NILTON GRAZIANO JUNIOR

CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS HEMT

Relatório de Pós-doutorado realizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba.

Supervisora: Prof[a]. Dra. Maria Glória Caño de Andrade

Sorocaba

2026

Sumário

RESUMO.....3
1 OBJETIVOS…….....……4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA…….....…….....4
2.1 O Transistor HEMT.....6
2.1.1 História.....6
2.1.2 Primeiras Aplicações.....7
2.1.3 Nitreto de Gálio.....7
2.1.4 Heteroestrutura.....8
2.1.5 Estrutura Epitaxial.....9
2.1.6 Aplicações e Vantagens.....11
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....12
4 RESULTADOS DOS ESTUDOS..... 12
5 IMPACTOS DO PROJETO PARA AVANÇO DO ESTADO DA ARTE NA ÁREA DO CONHECIMENTO.....20
6 CONTRIBUIÇÃO DO PROJETO PARA FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS ESPECIALIZADOS PARA A ACADEMIA, EDUCAÇÃO BÁSICA E SUPERIOR, INDÚSTRIA, SETOR DE SERVIÇOS E SETOR PÚBLICO.....20
7 CONTRIBUIÇÃO DO PROJETO PARA DIFUSÃO E TRANSFERÊNCIA DO CONHECIMENTO.....20
8 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS, TÉCNICAS, ARTÍSTICAS OU CULTURAIS RESULTANTES DO PROJETO.....20
9 COMCLUSÃO DO ESTUDO.....21
10 COLABORAÇÕES EM ARTIGOS DE ALUNOS DE MESTRADO DA UNESP.....21
11 MINISTRA DE AULAS PARA O MESTRADO.....21
12 PUBLICAÇÕES.....22
13 REFERÊNCIAS.....23

RESUMO

O projeto que aqui foi implementado, é uma contribuição para o desenvolvimento tecnológico da micro e nano eletrônica no Brasil, uma vez que pesquisou dispositivos semicondutores avançados. Mais especificamente, transistores de alta mobilidade (HEMTs - High Electron Mobility Transistors) Tratam-se de estruturas de transistores promissoras de dimensões manométricas fabricados com novos tipos de materiais, técnicas inovadoras de fabricação, diferentes dimensões e configurações que irão se somar ou em muitos casos substituir os atualmente utilizados.

Por meio de análises experimentais analizou-se o desempenho elétrico e analógico desses dispositivos que foram estudados em função dos métodos de fabricação, dos materiais utilizados, das geometrias de construção, das dimensões e da temperatura de operação, ruído baixa frequência entre outros. Tais parámetros, como demonstrado nos resultados alcansados, tem importante influencia no comportamento dos dispositivos e é oportuno citar que muitas vezes se diferere de forma fundamental dos dispositivos mais comuns construidos a partir do silício. Entere outros temas aqui apreciados é mister destacar como exemplo o comportamento singular ta tensão de limiar (V_{TH}) que como demonstrado, não aumenta de maneira linear com o incremento da tensão de dreno e para ser estudado requer motodo particular de extração, o que demandou a exploração e comparação de diversos metodos de obtenção do V_{TH}. Ainda, outro exemplo interessante de relatar é o comportamento singular da corrente em funão de tensão de dreno, este só pode ser entendido a luz de uma maior compreenção da estrutura do dispositivo. Esses topicos somados aos demais estudos, ajudam a elucidar o comportamento peculiar dos tranzistore HEMET e assim facilitar o uso deles em circuitos eletronicos avançados.

É funtamental informar que os estudos realizados neste projeto, apesar de bastante relevantes estão longe de encerrar os temas abordado e tem muito potencial aida para novas abordágems que podem ser implementada por outros pesquisadores desta intituição.

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho fundamentou-se nas caracterizações elétricas realizadas no Centro Interuniversitário de microeletrônica (Imec - Interuniversity microelectronics center) em (Bélgica), assim como, por dispositivos descritos (estudados) na literatura e/ou fabricados por outros centros de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: AlGaN/GaN HEMT, Propriedades Analógicas, Heterojunção, Alta Mobilidade de Elétrons

1 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é o de analisar o comportamento do dispositivo ao se variar a corrente de porta, dimensões, características construtivas, entre outros.

Este trabalho foi realizado a partir de análise de resultados de caracterizações elétricas experimentais. Adicionalmente, serão propostos novos métodos de extração das diferentes características elétricas e analógicas presentes nos dispositivos (e circuitos eletrônicos), assim como métodos de extração de parâmetros elétricos e físicos.

Os dispositivos que foram estudados são os dispositivos fabricados pelo Imec (Interuniversity microelectronics center), localizado na Bélgica, assim como, os dispositivos descritos (estudados) na literatura e/ou fabricados por outros centros de pesquisa. Esses dispositivos são fabricados diferentes tipos materiais (graphene-nanosheet) e engenharias de construção, estruturas (nanofios-nanowires) de Silício e/ou Germânio e dispositivos HEMTs (transistores de alta mobilidade) e técnicas inovadoras de fabricação de última geração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido ao forte impacto causado pelo controle e automatização de diversos tipos de sistemas (industriais, comerciais, hospitalares etc.), bem como o rápido desenvolvimento tecnológico da micro e nanoeletrônica no país, um estudo mais detalhado em dispositivos avançados de dimensões extremamente reduzidas se faz necessário.

A presente proposta de pesquisa a ser realizada no Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS da UNESP) visa um estudo aprofundado de dispositivos semicondutores avançados (nanométricos) através de análise de resultados de medidas elétricas (caracterização).

Estas estruturas semicondutoras são produzidas com diferentes tipos materiais (*graphene nanosheet*) [1] e engenharias de construção, estruturas (*nanofios-nanowires*) de Silício e/ou Germânio, transistores de alta mobilidade de elétrons [2] para aplicações em Radio Frequência que substituirão os dispositivos atualmente utilizados.

Este trabalho se enquadra nas linhas de pesquisa já em desenvolvimento no Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e tem o intuito de adicionar qualidade e confiabilidades nas demais pesquisas na área de materiais e componentes semicondutores.

O crescimento da indústria de circuitos integrados está diretamente ligado à sua capacidade de reduzir o tamanho dos transistores e da sua capacidade de realizar a integração de um maior número de transistores dentro de um único circuito integrado.

O desempenho elétrico e analógico dessas estruturas é estudado em função de suas dimensões, temperaturas e radiação através de medidas experimentais e simulações numéricas bidimensionais e tridimensionais. Dá-se também uma atenção ao ruído de baixa frequência (LF) a qual a sua origem será estudada de maneira a compreender os mecanismos físicos envolvidos neste tipo de ruído.

Geralmente, os espectros do sinal de dispositivos semicondutores são compostos por flutuações referentes ao número de portadores devido ao ruído flicker e por ondas de ruído de geração e recombinação no dielétrico de porta que se torna maior com o aumento da tensão de porta.

Os transistores de alta mobilidade de elétrons (HEMT) são, atualmente, a primeira escolha para aplicações de alta frequência, potência e temperatura, 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 aplicações também inclui computação, telecomunicações e instrumentação. É amplamente utilizado no tratamento de radiofrequência (RF), onde o alto desempenho é uma condição limitante para frequências de RF muito altas (GHz) [3].

Durante a última década, os transistores HEMTs utilizando nitreto de gálio (GaN) e nitreto de gálio-alumínio (AlGaN) têm sido intensamente estudados devido as suas propriedades elétricas fundamentais, tornando-se candidatos extremamente promissores para aplicações de ondas 5G devido à sua distinta mobilidade de elétrons, potência e alta tensão de ruptura [4].

Este dispositivo é, em muitos aspectos, semelhante a um MOSFET (transistor de efeito de campo óxido-metal-semicondutor) de canal n, no entanto, composto de várias camadas de semicondutores. Nos HEMTs, como nos MOSFETs, a corrente de dreno (I_D) entre os terminais da fonte e do dreno é controlado pela tensão aplicada entre a porta e os terminais da fonte, V_G (TAKAKURA et al., 2020).

Estruturas de transistores de alta mobilidade de elétrons são um dos candidatos para dispositivos comerciais baseados em GaN. Em particular, nos últimos anos as heteroestruturas fabricadas de AlGaN/GaN tem recebido muita atenção e contribuído para o estabelecimento dos HEMTs de GaN para aplicações de alta potência e rádio Frequência (RF) [5].

O ruído de baixa frequência (LF), aliado com análises analógicas, não são apenas importantes figuras de mérito para aplicações analógicas e de RF, mas também ferramentas poderosas e sensíveis para revelar e quantificar a qualidade do material utilizados na fabricação dos dispositivos. Estas ferramentas possibilitam a identificação de defeitos no material, efeitos de aprisionamento além de consolidar o estudo da confiabilidade de HEMTs baseados em GaN/AlGaN [6].

2.1 O Transistor HEMT

Dispositivos MOSFETs e MESFETs convencionais são geralmente utilizados em aplicações que requerem alta frequência, baixo ruído e alta densidade de potência. Possuem menores comprimento canal para que a maioria dos portadores tenham o mínimo possível de dispersão de impurezas e assim terem baixa degradação de desempenho. Além disso, tais aplicações, implicam também em limitações de projeto e de desempenho, os quais requerem altos níveis de saturação de corrente bem como, alto valor de transcondutância [7].

Devido às limitações físicas destas estruturas (MOSFETs e MESFETs), os dispositivos HEMTs se tornaram excelentes candidatos para essas aplicações, uma vez que incorporam heterojunções formadas de dois materiais com diferentes energias de banda onde os elétrons são confinados num poço quântico evitando assim a dispersão de impurezas.

Dispositivos HEMT, construídos a partir de heterojunções formadas por AlGaN/GaN, podem trabalhar em frequências muito altas com um excelente desempenho além de, possuir elevada tensão de ruptura e alta velocidade de saturação dos elétrons. O material GaN disponibiliza uma polarização piezoeléctrica muito forte que ajuda à acumulação de uma grande quantidade portadores na interface da heterojunção AlGaN/GaN [8]. A seguir, serão descritos os principais tópicos referentes ao dispositivo de estudo HEMT.

2.1.1 História

O transistor HEMT foi desenvolvido pelo Dr. Takashi Mimura, no Laboratório Fujitsu, em 1979 (PATENTE JAPONESA, 1987) em Kobeno Japão. O desenvolvimento destes transistores foi motivado pelo estudo de super redes de dopagem modulada, que são possíveis através da utilização de uma heterojunção.

A principal característica de seu projeto foi a introdução de uma junção Schottky em uma heterojunção (entre os materiais AlGaAs e GaAs do tipo n) para possibilitar a criação de uma camada de depleção na superfície da camada de AlGaAs do tipo n.

Quando controlado pela tensão de porta, o efeito de campo é exercido sobre o gás eletrônico bidimensional (2DEG) na camada de GaAs controlando assim, a densidade de elétrons. Devido a essa característica, pode-se construir um transistor de alta velocidade que usa um gás eletrônico bidimensional e que não é afetado pela dispersão do dopante.

Em 1980, o Dr. Takashi Mimura publicou um artigo demonstrando a primeira operação do HEMT, no qual uma estrutura com uma única heterojunção de n-AlGaAs e GaAs foi usada para controlar um gás eletrônico bidimensional através efeito de campo (MIMURA, 1980). Neste artigo, os desempenhos de alta velocidade do transistor HEMT mostraram-se superiores aos do dispositivo

MESFET; na mobilidade eletrônica e na transcondutância na temperatura de 77K e foram 5,5 vezes e 3 vezes maiores, respectivamente.

Após esses resultados, a pesquisa e o desenvolvimento nos dispositivos HEMTs cresceram rapidamente em aplicações de circuitos lógicos de alta velocidade e de micro-ondas. Foram relatados a utilização dos HEMTs em circuitos integrados com velocidade comutação, amplificadores com baixa figura de ruído e alto ganho e em supercomputadores [1].

2.1.2 Primeiras Aplicações

Segundo registros históricos, a primeira aplicação comercial do HEMT foi um amplificador de baixo ruído. Os dispositivos HEMTs podem ser utilizados para receber baixos sinais vindos do espaço, devido ao seu alto desempenho. Em vista disso, em 1985, os HEMTs foram utilizados na construção do radiotelescópio de 45 metros no Nobeyama Radio Observatory (NRO) em Nagano, Japão. Em 1986, a tecnologia contribuiu para descobertas relacionadas às moléculas interestelares na Nuvem Molecular de Touro a cerca de 400 anos-luz de distância [9].

No setor privado, por volta de 1987, os HEMTs foram utilizados em receptores de radiodifusão por satélite, o que permitiu, que antenas parabólicas fossem reduzidas a menos da metade do diâmetro, ajudando assim, a popularizar as transmissões por satélite no Japão e na Europa. O mercado de amplificadores de baixo ruído com esses transistores em 1990 era de cerca de cem milhões de dólares.

2.1.3 Nitreto de Gálio

Dispositivos semicondutores construídos a partir de nitreto de gálio (GaN) possuem excelentes propriedades para aplicações em alta potência e alta frequência tais como [2].

- Banda de energia superior à de silício: esta grande banda de energia lhe dá a capacidade de suportar altos campos elétricos e altas temperaturas de operação.
- Alta mobilidade eletrônica: juntamente com a capacidade de suportar altas tensões o GaN permite alcançar maiores velocidades de saturação e maior frequência operacional.
- Alta estabilidade mecânica/térmica, combinada com boa condutividade térmica para dissipar o calor permitindo que os dispositivos possam operar a temperatura e potência mais altas.

2.1.4 Heteroestrutura

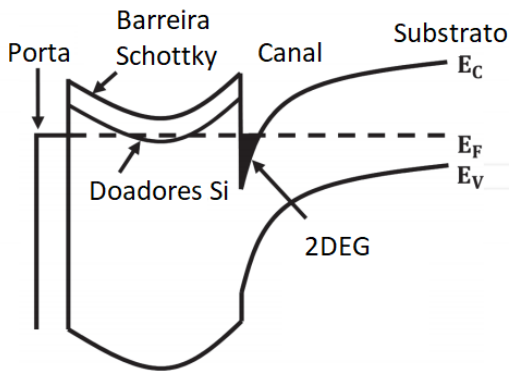
Os dispositivos HEMTs são construídos por heterojunções formadas por semicondutores com largura de banda de energia diferentes. Quando uma heterojunção é formada, a banda de condução e a banda valência se encurvam para formar um nível contínuo em todo o material. O elemento com banda de energia maior tem elétrons em excesso na banda de condução, pois é dopado com átomos de doadores (ou devido à carga de polarização). O material com banda de energia menor tem estados de condução com menor energia. Assim, os elétrons difundirão do material com banda de energia maior para o material com banda de energia menor, pois tem estados com menor energia [6].

Em vista disso, ocorrerá uma mudança de potencial devido ao movimento dos elétrons e um campo elétrico será induzido entre os materiais. O campo elétrico induzido irá desviar os elétrons de volta para a banda de condução do elemento com maior banda de energia. Os processos de deriva e difusão continuam até que se equilibrem, criando uma junção em equilíbrio (como uma junção p-n). Observe que o material não dopado com banda de energia menor possui portadores majoritários em excesso, que geram alta velocidade de comutação. Um fato interessante é que o semicondutor não dopado de menor energia de banda não possui átomos doadores para causar espalhamento e, portanto, garante alta mobilidade.

Outro aspecto interessante dos HEMTs é que as descontinuidades nas bandas de condução e valência podem ser utilizadas para controlar o tipo de portadores dentro e fora do dispositivo. Essa difusão de portadores leva ao acúmulo de elétrons ao longo da interface das duas regiões e dentro do material com banda de energia. Este acúmulo de elétrons pode levar a uma corrente muito alta nesses dispositivos. A região que contém os elétrons acumulados é denominada de região de gás de elétrons bidimensional, 2DEG [8].

A Figura 1 mostra o diagrama de banda de energia formado na heterojunção para dispositivos HEMTs.

Figura 1 – Diagrama de bandas energia de um HEMT



Fonte – Adaptado de **(**AADIT, et al., 2017)

Nota-se, pela Figura 1, que tanto a banda de condução (E_C) quanto a banda de valência (E_V) encurvam-se em relação ao nível de Fermi (E_F), resultando em um bom preenchimento da camada de gás 2DEG e, eventualmente, um canal de condução é formado. Considerando que a maioria dos elétrons ocupa a primeira sub-banda de energia, a densidade do portador na região 2DEG é regida pela equação 1 [10]:

$$n2D = \int_0^{\infty} D(E)dE = \frac{m^*}{\varphi^2} q \frac{\Delta}{q} \qquad (1)$$

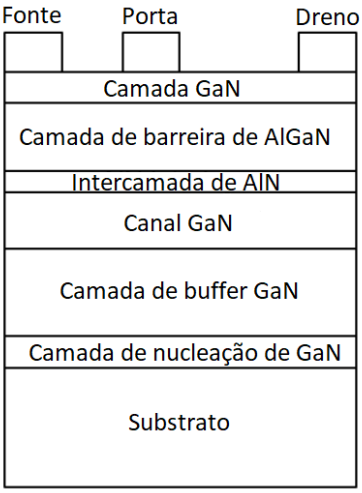
Onde m^* é a massa efetiva eletrônica, $f(E)$ é a função de distribuição Fermi-Dirac e $D(E)$ é a densidade energética dos estados.

2.1.5 Estrutura Epitaxial

Semelhante a um MOSFET tradicional, o dispositivo AlGaN/GaN HEMT apresenta o dreno e os contatos da fonte para obter contatos ôhmicos e uma porta para gerar a barreira Schottky.

Um gás eletrônico bidimensional é formado na heterointerface entre os dois materiais (AlGaN e GaN), devido à transferência de elétrons livres do AlGaN para o GaN, produzindo um encurvamento da banda de condução. Caso a largura da região próxima da heterointerface (onde os elétrons estão confinados) seja suficientemente estreita, os efeitos quânticos se tornam importantes e devem ser levados em conta [10].

Figura 2 - Seção transversal de um dispositivo HEMT de AlGaN/GaN.



Fonte – Adaptado de **((**HADHEMI, 2017)

De acordo com a Figura 2, verifica-se que a estrutura do dispositivo apresenta seis principais camadas, as quais [10].

- Substrato: é a camada utilizada como base para realização do crescimento do dispositivo. A escolha de o substrato depende do tamanho disponível, custo, condutividade

térmica, constante de incompatibilidade de rede, expansão de calor e aplicação do dispositivo baseado em GaN**.**

- Camada de buffer de GaN: é naturalmente dopada e composta de material de largura de banda larga.
- Camada de barreira de AlGaN: é uma camada naturalmente dopada e formada pelo material de banda larga o AlGaN. Esta camada forma o contato Schottky com o contato metálico da porta e fornece os elétrons para a condução atual no canal. O HEMT de AlGaN/GaN pode estar sujeito a fenômenos parasitários que o impedirão de funcionar em condições ideais. Dessa forma, as camadas descritas abaixo podem ser adicionadas à estrutura.

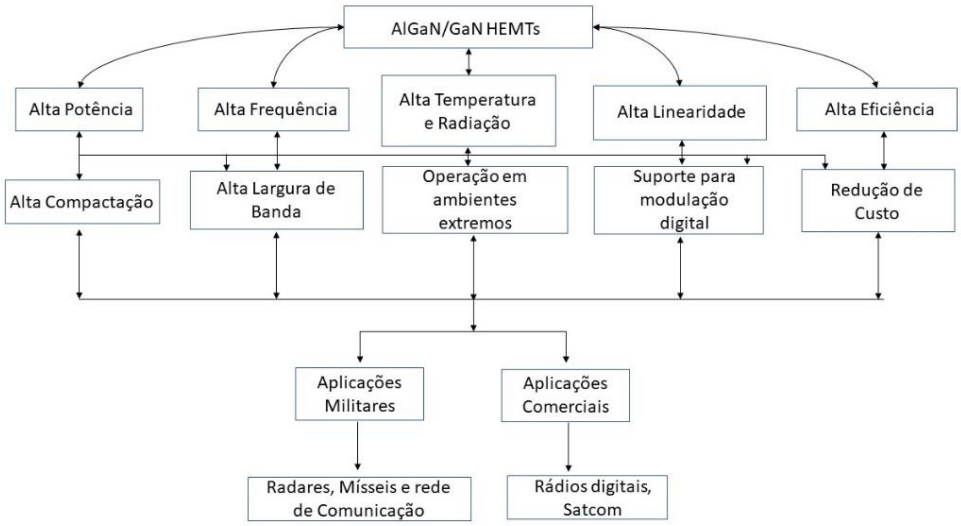
- Camada de nucleação: é uma camada intermediária entre a camada GaN e o substrato. Permite reduzir a tensão de tração de GaN devido à incompatibilidade de rede que favorece a formação de rachaduras.
- Intercamada de AlN: a chamada camada espaçadora AlN é usada para melhorar e melhorar a densidade de 2DEG, a mobilidade e a corrente de dreno.
- Camada de GaN: permite proteger a camada ativa e reduzir a resistência ao contato e canal, a fim de limitar a corrente de fuga.

2.1.6 Aplicações e Vantagens

As propriedades físicas do Nitreto de Gálio possibilitam a sua inserção em um mercado consumidor com uma abrangente lista de aplicações, como osciladores, radares, celulares, satélite de comunicação, estações base, sitcom, espaço, rádios digitais e atenuadores em aplicações comerciais e militares [10].

Dispositivos HEMTs compostos de GaN são utilizados principalmente em aplicações sem fio e eletrônicos de alta potência visto sua excelente eficiência em operação de alta frequência e altas tensões operacionais. A Figura 3 mostra as principais características e aplicações do dispositivo.

Figura 3 – Principais características e aplicações de dispositivos HEMT



Fonte – Adaptada de (HADHEMI, 2017)

Atualmente, HEMTs são mais comumente incorporados em circuitos integrados. Esses chips de circuito integrado de micro-ondas monolíticos são amplamente utilizados em aplicações de projeto de RF [10].

- Alto ganho alto: dispositivos HEMTs possuem um alto ganho em frequências de micro-ondas porque as portadoras de carga são quase exclusivamente as portadoras majoritárias e as portadoras minoritárias não estão significativamente envolvidas.
- Baixo ruído: dispositivos HEMTs apresentam baixíssimo valor absoluto de ruído, visto que a variação de corrente nos dispositivos é baixa quando comparada a outros dispositivos de efeito de campo.

Considerando altos valores de transcondutância (g_m), altos valores de velocidade de saturação e baixos valores de capacitância de porta é possível alcançar altos valores de frequência de corte intrínsecos. Esta relação é apresentada na equação 2 [10].

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_g} = \frac{V_S}{2\pi L_g} \quad (2)$$

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

Além disso, o escalamento do dispositivo irá teoricamente permitir maior f_T e, portanto, f_{MAX} (frequência máxima), devido à correlação L_G, mantendo uma alta relação de aspecto entre o comprimento da porta e a distância porta-canal. Reduzir o comprimento da porta é crucial para aumentar desempenho de frequência.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A partir de resultados de testes laboratoriais de amostras de dispositivos fabricados pelo Imec (Interuniversity microelectronics center), localizado na Bélgica. Também, foram efetuadas medidas das caracteríticas I-V e I-t de dispositivos de diferentes dimensões em diferentes condições de polarização, visando determinar como os transistores se comportam e a partir desses dados se observou o comportamento singular em relação a variação da temperatura. Para explorar adequadamente a questão foi necessário determinar qual o melhor método para extração da tensão de limiar. Na literatura não esta claro qual seria esse método, então coube ao pesquisador comparar os métodos disponíves e determinar o mais coerente.

4 RESULTADOS DOS ESTUDOS[1]

Os estudos descritos possibilitaram duas linhas principais de estudos além da publicação em revista de estudo iniciado anteriormente. A primeira explora quatro métodos de extração de tensão de limiar (V_{TH}) amplamente utilizados em transistores de efeito de campo de elétrons de alta mobilidade (HEMTs) de AlGaN/GaN fabricados no imec. Demonstra-se que a extrapolação linear fornece a definição de V_{TH} mais robusta em diferentes geometrias e condições de polarização. Ao normalizar as curvas I_D-V_G usando V_{GT}, mostra-se que a aparente dependência das discrepâncias geométricas desaparece, permitindo uma interpretação mais clara dos efeitos da relação de aspecto sob diferentes polarizações de dreno. Esses resultados sugerem que as tendências dependentes da geometria relatadas na literatura podem surgir parcialmente de inconsistências na extração de V_{TH}, em vez de características físicas intrínsecas do dispositivo.

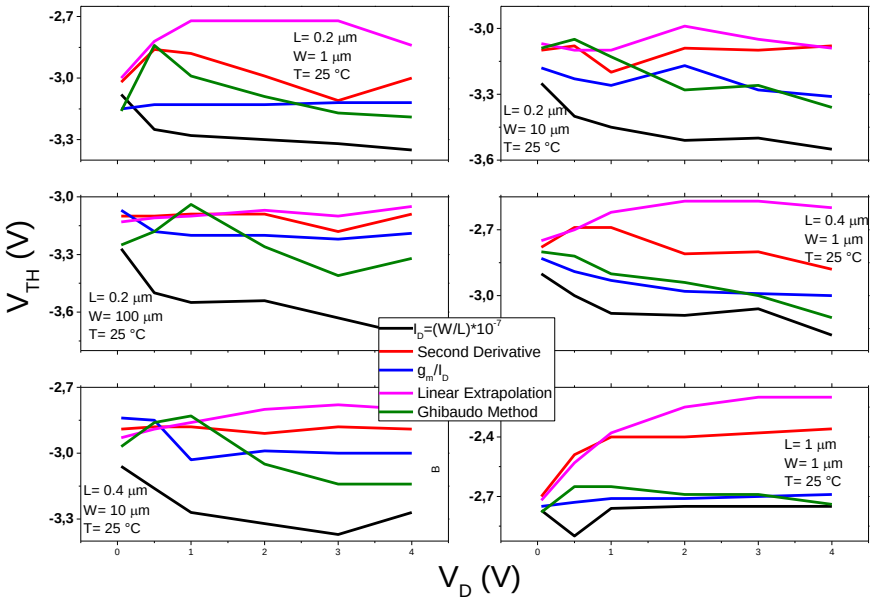
Quatro métodos de extração de V_{TH} amplamente utilizados são avaliados. Os métodos adotados são: o método da corrente, que calcula o VT_H correspondente à corrente usando a expressão $I_D = (W/L)*10^{-7}$, onde W é a largura e L é o comprimento do canal do dispositivo. O segundo método foi o da segunda derivada, no qual a curva I_D x V_G é diferenciada duas vezes e o V_{TH} corresponde à projeção do ponto máximo da curva resultante no eixo de tensão. O terceiro foi o método gm/I_D, que pode ser expresso como (gm/I_D) on Threshold = $(g_m/I_D)max/2$, onde gm é a transcondutância. O últim foi a extrapolação do limiar, na qual o V_{TH} é determinado por extrapolação linear da curva I_D x V_G no ponto de transcondutância máxima (gm). Como mostrado na figura 4, a extrapolação linear fornece os

[1] Excertos desta seção do Relatório de Pós-doutorado foram submetidos à revista Solid-State Electronics e constam no trabalho "VTH Extraction in VGT-Normalized AlGaN/GaN HEMTs", que foi apresentado no evento 12th Joint EuroSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon.

GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. VTH Extraction in VGT-Normalized AlGaN/GaN HEMTs. 2026. Trabalho apresentado ao Joint EuroSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon, 12., 2026, Granada.

valores de V_{TH} mais consistentes em diferentes geometrias e condições de polarização.

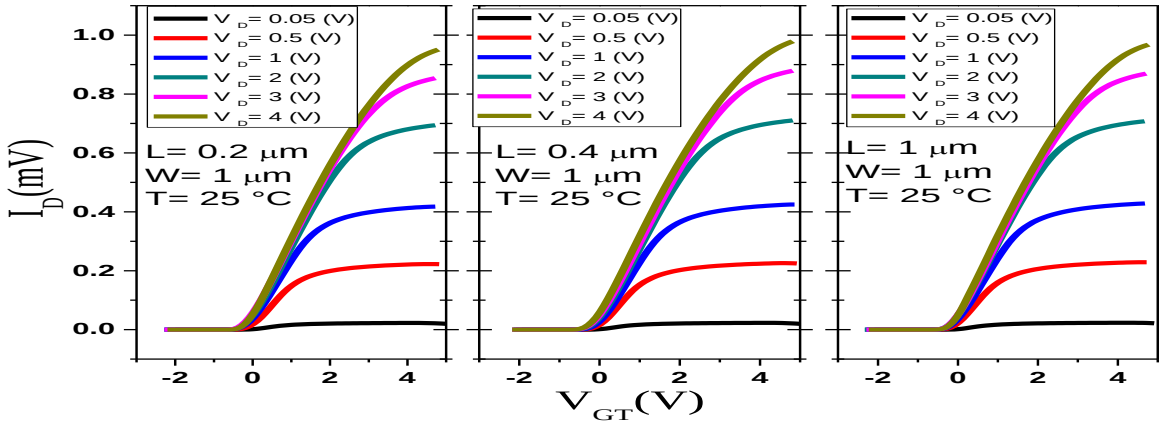
Figura 4: Comparação de quatro métodos de extração V_{TH} em HEMTs AlGaN/GaN [4] para diferentes W, L e V_D.



Fonte – Autor

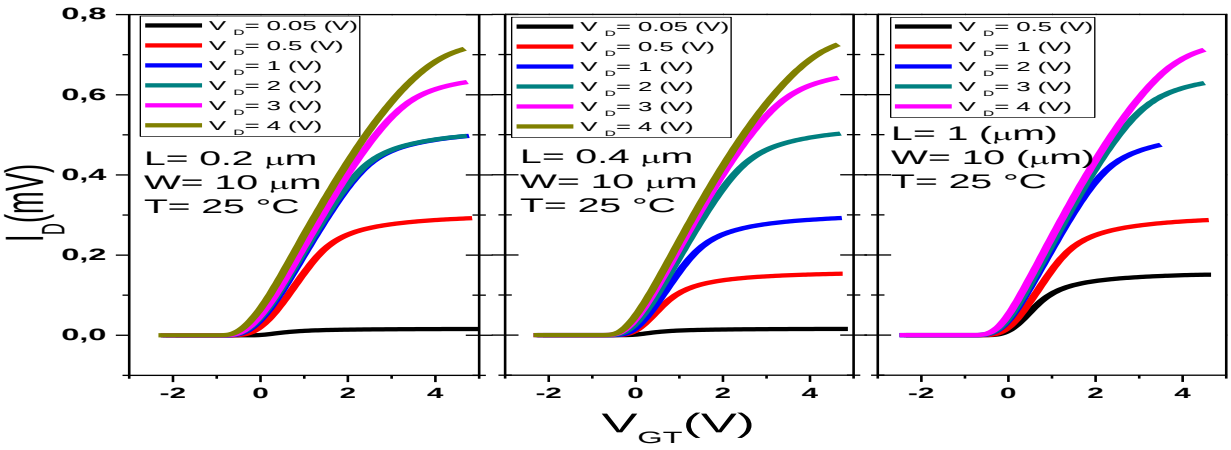
As curvas I_D x V_G foram normalizadas usando V_{GT} ($|V_G-V_{TH}|$), permitindo uma comparação direta entre dispositivos com geometrias diferentes. O resultado dessa padronização é mostrado nas figuras 5 e 6.

Figura 5: Características I_D x V_{GT} para HEMTs AlGaN/GaN com W = 1 µm, variando L e V_D.



Fonte – Autor

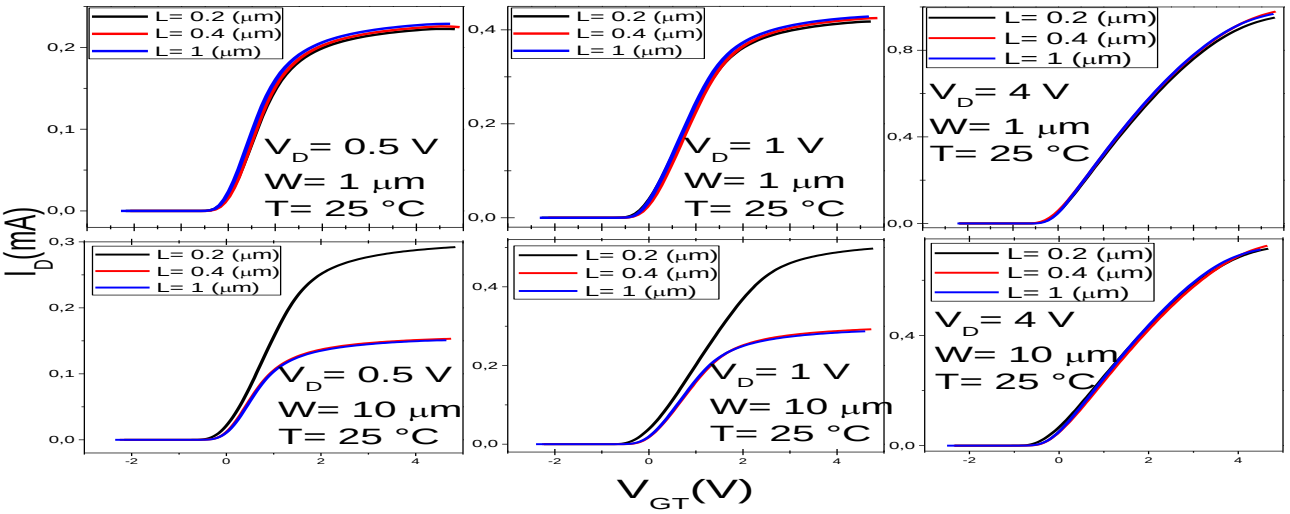
Figura 6: Características I_D x V_{GT} para HEMTs AlGaN/GaN com W = 10 µm, variando L e V_D.



Fonte – Autor

Na Figura 7, quanto maior L, menor a corrente. No entanto, quando a tensão de dreno (V_D) aumenta, as curvas tendem a se sobrepor. Esse comportamento sugere que o aumento do campo elétrico lateral em V_D mais altos compensa parcialmente a redução da corrente associada a comprimentos de canal mais longos [11].

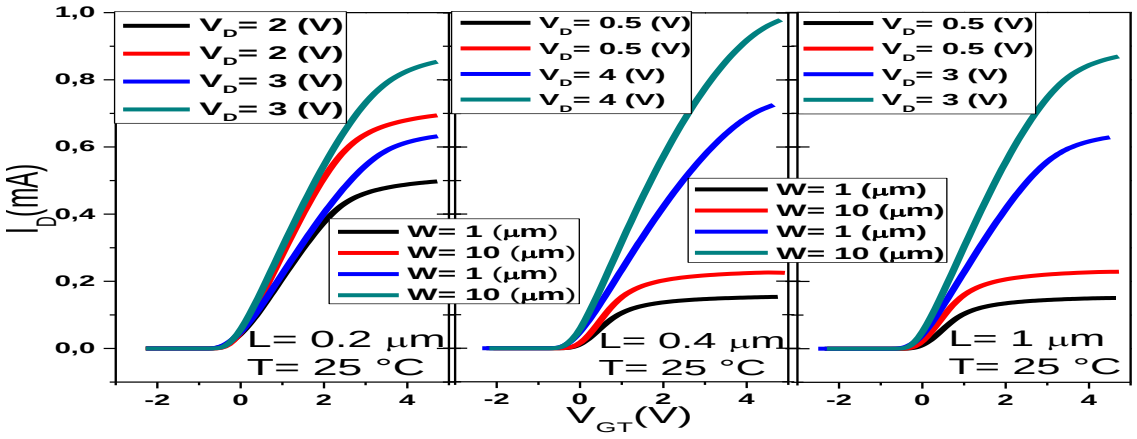
Figura 7: Influência do comprimento do canal (L) nas características I_D x V_{GT} para W fixo para HEMTs AlGaN/GaN.



Fonte – Autor

A Figura 8 mostra as curvas que consideram (W) e quanto maior W, maior a corrente.

Figura 8: Influência da largura do canal (W) nas características I_D x V_{GT} para L fixo para HEMTs AlGaN/GaN.



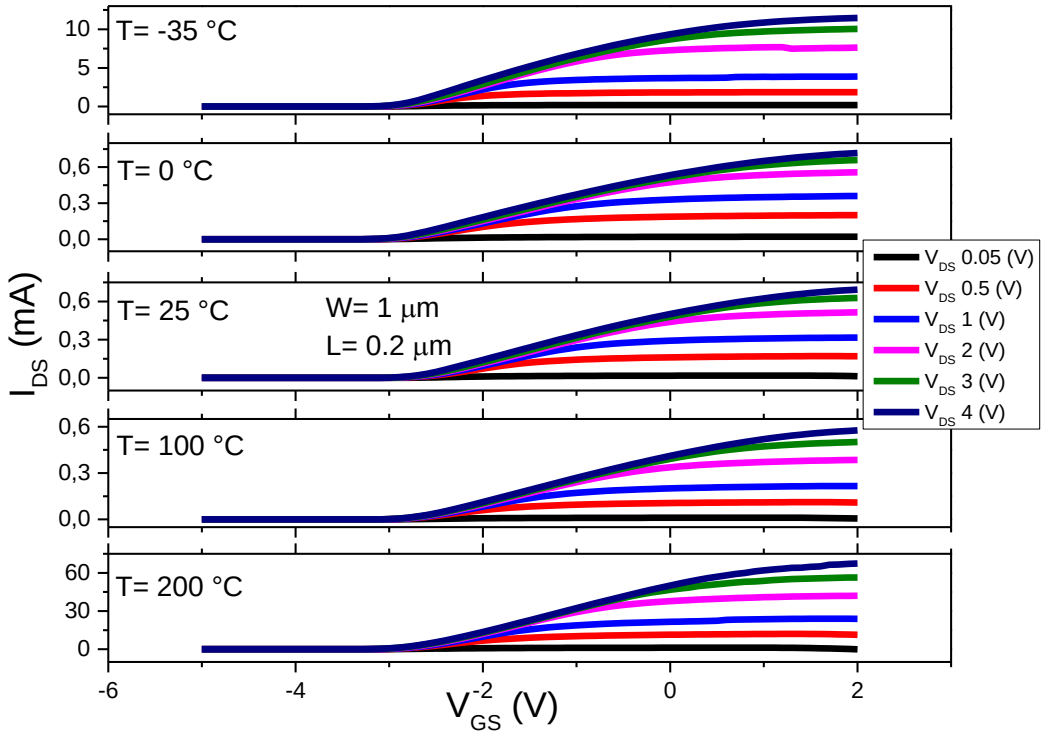
Fonte – Autor

O estudo seguinte, se aproveita do método mais confiável para a determinação da tensão de limiar para estudar o impacto da variação de temperatura, outravez partindo de dados experimentais.

O trabalho em questão, analisou a influência da temperatura no desempenho de dispositivos HEMT de AlGaN/GaN. As características I_{DS} versus V_{GS} e I_{DS} versus V_{DS} são avaliadas em uma ampla faixa de temperatura, juntamente com parâmetros-chave como tensão de limiar e transcondutância. Os resultados mostraram uma dependência não monotônica do I_{DS} com a temperatura, com um aumento significativo tanto em baixas quanto em altas temperaturas. Esse comportamento difere daquele tipicamente observado em dispositivos convencionais baseados em MOS. Variações na tensão de limiar e na transcondutância também são observadas, seguindo uma tendência similar. A análise indica que esse comportamento está associado aos efeitos combinados da carga induzida por polarização e da dinâmica de armadilhas, que influenciam o transporte de portadores no canal. Essas descobertas destacam a importância dos efeitos dependentes da temperatura no projeto de circuitos baseados em HEMTs de AlGaN/GaN.

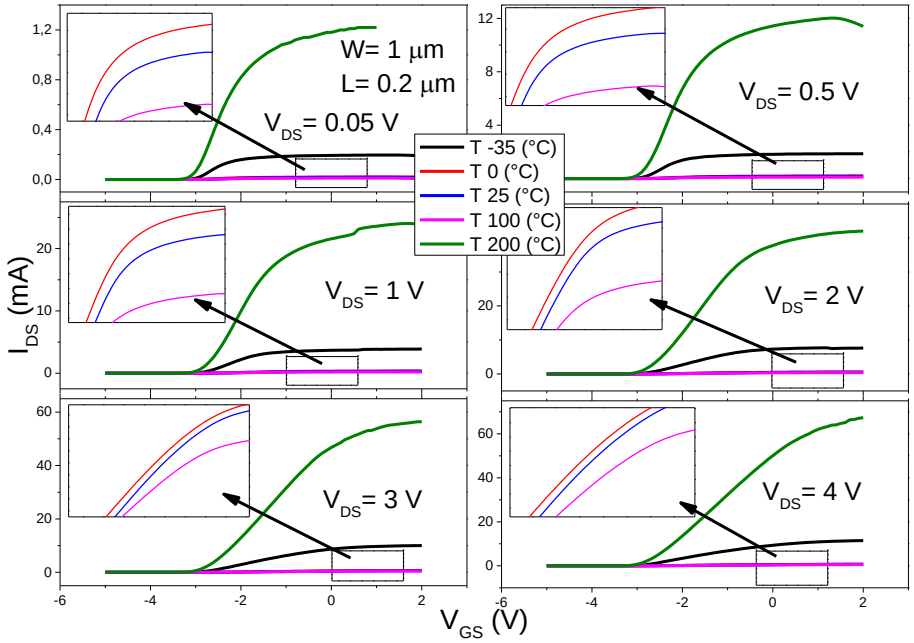
A Figura 9 mostra as curvas I_{DS}xV_{GS} para vários valores de tensão de dreno (V_{DS}) e para todas as temperaturas estudadas. Nessa perspectiva, observa-se um comportamento convencional. A Figura 10 separa as mesmas curvas da figura anterior e as orienta em função da temperatura. Para todos os valores de V_{DS}, as temperaturas intermediárias apresentam comportamento semelhante, enquanto a −35 °C observa-se um I_{DS} significativamente maior. A 200 °C, o I_{DS} é significativamente maior do que nas temperaturas intermediárias.

Figura 9: Curvas experimentais $I_{DS}xV_{GS}$ de dispositivos HEMT com W de 1 µm e L de 0.2 µm para vários valores de V_{DS} e separados por temperatura.



Fonte – Autor

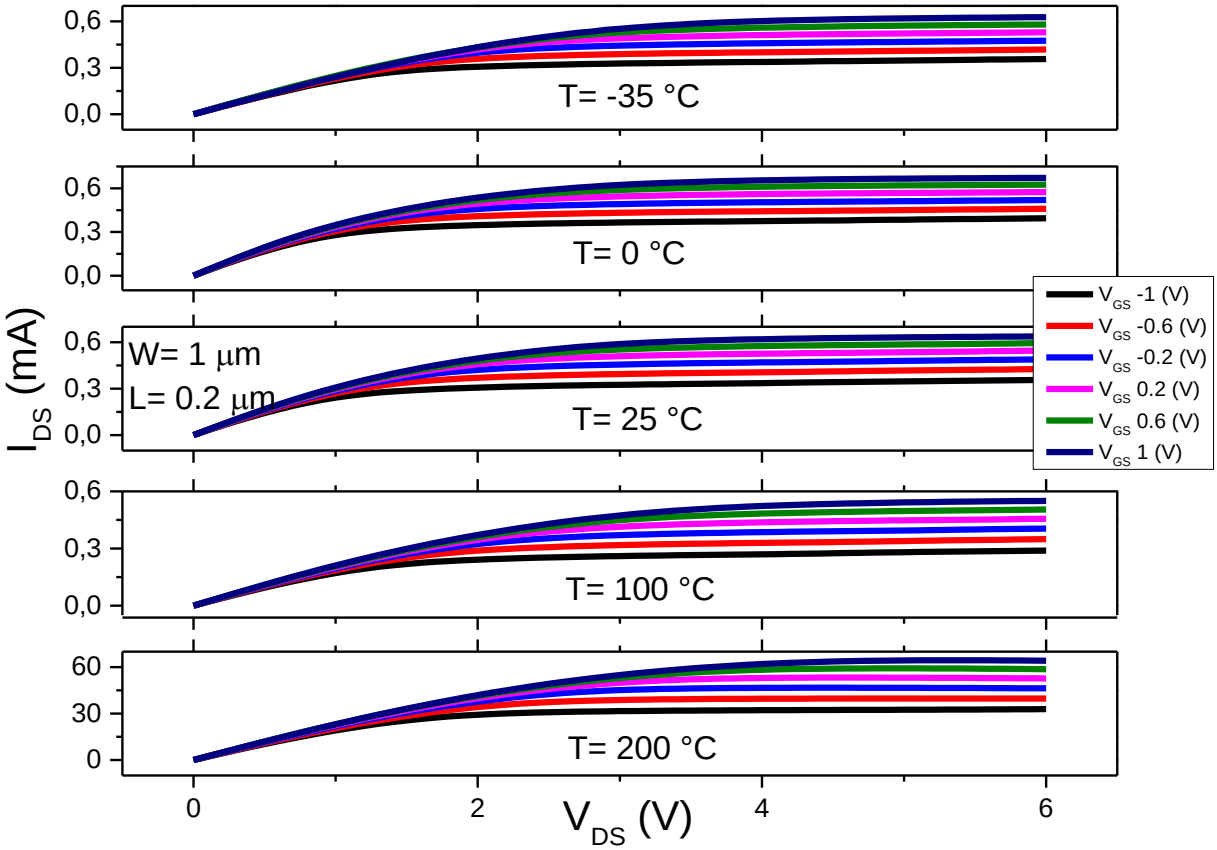
Figura 10: Curvas experimentais IDSxVGS de dispositivos HEMT com W de 1 µm e L de 0,2 µm para várias temperaturas, separadas por valores de V_{DS}.



Fonte – Autor

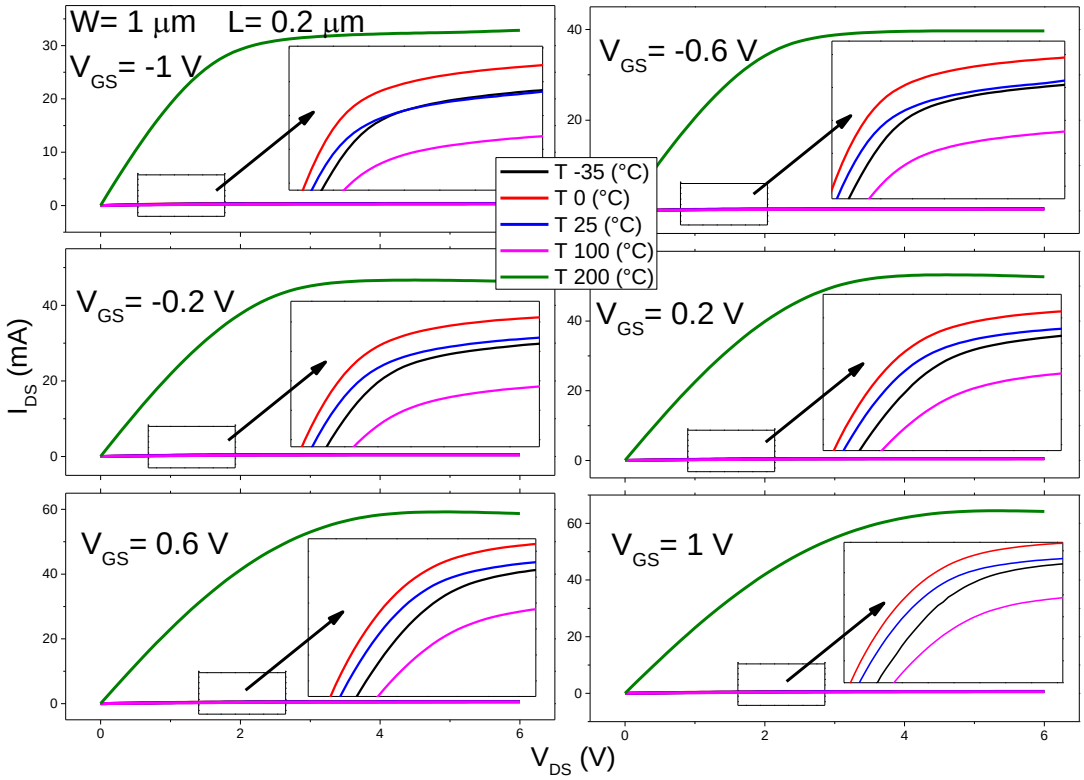
Agora, replicando o estudo anterior, mas desta vez para as curvas I_{DS} x V_{DS}, observando o comportamento dessas curvas para cada temperatura na Figura 11, observa-se uma característica de saída típica. No entanto, ao agrupar as curvas por temperatura na Figura 12, vemos que na faixa entre -35 e 100 °C o comportamento é semelhante, mas em relação a 200 °C observa-se uma variação significativa, onde o I_{DS} é significativamente maior a 200 °C em comparação com as temperaturas intermediárias.

Figura 11: Curvas I_{DS}xV_{DS} experimentais de dispositivos HEMT com W de 1 µm e L de 0,2 µm para diferentes valores de V_{GS} e separados por temperatura.



Fonte – Autor

Figura 12: Curvas I_{DS}xV_{DS} experimentais de dispositivos HEMT com W de 1 µm e L de 0,2 µm para diferentes valores de V_{GS} e separados por temperatura.

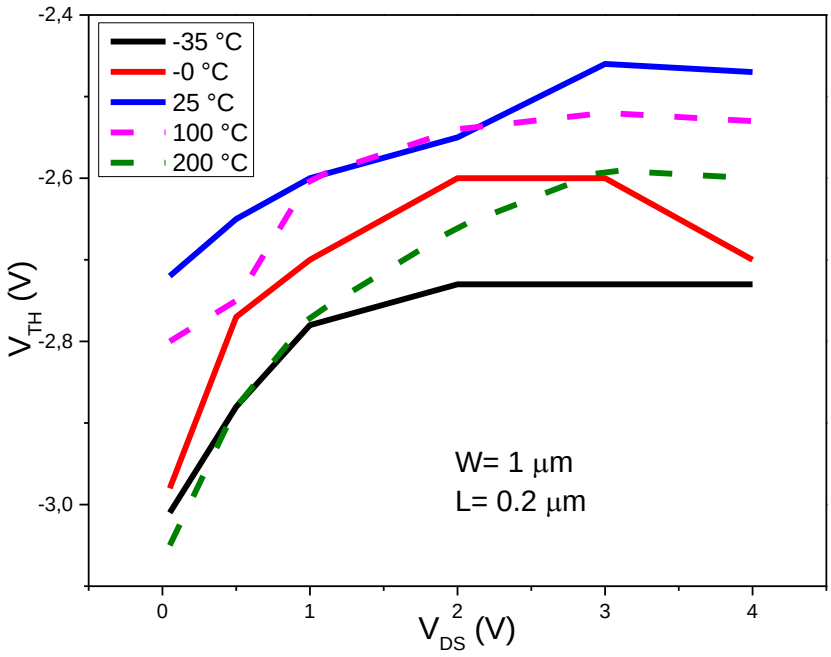


Fonte – Autor

Para extrair on V_{TH}, foi utilizado o método de extrapolação linear [12], um método que se mostrou confiável em um estudo anterior. Ao analisar o comportamento da V_{TH} na Fig. 13, fica claro que há um comportamento diferenciado para a faixa de temperatura entre -35 e 25 °C e entre 100 e 200 °C.

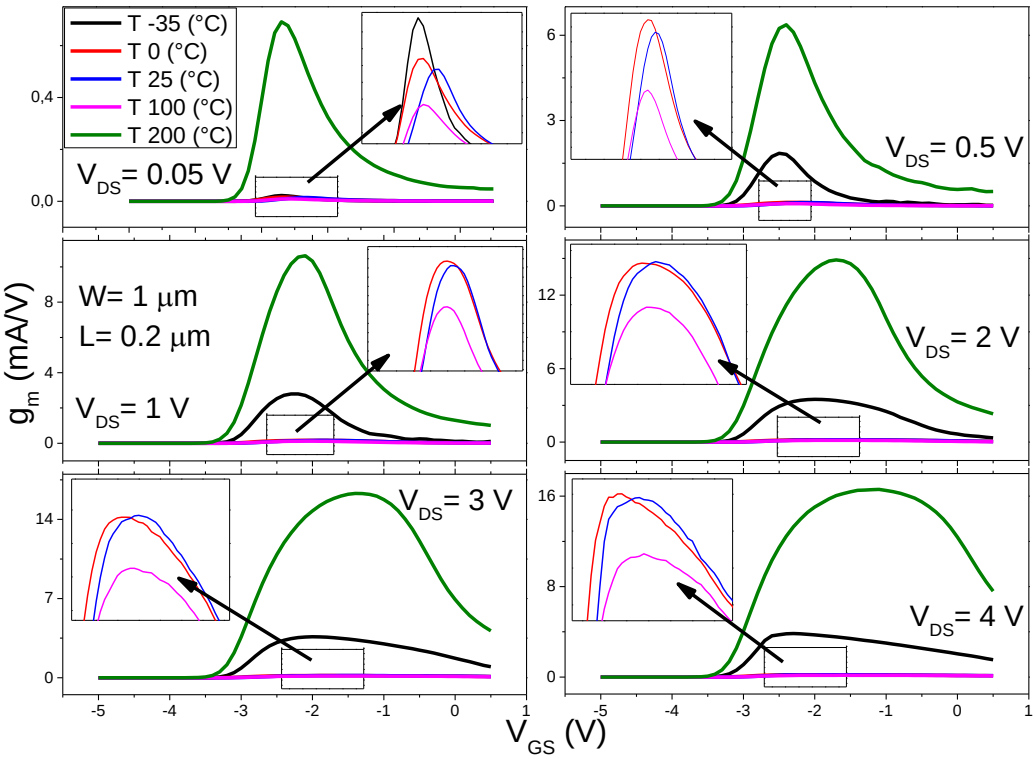
A Fig. 14 trata da transcondutância e, de certa forma, segue uma tendência semelhante à observada nas características I_{DS}xV_{GS}. Aqui também, temos um aumento a uma temperatura de -35 °C e um salto a 200 °C. A -35 °C, o g_{max} é em média 50 vezes maior do que em temperaturas intermediárias e, a 200 °C, o g_{max} aumenta em até duas ordens de magnitude em comparação com as condições de temperatura intermediária.

Figura 13: Valores de V_{TH} medidos em dispositivos HEMT com largura (W) de 1 µm e comprimento (L) de 0,2 µm para diferentes temperaturas.



Fonte – Autor

Figura 14: Curvas experimentais de transcondutância de dispositivos HEMT com W de 1 µm e L de 0,2 µm para várias temperaturas e separadas por valores de V_{DS}.



Fonte – Autor

5 IMPACTOS DO PROJETO PARA AVANÇO DO ESTADO DA ARTE NA ÁREA DO CONHECIMENTO

Ao longo dos últimos anos, diversos grupos de pesquisas têm publicado trabalhos sobre as propriedades elétricas de transistores HEMETs, demonstrando diversas vantagens em relação a transistores modo inversão, como melhores propriedades analógicas, menores efeitos de canal curto e menor ruído de baixa frequência [2]. Um ponto importante dos dispositivos HEMETs, é o seu comportamento singular em relação a variada temperatura [13]. A importância de estudos relativos a esta característica aumenta de forma proporcional à diminuição do comprimento de canal em tecnologias mais atuais, de modo que essa incerteza tem se tornado um problema de confiabilidade nos dispositivos atuais. Sendo assim, os estudos aqui apresentados contribuem para o avanço da microeletrônica.

6 CONTRIBUIÇÃO DO PROJETO PARA FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS ESPECIALIZADOS PARA A ACADEMIA, EDUCAÇÃO BÁSICA E SUPERIOR, INDÚSTRIA, SETOR DE SERVIÇOS E SETOR PÚBLICO

O projeto gera oportunidade e expertise para desenvolvimento de projetos individuais ou em grupo, no que se refere pesquisas sobre o tema, ainda está servindo como referência para formação de aluno de Mestrado.

7 CONTRIBUIÇÃO DO PROJETO PARA DIFUSÃO E TRANSFERÊNCIA DO CONHECIMENTO

As publicações advindas do projeto, são públicas e estão disponíveis para referência e fomento de futuros projetos correlatos e estão apresentadas nos arquivos em anexo.

8 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS, TÉCNICAS, ARTÍSTICAS OU CULTURAIS RESULTANTES DO PROJETO

O projeto aqui desenvolvido gerou como resultado três artigos. Um advindo de pesquisa anterior e publicado na edição especial da revista JICS, um publicado no congresso da EUROSOI, outro submetido a SBMicro e ainda um convite para submissão de artigo para revista SolidStates.

9 CONCLUSÃO DO ESTUDO

Há de se destacar que os trabalhos demonstram que o método de extração do V_{TH} afeta criticamente a interpretação do comportamento dependente da geometria em HEMTs de AlGaN/GaN. A extrapolação linear fornece a definição de V_{TH} mais consistente, permitindo uma normalização confiável do V_{GT} e evitando interpretações enganosas dependentes da geometria que podem surgir de métodos de extração de V_{TH} inconsistentes. Ainda foi demonstrado a transcondutância é fortemente afetada por variações de temperatura, tanto em temperaturas relativamente altas quanto baixas em comparação com a temperatura ambiente. Consequentemente, o comportamento dos dispositivos HEMT é afetado, pelo menos no que diz respeito à corrente de dreno e à tensão de limiar; portanto, os efeitos da temperatura devem ser cuidadosamente considerados no projeto de circuitos baseados em HEMTs de AlGaN/GaN.

Esses resultados contribuem para uma melhor compreensão do comportamento dependente da temperatura em HEMTs de GaN, o que é essencial para um projeto de circuito confiável. Esse comportamento é particularmente relevante para o projeto de dispositivos baseados em GaN que operam em amplas faixas de temperatura.

10 COLABORAÇÕES EM ARTIGOS DE ALUNOS DE MESTRADO DA UNESP

Em uma singular oportunidade, foi possível desenvolver junto aos alunos de mestrado, vários artigos que redundaram em publicações. Por um lado, os alunos se beneficiaram da minha experiência no desenvolvimento dos seus artigos para aprofundar os conceitos e depurar o texto de forma a tornar o trabalho claro e objetivo. Por outro lado, tive a oportunidade de ter contato com linhas de trabalhos diferentes e aprofundar e ampliar conhecimentos.

11 MINISTRA DE AULAS PARA O MESTRADO

Na matéria Dispositivos Eletrônicos, Tive a oportunidade de ministrar palestras sobre semicondutores, capacitor MOS e transistor MOS, sempre sob a orientação da Profa. Dra. Maria Gloria Caño de Andrade.

Isso propiciou meu aprimoramento na metodologia de desenvolver e ministrar aulas em ambiente de alto nível. O que demandou um aprofundamento de conceitos outrora adquiridos.

12 PUBLICAÇÕES RESULTANTES

- **Periódicos:**

Nilton Graziano Junior, Rodrigo T. Doria, R. Trevisoli, Maria Glória Caño de Andrade, **Drain Biasing and Temperature Variation Influences on NBTI of Junctionless Nanowire Transistors**. JICS. Journal of Integrated Circuits and Systems, v.21, - 5, 2026.

- **Congressos Internacionais:**

Nilton Graziano Junior, Eddy Simoen, Maria Glória Caño de Andrade, **V_{TH} Extraction in V_{GT}-Normalized AlGaN/GaN HEMTs**, EUROSOI 2026.

- **Submetidos:**

Nilton Graziano Junior, Eddy Simoen, and Maria Glória Caño de Andrade, **V_{TH} Extraction in V_{GT}-Normalized and Non-Monotonic Temperature Dependence of Drain Current and Transconductance in AlGaN/GaN HEMT Devices**, SolidStates 2026.

13 REFERÊNCIAS

[1] Islam N, Mohamed MFP, Khan MFAJ, et al. “Applications and Challenges of GaN HEMT Technology for Modern Power Devices: A Review” Crystals. 2022; 12(11):1581)

[2] Haziq M, Falina S, Manaf AA, et al. “Challenges and Opportunities for High-Power and High-Frequency AlGaN/GaN High-Electron-Mobility Transistor (HEMT) Applications: A Review” Micromachines. 2022; 13(12):2133

[3] B. Mounika, J. Ajayan, Sandip Bhattacharya, D. Nirmal. “Recent developments in materials, architectures and processing of AlGaN/GaN HEMTs for future RF and power electronic applications: A critical review” Micro and Nanostructures,Volume 168, 2022, 207317, ISSN 2773-0123

[4] YE, Ran et al. “An overview on analyses and suppression methods of trapping effects in AlGaN/GaN HEMTs” IEEE Access, v. 10, p. 21759-21773, 2021

[5] Noshin, Maliha, et al. “Probing the thermal and electrical properties of ultrawide bandgap nitrogen-polar AlGaN heterostructures” Advanced Functional Materials 34.39 (2024): 2403474Sentaurus Device User Guide, Synopsys, 2016.

[6] Fletcher, AS Augustine, et al. “An intensive study on assorted substrates suitable for high JFOM AlGaN/GaN HEMT” Silicon 13.5 (2021): 1591-1598.

[7] Zhan, Gao, et al. “Transconductance overshoot, a new trap-related effect in AlGaN/GaN HEMTs” IEEE Transactions on Electron Devices 70.6 (2023): 3005-3010

[8] Singhal, Jashan, et al. “Toward AlGaN channel HEMTs on AlN: Polarization-induced 2DEGs in AlN/AlGaN/AlN heterostructures” APL Materials 10.11 (2022)

[9] SUZUKI, H. et al. "Survey of Carbon Chain Molecules in TMC-1", Astronomical Society of Japan (PASJ), v. 38, n. 6, p. 911-917, 1986

[10] Lakhdhar, Hadhemi. “Reliability assessment of GaN HEMTs on Si substrate with ultra-short gate dedicated to power applications at frequency above 40 GHz”. Diss. Université de Bordeaux, 2017.

[11] Raja, P. Vigneshwara, et al. “Trapping effects on AlGaN/GaN HEMT characteristics” Solid-State Electronics 176 (2021): 107929

[12] Kumar, Vijaya et al. “Review of reliability of threshold voltage (Vth) extraction methods in silicon-based tunnel field effect transistors (TFETs)” Micro and Nanostructures, p. 208559, 2026

[13] Noshin, Maliha, et al. “Probing the thermal and electrical properties of ultrawide bandgap nitrogen-polar AlGaN heterostructures” Advanced Functional Materials 34.39 (2024): 2403474