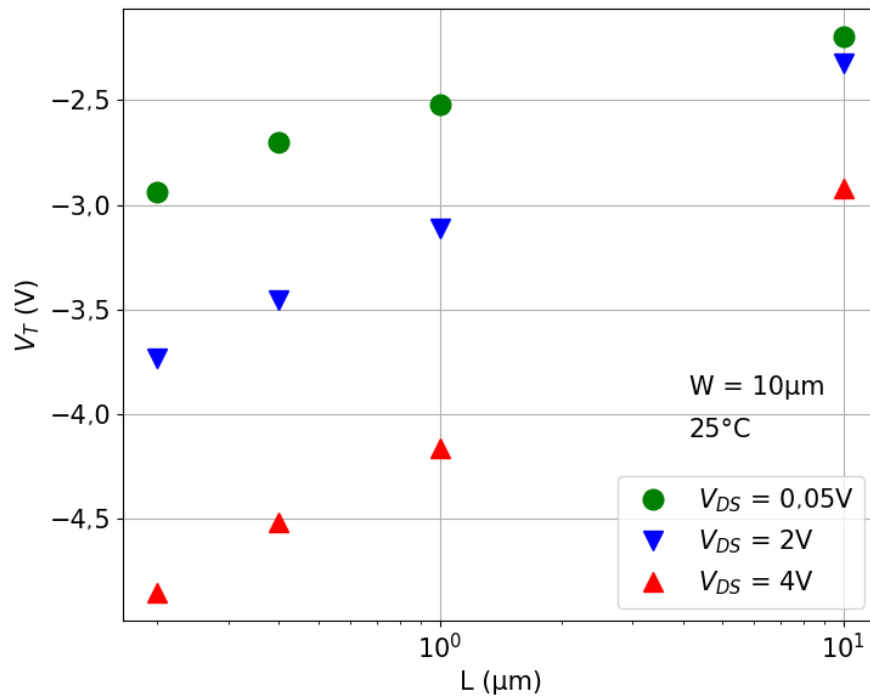
A tensão de limiar representa o início de um fluxo significativo de corrente de dreno que também depende do comprimento do canal. As Figuras 48 e 49 mostram a tensão de limiar em relação ao comprimento do canal para diferentes larguras do canal. Como descrito anteriormente, neste trabalho a tensão de limiar foi extraída pelo método da extrapolação.

Figura 48 - Tensões de limiar de HEMTs AlGaIn/GaN com diferentes comprimentos de canal para diferentes regiões de operação e largura do canal igual a $1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Figura 49 - Tensões de limiar de HEMTs AlGaIn/GaN com diferentes comprimentos de canal para diferentes regiões de operação e largura do canal igual a $10\mu\text{m}$.



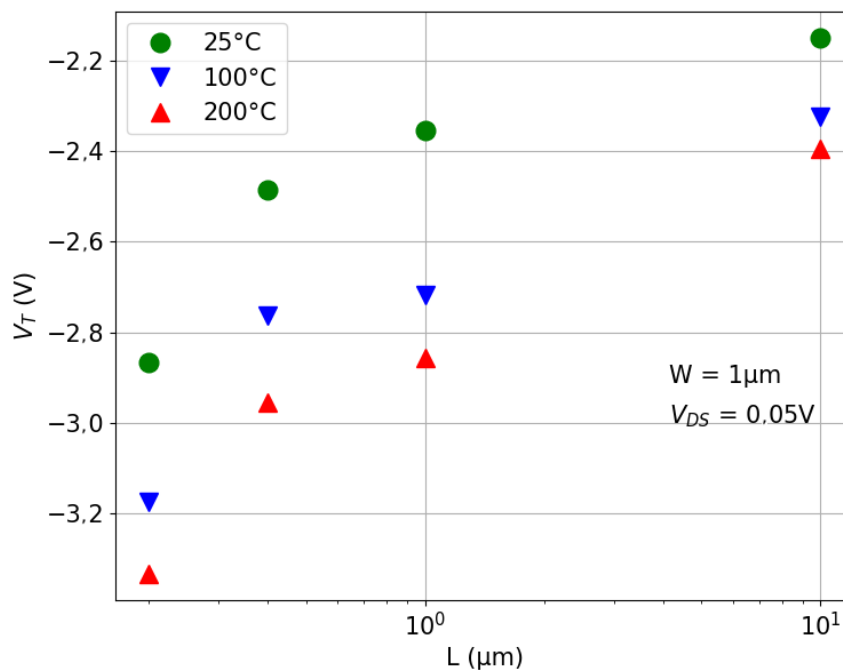
Fonte – Autor.

Tais medidas são realizadas para averiguar e validar o método de extração de tensão de limiar utilizado (no caso, extrapolação). Outros métodos foram testados, como o método da corrente-constante, segunda-derivada, relação da corrente pela raiz quadrada da transcondutância e relação da corrente pela transcondutância, porém o método de Extrapolação obteve maior acurácia nos resultados.

Esperava-se obter, para maiores tensões de dreno, um menor (mais negativo) valor de tensão de limiar. Como foi possível observar, para todos os valores de largura do canal, esse comportamento foi o apresentado, validando a utilização.

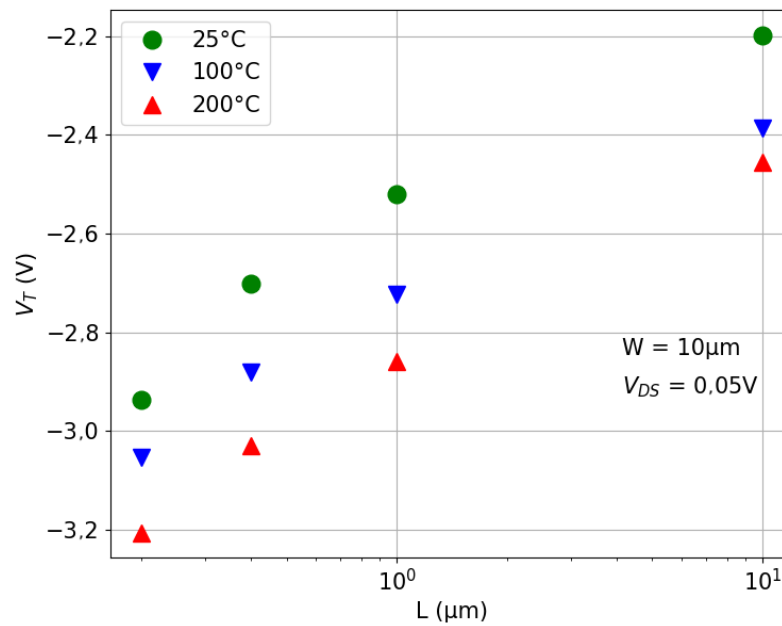
Para uma polarização de dreno de 0,05V, as Figuras 50 e 51 apresentam o comportamento da tensão de limiar do dispositivo perante variações no comprimento do canal e temperaturas de operação para diferentes larguras do canal.

Figura 50 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de 1 μ m e polarização de V_D de 0,05V.



Fonte – Autor.

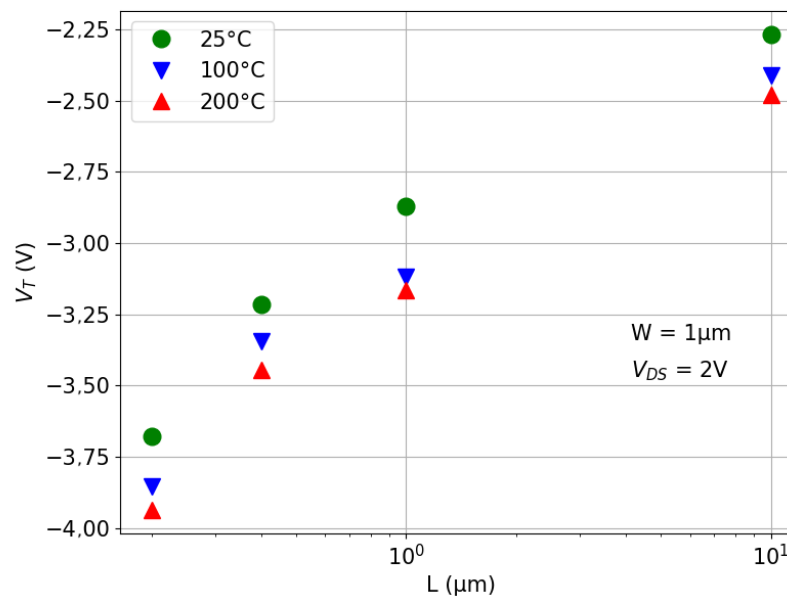
Figura 51 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu\text{m}$ e polarização de V_D de $0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

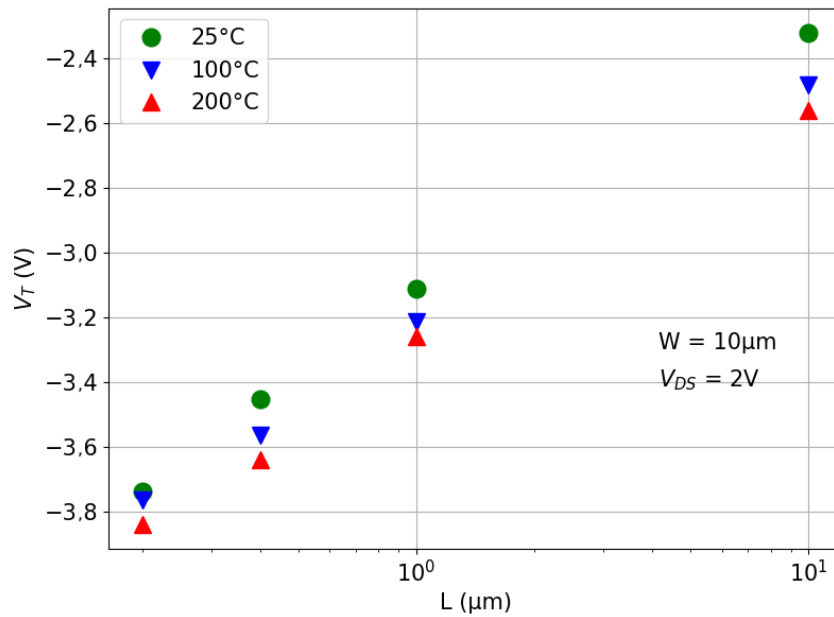
Da mesma forma, para uma polarização de dreno de 2V , as Figuras 52 e 53 apresentam o comportamento da tensão de limiar do dispositivo perante variações no comprimento do canal e temperaturas de operação para diferentes larguras do canal.

Figura 52 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $1\mu\text{m}$ e polarização de V_D de 2V .



Fonte – Autor.

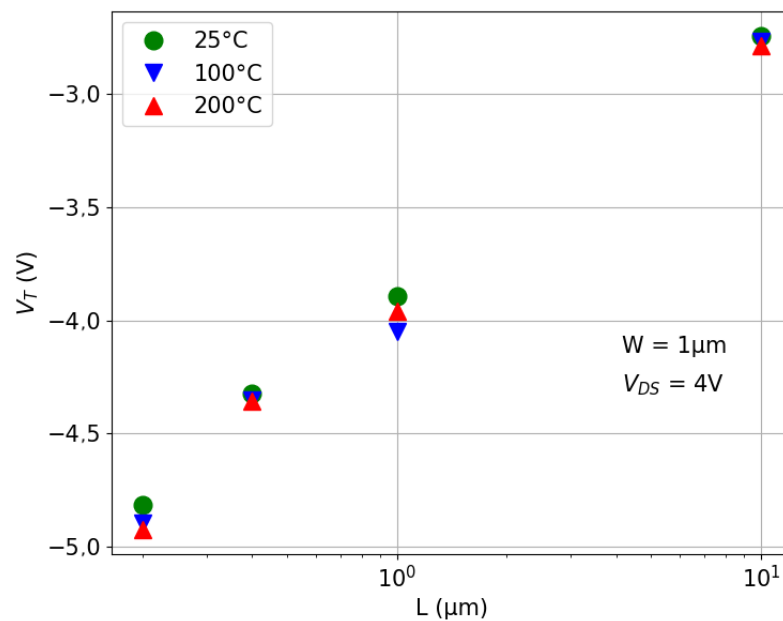
Figura 53 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu\text{m}$ e polarização de V_D de 2V.



Fonte – Autor.

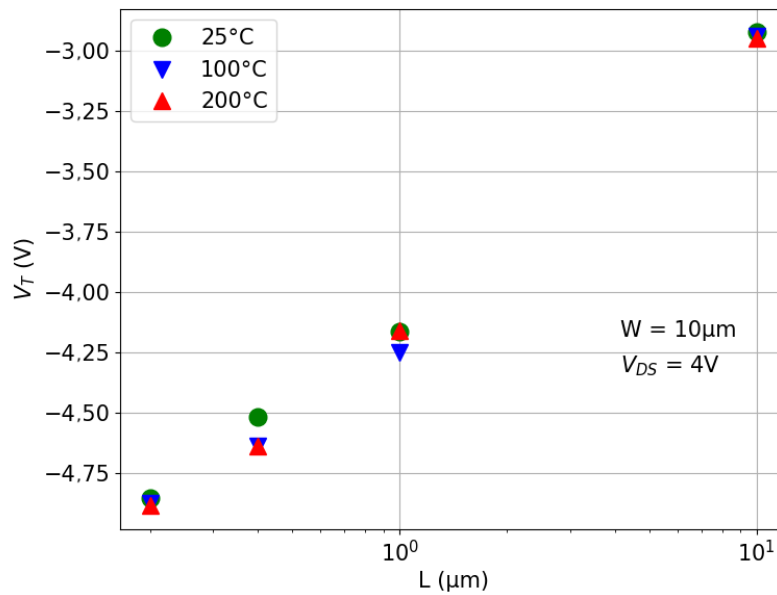
Finalmente, para uma polarização de dreno de 4V, as Figuras 54 e 55 apresentam o comportamento da tensão de limiar do dispositivo perante variações no comprimento do canal e temperaturas de operação para diferentes larguras do canal.

Figura 54 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $1\mu\text{m}$ e polarização de V_D de 4V.



Fonte – Autor.

Figura 55 - Tensão de limiar versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura do canal de $10\mu\text{m}$ e polarização de V_D de $4V$.



Fonte – Autor.

A redução na tensão de limiar com a redução do comprimento do canal pode ser explicada, para todas as polarizações de dreno, devido à redução na controlabilidade do canal pela porta. Vale ressaltar que cada tipo de semiconductor possui seu próprio nível de Fermi. Em baixa temperatura, o nível de Fermi está próximo a uma das bordas da banda e aumenta em direção ao intervalo médio para o aumento da temperatura (ELEWA et al., 1990).

Em relação a polarização de dreno, como já verificado nas plotagens para validação do método de extrapolação, quanto maior o V_{DS} , menor (mais negativa) é a tensão de limiar.

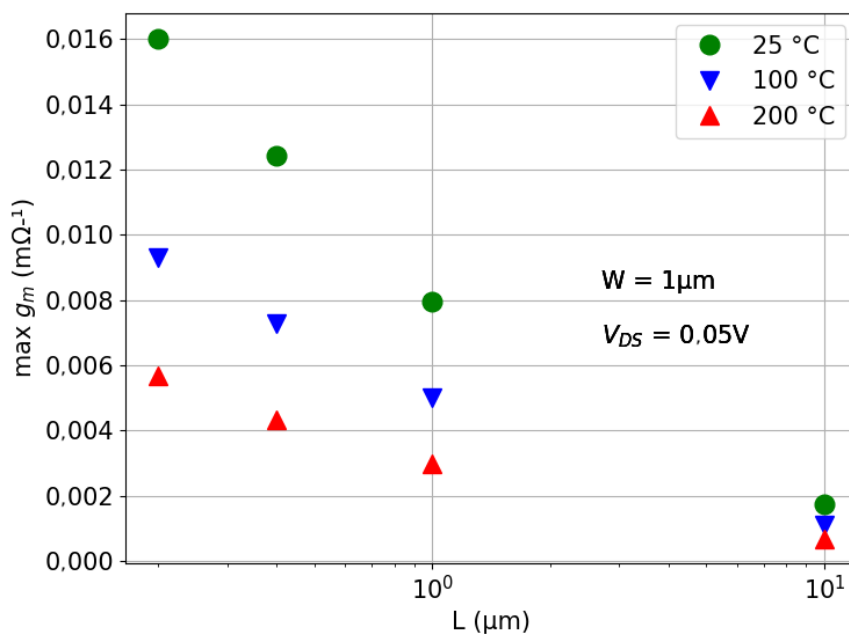
Verifica-se que, com a alteração na largura do canal, não há mudanças consideráveis no valor de V_T para V_{DS} de $0,05V$ e $2V$. Porém, em V_{DS} de $4V$, em cada aumento de W , maior a discrepância entre o padrão dos valores de V_T perante as temperaturas. Para V_{DS} de $0,05V$ e $2V$, o padrão definiu-se, em ordem crescente de V_T , 25°C e 100°C e 200°C .

O aumento do V_T com a redução da temperatura pode ser explicado visto sua proporcionalidade com a variação do potencial de Fermi ϕ_F com a temperatura (ELEWA et al., 1990; BERGAMIM et al., 2021).

3.4.2 TRANSCONDUTÂNCIA

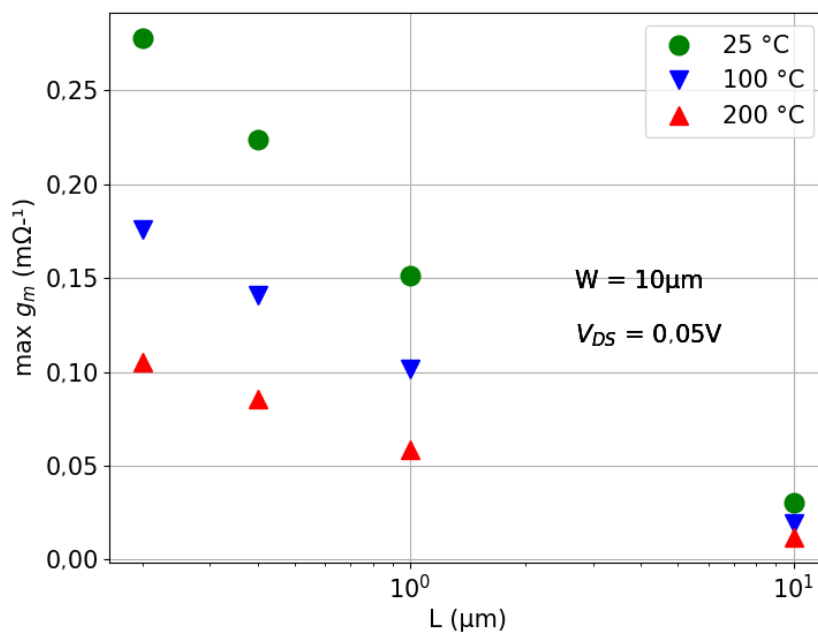
A análise da transcondutância máxima é um parâmetro importante para a avaliação do dispositivo, visto que determina a mobilidade de baixo campo dos elétrons, ou seja, a facilidade de fluidez dos elétrons no canal do transistor (BERGAMIM et al., 2021). Os valores máximos da transcondutância versus o comprimento do canal para larguras de canal de 1 e 10 μm e operação com $V_{DS} = 0,05\text{V}$, são mostrados nas Figuras 56 e 57, respectivamente.

Figura 56 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 1 μm e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

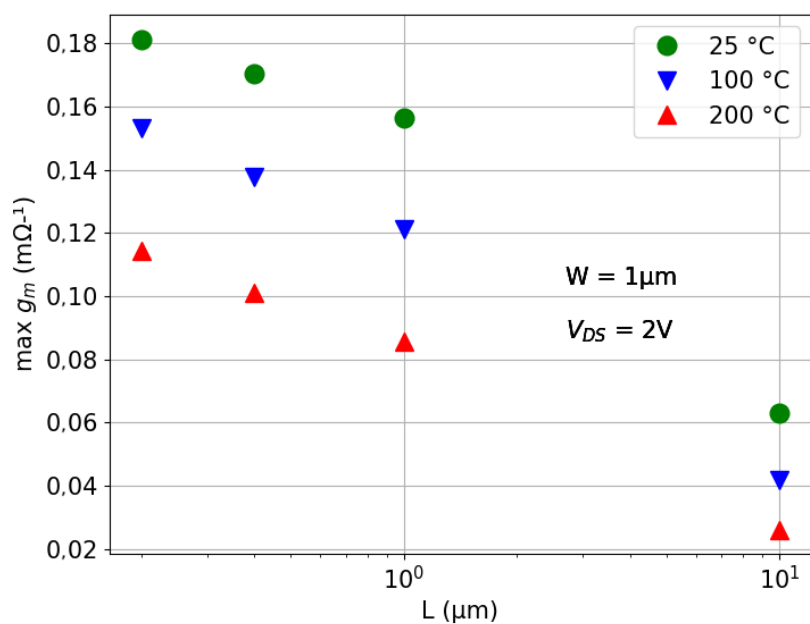
Figura 57 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 0,05\text{V}$.



Fonte – Autor.

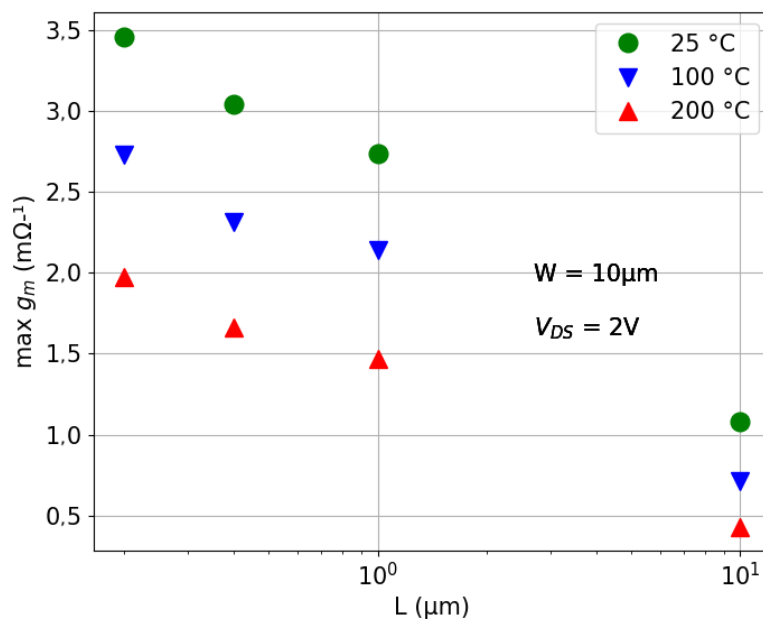
Da mesma forma, os valores máximos da transcondutância versus comprimento do canal para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$, com $V_{DS} = 2\text{V}$, são mostrados nas Figuras 58 e 59, respectivamente.

Figura 58 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

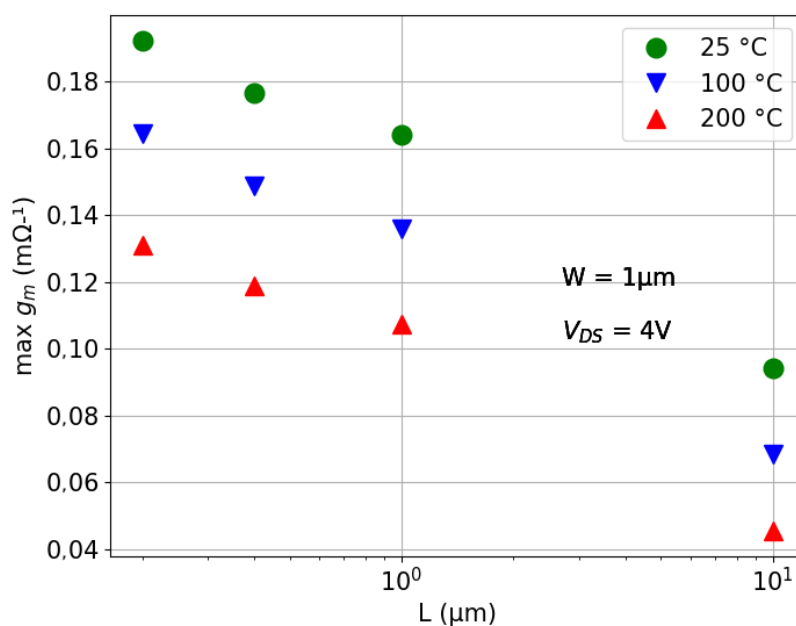
Figura 59 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 2\text{V}$.



Fonte – Autor.

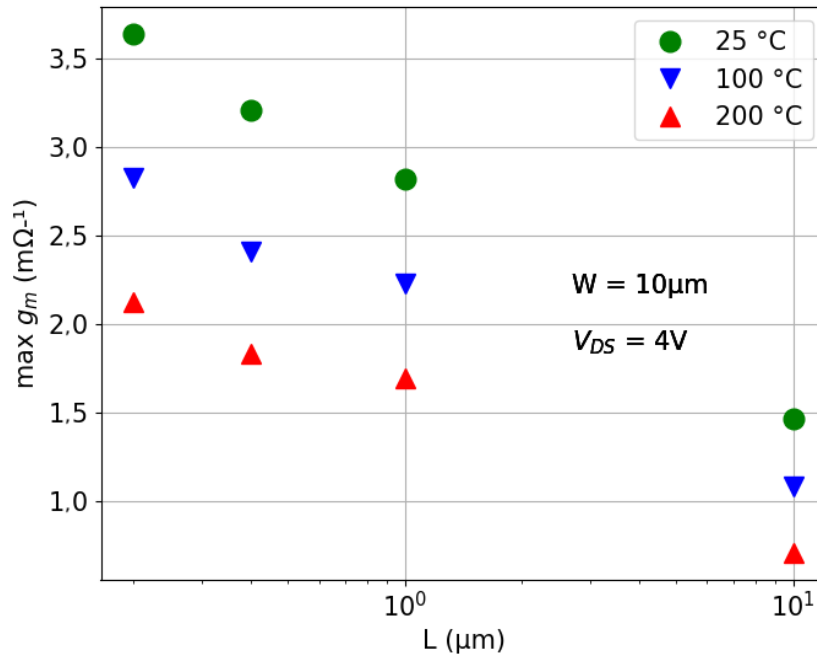
Finalmente, os valores máximos da transcondutância versus comprimento do canal (L) para larguras de canal de 1 e $10\mu\text{m}$, com $V_{DS} = 4\text{V}$, são mostrados nas Figuras 60 e 61, respectivamente.

Figura 60 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $1\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

Figura 61 - Transcondutância máxima versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$ e $V_{DS} = 4\text{V}$.



Fonte – Autor.

Observa-se que, com o aumento do comprimento do canal, independente da região de operação do transistor ($V_{DS} = 0,05, 2$ ou 4V) o valor da transcondutância máxima diminui.

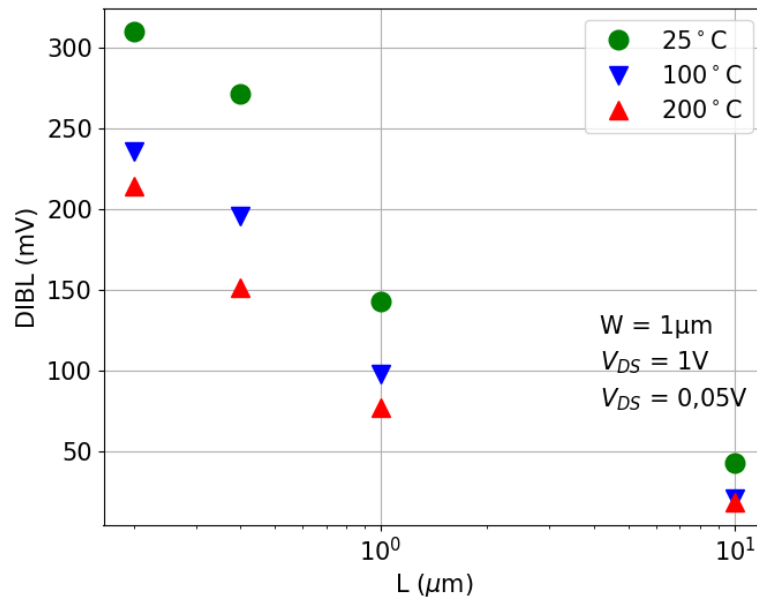
Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual de g_m conforme aumento de W . Para $W = 1\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$, o padrão definiu-se, em ordem crescente de g_m , 25°C e 100°C e 200°C .

Outra figura interessante a ser mostrada é como a eficiência da transcondutância é afetada pela temperatura de operação. Em temperaturas elevadas, a transcondutância diminui devido à menor mobilidade e velocidade de saturação (ISLAM et al., 2010; (BERGAMIM et al., 2021).

3.4.3 REDUÇÃO DA BARREIRA INDUZIDA PELO DRENO (DIBL)

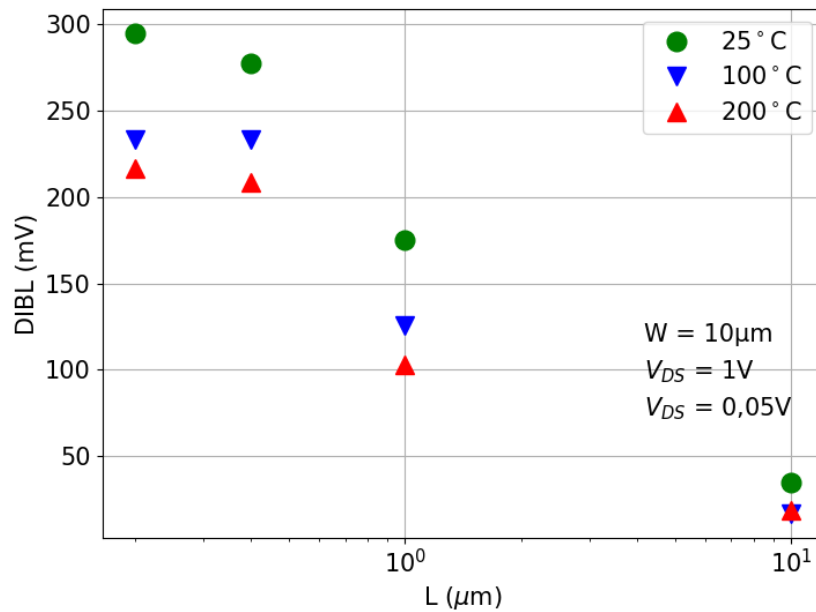
As Figuras 62 e 63 apresentam o DIBL em função do comprimento do canal para os transistores HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas. O comportamento desses dispositivos foi medido em duas diferentes polarizações de dreno; $V_{D1} = 0,05\text{V}$ e $V_{D2} = 1\text{V}$.

Figura 62 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 1V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

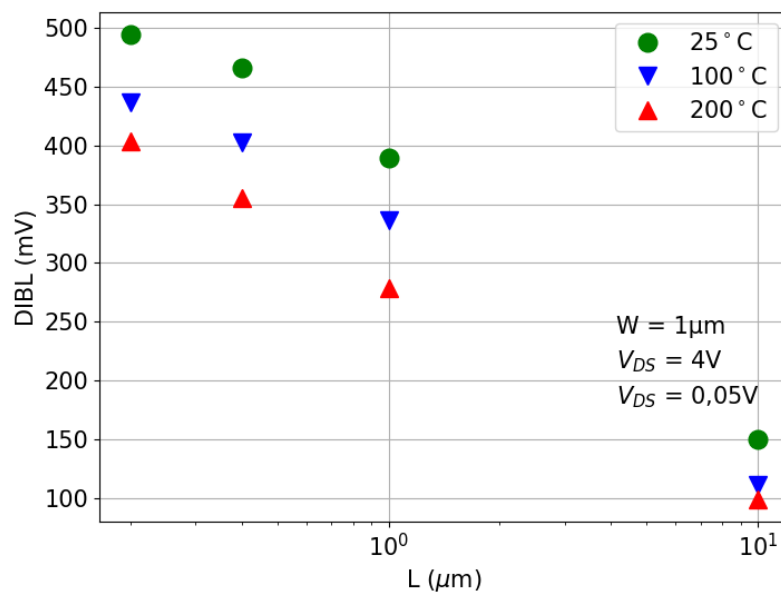
Figura 63 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 1V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

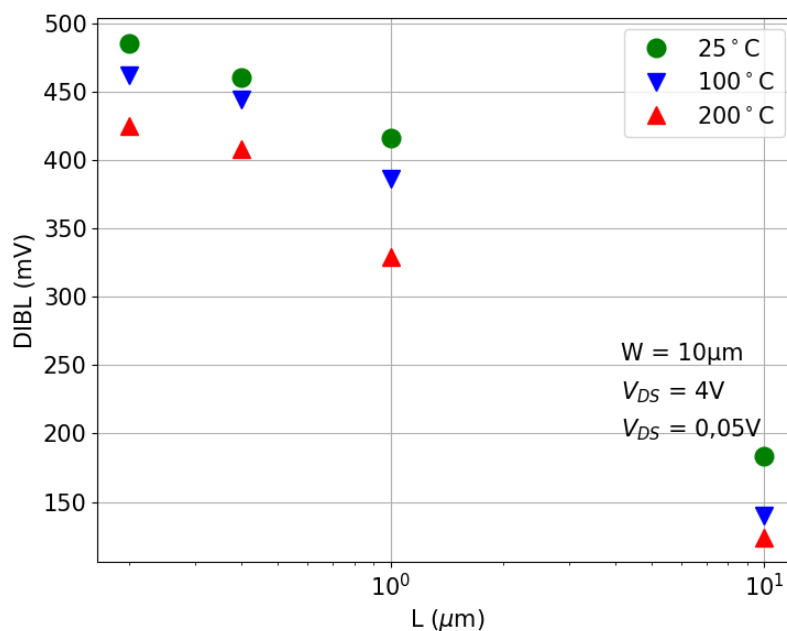
Da mesma forma, as Figuras 64 e 65 apresentam o DIBL em função do comprimento do canal para os transistores HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas. O comportamento desses dispositivos foi medido nas seguintes polarizações de dreno; $V_{D1} = 0,05\text{V}$ e $V_{D2} = 4\text{V}$.

Figura 64 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 4V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Figura 65 - Curvas experimentais do DIBL para dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN na tensão de polarização de dreno de 4V e 0,05V em função do comprimento do canal perante diferentes temperaturas para $W = 10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Com a diminuição do comprimento do canal, os valores de DIBL aumentam, visto que parte das cargas do canal passam a ser controladas pelo dreno (ANDRADE, 2012). Nos dispositivos analisados, verificou-se que houve uma melhora no valor de DIBL (diminuição) com o aumento do comprimento de canal, conforme esperado.

Nota-se que o DIBL é maior para menores valores de temperatura. Isso pode ser devido ao método de extração de tensão de limiar empregado.

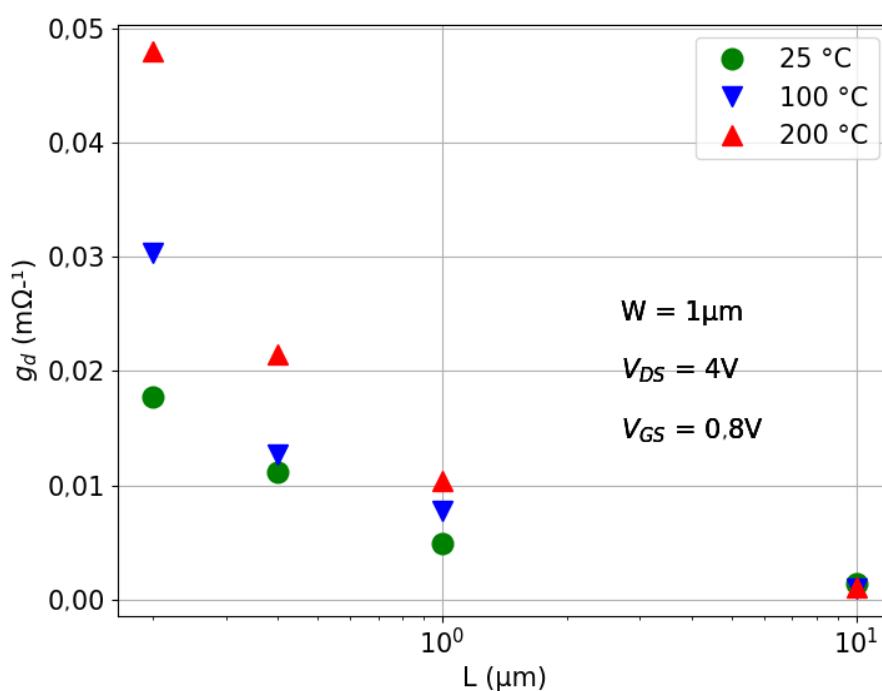
3.4.4 CONDUTÂNCIA DE SAÍDA

Os valores de condutância de saída versus comprimento do canal para larguras de canal de 1 e 10 μm , com $V_{DS} = 4\text{V}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$, são mostrados nas Figuras 66 e 67, respectivamente.

Similar à transcondutância, o valor absoluto da condutância de saída diminui à medida que o comprimento do canal aumenta. Porém, em relação à temperatura, é possível observar um comportamento contrário ao anterior. Conforme há aumento de temperatura, mais elétrons na banda de valência ficam excitados e saltam para a banda de condução e, portanto, a condutância aumenta, resultando na diminuição da resistência (BERGAMIM et al., 2021). Assim, a condutividade aumenta e a resistividade diminui.

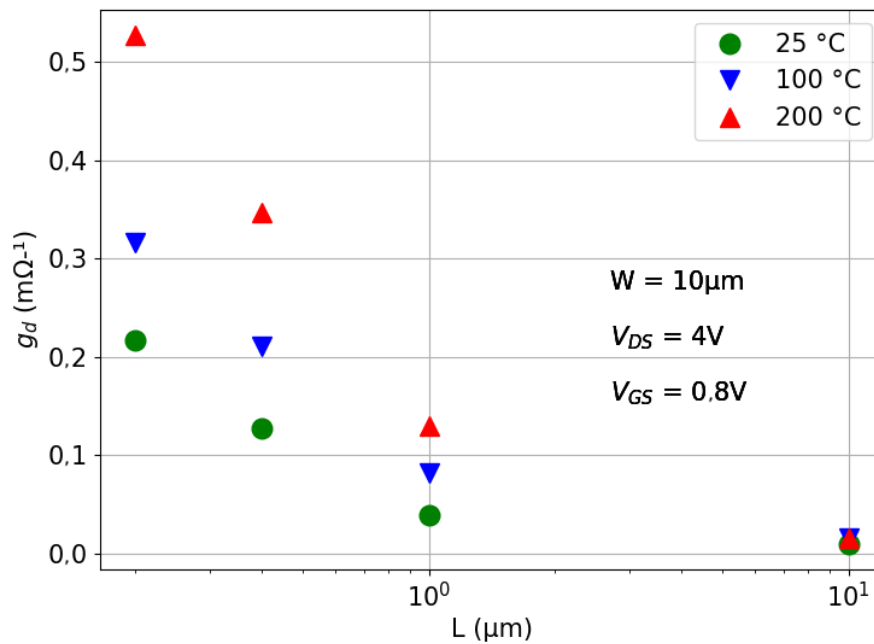
Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual de g_d conforme aumento de W .

Figura 66 – Condutância de saída versus L para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de 1 μm , $V_{DS} = 4\text{V}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$.



Fonte – Autor.

Figura 67 - Condutância de saída versus L para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas, largura do canal de $10\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e $V_{GS} = 0,8\text{V}$.



Fonte – Autor.

Similar à transcondutância, o valor absoluto da condutância de saída diminui à medida que o comprimento do canal aumenta. Porém, em relação à temperatura, é possível observar um comportamento contrário ao anterior. Conforme há aumento de temperatura, mais elétrons na banda de valência ficam excitados e saltam para a banda de condução e, portanto, a condutância aumenta, resultando na diminuição da resistência (BERGAMIM et al., 2021). Assim, a condutividade aumenta e a resistividade diminui.

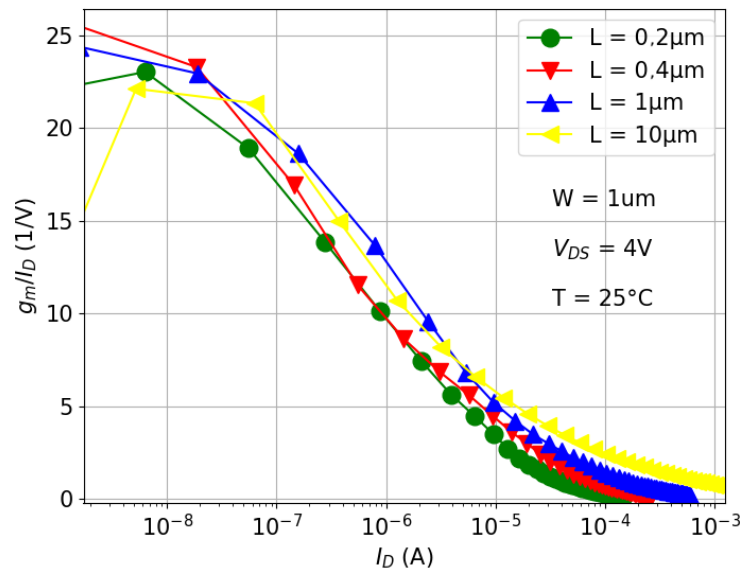
Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual de g_d conforme aumento de W .

3.5 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

3.5.1 EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO

A eficiência do transistor (g_m/I_D) em relação à corrente de porta, para larguras de canal de $1\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$, e temperatura de operação de 25°C é mostrada na Figura 68.

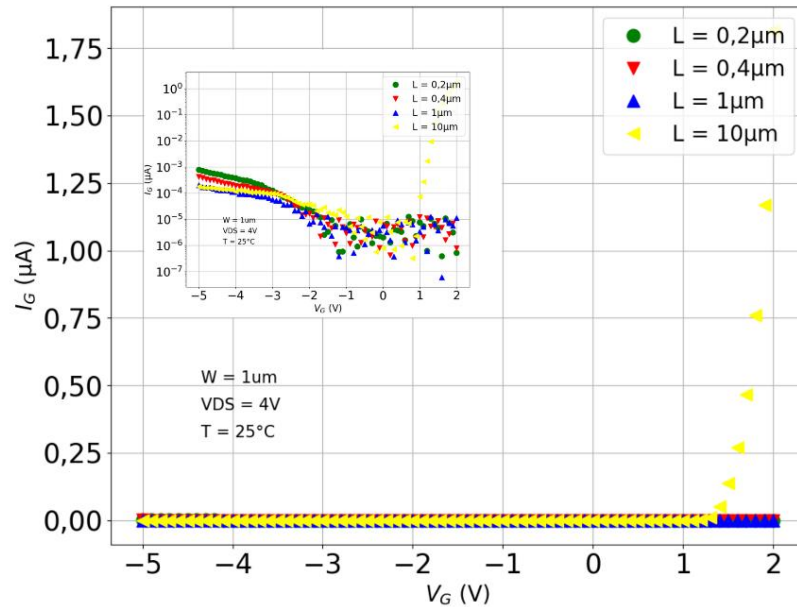
Figura 68 – Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 1μm.



Fonte – Autor.

O dispositivo HEMT mais longo ($L = 10μm$) mostra a relação g_m/I_D mais baixa na região de inversão fraca em comparação com dispositivos com canal mais curto devido à sua maior corrente de porta, como é apresentado na Figura 69.

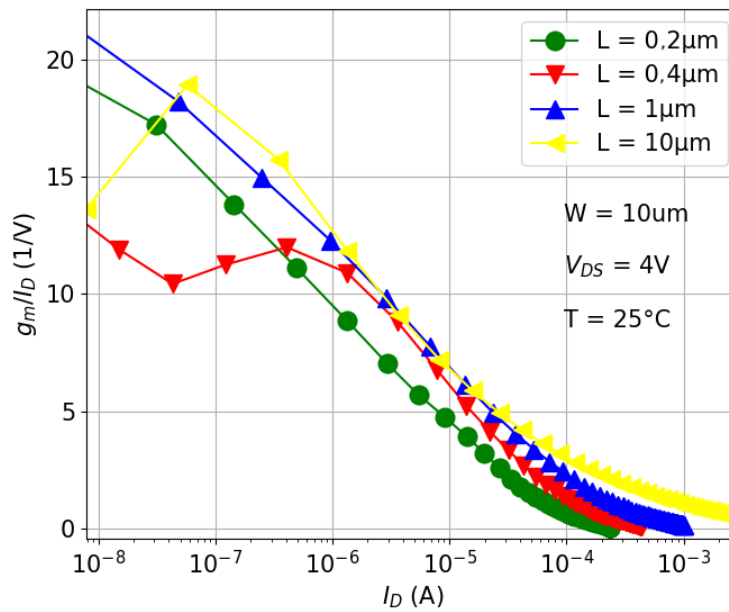
Figura 69 – Corrente de porta (I_G) versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de 1μm.



Fonte – Autor.

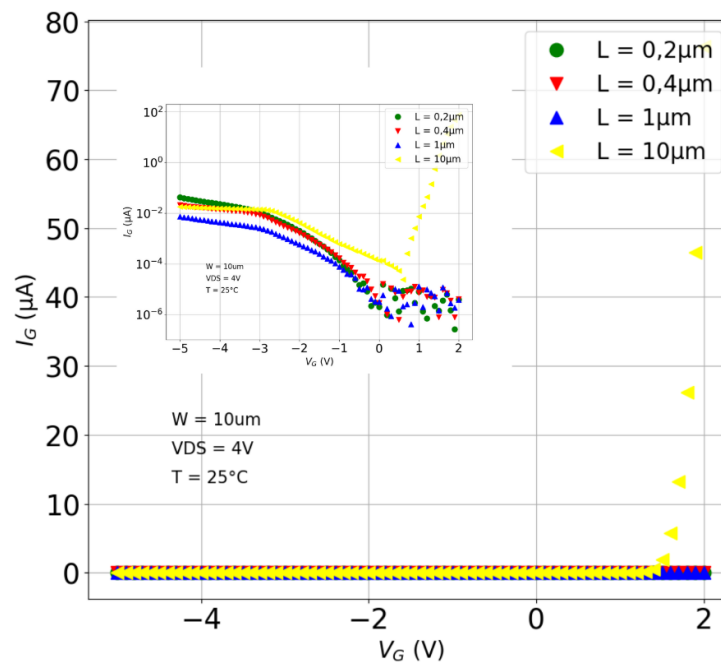
A eficiência do transistor em relação a corrente de dreno, para larguras de canal de $10\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e temperatura de operação de 25°C , assim como sua respectiva corrente de porta versus tensão de porta são mostradas nas Figuras 70 e 71.

Figura 70 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

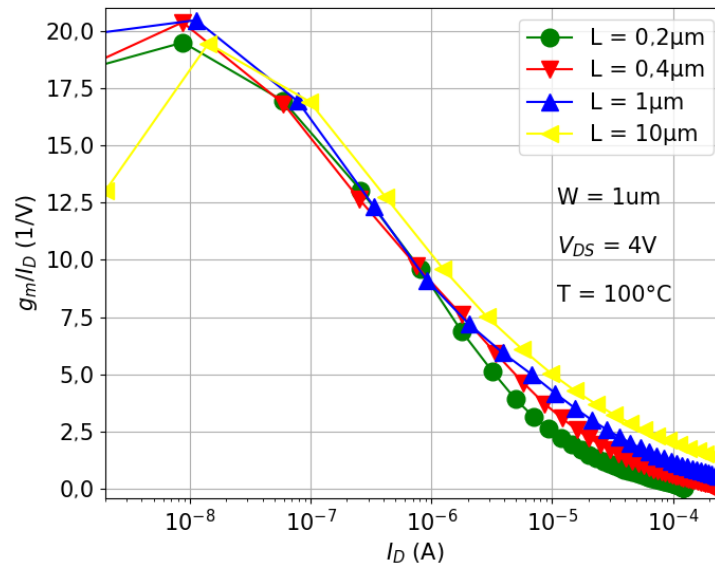
Figura 71 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 25°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

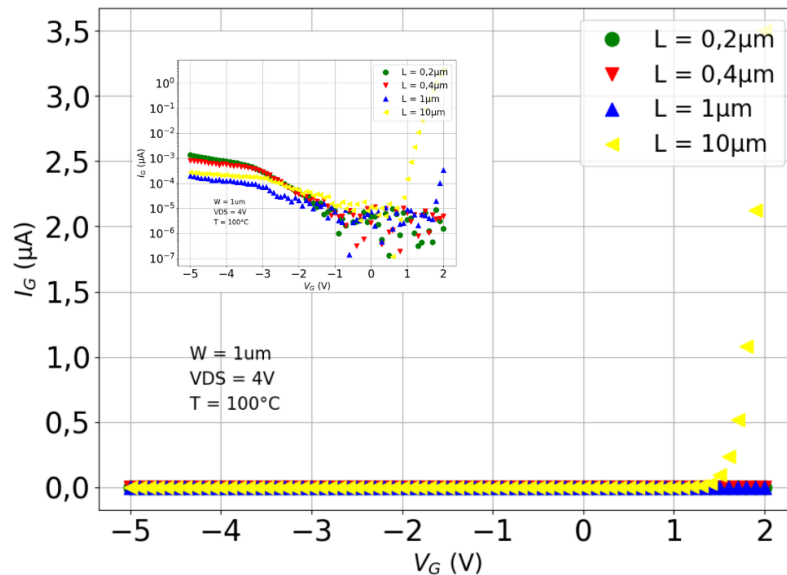
Da mesma forma, a eficiência do transistor em relação a corrente de dreno, para larguras de canal de $1\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e temperatura de operação de 100°C , assim como sua respectiva corrente de porta versus tensão de porta são mostradas nas Figuras 72 e 73.

Figura 72 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de $1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

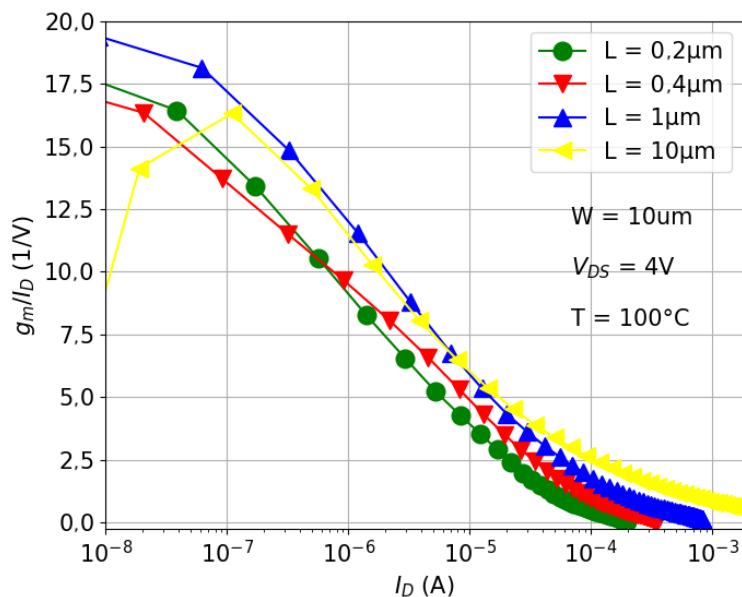
Figura 73 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de $1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

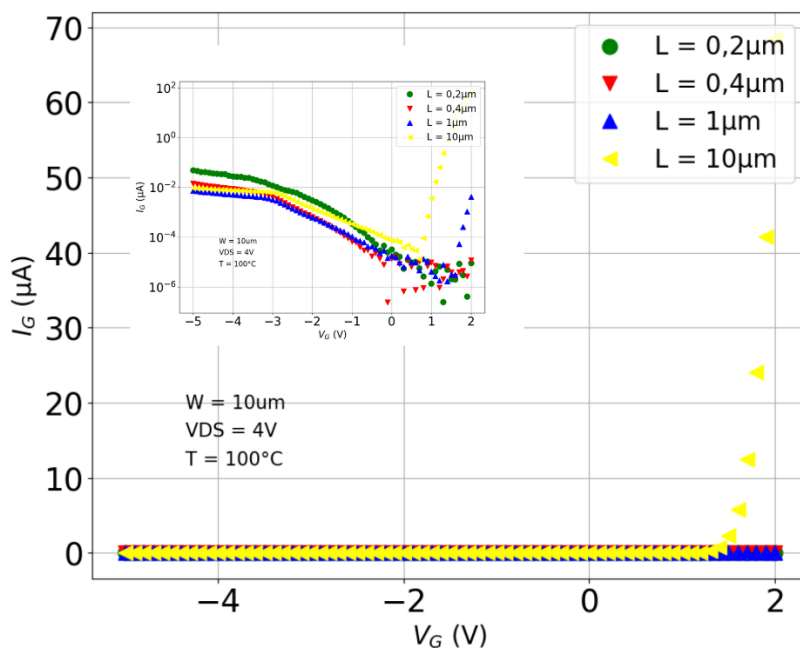
A eficiência do transistor em relação a corrente de dreno, para larguras de canal de $10\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e temperatura de operação de 100°C , assim como sua respectiva corrente de porta versus tensão de porta são mostradas nas Figuras 74 e 75.

Figura 74 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno (I_D) para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

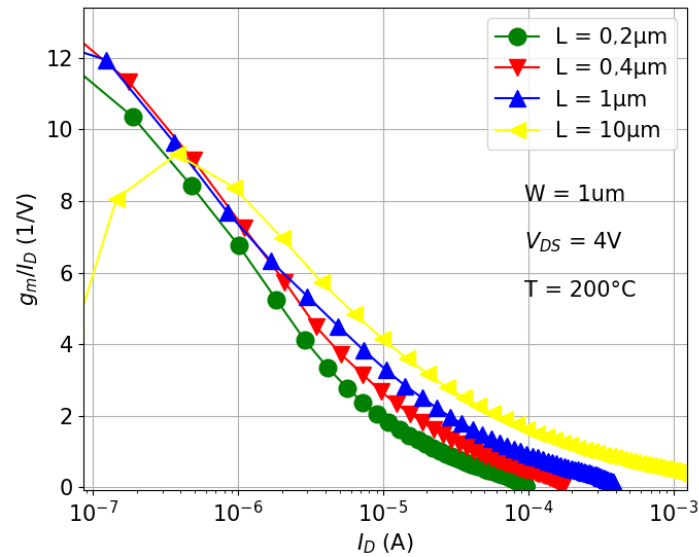
Figura 75 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 100°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

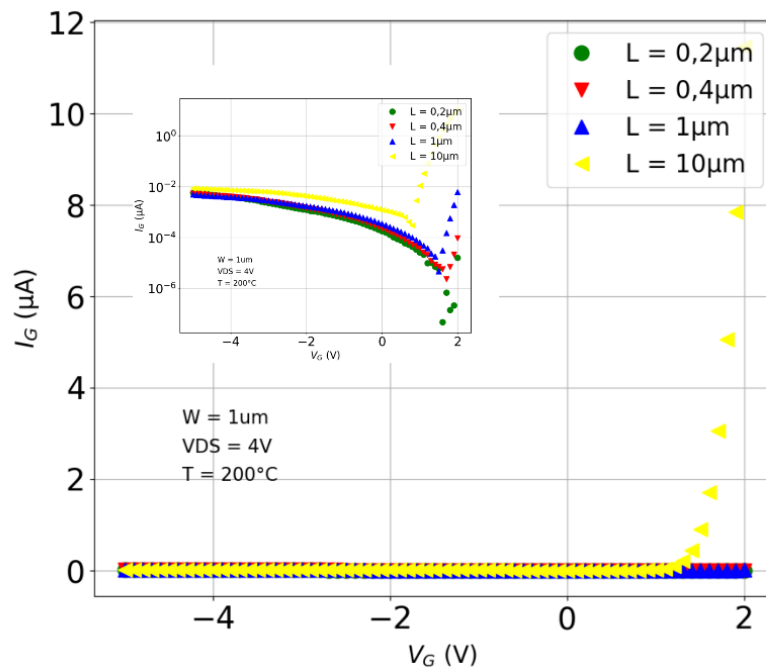
Finalmente, a eficiência do transistor em relação à corrente de dreno, para larguras de canal de $1\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e temperatura de operação de 200°C , assim como sua respectiva corrente de porta versus tensão de porta são mostradas nas Figuras 76 e 77.

Figura 76 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de $1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

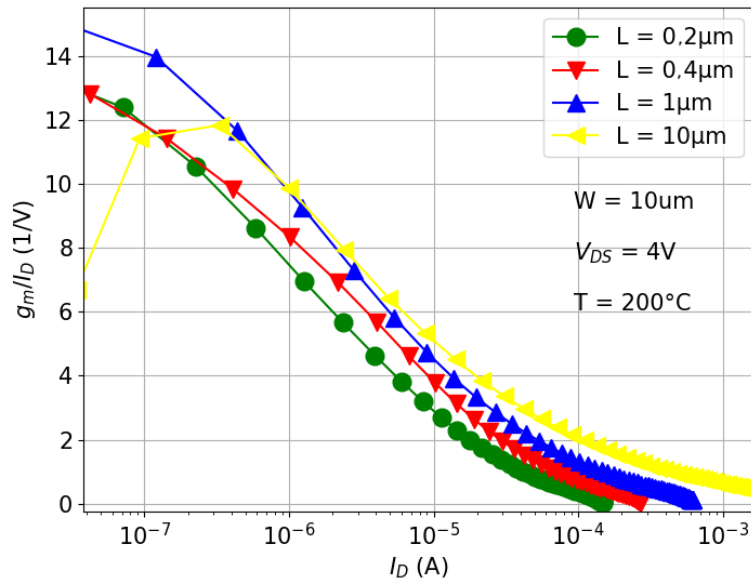
Figura 77 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de $1\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

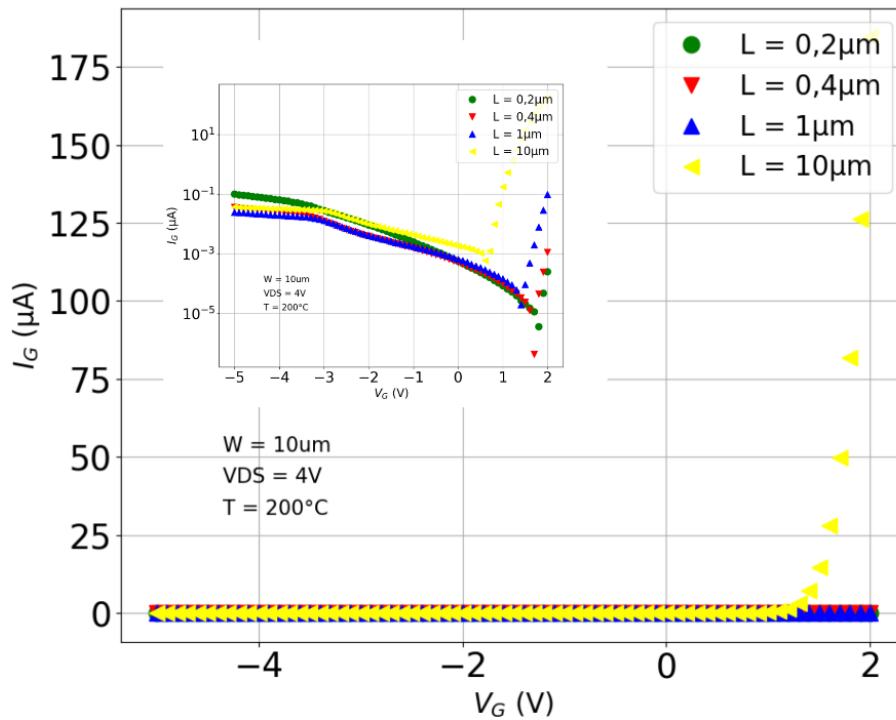
A eficiência do transistor em relação a corrente de dreno, para larguras de canal de $10\mu\text{m}$, $V_{DS} = 4\text{V}$ e temperatura de operação de 200°C , assim como sua respectiva corrente de porta versus tensão de porta são mostradas nas Figuras 78 e 79.

Figura 78 - Eficiência do dispositivo versus corrente de dreno para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

Figura 79 - Corrente de porta versus tensão na porta para HEMTs AlGaIn/GaN em temperatura de operação de 200°C e largura do canal de $10\mu\text{m}$.



Fonte – Autor.

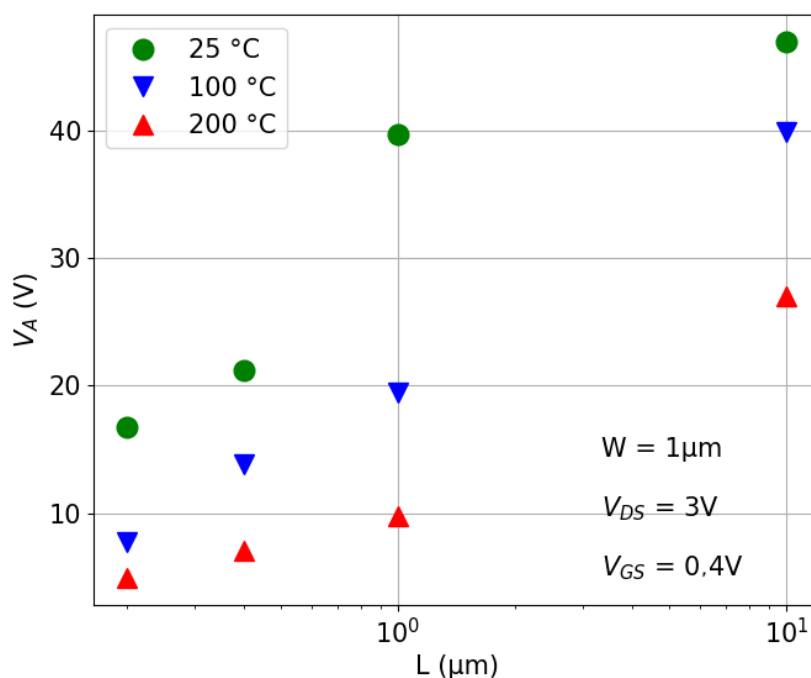
Verifica-se que, com a alteração na largura do canal, não há mudança consideráveis no valor da eficiência do dispositivo, todavia, com o incremento na temperatura, é observado um menor o valor absoluto de g_m/I_D e, conseqüentemente, menor sua eficiência. Nota-se que o g_m/I_D máximo ocorre na região de inversão fraca.

O nível de g_m/I_D está diretamente relacionado com a oscilação de V_T e sublimiar. Desta forma, um dispositivo mais longo apresenta um maior acoplamento eletrostático causando uma pequena variação na tensão de limiar, subliminar e eficiência do transistor (GALETI, 2012; BERGAMIM et al., 2021).

3.5.2 TENSÃO EARLY

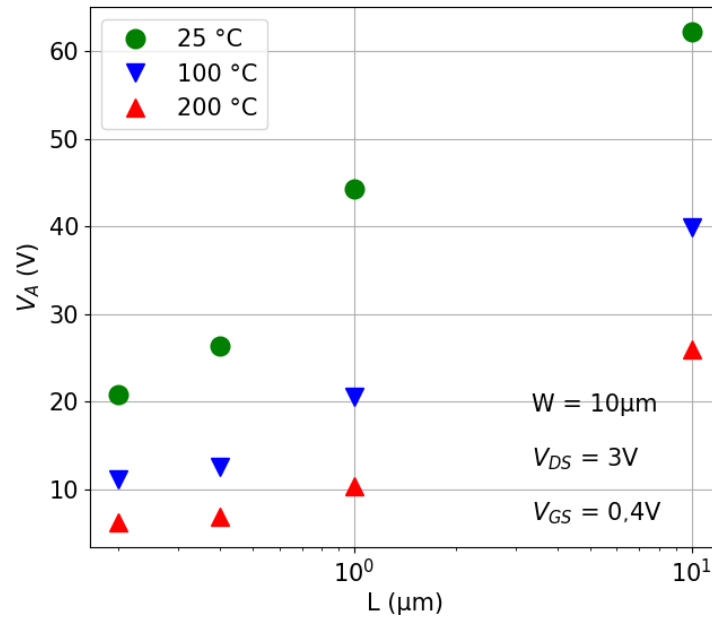
Os valores experimentais de tensão de Early versus comprimento do canal para larguras de canal de 1 e 10 μm , $V_{DS} = 3\text{V}$ e $V_{GS} = 0,4\text{V}$ são mostrados nas Figuras 80 e 81, respectivamente.

Figura 80 - Tensão Early versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 1 μm .



Fonte – Autor.

Figura 81 - Tensão Early versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 10 μ m.

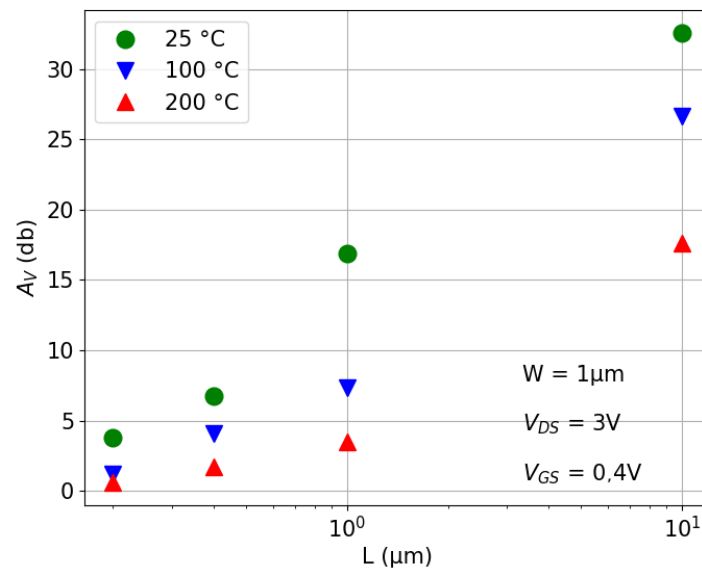


Fonte – Autor.

3.5.3 GANHO INTRÍNSECOS

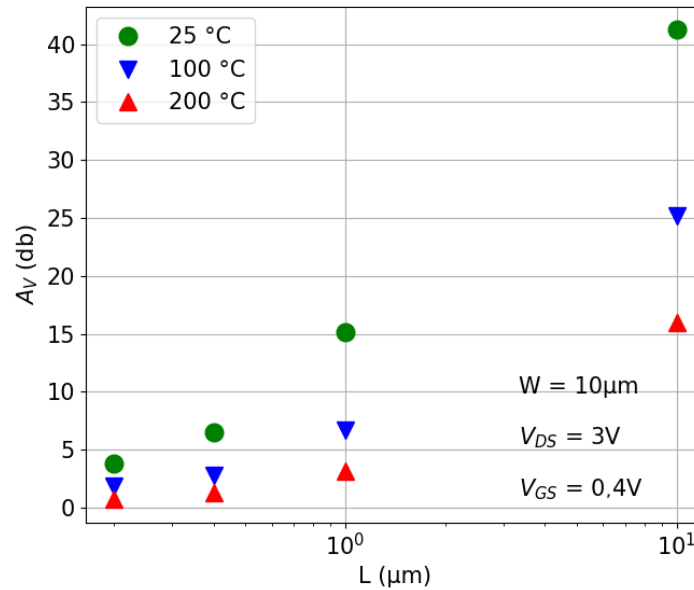
Em vista dos valores experimentais de ganho intrínseco versus comprimento do canal para larguras de canal de 1 e 10 e V_{DS} = 4V, são mostrados nas Figuras 82 e 83, respectivamente.

Figura 82 - Ganho intrínseco versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 1 μ m.



Fonte – Autor.

Figura 83 - Ganho intrínseco versus comprimento do canal para HEMTs AlGaIn/GaN em diferentes temperaturas e largura de canal de 10 μ m.



Fonte – **Autor**.

Um aumento de V_A e A_V é observado para os canais mais longos e esse comportamento pode estar relacionado à menor penetração do campo no dreno (MILENE et al., 2012). Em temperaturas mais altas ocorre um aumento da condutância de saída, resultando numa diminuição do valor de V_A e A_V com o aumento da temperatura (BERGAMIM et al., 2021).

Em relação à variação da largura do canal, verifica-se um aumento gradual tanto de V_A , quanto de A_V conforme aumento de W .

3.6 ANÁLISE DE RUÍDO DE BAIXA FREQUÊNCIA

As medições de ruído foram realizadas no wafer em diferentes temperaturas variando entre 5°C e 100°C em operação linear em um V_D de polarização de dreno de 50mV usando o Analisador de Ruído de Baixa Frequência Avançado da Keysight (A-LFNA E4727A).

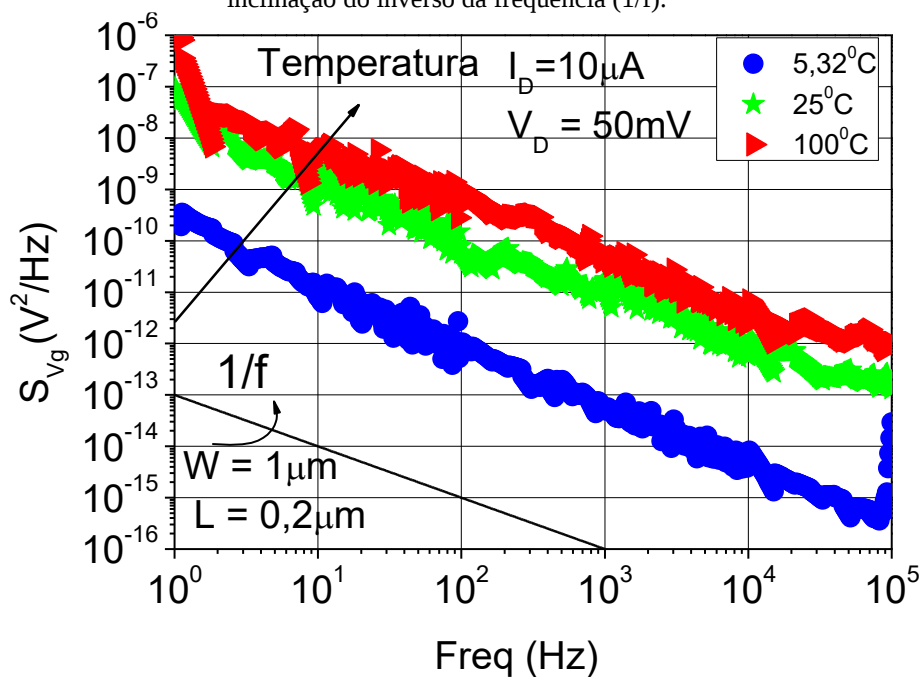
3.6.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA DE RUÍDO

As características de ruído LF em HEMTs AlGaIn/GaN podem ser explicados utilizando os modelos de Carrier Number Fluctuations (CNF) e Hooge Mobility Fluctuations (HMF). O modelo CNF explica as flutuações no número da portadora devido às interações das portadoras do canal com armadilhas no dielétrico da porta e/ou no corpo do semiconductor, enquanto o modelo HMF explica as flutuações na mobilidade dos portadores no canal devido ao espalhamento das cargas móveis (ANDRADE et al., 2021).

Em ambos, o ruído LF pode ser caracterizado com o modelo de flutuações de mobilidade correlacionadas (CMF), o que explica que as flutuações causadas pela captura/retirada de portadoras no canal podem causar simultaneamente as flutuações na mobilidade dos portadores (GHIBAUDO et al., 1991)

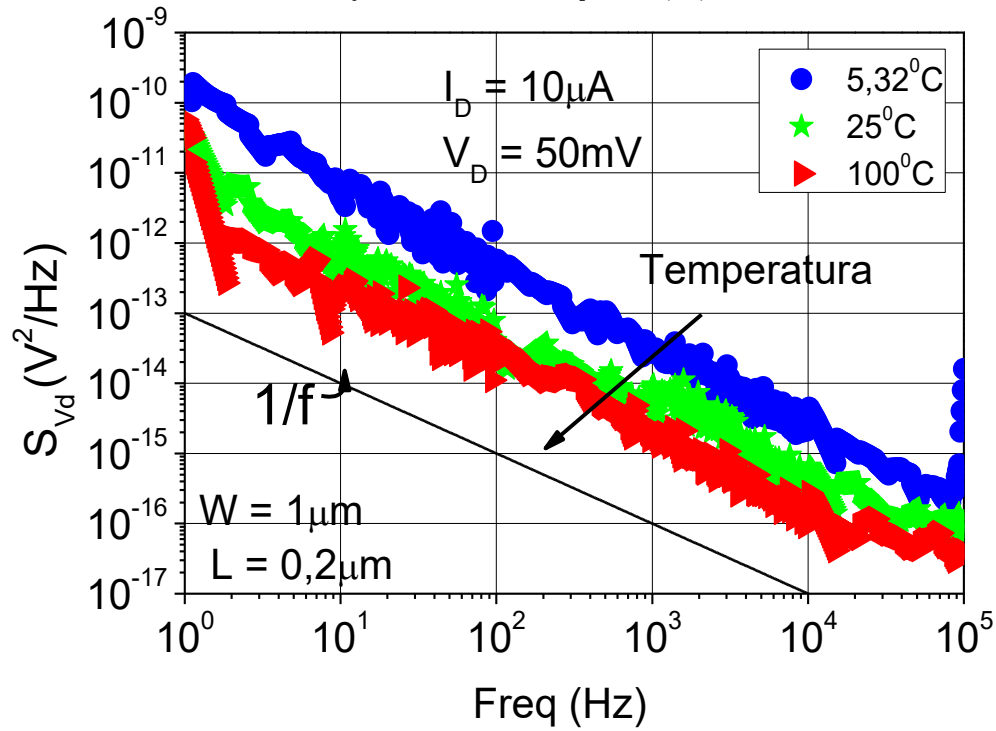
Os espectros PSD de ruído LF correspondentes são representados nas Figuras 84 a 89.

Figura 84 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).



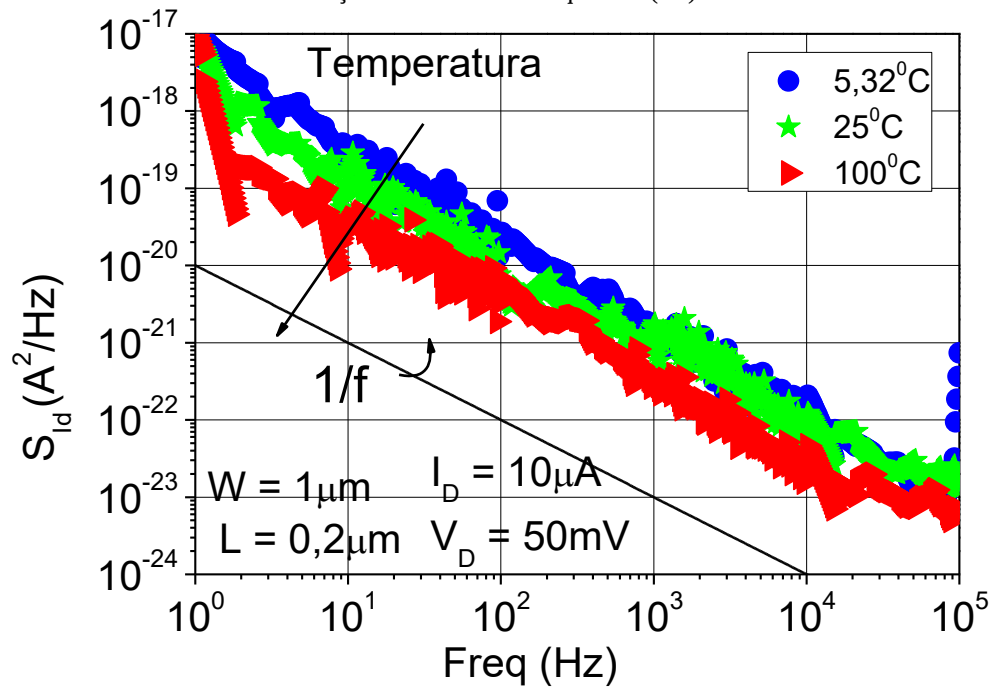
Fonte – Autor.

Figura 85 - Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).



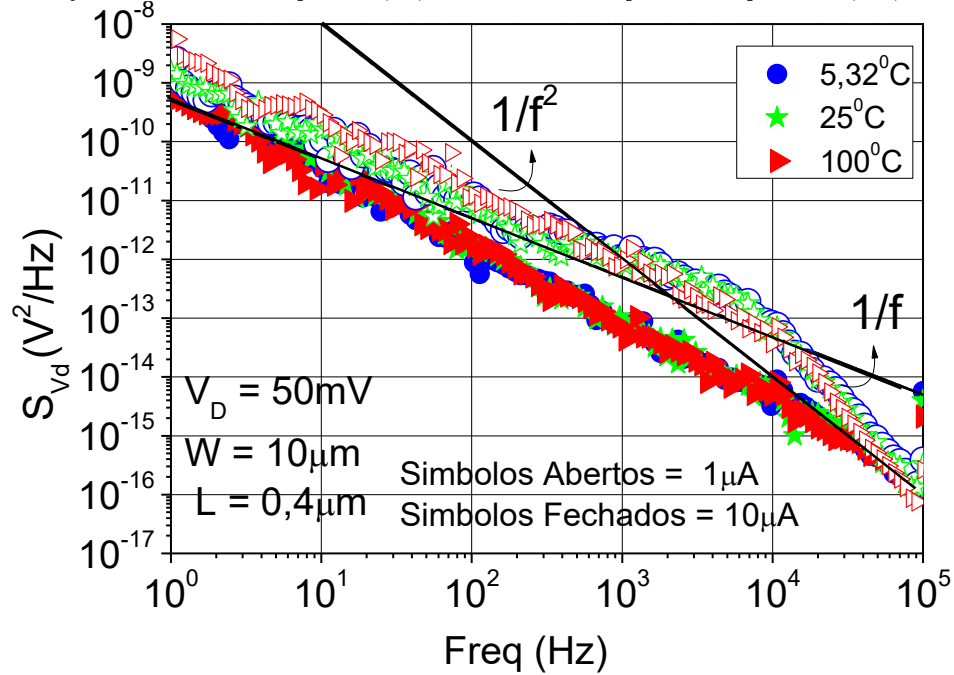
Fonte – Autor.

Figura 86 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 1\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,2\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$).



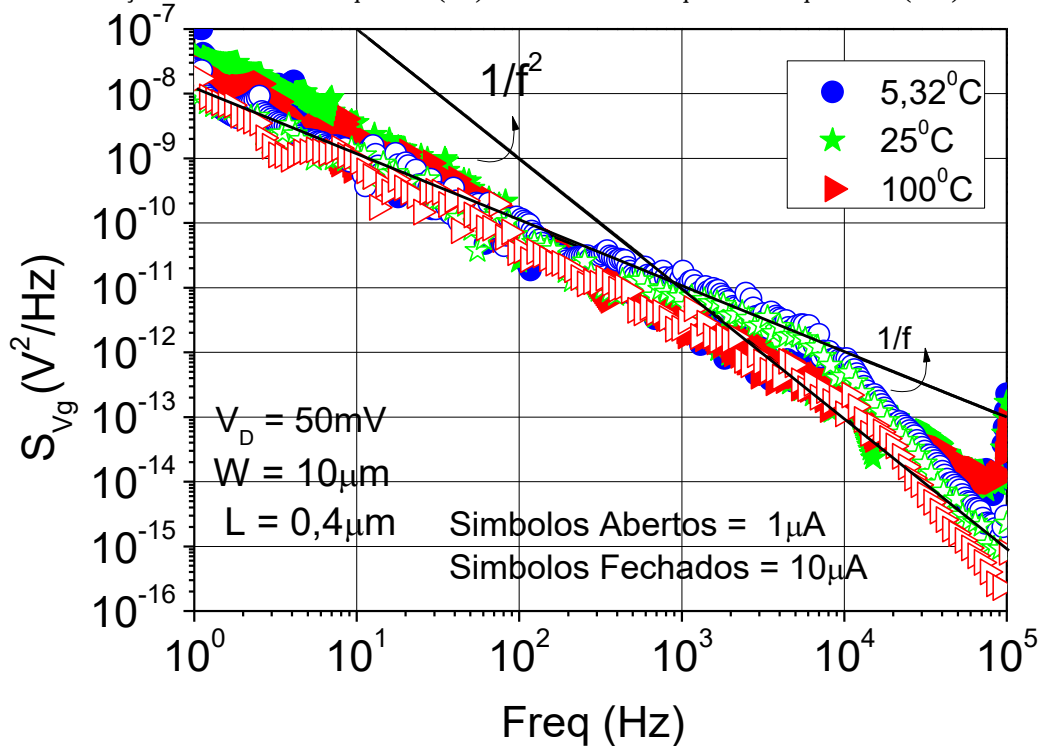
Fonte – Autor.

Figura 87 - Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 1\text{ }\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\text{ }\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\text{ }\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).



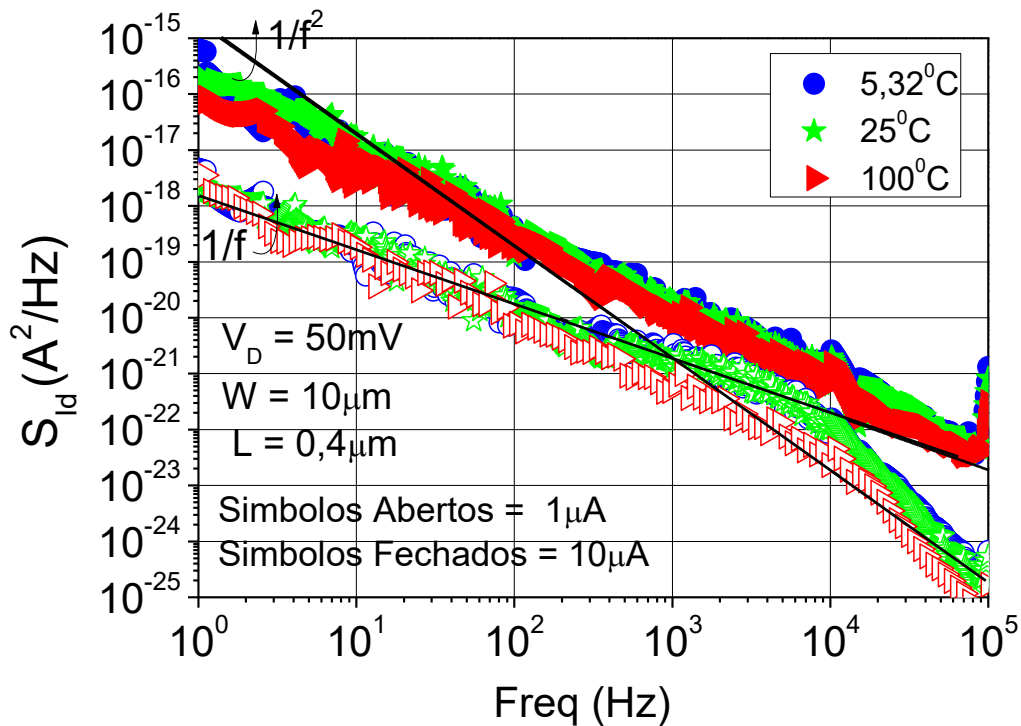
Fonte – Autor.

Figura 88 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 1\text{ }\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\text{ }\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\text{ }\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).



Fonte – Autor.

Figura 89 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $I_D = 10\mu\text{A}$ de um HEMT com largura $W = 10\mu\text{m}$ e comprimentos de canal $L = 0,4\mu\text{m}$ em diferentes temperaturas. A linha preta representa a inclinação do inverso da frequência ($1/f$) e o inverso da frequência ao quadrado ($1/f^2$).



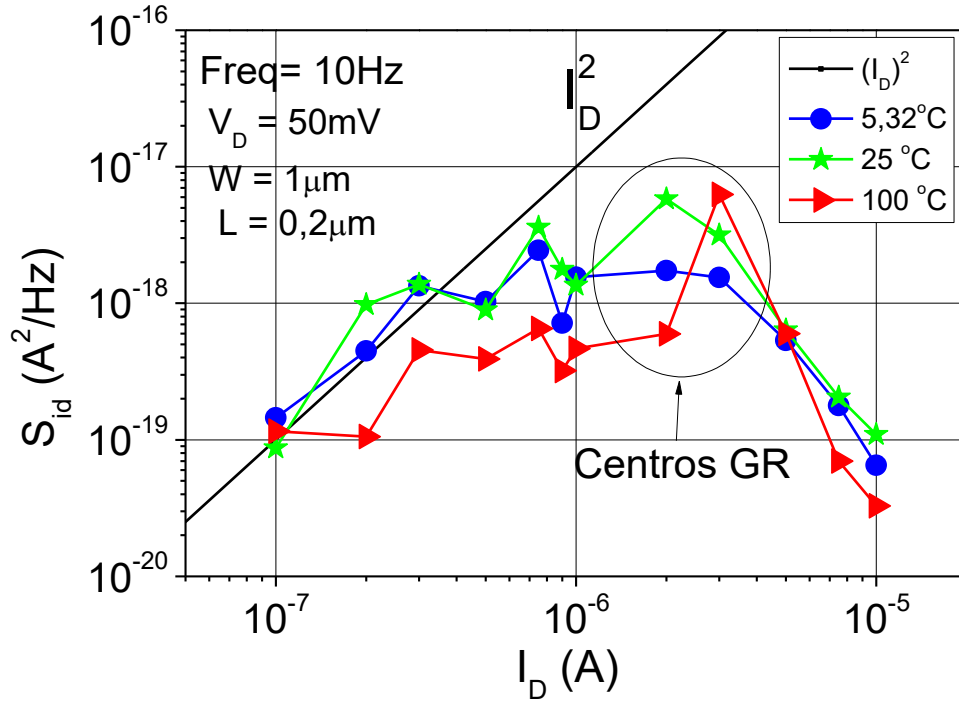
Fonte – Autor.

Para dispositivos menores e curtos ($W = 1\mu\text{m}$ e $L = 0,2\mu\text{m}$), a tensão de dreno e o ruído de corrente de dreno são menores em alta temperatura. No entanto, o ruído da tensão da porta é maior quando a temperatura aumenta devido ao aprisionamento na barreira AlGaIn (ANDRADE et al., 2021).

Para dispositivos mais longos ($W = 10\mu\text{m}$ e $L = 0,4\mu\text{m}$), a superposição de ruído $1/f$ em frequências mais altas e Lorentzian devido ao ruído de geração e recombinação (GR) é mostrada. Além disso, o ruído GR é mais pronunciado para a corrente de dreno mais baixa ($I_D = 1\mu\text{A}$) indicando a possibilidade de haver um menor número de portadores nas proximidades do canal GaN dos HEMTs (BOUDIER, 2016) que preenchem os centros de GR.

O comportamento típico da densidade espectral de ruído da corrente de dreno (S_{Id}) versus I_D em dispositivos HEMT é representado na Figura 90, onde o S_{Id} segue uma lei quadrática com a corrente de dreno para baixos valores de corrente de dreno.

Figura 90 – Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.



Fonte – Autor.

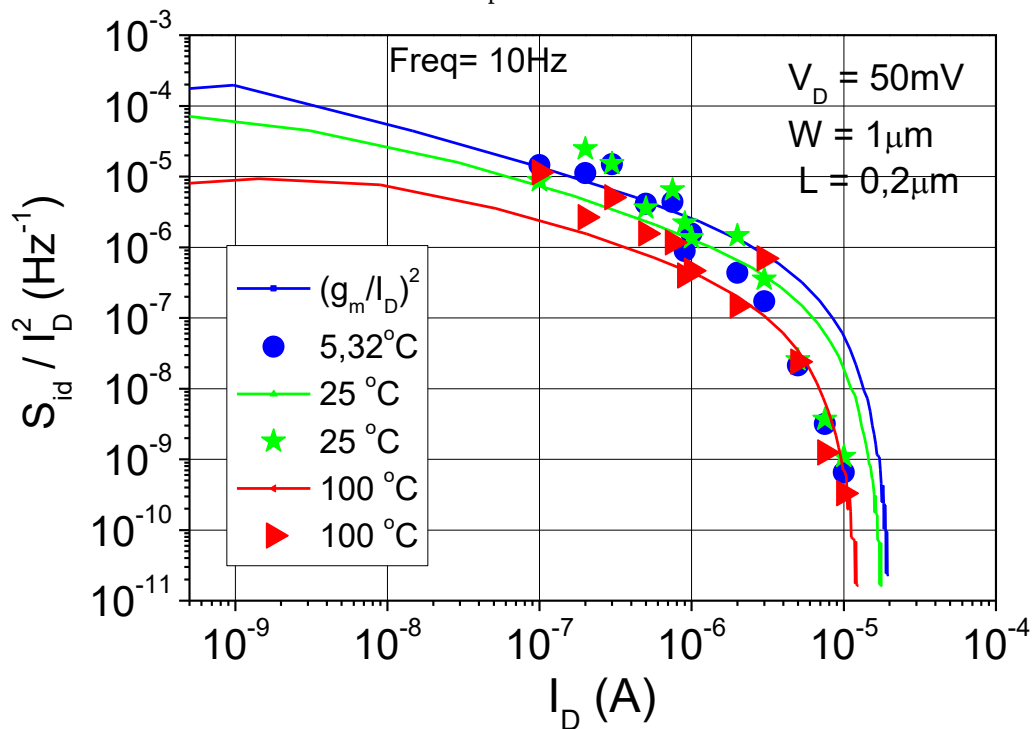
Também há centros de ruído GR nas curvas S_{id} vs. I_D , indicando, a existência de flutuações dos portadores de cargas (ANDRADE, 2012); além disso, o ruído é menor em alta temperatura (SIMOEN, 2011).

O espectro de ruído $1/f$ normalizado (S_{id}/I_D^2) em diferentes temperaturas em função da corrente de dreno é mostrado na Figura 91 juntamente com as curvas $(g_m/I_D)^2$.

Um comportamento semelhante das duas curvas é uma indicação de que o ruído LF é governado por flutuações do número de portadores (CNF). Isso corresponde a um platô em inversão fraca (GHIBAUDO et al., 1991; HASAN et al., 2017; SAI et al., 2019).

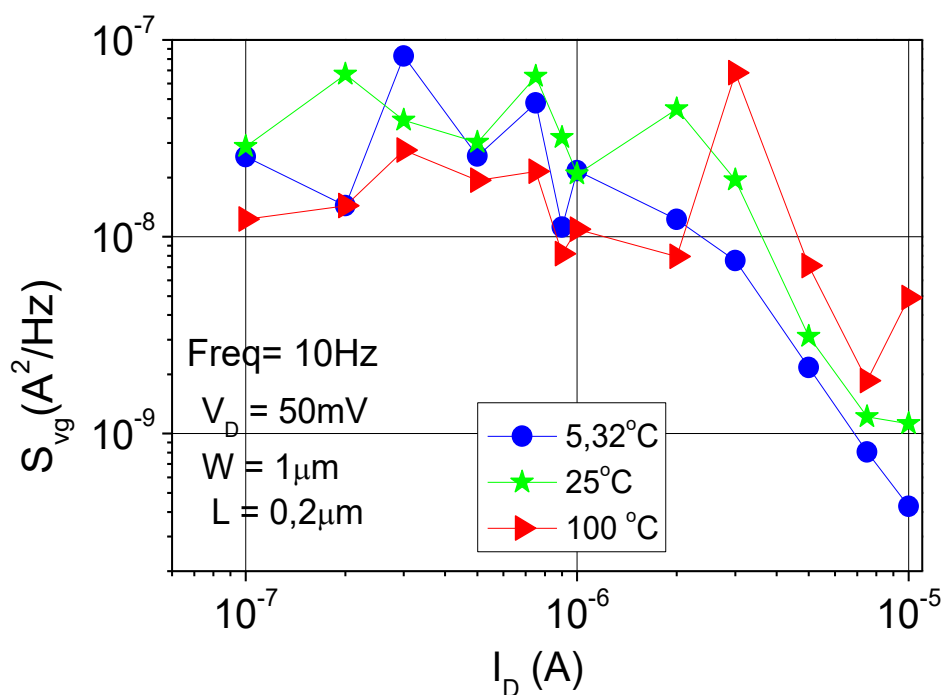
O ruído $1/f$ visto é devido ao aprisionamento na barreira AlGaIn (ANDRADE et al., 2021). A tensão de porta e o PSD do ruído de tensão de dreno (Figuras 92 e 93, respectivamente) seguem o número de flutuações do ruído $1/f$.

Figura 91 – Densidade espectral de ruído normalizada versus corrente de dreno com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas. As linhas são proporcionais com g_m^2/I_D^2 para cada dispositivo.



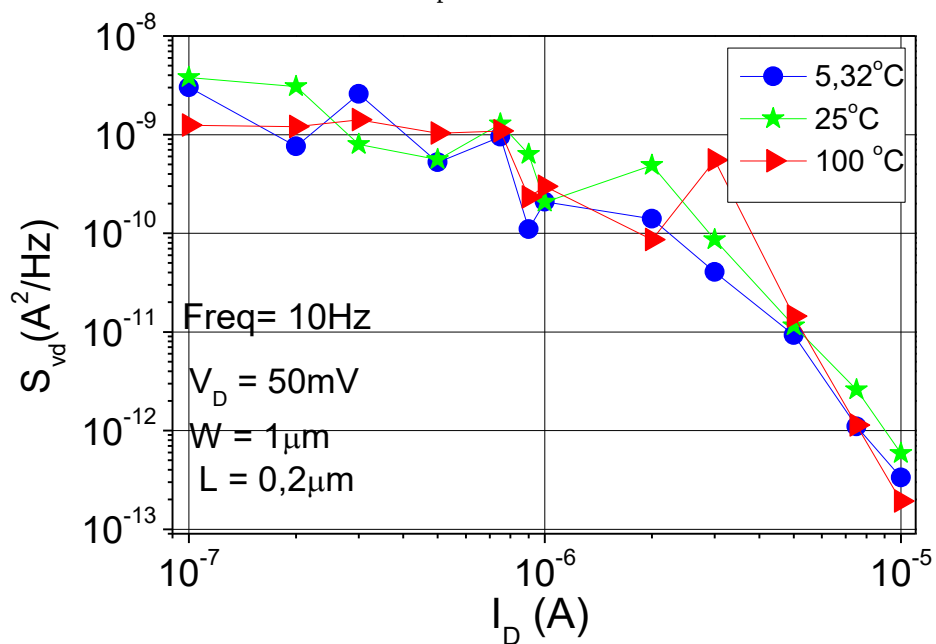
Fonte – Autor.

Figura 92 – Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.



Fonte – Autor.

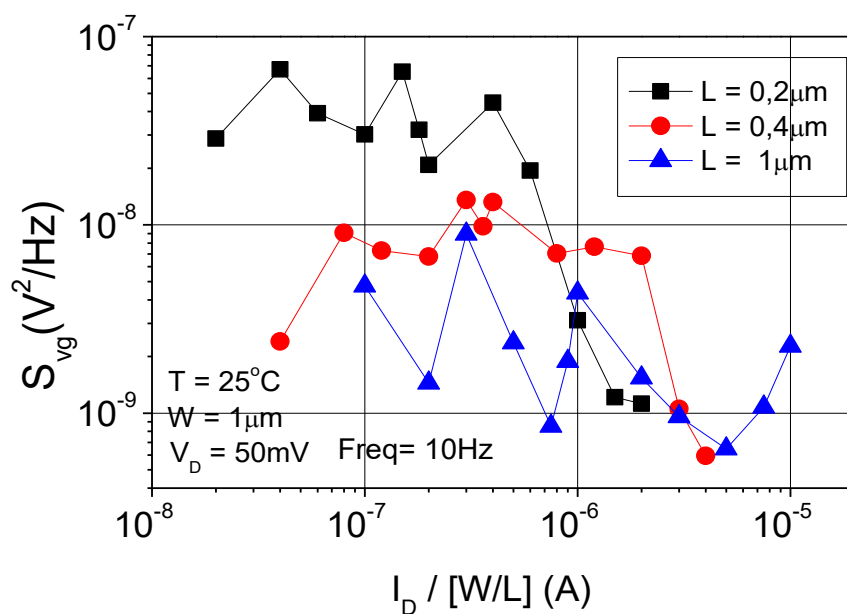
Figura 93 – Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT a diferentes temperaturas.



Fonte – Autor.

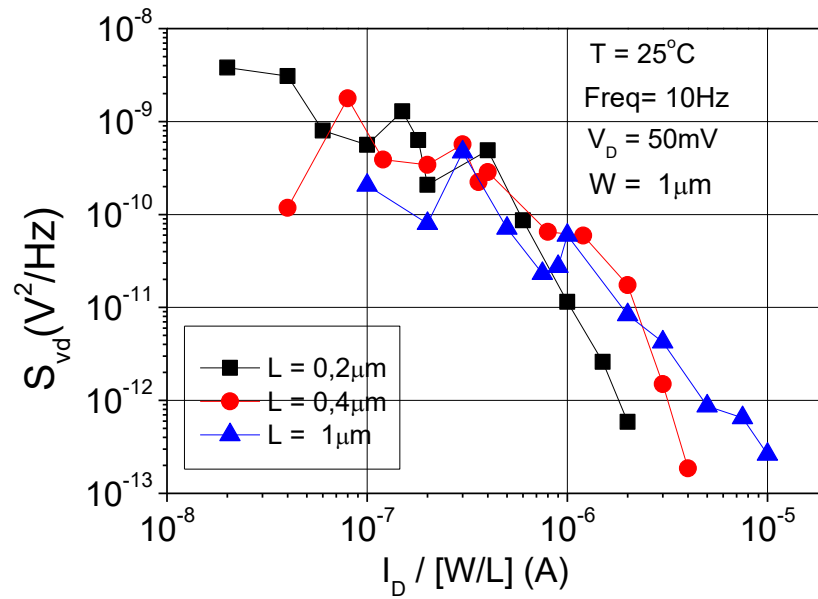
A tensão de porta, a tensão de dreno e o PSD de ruído de corrente de dreno (Figuras 94, 95 e 96, respectivamente) aumentam com a diminuição do comprimento do canal (L) visto que em dispositivos menores um único evento de captura de elétrons pode induzir a flutuações de ruído mais significativas (ANDRADE et al., 2021).

Figura 94 - Ruído de tensão de porta PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C.



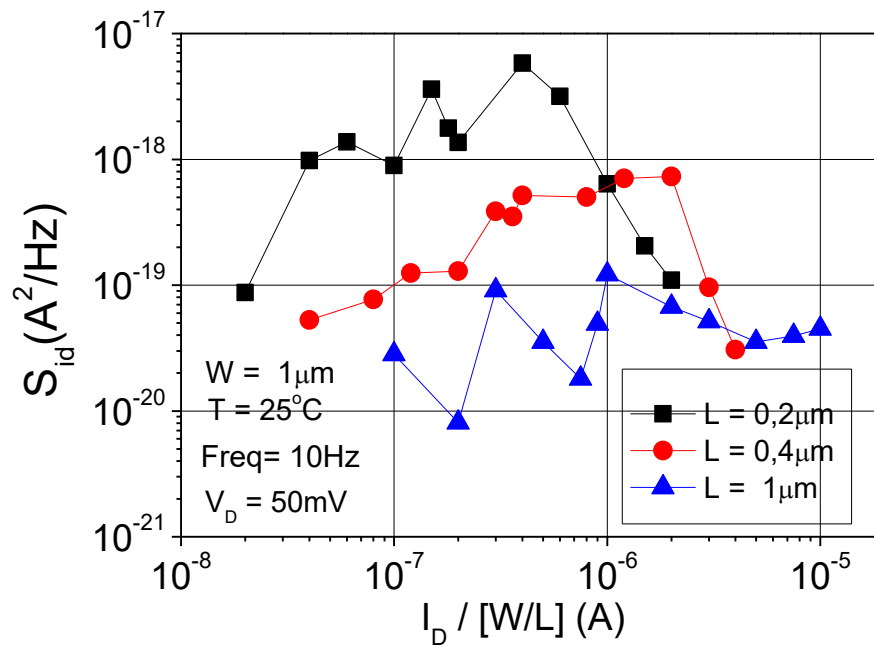
Fonte – Autor.

Figura 95 – Ruído de tensão de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C .



Fonte – Autor.

Figura 96 - Ruído de corrente de dreno PSD com $V_D = 50\text{mV}$ e $f = 10\text{Hz}$ de um HEMT para diferentes comprimentos de canal em 25°C .



Fonte – Autor.

4 CONCLUSÕES DO TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado um estudo comparativo em diferentes temperaturas sobre dispositivos HEMTs AlGaIn/GaN fabricados sobre lâminas de silício de 200mm <111> e construídos em diferentes dimensões.

Primeiramente, foi realizada a análise de dados (resultados das caracterizações elétricas) obtidos no laboratório do imec que englobou um estudo que foi desde as características mais básicas até o comportamento analógico, como também, análises em termos de ruído de baixa frequência.

Referente aos parâmetros analógicos, verificou-se que, quanto mais longo o canal, mais alta a tensão de limiar e mais baixos os valores de transcondutância.

Tendo em vista a análise da temperatura, o mesmo comportamento pôde ser percebido para a maioria das figuras de mérito analisadas (exceto g_d): um aumento na temperatura de operação acarreta uma diminuição nos valores absolutos medidos. Esta tendência pode ser diretamente relacionada à variação do potencial de Fermi com a temperatura. A mudança no V_T está diretamente relacionada ao potencial de Fermi, enquanto a variação em g_m é devido à menor mobilidade e velocidade de saturação. A respeito de g_d , um aumento na temperatura levou a um aumento na condutividade e uma diminuição na resistividade.

Dispositivos com L maior apresentaram melhor eficiência de transcondutância. Além disso, a variação observada dos parâmetros analógicos com a tensão de porta, corrente de dreno e diminuição da transcondutância podem ser atribuídas à degeneração da mobilidade dos elétrons, efeito este em que é sugerido maior elucidação em trabalhos futuros com a verificação de efeito da resistência série.

Em vista do ruído, as medições sugeriram que o ruído $1/f$ é devido ao aprisionamento na barreira AlGaIn. Além disso, o ruído GR pode ser originado de uma única armadilha de elétrons no volume de GaN. A miniaturização dos dispositivos ocasiona uma grande sensibilidade a ruídos indesejáveis. Em outras palavras, alguns defeitos críticos têm um impacto marcante na operação do dispositivo.

Como perspectivas de futuros trabalhos, seria interessante analisar os motivos que levaram a razão de V_T/T variar com a temperatura, explicitando causas físicas para tal comportamento. Além disso, verificar as causas para quedas bruscas da corrente de dreno para com o aumento da tensão de porta e, também, os fundamentos que levaram a transcondutância a apresentar diminuição com o aumento do comprimento do canal.

Seria plausível verificar, também, as causas que levaram dispositivos com W de $1\mu\text{m}$ apresentarem maior delta de tensão de limiar com a temperatura, se comparados com dispositivos de W de $10\mu\text{m}$, além de averiguar o porquê de a tensão de limiar não estabilizar para dispositivos com L longos.

Embora o método de extração de tensão de limiar aplicado neste trabalho fora o método da extrapolação linear, em futuros trabalhos poderão ser considerados novos métodos, visto que o dispositivo estudado apresentou diferentes características de corrente de dreno para diferentes métodos aplicados. Dessa forma, diferentes comportamentos de DIBL poderão ser observados.

Novas polarizações do dispositivo poderão ser estudadas a fim de verificar limites de uso e eficiência.

Além disso, pode-se aprofundar em maiores análises, como os efeitos de resistência série para conclusões oportunas sobre mobilidade e, também, averiguar o comportamento de dispositivos que divergiram dos demais.

5 PUBLICAÇÕES DO AUTOR

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

ARTIGOS

Revistas Internacionais:

1. BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M. G. C.; BERTRAND, P., SIMOEN, E., **Analog Performance of GaN/AlGa_N High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.** In: Solid-State Electronics, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.108048>.
2. ANDRADE, M. G. C.; BERGAMIM, L. F. O. et al., **Low-Frequency Noise Investigation of High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.** In Solid-State Electronics, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.108050>.

Congressos Internacionais:

3. JUNIOR, B. B.; ANDRADE, M. G. C.; BERGAMIM, L. F. O., NOGUEIRA, C. R.; PARVAIS, B.; SIMOEN, E., LAEDC 2022 (IEEE Latin American Electron Devices Conference), 2022, Puebla, México. **Temperature Dependence of AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors on 200 mm Si wafers.** (aceito para publicação)
4. BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M. G. C.; BERTRAND, P., SIMOEN, E., INFOS 2021, 2021, Rende, Itália. **Analog Performance of GaN/AlGa_N High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.**
5. BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M. G. C.; BERTRAND, P., SIMOEN, E., INFOS 2021, 2021, Rende, Itália. **Low-Frequency Noise Investigation of High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.**

Congressos Nacionais:

6. BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M. G. C. **Analog and Low-Frequency Noise Investigation of AlGa_N/Ga_N HEMTs.** In: Seminatec2022, 2022, São Bernardo do Campo, Brasil.

APRESENTAÇÕES

Congressos Internacionais:

1. INFOS 2021 (22th Conference on Insulating Films on Semiconductors), 2021, Rende, Itália. **Analog Performance of GaN/AlGaN High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.**
2. INFOS 2021 (22th Conference on Insulating Films on Semiconductors), 2021, Rende, Itália. **Low-Frequency Noise Investigation of High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors.**

Congressos Nacionais:

3. SEMINATEC 2022 (XVI Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology), 2022, São Bernardo do Campo, Brasil, **Analog and Low-Frequency Noise Investigation of AlGaN/GaN HEMTs.**

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AADIT, M. N. A et al. - **High Electron Mobility Transistors: Performance Analysis**. In: Research Trend and Applications, Jun. 2017, doi: 10,5772/67796.

AGARWAL, H et al. - **Analytical Modeling and Experimental Validation of Threshold Voltage in BSIM6 MOSFET Model**. In: IEEE Journal of the Electron Devices Society, v. 3, n. 3, pp. 240–243, Maio 2015.

AKITA, M. et al. - **High-frequency measurements of AlGaIn/GaN HEMTs at high temperatures**. In: IEEE Electron Dev. Lett., vol. 22, no. 8, pp. 376-377, Ago. 2001, doi: 10.1109/55.936348.

ALVES, L et al. - **Transistores HEMT GaN: Uma Nova Expectativa na Eletrônica De Potência**. In: Jornal Do Pet Engenharia Elétrica. v. X. Jan. 2016.

ANDRADE, M. G. C. - **Estudo de transistores de porta tripla de corpo**. 2012. Tese (Doutorado em Microeletrônica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. doi:10.11606/T.3.2012.tde-10062013-150025.

ANDRADE, M. G. C.; BERGAMIM, L. F. O. et al. - **Low-Frequency Noise Investigation of High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors**. In: Solid-State Electronics, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.1080501>

BAG, D. et al. - **2DEG modulation in double quantum well enhancement mode nitride HEMT**. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*. In: *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures* vol. 74, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.physe.2015.06.011.

BALIGA, B. J. et al. - **Gallium nitride devices for power electronic applications**. In: *Semiconductor Science and Technology*, vol. 28, Jun. 2013.

BARÚQUI, Fernando AP. - **Apostila de microeletrônica**. The Laboratory for the Processing of Analog and Digital Signals (PADS). 120f. 2020. Disponível em: http://www.pads.ufrj.br/~fbaruqui/Arquivos/Apostila_Micro.pdf. Acesso em: 11/11/2020.

BELLAKHDAR, A. et al. - **The thermal effect on the output conductance in AlGaIn/GaN HEMT's**. In: IEEE, pp. 1–4 Dez 2012. doi: 10.1109 / ICM.2012.6471365.

BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M. G. C.; BERTRAND, P., SIMOEN, E. - **Analog Performance of GaN/AlGaIn High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors**. In: *Solid-State Electronics*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.108048>

BHOUMILK, M. - **Electrical Characteristics of GaAs Nano-HEMT**. In: *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, v. 3, n. 2, p. 1–6, 2013.

BOUDIER, D. et al. - **Low frequency noise assessment in n- and p-channel sub-10 nm triple-gate FinFETs: Part II: Measurements and results**, In: *Solid-State Electron*, vol. 128, pp. 109-114, 2017, doi: 10.1016/j.sse.2016.10.013.

BUTTAY, C. et al. - **Thermal Stability of Silicon Carbide Power JFETs**. In: **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 60, n. 12, pp. 4191–4198, Dez 2013. doi: 10.1109/TED.2013.2287714.

CASTRO, A. V. - **Fundamentos de internet das coisas - IOT**. Trabalho de conclusão de curso. Faculdades IDAAM. Chapada, Manaus, Disponível em: <<http://repositorio.idaam.edu.br/handle/prefix/1126>>. Acesso em: 8 Dez 2021.

CHEN, D. et al. - **A sandwich-structured AlGaIn/GaN HEMT with broad transconductance and high breakdown voltage**. In *Journal of Materials Chemistry* vol. 7, Ago. 2019, doi: 10.1039/C9TC03718G.

CHEN, Y et al. - **Improved quasi-physical zone division model with analytical electrothermal 1 ds model for AlGaIn/GaN heterojunction high electron mobility transistors**. In: *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, v. 33, n. 3, 10 Maio 2020, doi:10.1002/jnm.2630.

CHRISTENSSON, S. e LUNDSTRÖM, I. - **Low frequency noise in MOS transistors—II Experiments**. In: *Solid-State Electronics*, v. 11, n. 9, pp. 813–820, Set 1968, doi: 10.1016/0038-1101(68)90101-9.

CHRISTENSSON, S. et al. - **Low frequency noise in MOS transistors—I Theory**. In: *Solid-State Electronics*, v. 11, n. 9, pp. 797–812, Set 1968, doi: 10.1016/0038-1101(68)90100-7.

CHUGH, N.; et al. - **Performance comparison of Dual Material Gate (DMG) and Conventional AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor**. In: 2018 4TH International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) Mar. 2018, In *Anais: IEEE*, 2018, doi :10.1109/ICDCSyst.2018.8605122.

CIOFI, C e NERI, B. - **Low-frequency noise measurements as a characterization tool for degradation phenomena in solid-state devices**. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 33, n. 21, pp. R199–R216, 7 Nov 2000.

COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. - **Physics of Semiconductor Devices**. In: Springer New York, 2002.

COLINGE, P. - **Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLS**, In Kluwer Academic Publishers, 3ª ed, 2004.

DOS SANTOS, S. D. - **Influência da tensão mecânica no abaixamento de barreira induzido pelo dreno (dibl) em finfets de porta tripla**. 2010. 97 f. Dissertação, Universidade de São Paulo – USP São Paulo, 2010.

DUTRA, P. et al. - **Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise**. In: *Reviews of Modern Physics*, v. 53, n. 3, pp. 497-516, 1981.

ELEWA T. et al. - **Performance and physical mechanisms in SIMOX MOS transistors operated at very low temperature**. In *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, no. 4, pp. 1007-1019, April 1990, doi: 10.1109/16.52436.

FRANCIS, P. et al. - **SOI technology for high temperature applications**. In: Technical Digest of IEDM - International Electron Devices Meeting, 1992. pp. 353-356.

GALUP, C.; SCHNEIDER, M. - **The compact all-region MOSFET model: theory and applications**. In: 2018 16TH IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS) 2018, Anais: IEEE, 2018, doi: 10.1109/NEWCAS.2018.8585657.

GASSOUMI, M. et al. - **DC and RF characteristics optimization of AlGaIn/GaN/BGaN/GaN/Si HEMT for microwave-power and high temperature application**. In Results in Physics, v. 12, pp.302–306, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2018.11.063.

GHIBAUDO, G. et al. - **Improved Analysis of Low Frequency Noise in Field-Effect MOS transistors**. In Physica Status Solidi., vol. 124, pp. 571-581, 1991, doi: 10.1002/pssa.2211240225.

HADHEMI L. - **Reliability assessment of GaN HEMTs on Si substrate with ultra-short gate dedicated to power applications at frequency above 40dB**. Université de Bordeaux, 2017.

HAN, T.-C. et al. - **Simulation study of InAlN/GaN high-electron mobility transistor with AlInN back barrier**. In Chinese Physics B, v. 26, n. 10, pp.107301, 2017, doi: 10.1088/1674-1056/26/10/107301.

HARROUCHE, K. e MEDJDOUB, F. - **GaN-Based HEMTs for Millimeter-wave Applications. Nitride Semiconductor Technology**. In: Wiley, 2020. pp. 99–135, doi: 10.1002/9783527825264.ch3.

HASAN, Md. R. et al. - **Fabrication and comparative study of DC and low frequency noise characterization of GaN/AlGaIn based MOS-HEMT and HEMT**. In Journal of Vacuum Science and Technology B: Nanotechnology and Microelectronics, vol. 35, 2017, doi: 10.1116/1.4998937.

HIERRO, A. et al. - **Optically and thermally detected deep levels in n -type Schottky and p+-n GaN diodes**. In: Applied Physics Letters, v. 76, n. 21, pp.3064–3066, Maio 2000, doi: 10.1063/1.126580.

HOOGE, F. N. - **1/f noise sources**. In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, no. 11, pp. 1926-1935, Nov. 1994, doi: 10.1109/16.333808.

HSU, L. H. et al. - **Development of GaN HEMTs Fabricated on Silicon, Silicon-on-Insulator, and Engineered Substrates and the Heterogeneous Integration**. In: Micromachines, v. 12, n. 10, pp. 1159, 27 Set 2021, doi: 10.3390/mi12101159.

ISLAM, S. S. et al. - **Temperature-dependent nonlinearities in GaN/AlGaIn HEMTs**. In: IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 49 pp. 710-717, May 2002, doi: 10.1109/16.998575.

JAVORKA, P. - **Fabrication and Characterization of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors**. 2004. Dissertação de mestrado em Engenharia elétrica da University of Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, Alemanha, 2004, doi: 10.32657 / 10356/67970.

JONES, E. A. et al. - **Review of Commercial GaN Power Devices and GaN-Based Converter Design Challenges**. In: IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 3, Jan. 2016, pp. 707-719.

JUNG, J. H. et al. - **Fabrication of AlGaN/GaN MISHEMT with dual-metal gate electrode and its performances**. In: Applied Physics A, v. 126, n. 4, pp.274, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00339-020-3453-4.

KANDIAH, K. et al. - **Low frequency noise in junction field effect transistors**. In: Solid-State Electronics, v. 21, n. 8, pp. 1079-1088, 1978.

KIM, J. - **A New GaN HEMT Small-Signal Model Considering Source via Effects for 5G Millimeter-Wave Power Amplifier Design**. In: Applied Sciences, v. 11, n. 19, pp. 9120, 30 Set 2021, doi: 10.3390/app11199120.

KIM, S. et al. - **GaN MIS-HEMT PA MMICs for 5G Mobile Devices**. In: Journal of the Korean Physical Society, v. 74, n. 2, pp. 196–200, 26 Jan 2019, doi: 10.3938/jkps.74.196.

KLEIN, PP.B. et al. - **Observation of deep traps responsible for current collapse in GaN metal–semiconductor field-effect transistors**. In: Applied Physics Letters, v. 75, n. 25, pp.4016–4018, Dez. 1999, doi: 10.1063/1.125523.

KORDOS, P. et al. - **Material and device issues of GaN-based HEMTs**. In: 8TH IEEE International Symposium on High Performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications (CAT. NO.00TH8534) Nov. 2000, In: Anais IEEE, 2000, doi: 10.1109/EDMO.2000.919030.

LIANG, X. - **Characterization of GaN-based HEMTs for power electronics**. Tese (doutorado) School of Electrical Engineering and Computer Science, 2020.

LIM, H. K. et al. - **Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's**. In: IEEE Transactions on Electron Devices, v. 30, n. 10, pp. 1244-1451, 1983.

LIU, A.-C. et al. - **The Evolution of Manufacturing Technology for GaN Electronic Devices**. In: Micromachines, v. 12, n. 7, pp.737, Jun. 2021, doi: 10.3390/mi12070737.

MCWHORTER, A.L. - **1/f Noise and Germanium Surface Properties**. Semiconductor Surface Physics, R. H. Kingston, Ed. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania Press, pp. 207-228, 1957.

GALETI M. et al. - **Analog parameters of MuGFET devices with different source/drain engineering**. In: 8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, ICCDCS 2012. doi: 10.1109/ICCDCS.2012.6188896.

MANZOLI, J. E. - **Efeito de campo em heteroestruturas semicondutoras de dispositivos eletrônicos quânticos**. 1998. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. doi:10.11606/T.88.1998.tde-19082015-112652.

MIMURA, T. - **Development of High Electron Mobility Transistor**. In: Japanese Journal of Applied Physics, v. 44, n. 12, pp. 8263–8268, 8 Dez 2005, doi: 10.1143/JJAP.44.8263.

MIMURA, T. et al. - **A New Field-Effect Transistor with Selectivity Doped GaAs/n-AlGaAs Heterojunctions**. In: J. Appl. Phys., vol. 19, 1980, pp. L225-L227.

MIMURA, T. et al. - **High Electron Mobility Transistors with Selectively Doped GaAs/n-AlGaAs Heterojunctions**. In: IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-27, No. 11, pp. 2197-2197, 1980.

MIMURA, T. - **The early history of the high electron mobility transistor (HEMT)**. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 50, n. 3, pp. 780–782, Mar 2002. Doi: 10.1109 / 22.989961.

NAHHAS, A. M. - **Review of AlGaIn/GaN HEMTs Based Devices**. In American Journal of Nanomaterials, Vol. 7, Abr. 2019, Pages 10-21, v. 7, n. 1, pp.10–21, 2019, doi: 10.12691/AJN-7-1-2.

NAKAJIMA, S. - **GaN HEMTs for 5G Base Station Applications**. Dez 2018, In: IEEE, Dez 2018. pp. 14.2.1-14.2.4, doi: 10.1109 / IEDM.2018.8614588.

NEWAR, T. e BHAJANA, V. V. S. K. - **Modelling and comparison of Si-MOSFET and eGaIn-HEMT for power converter applications using TCAD**. Maio 2017, In: IEEE, Maio 2017. pp. 430–434. doi: 10.1109 / RTEICT.2017.8256633.

NIORE M. et al. - **A 20GHz High Electron Mobility Transistor Amplifier for Satellite Communications**. In: IEEE ISSCC Dig. Tech., 1983, pp. 198-199.

OLDHAM, T.R. e MCLEAN, F.B. - **Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices**. In: IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 50, n. 3, pp. 483–499, Jun 2003, doi: 10.1109 / TNS.2003.812927.

ORTIZ-CONDE, A. et al. - **A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods**. In: Microelectronics Reliability, vol. 42, issues 4–5, pp. 583-596, 2002, doi: 10.1016/S0026-2714(02)00027-6.

PARVESH et al. - **Effect of temperature on current voltage characteristics of lattice mismatched Al/sub m/Ga/sub 1-m/N/GaN HEMTs**. In 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 2005, pp. 4, doi: 10.1109/APMC.2005.1606585.

PATENTE JAPONESA, No. 1409643 - **Semiconductor Device**, Nov. 24, 1987.

PERALAGU, U. et al. - **CMOS-compatible GaN-based devices on 200mm-Si for RF applications: Integration and Performance**. In: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, pp. 17.2.1-17.2.4, 2019, doi: 10.1109/IEDM19573.2019.8993582.

PINCHBECK, J. et al. - **Dual metal gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with improved transconductance and reduced short channel effects**. In: Journal of Physics D: Applied Physics, v. 54, n. 10, pp.105104, Nov. 2021, doi: 10.1088/1361-6463/abcb34.

PRUDKOVSKIY, V. - **Electronic properties of quasi-one-dimensional systems (C60@SWCNTs and InAs nanowires) studied by electronic transport under high magnetic field.** Jun. 2013.

PUT, S. - **Radiation tolerance of advanced cmos and bipolar technologies.** 2010. 195 f. Tese (doutorado) - Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 2010.

RAO, H. et. al. - **Device reliability study of high gate electric field effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using low frequency noise spectroscopy.** In: Applied Physics Letters, vol. 108, pp. 053707, 2010.

ROCCAFORTE, F. et al. - **An Overview of Normally-Off GaN-Based High Electron Mobility Transistors.** In: Materials, v. 12, n. 10, pp. 1599, 15 Maio 2019, doi: 10.3390/ma12101599.

RODRIGUEZ, A. L. et al. - **Defect analysis in UTBOX SOI nMOSFETs by low-frequency noise.** Proceeding of EuroSOI2012 – Workshop of the Thematic Network on Silicon On-Insulator Technology, Devices and Circuits Montpellier – France, pp. 67–68, 2012.

RODRÍGUEZ, R. et al. - **Numerical simulation and compact modelling of AlGaIn/GaN HEMTs with mitigation of self-heating effects by substrate materials.** In Physica status solidi (a), v. 212, n. 5, pp.1130–1136, Jan. 2015, doi: 10.1002/pssa.201431897.

ROMERO, M. A. et al. - **Transistores de alta mobilidade eletrônica (HEMTs): Princípios de operação e características eletrônicas.** Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v.37, n.4, p. 4306-1-4306-15, Dez. 2015.

ROMERO, M. et al. - **Transistores de alta mobilidade eletrônica (HEMTs): Princípios de operação e características eletrônicas.** In: Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, pp. 4306-1-4306–15, Dez 2015, doi: 10.1590/S1806-11173741967.

RUSCHEL, C. S. - **Análise e Proposta de Aprimoramento do Modelo de um Diodo para Módulos Fotovoltaicos.** 2019. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2019.

RZIN, M. et al. - **Investigation of the dynamic on-state resistance of AlGaIn/GaN HEMTs.** In Microelectronics Reliability, vol. 55, pp. 1672-1676, Ago. 2015.

RZIN, M. et al. - **Impact of the in-situ SiN Thickness on Low-Frequency Noise in MOVPE InAlGaIn/GaN HEMTs.** In IEEE Transactions on Electron Devices, v. 66, n. 12, pp. 5080–5083, 2019, doi: 10.1109/TED.2019.2945296.

SAI, P. et al, - **Low Frequency Noise and Trap Density in GaN/AlGaIn Field Effect Transistors.** In Applies Physics Letters vol. 115, pp 183501, 2019, doi: 10.1063/1.5119227.

SASAKI, K. R. A. - **Estudo de transistores SOI MOSFETs com camada de silício e óxido enterrado ultrafinos operando em modo de tensão de limiar dinâmica.** 2016. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 145f. 2016, doi: 10.11606/T.3.2017.tde-07032017-145408.

SCHMITZ, A. C.; et al. - **Metal contacts to n-type GaN**. In Journal of Electronic Materials, v. 27, n. 4, p. 255–260, 1998, doi: 10.1007/s11664-998-0396-5.

SILVEIRA, F. et al. - **A gm/ID Based Methodology for the Design of CMOS Analog Circuits and Its Application to the Synthesis of a Silicon-on-Insulator Micropower OTA**. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits, v. 31, n. 9, pp. 1314-1319, 1996.

SILVESTRI, M. et. al. - **Iron-induced deep-level acceptor center in GaN/AlGaIn high electron mobility transistors: Energy level and cross section**. In Applied Physics Letters, vol. 102, pp. 073501, Fev. 2013.

SIMOEN, E. et al. - **Low-frequency noise in triple-gate n-channel bulk FinFETs**, In 21st International Conference on Noise and Fluctuations. IEEE, pp. 127-131, 2011, doi: 10.1109/ICNF.20115994280.

SIMOEN, E. et al. - **On the Variability of the Low-Frequency Noise in UTBOX SOI nMOSFETs**. In: ECS Transactions, v. 49, n. 1, pp. 51–58, 30 Ago 2012, doi: 10.1149/04901.0051ecst.

SUZUKI H. et al. - **Detection of the interstellar C₆H radical**. In: Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 38, pp. 911-917, 1986.

TAKAKURA, K. et al. - **Low-Frequency Noise Investigation of GaN/AlGaIn Metal–Oxide–Semiconductor High-Electron-Mobility Field-Effect Transistor with Different Gate Length and Orientation**. In IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 67, no. 8, pp. 3062-3068, Ago. 2020, doi: 10.1109/TED.2020.3002732.

TAN, W. S. et al. - **High temperature performance of AlGaIn/GaN HEMTs on Si substrates**. In Solid-State Electronics, vol. 50, issue 3, Mar. 2006, pp. 511-513, doi: 10.1016/j.sse.2006.02.008.

TOME, P. M. et al. - **A Multiple-Time-Scale Analog Circuit for the Compensation of Long-Term Memory Effects in GaN HEMT-Based Power Amplifiers**. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 68, n. 9, pp. 3709–3723, Set 2020, doi: 10.1109 / TMTT.2020.3007713.

Townsend, T. U. - **A Method for Estimating the Long Term Performance of Photovoltaic Modules**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Wisconsin-Madison, 1989.

VAUN, A. - **Noise in Solid State Devices and Circuits**. John Wiley & Sons, 1986.

VILAS BÔAS, A. C. - **Estudo dos efeitos da dose total ionizante (TID) em um transistor comercial de alta mobilidade de elétrons (HEMT), baseado na heteroestrutura AlGaIn/GaN**. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). Centro Universitário FEI. São Bernardo do Campo, 124f. 2020, doi: 10.31414/EE.2020.D.131231.

VIMALA, P. et al. - **High electron mobility transistor-a review on analytical models**. In International Journal for Innovative Research in Science & Technology Out. 2016.

WATANABE Y et al. - **A HEMT LSI for Multibit Data Register**. In: IEEE ISSCC Dig. Tech., 1988, pp. 86-87

WU, Q. et al. - **A Scalable Multiharmonic Surface-Potential Model of AlGaN/GaN HEMTs**. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 66, n. 3, pp. 1192–1200, Mar 2018, doi: 10.1109 / TMTT.2017.2775639.

YE, P. D. et al. - **GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility-transistor with atomic layer deposited Al₂O₃ as gate dielectric**. In Applied Physics Letters, vol. 86, pp. 063501-063501, Jan. 2005.

ZENG, F. et al. - **A Comprehensive Review of Recent Progress on GaN High Electron Mobility Transistors: Devices, Fabrication and Reliability**. In: Electronics, v. 7, n. 12, pp. 377, 3 Dez 2018, doi: 10.3390/electronics7120377.

ZHAN, G. - **Improvement of performance and reliability of GaN-based high electron mobility transistors (HEMTs) using high-K dielectrics**. 2017. 219 p. f. Universidad Politécnica de Madrid, 2017.

ZHANG, X. et al. - **AlNGaN HEMT T- gate optimal design**. In Applied Mechanics and Materials, vol. 347-350, 2013.