

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Influência da razão estequiométrica Zn:Sn nas
propriedades elétricas de transistores de filme fino de óxido de zinco e estanho
processados em solução

Pedro Luis Mainardi Forti da Silva

Prof. Dr. Lucas Fugikawa-Santos

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Pedro Luis Mainardi Forti da Silva

Influência da razão estequiométrica Zn:Sn nas
propriedades elétricas de transistores de filme fino de óxido de
zinco e estanho processados em solução

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Bacharel em Física.

Rio Claro (SP)

2025

S586i

Silva, Pedro Luis Mainardi Forti

Influência da razão estequiométrica Zn:Sn nas propriedades elétricas de transistores de filme fino de óxido de zinco e estanho processados em solução / Pedro Luis Mainardi Forti Silva. -- Rio Claro, 2025

41 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Fugikawa Santos

1. Metal óxido semicondutor. 2. Transistor de filme fino. 3. Processamento de solução. 4. Caracterização elétrica. I. Título.

Pedro Luis Mainardi Forti da Silva

Influência da razão estequiométrica Zn:Sn nas
propriedades elétricas de transistores de filme fino de óxido de
zinco e estanho processados em solução

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Bacharel em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Lucas Fugikawa-Santos (Orientador)

Prof. Dr. Carlos César Bof Bufon

Prof. Dr. Ulisses Ferreira Kaneko

Prof. Dr. Alexandre Mesquita (Suplente)

Rio Claro, 14 de novembro de 2025.

Assinatura do aluno

assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe e meu pai por tudo que me proporcionaram até este momento, pelo carinho, apoio e amor. Amo vocês!

Agradeço também à minha irmã, que sempre me ajudou a melhorar todos os trabalhos e mensagens importantes em que pedia sua ajuda, bem como pelo apoio e pelas palavras de incentivo. Sou muito grato ao que fez por mim.

Agradeço ao meu orientador, Lucas Fugikawa-Santos, pela orientação, pelos conselhos e pelas oportunidades que me proporcionou durante minha formação. Também agradeço a João Victor Mendes e João Paulo Braga por toda a ajuda e pelas orientações que me deram durante a realização dos experimentos no laboratório.

Gostaria de agradecer meus amigos de laboratório, Pedro Mourão, Kaynan e ao técnico André, pelas conversas que deixavam o ambiente mais divertido.

Agora, ao final de quatro anos de curso, gostaria de agradecer aos amigos que fizeram parte da dessa jornada, em especial a Rafael, Eduardo, Thiago, Vitória e Gabriel. Foram muitas noites em chamada estudando para provas, fazendo relatórios, jogando conversa fora, treinando para apresentações e jogando Rounds. Entre tantas outras coisas, essas amizades tornaram o curso mais leve.

Por fim, agradeço ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - 116167/2024-6 pois, sem ele, este trabalho não poderia ter sido realizado.

“Não se trata de bater duro, se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando.” - Rock Balboa

RESUMO

O crescente interesse por transistores de filme fino à base de óxidos metálicos deve-se às suas excelentes propriedades eletrônica e optoeletrônicas, que os tornam promissores para aplicações em eletrônica transparente e flexível. Entre os diversos óxidos investigados, o óxido de zinco e estanho (ZTO) destaca-se como um semicondutor do tipo-n devido a sua alta mobilidade eletrônica, alta transparência ótica, flexibilidade e excelentes características de transporte, além de ser uma boa opção ambiental. Devido a combinação de determinadas razões estequiométricas entre zinco e estanho formarem um sólido amorfo, este trabalho estuda como razões distintas da composição atômica de Zn:Sn afetam as propriedades elétricas de transistores de filme fino (TFTs) de óxido de zinco e estanho processados por solução. A performance dos transistores foi analisada pela caracterização de propriedades elétricas, como curvas de transferência e de saída, para obter os parâmetros de mobilidade de saturação, tensão de limiar e inclinação sublimiar (*subthreshold swing*), para as diferentes estequiometrias e temperaturas. Os resultados obtidos indicam que a temperatura influencia as propriedades elétricas dos TFTs de ZTO, e que as concentrações mais promissoras foram as com razões Zn:Sn próximas de 1:1.

Palavras-chave: Metal óxido semicondutor; transistor de filme fino; processamento de solução; caracterização elétrica.

ABSTRACT

The growing interest in metal oxide–based thin-film transistors (TFTs) arises from their excellent electronic and optoelectronic properties, which make them promising candidates for applications in transparent and flexible electronics. Among the various oxides investigated, zinc tin oxide (ZTO) stands out as an n-type semiconductor due to its high electron mobility, optical transparency, flexibility, excellent transport characteristics, and environmentally friendly nature. Since certain stoichiometric ratios between zinc and tin can lead to the formation of an amorphous solid, this study investigates how different Zn:Sn atomic ratios affect the electrical properties of solution-processed ZTO TFTs. The transistor performance was analyzed through electrical characterization, including transfer and output curves, in order to extract key parameters such as saturation mobility, threshold voltage, and *subthreshold swing* for different stoichiometries and temperatures. The results indicate that temperature significantly influences the electrical behavior of ZTO TFTs, and that the most promising compositions correspond to Zn:Sn ratios close to 1:1.

Keywords: metal oxide semiconductors; thin-film transistors; solution processing; electrical characterization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1 Óxidos semicondutores	12
2.2 Características de transporte de carga em transistores de efeito de campo	13
2.2.1 Transistores de efeito de campo	13
2.2.2 Curvas de saída e transferência.....	16
2.3 Influência da temperatura nas propriedades elétricas	18
2.4 Estruturas de transistores de filme fino	19
2.5 Deposição da camada ativa por <i>spin-coating</i>	21
3 METODOLOGIA	24
3.1 Preparo das soluções	24
3.2 Escolha do substrato e processo de limpeza.....	24
3.3 Deposição da solução e eletrodos	25
3.4 Caracterização elétrica dos dispositivos	26
3.5 Caracterização elétrica em função da temperatura	27
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Primeiras medidas feitas.....	29
4.2 Dependência com a temperatura.....	34
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

No ano de 1947, o transistor foi inventado por William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain, sendo este um marco para a história da humanidade e gerando um significativo avanço científico e tecnológico na época ^[1,2]. Após a demonstração de que a junção de materiais semicondutores controlava a amplificação de corrente, os transistores de junção bipolar substituíram as válvulas termiônicas, que, apesar de serem uma tecnologia consolidada, eram maiores, mais caras, consumiam mais energia e eram menos confiáveis que os transistores ^[3,4].

Desde a sua evolução, o transistor vem passando por uma notável evolução, dando origem a diferentes tipos de dispositivos, como transistores de junção bipolar e transistores de efeito de campo (do inglês, *field effect transistors*, FETs), incluindo os transistores de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor (MOSFET) ^[3]. Embora ambos atuem como dispositivos de amplificação e chaveamento, diferem quanto ao princípio de funcionamento e à estrutura. O transistor bipolar de junção controla a corrente de saída por meio de uma corrente de base, envolvendo portadores majoritários e minoritários, sendo composto pelos terminais emissor, coletor e base. Já o transistor de efeito de campo é um dispositivo de controle por tensão, em que um sinal variável aplicado aos dois terminais de entrada controla eletronicamente o sinal nos dois terminais de saída, existindo um terminal comum entre a saída e a entrada, sendo seus terminais denominados dreno, fonte e porta ^[5]. Os estímulos elétricos aplicados nesses terminais, assim como os materiais e a configuração geométrica, determinam a funcionalidade e performance do transistor ^[6].

Neste trabalho, estudamos transistores de filme fino (do inglês, *thin-film transistors*, TFTs), que são um tipo especial de transistor de efeito de campo. O processo de efeito de campo ocorre quando uma tensão é aplicada no eletrodo de porta, produzindo um campo elétrico que faz com que portadores de carga se acumulem na interface de contato entre o dielétrico e o semicondutor. Esses portadores são responsáveis pela modulação de corrente entre o dreno e a fonte ^[7].

Os TFTs são dispositivos eletrônicos cujas camadas (semicondutora, eletrodos e camada dielétrica) são depositadas como filmes finos em um substrato que fornece suporte mecânico à estrutura do dispositivo [8]. Esses são amplamente utilizados em diversos equipamentos, como monitores de tela plana, computadores, smartphones e sensores de gases [9].

Como uma alternativa à busca por outros semicondutores além do silício, os óxidos metálicos têm sido muito explorados; entre eles, os óxidos de zinco e de estanho são muito populares [10]. Quando o zinco e o estanho são misturados em concentrações próximas e depositados como um filme fino, devido às suas diferentes estruturas cristalinas, não escolhem qual estrutura adotar, resultando, por fim, em um filme amorfo. Esse processo garante vantagem sobre o silício amorfo, pela maior mobilidade dos portadores de carga dos óxidos [11], ou seja, eles podem conduzir maiores quantidades de corrente quando ligados.

Existem diversas técnicas de deposição de óxidos metálicos semicondutores (SMOs), indo de métodos mais sofisticados, como *RF magnetron sputtering*, deposição de vapor químico (CVD) e deposição a laser pulsado (PLD) até métodos mais simples de processamento de solução, como deposição por jato de tinta, sol-gel, *spray* pirólise e *spin-coating*, que permitem uma variação mais fácil da composição química e baixo custo de revestimento [12, 13, 14]. Os óxidos metálicos, como o óxido de zinco e estanho (do inglês, *zinc-tin oxide*, ZTO), são facilmente processados em solução e apresentam propriedades que são visadas, como alta transparência ótica, estabilidade química, alta mobilidade eletrônica, flexibilidade e excelentes características de transporte de carga, além de serem uma ótima opção ambiental, apresentando baixa toxicidade, o que os torna fortes candidatos para novas aplicações em eletrônicas e optoeletrônicas [11, 12, 15].

Com o intuito de analisar como a variação da razão estequiométrica entre zinco e estanho influencia as propriedades elétricas de transistores de filme fino processados em solução, este trabalho aborda o preparo, a caracterização elétrica e a análise de TFTs de zinco e estanho processados em solução, em que a camada semicondutora (ativa) é depositada usando as soluções precursoras de acetato de zinco dihidratado e cloreto de estanho dihidratado, por meio da técnica de deposição

spin-coating. Também é investigado como as propriedades elétricas analisadas são influenciadas pela variação da temperatura dentro de um criostato.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Óxidos semicondutores

Os óxidos metálicos semicondutores são materiais promissores para a produção de TFTs. Esses materiais possuem propriedades únicas, como condutividade elétrica elevada, alta transparência ótica na região do espectro de luz visível, capacidade de produção em grande escala, baixa temperatura de processamento e capacidade de utilizar substratos flexíveis [16, 17, 18].

A utilização de óxidos metálicos possui a vantagem de permitir seu processamento por meio de uma solução química, em temperaturas relativamente baixas, o que possibilita a utilização de substratos flexíveis e transparentes, como vidro e PET. Neste trabalho, a camada ativa foi formada utilizando a técnica de deposição por *spin-coating*; porém, existem muitas outras formas de deposição de óxidos metálicos que são usadas no meio científico, sendo as deposições por *drop casting*, *spray* pirólise e impressão por jato de tinta alguns dos diversos métodos usados [17].

Entre os óxidos semicondutores mais estudados, o óxido de zinco (ZnO) e o dióxido de estanho (SnO₂) se destacam. Quando são depositados individualmente na forma de filmes finos, estes óxidos tendem a se tornar policristalinos [11]. A combinação desses materiais tem sido amplamente explorada como estratégia para modificar a estrutura e melhorar o desempenho dos dispositivos de filmes finos. Como o ZnO e o SnO₂ possuem estruturas eletrônicas distintas, quando é preparada uma solução de ZnO e é introduzida uma quantidade de SnO₂ superior a 10%, os átomos desses dois óxidos não conseguem adotar uma estrutura cristalina única, o que ocasiona a formação de um filme amorfo de óxido de zinco e estanho (ZTO) [11, 19].

O ZTO é um semicondutor do tipo-n, que possui menos portadores de carga que filmes de ZnO, o que limita sua condutividade. Porém, devido às suas configurações eletrônicas, o ZTO apresenta uma mobilidade eletrônica bastante alta (32 cm²V⁻¹s⁻¹), apesar de seu caráter amorfo [20, 21, 22]. Segundo Zhao *et al.* (2012), diferentes precursores de estanho (Sn) utilizados no preparo do ZTO afetam

fortemente o desempenho desses dispositivos, em razão do estanho (Sn) ser um elemento metálico multivalente, existem compostos Sn(II) próprios e compostos Sn(IV) com diferentes configurações geométricas moleculares ^[23]. O ZTO possui duas formas que foram relatadas: a ilmenita trigonal (ZnSnO_3) e o espinélio cúbico (Zn_2SnO_4), suas células unitárias são representadas na Figura 1. Os atributos atraentes do ZTO são a estabilidade química em relação à oxidação e à corrosão, além da tendência a formar superfícies extremamente lisas em filmes finos ^[20].

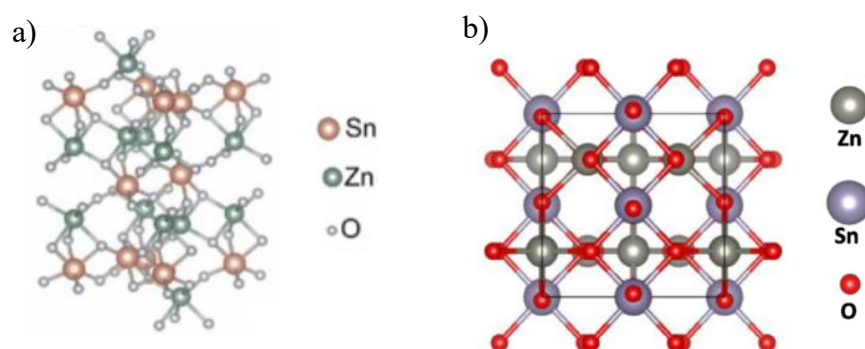


Figura 1 – a) Representação da célula unitária de ilmenita trigonal (ZnSnO_3); b) representação da célula unitária do espinélio cúbico (Zn_2SnO_4). Figuras adaptadas, respectivamente de Jing (2024) e Nguyen (2023).

2.2 Características de transporte de carga em transistores de efeito de campo

2.2.1 Transistores de efeito de campo

Os transistores de óxido metálico funcionam por meio da formação de um acúmulo de cargas na interface entre o semicondutor e o dielétrico. Nos transistores de efeito de campo do tipo-n, quando há a aplicação de uma diferença de potencial (ddp) negativa no eletrodo de porta, ocorre o acúmulo de buracos entre o semicondutor e o dielétrico, impedindo a passagem de corrente no canal. Já quando há a aplicação de uma ddp positiva no eletrodo de porta, ocorre acúmulo de elétrons no semicondutor, que pode ser modulado pela aplicação de uma tensão entre o dreno e a fonte. Essa tensão gera uma corrente elétrica que é controlada de acordo com a tensão aplicada na porta ^[3].

Podemos entender esse funcionamento com o esquema das Figuras 2, 3 e 4. No caso em que não é aplicada uma diferença de potencial entre o dreno e a fonte ($V_{DS} = 0V$), a aplicação de uma tensão negativa no eletrodo de porta ($V_{GS} < 0V$), provoca a atração de buracos entre o semiconductor e o dielétrico, região de acumulação, que é mostrada na Figura 2a. Ao aumentar a tensão de porta para valores positivos, mas inferiores à tensão de limiar (parâmetro que será explicado no Capítulo 2.2.2), o transistor entra na região de depleção, que é a região do semiconductor quando não tem portadores de carga livre, apresentada na Figura 2b.

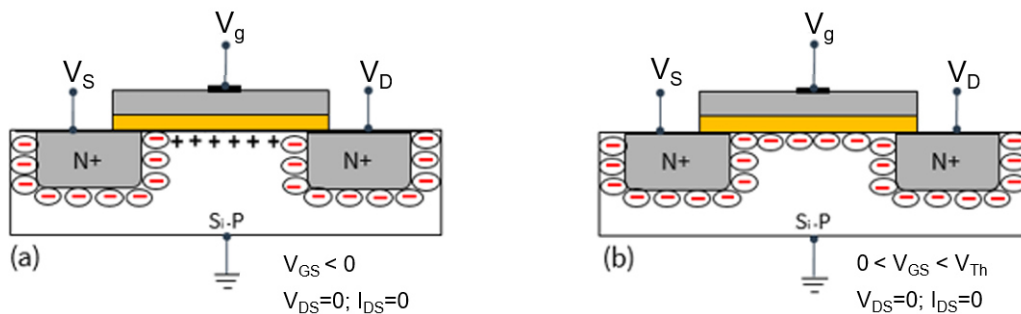


Figura 2 - Transistor de óxido metálico semicondutor trabalhando em: (a) acumulação e (b) depleção. Figura adaptada de Carmo (2022).

Quando a tensão de porta ultrapassa a tensão de limiar, ainda sem aplicar uma ddp entre o dreno e a fonte, ocorre um grande acúmulo de elétrons livres na região entre o semiconductor e o dielétrico, esse acúmulo de cargas é chamado de canal. Como consideramos $V_{DS} = 0V$, não há passagem de corrente e, como as cargas acumuladas nessa região são elétrons e não mais buracos, o transistor está na região de inversão (Figura 3c). Considerando agora a aplicação de uma ddp entre o dreno e a fonte, haverá passagem de corrente pelo canal, mas é preciso analisar como a tensão de dreno e fonte é aplicada em relação a $V_{GS} - V_{Th}$ para determinar o comportamento do transistor. Para o caso, em que $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_{Th}$, o canal estende-se da fonte até o dreno, sendo gerada uma região de depleção de portadores de carga perto do eletrodo de dreno (Figura 3d). Assim, o transistor opera na região linear, cuja corrente de dreno e fonte é descrita na equação 1 [26].

$$I_{DS} = \frac{W \mu C_{ox}}{L} \left[(V_{GS} - V_{Th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (1)$$

Sendo o comprimento e a largura do canal, respectivamente, W e L , a capacitância por unidade de área (C_{ox}) é descrita na equação 2.

$$C_{ox} = \frac{C}{A} = \frac{k\epsilon_0}{d} \quad (2)$$

Sendo ϵ_0 a constante de permissividade do vácuo, k é a constante dielétrica do material e d é a espessura do dielétrico.

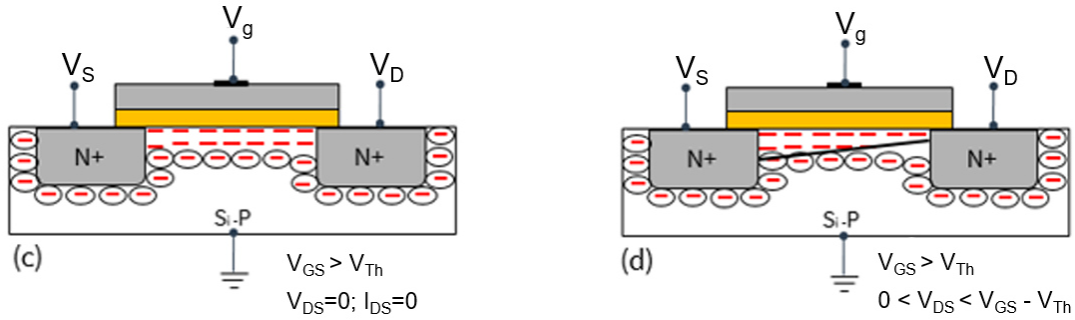


Figura 3 - Transistor de óxido metálico semicondutor trabalhando em: (c) inversão e (d) região linear. Figura adaptada de Carmo (2022).

Aumentar o valor de tensão V_{DS} para que se iguale a $V_{GS} - V_{Th}$, faz com que a região de depleção cresça até ocorrer o estrangulamento do canal (Figura 4e), fenômeno chamado de *pinch-off*. Neste momento, a tensão está em transição da região linear para a região de saturação. Ao continuar aumentando V_{DS} , seu valor ultrapassará $V_{GS} - V_{Th}$, fazendo a região de estrangulamento se deslocar em direção à fonte, fazendo a corrente atingir seu valor máximo, devido a limitação da passagem de elétrons pelo canal. Se continuar aumentando o valor de V_{DS} não causará aumentos significativos da corrente, e o transistor passa a operar no regime de saturação, sua corrente é descrita na equação 3 (Figura 4f) [26, 6].

$$I_{DSAT} = \frac{W \mu C_{ox}}{L} \frac{(V_{GS} - V_{Th})^2}{2} \quad (3)$$

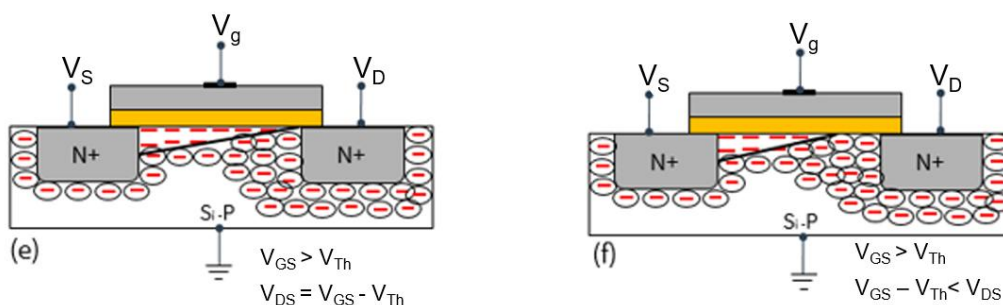


Figura 4 - Transistor de óxido metálico semicondutor trabalhando em: (e) transição linear/saturação e (f) região de saturação. Figura adaptada de Carmo (2022).

2.2.2 Curvas de saída e transferência

Os parâmetros utilizados para analisar a eficiência dos TFTs são retirados das curvas de saída e transferência. Tais curvas consistem na medição da corrente entre a fonte e o dreno por meio da variação das tensões aplicadas entre os eletrodos de contato. A curva de saída é obtida fixando-se a tensão no eletrodo de porta e fazendo-se uma varredura na tensão aplicada entre os eletrodos de fonte e dreno (Figura 5a), o que promove a modulação da corrente no regime linear e, posteriormente, a saturação da corrente no canal. Já a curva de transferência é obtida fixando-se a tensão entre a fonte e o dreno e fazendo-se uma varredura da tensão no eletrodo de porta (Figura 5b). Dessa curva são extraídos os parâmetros experimentais típicos do dispositivo.

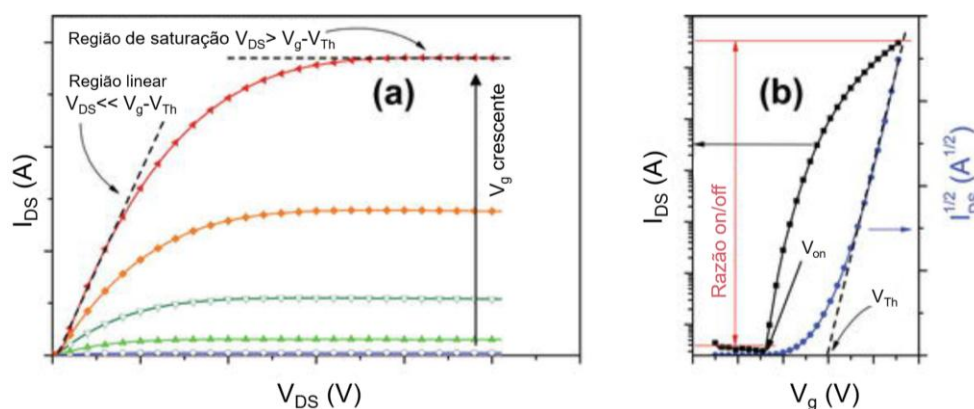


Figura 5 - Curvas características de TFTs: (a) curvas de saída, com regiões lineares e de saturação características; b) curva de transferência e curva de $I_{DS}^{1/2}$ versus V_G

(escala linear), com extrapolação de V_{Th} e inclinação para determinação da mobilidade de saturação. Figura adaptada de Braga (2018).

Da curva de transferência, foram retirados alguns parâmetros importantes para analisar o comportamento dos transistores, sendo eles:

- Tensão de limiar (V_{Th}): Nos semicondutores de óxido amorfo, a definição física da tensão de limiar é diferente da utilizada em filmes com estrutura cristalina. Isso ocorre porque o filme amorfo apresenta uma grande densidade de armadilhas de carga que capturam parte dos elétrons induzidos pela tensão aplicada à porta. Para tensões baixas, a maior parte da carga acumulada no canal é aprisionada nesses estados, contribuindo para a carga estática, mas não para a condução. À medida que a tensão de porta aumenta, as armadilhas vão sendo preenchidas, até o ponto em que os elétrons passam a se mover livremente no canal. A condição de limiar ocorre quando a razão entre a densidade de portadores livres e aprisionados atinge um valor crítico, o qual depende da densidade e profundidade das armadilhas, assim como do material e do método de processamento da camada ativa [27,28].

De uma forma mais direta, é o valor mínimo de tensão aplicada ao terminal de porta de um transistor para que uma corrente significativa comece a fluir no canal [29]. Sendo obtida graficamente a partir da curva de transferência, em que seu valor é obtido no ponto em que a linearização da curva da $\sqrt{I_{DS}}$ intercepta o eixo de V_G .

- Razão on/off: é a razão entre o maior valor de corrente da curva de transferência (estado *on*) e a corrente do dispositivo desligado (estado *off*). A corrente mínima é geralmente dada pela corrente de fuga ou pelo ruído do equipamento de medição, enquanto a corrente máxima depende do material com que o semicondutor é feito e da eficiência com que o campo elétrico injeta cargas no semicondutor [29].
- Mobilidade de saturação (μ_{sat}): representa a capacidade de transporte dos portadores de carga no canal do transistor, na região de saturação da curva

de transferência. Em um TFT, a mobilidade pode ser afetada pela rugosidade na superfície, defeitos estruturais ou impurezas ionizadas [29], sendo definida pela equação (4).

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_{ox}} \left(\frac{\partial \sqrt{I_{DS}}}{\partial V_g} \right)^2 \quad (4)$$

- *Subthreshold swing* (SS): indica o quão eficientemente a corrente de dreno e fonte aumentam em uma década, por meio da variação da tensão na porta, sendo definida pela equação (5).

$$SS = \left(\frac{\partial V_g}{\partial (\log I_{DS})} \right) \quad (5)$$

Normalmente, $SS \ll 1$, em torno de 0,10 - 0,30 V. dec⁻¹. Valores menores de SS significam que a corrente aumenta com velocidades mais altas e tem um consumo menor de energia [29].

2.3 Influência da temperatura nas propriedades elétricas

A temperatura de operação de um transistor influencia fortemente seu comportamento por meio de diversos mecanismos físicos, sendo importante entender o comportamento do dispositivo em condições extremas de temperatura para saber o impacto que terá nos parâmetros elétricos do dispositivo, na energia de ativação e na mobilidade de cargas. Com o crescente interesse em eletrônica de baixas temperaturas, devido as suas aplicações em supercondutividade, detectores de infravermelho, instrumentação criogênica na medicina e comunicação por satélites, tornou-se necessário entender mais profundamente o funcionamento de semicondutores em baixas temperaturas [30].

A temperatura, no caso de TFTs de óxido semicondutores, governa a variação da tensão de limiar (V_{Th}) principalmente pela densidade de estados localizados no subgap do semicondutor, bem como por parâmetros geométricos do dispositivo, como a espessura do canal e a capacitância de porta. Sendo que, esses fatores influenciam termicamente a ocupação das cargas aprisionadas, causando deslocamentos da tensão de limiar com a temperatura [31].

Em relação a energia de ativação, em baixas temperaturas, o transporte de carga é predominantemente governado por armadilhas rasas localizadas na interface semiconductor/dielétrico, resultando em energias de ativação associadas a esses estados. Em regimes de temperatura mais elevados, a energia de ativação passa a refletir a ativação térmica de portadores inicialmente aprisionados em estados localizados mais profundos para a banda de condução, bem como a influência de estados de armadilha carregados na camada dielétrica [12].

Por fim, a forma que a temperatura afeta a mobilidade muda dependendo da estrutura do material, no caso de semicondutores cristalinos, como o silício, dentre alguns mecanismos que ocasionam uma variação da mobilidade, o aumento da temperatura faz com que as vibrações da rede cristalina (fônons) se intensifiquem, o que gera uma resistência no movimento dos elétrons, essa resistência causa uma diminuição na mobilidade [30]. Já no caso de óxidos semicondutores amorfos, como ZTO, ou nanocristalinos, como ZnO, o transporte de carga é limitado pela presença de estados localizados, nos contornos de grãos ou na interface entre o dielétrico e o semiconductor, que aprisionam portadores, sendo que o aumento da temperatura libera esses portadores aprisionados em estados localizados gerando um aumento da mobilidade [12].

2.4 Estruturas de transistores de filme fino

Os transistores de filme fino (TFTs) são dispositivos cuja camada ativa (semiconductor), camada dielétrica e eletrodos são depositados como filmes finos sobre um substrato que dá suporte mecânico à sua estrutura, sem interferir nas características elétricas dos transistores. Os eletrodos de fonte e dreno geralmente são formados por longas faixas metálicas paralelas, que ficam separadas por uma distância L (do inglês, *length*), que é o comprimento do canal. Já a distância de sobreposição dos eletrodos de fonte e dreno no plano do filme é chamada de W (do inglês, *width*), que é a largura do canal [8], como apresentado na Figura 6.

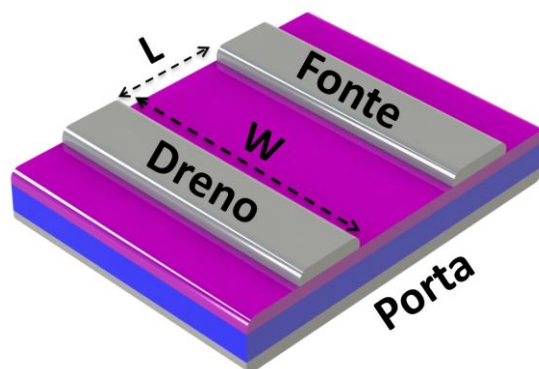


Figura 6 – Esquema da estrutura do transistor, mostrando o comprimento (L) e largura (W) do canal. (Autoria própria).

Os TFTs podem ser construídos de diferentes formas, mas apresentam quatro estruturas básicas, como é mostrado na Figura 7. A diferença dessas estruturas é a posição em que os eletrodos estão em relação à camada ativa. Nas configurações de porta superior (Figuras 7a e 7b), o eletrodo de porta é depositado sobre a camada dielétrica, que é depositada sobre a camada semicondutora. Em alguns métodos de deposição do material dielétrico, isto não é possível. Os eletrodos de dreno e fonte podem ser depositados tanto sob quanto sobre a camada semicondutora.

Já as estruturas de porta inferior (Figuras 7c e 7d) destacam-se por apresentarem a mesma configuração inferior de substrato, eletrodo de porta e camada dielétrica, o que é conveniente quando apenas a camada semicondutora é alterada. Porém, essas estruturas exigem cuidados adicionais para não danificar a camada dielétrica, que pode ocorrer dependendo do solvente utilizado na deposição da camada ativa semicondutora ou se a temperatura de deposição da camada semicondutora for maior do que àquela suportada pelo dielétrico [8].

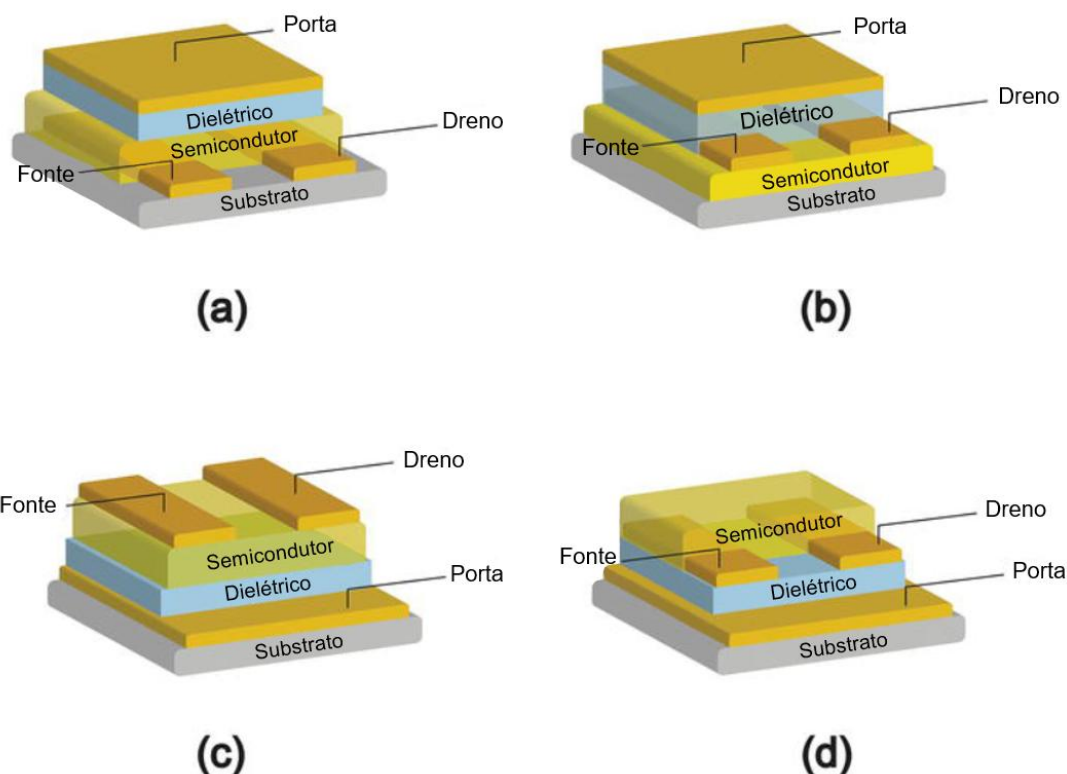


Figura 7 - Configurações de eletrodo mais utilizadas para transistores de filme fino: (a) porta superior, contato inferior; (b) portão superior, contato superior; (c) porta inferior, contato superior; (d) porta inferior, contato inferior. Figura adaptada de Braga *et al.* (2018).

2.5 Deposição da camada ativa por *spin-coating*

Dentre os métodos de deposição da camada ativa, o método de *spin-coating* destaca-se devido ao seu baixo custo de fabricação [8], capacidade de aplicação de filmes altamente uniformes com espessura controlável e reprodutibilidade [32], que são características visadas na produção de TFTs de óxido metálico.

Esta técnica consiste em depositar uma camada fina e uniforme em um substrato plano. A deposição de filmes finos por *spin-coating* baseia-se na rotação do substrato, que gera uma força centrífuga que espalha a solução precursora uniformemente sobre este substrato, com posterior evaporação do solvente [33] (Figura 8).

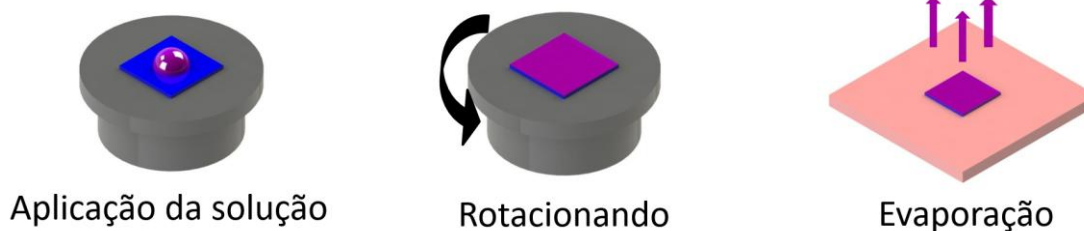


Figura 8 – Processo de deposição da solução por *spin-coating*. (Autoria própria).

Na etapa de rotação, o substrato é rapidamente acelerado a uma alta velocidade angular, fazendo com que a força centrífuga que atua sobre o líquido vença suas forças adesivas. Isso faz com que a maior parte do líquido seja ejetada do substrato; em seguida do processo de evaporação, faz com que diminua a espessura do filme sobre o substrato, mostrado na Figura 9. Outros parâmetros que afetam significativamente a espessura do filme são a viscosidade e concentração da solução [32, 34].

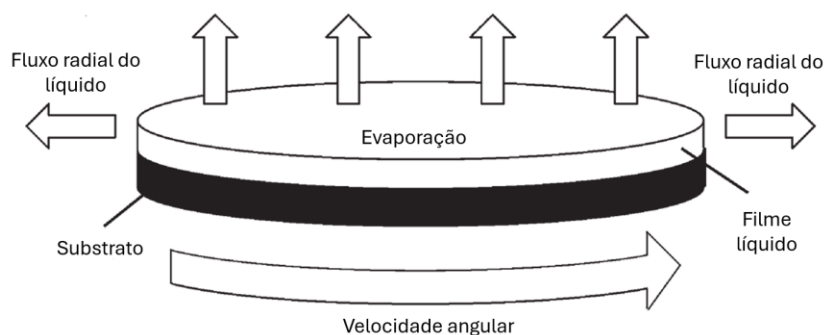


Figura 9 – Esquema do principal processo do método de *spin-coating*. Figura adaptada de Norrman *et al.* (2005).

Essa técnica é comumente realizada usando concentrações na faixa de 0,03 – 0,3 M, para dar origem a filmes precursores orgânicos. Esses filmes passam por um processo de pirólise, onde os substratos são aquecidos ou em uma placa de aquecimento ou em um forno, a temperaturas que sobreponham a temperatura de degradação do composto orgânico; geralmente acima de 300°C [8]. Depois da decomposição térmica sofrida pela fase precursora orgânica, formam-se aglomerados de óxidos cercados por alguns vazios. Para garantir a formação de um

filme de óxido uniforme e o preenchimento desses vazios, é feita a deposição de múltiplas camadas por *spin-coating* ^[35], intercaladas por um tratamento térmico que desenvolve a formação de óxido e evita que as camadas anteriores sofram dissolução ^[8].

3 METODOLOGIA

3.1 Preparo das soluções

O primeiro passo foi preparar soluções precursoras, utilizando dois sais metálicos: o sal de acetato de zinco dihidratado (219,51 g/mol) para a produção de óxido de zinco, e o sal de cloreto de estanho dihidratado (225,65 g/mol) para produção de óxido de estanho. Como solvente da solução foi usado 2-metoxietanol.

Para preparar as soluções foi utilizada a equação (6). Para ambas as soluções a concentração molar utilizada foi 0,1 mol/L, e a massa molar utilizada foi a de cada um dos sais, onde a massa de sal necessária foi encontrada para o volume estimado de solução que seria gasto.

$$m[g] = M[\text{mol/L}] \cdot MW[\text{g/mol}] \cdot V[L] \quad (6)$$

Com as soluções prontas, estas foram misturadas em frascos menores, utilizando o volume como parâmetro para obter diferentes razões estequiométricas entre zinco e estanho, nas proporções de 1:0, 1:0,10, 1:0,25, 1:0,5, 1:1, 1:2 e 1:4 (Zn Sn). Para a homogeneização dessas novas soluções, adicionou-se uma barrinha de metal dentro dos frascos que ficavam sobre um agitador magnético por 12h.

Após esse período, adicionou-se etanolamina à solução como agente estabilizador para torná-la mais homogênea. Utilizou-se uma concentração molar de 0,3 mol/L, e sua massa molar é 61,08 g/mol.

3.2 Escolha do substrato e processo de limpeza

Foram utilizados substratos de silício dotado tipo-p (boro) de 550 µm de espessura, com uma camada de 100 nm de dióxido de silício (SiO₂) crescido termicamente. Na base da bolacha foi depositada uma camada de alumínio para melhorar o contato elétrico, sendo que o alumínio e o próprio substrato foram utilizados como eletrodo de porta. Como o dióxido de silício é um isolante, ele foi utilizado como o dielétrico do transistor (Figura 10). A escolha da bolacha de silício

vendida comercialmente, deve-se ao fato de que sua superfície é muito regular e bastante padronizada, o que garante alta estabilidade e reprodutibilidade das amostras.

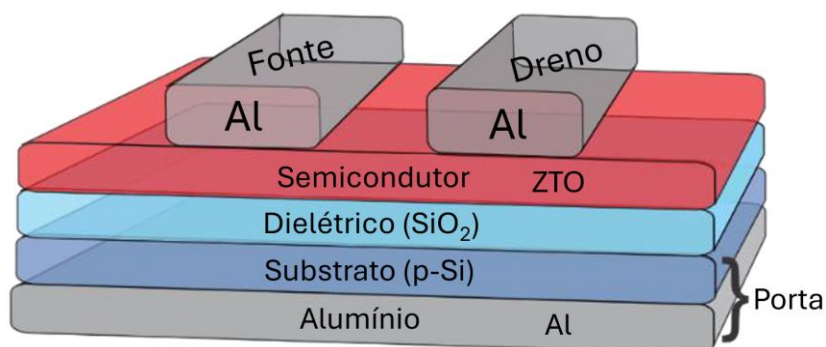


Figura 10 – Imagem representativa da estrutura do transistor confeccionado. Figura adaptada de Braga (2018).

Para remover possíveis resíduos orgânicos presentes na superfície, os substratos foram submetidos a um processo de limpeza em múltiplas etapas. Inicialmente, foram lavados sobre água corrente para retirada de resíduos maiores, em seguida, foram colocados em um suporte de amostras, o qual foi levado dentro de um béquer contendo água deionizada e detergente alcalino. O conjunto foi colocado em um limpador ultrassônico, onde ficou por 15 minutos sob aquecimento. Dado este tempo, os substratos foram retirados e secos, sendo submetidos novamente ao processo, mas sem aquecimento e com o béquer contendo acetona e, em seguida, álcool isopropílico. Por fim, os substratos receberam um tratamento de plasma em sua superfície por 10 minutos.

3.3 Deposição da solução e eletrodos

Para o processo de deposição, foi escolhida a estrutura dos transistores sendo de porta inferior e contatos superiores, pois esta é uma estrutura bastante conveniente para produção de muitos dispositivos variando apenas a deposição da camada ativa e dos eletrodos de contato (Figura 10).

Cada substrato recebeu três camadas de solução, aplicadas com auxílio de uma pipeta de 150 μL . A fim de evitar contaminações, uma ponteira diferente foi utilizada para cada solução. Durante o processo, os substratos foram rotacionados por 30 segundos a 3000 rpm e, em seguida, por 30 segundos a 6000 rpm. Após a rotação, estes foram levados a uma mesa aquecida a 450°C, sendo que, nas duas primeiras deposições, foram deixados por 5 minutos sobre a superfície aquecida e, na terceira deposição, são deixados por 1 hora, para toda a solução precursora ser evaporada, restando apenas o óxido metálico na superfície do substrato.

Para o próximo passo, foi feita a deposição dos contatos de dreno e fonte pela evaporação de alumínio feita em uma evaporadora Edwards auto 306, utilizando uma máscara de sombras com razão W/L (5 mm/0,1 mm) dos eletrodos de 50.

Inicialmente, foi utilizada uma máscara de sombra que produz três transistores por substrato, mas, logo em seguida, utilizou-se uma máscara de sombra com sete transistores por substrato, para ter mais amostras e mais dados para análise. Os transistores feitos com essas máscaras são mostrados, respectivamente, na Figura 11.

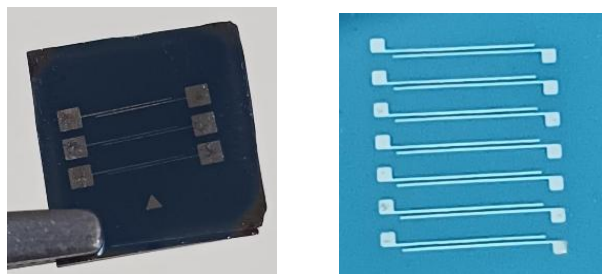


Figura 11 – Substrato com três e sete transistores, respectivamente. (Autoria própria).

3.4 Caracterização elétrica dos dispositivos

A caracterização elétrica dos dispositivos foi realizada utilizando um programa em Python, desenvolvido pelo grupo de pesquisa, para controlar os

equipamentos Keithley 2410-C e Keithley 2430, que aplicam tensões no dreno, fonte e porta e medem a corrente no canal.

São feitas as medidas de duas curvas principais, sendo a primeira a curva de saída, onde a tensão da porta é mantida fixa para os valores de 0, 10, 20 e 30 V, enquanto ocorre uma varredura da tensão no dreno e fonte entre 0 e 25 V. Já, a curva de transferência, mantém a tensão entre o dreno e fonte fixa para os valores de 10, 20 e 30 V, enquanto ocorre uma varredura da tensão na porta entre -15 e 25 V. A partir da curva de transferência, foram extraídos alguns parâmetros importantes para a análise do desempenho dos transistores, sendo eles: tensão de limiar, mobilidade de saturação, *subthreshold swing* e razão on/off.

3.5 Caracterização elétrica em função da temperatura

Após a medição de todos os transistores produzidos anteriormente, observou-se que as razões estequiométricas de 1:0, 1:0,5, 1:1 e 1:2 (Zn:Sn) apresentaram os melhores desempenhos. Com base nesses resultados, foram preparadas novas amostras, utilizando uma máscara contendo três dispositivos por substrato, conforme ilustrado na Figura 11. Esses dispositivos foram medidos em um criostato, com a temperatura variando de 80 K a 350 K, a fim de analisar a influência da temperatura sobre seu comportamento elétrico.

Os dispositivos foram presos dentro do criostato, de vácuo dinâmico abaixo de 10^{-3} mbar, e os contatos de dreno, fonte e porta foram conectados em alguns fios ligados às Keithley 2410-C e Keithley 2430, os mesmos utilizados anteriormente. O criostato foi ligado em um medidor e controlador de temperatura (Lakeshore), como mostrado na Figura 12.

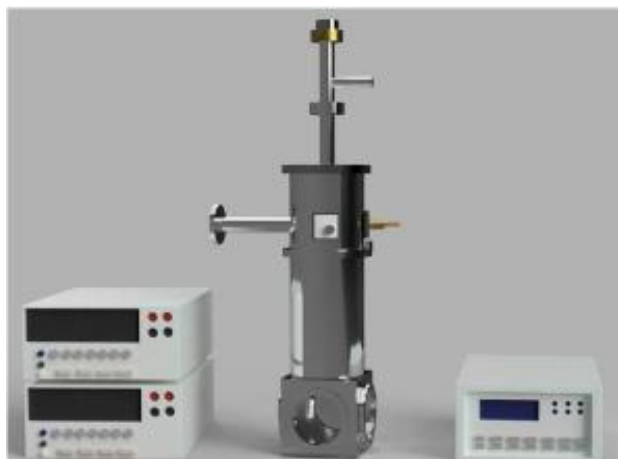


Figura 12 – Equipamentos utilizados nas medições elétricas: Kethiley 2430 e Kethiley 2410-C; criostato; medidor e controlador de temperatura (Lakeshore). (Autoria própria).

Inicialmente, foi adicionado nitrogênio líquido dentro do criostato, e sua temperatura foi aumentada para 350 K, a fim de retirar todo o oxigênio adsorvido no canal (semicondutor) do transistor. O dispositivo foi mantido a esta temperatura por 10 minutos, permitindo estabilizar a temperatura dentro do criostato. Após este tempo, o aquecedor foi desligado e a temperatura foi diminuída até 120 K. As medidas foram feitas nas temperaturas de 120, 180, 240, 300 e 350 K. Para cada temperatura, aguardou-se a estabilização por 10 minutos, depois o programa em Python realizava as medidas das curvas de saída e de transferência. Tendo terminado as medições, a temperatura foi aumentada para o próximo valor e o procedimento se repetiu, para todos os substratos.

Após ter feito as medições no criostato, os dados coletados foram graficados no aplicativo de criação de gráficos Origin. Por meio dos gráficos das curvas de transferência para cada temperatura, foram obtidos os valores para criar outros gráficos para obter as informações de tensão sublimar, mobilidade de saturação e densidade de armadilhas de carga.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Primeiras medidas feitas

Usando as medidas feitas no início deste trabalho, foram construídos gráficos das curvas de saída e transferência para as diferentes razões estequiométricas analisadas.

A Figura 13 mostra o gráfico para razão de 1:0 Zn:Sn. Apesar de apresentar armadilhas de carga na interface, que fazem com que ele se ligue para tensões negativas na porta, o transistor apresenta curvas características do tipo-n.

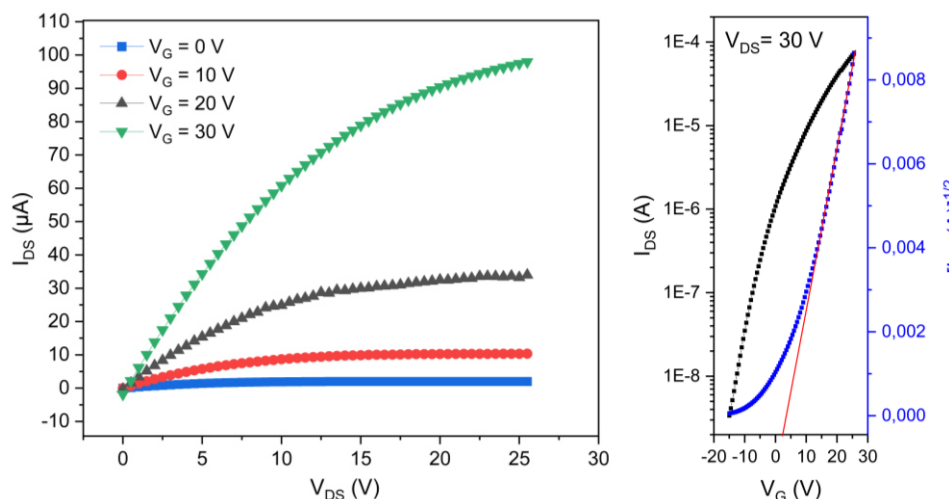


Figura 13 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:0. (Autoria própria).

As Figuras 14 e 15 mostram as curvas para as razões de 1:0,25 e 1:0,10 Zn:Sn. Observa-se que, em transistores com quatro ou mais partes de zinco para uma de estanho, os transistores são pouco condutores. Isso pode ser visto olhando as curvas de transferência, onde a corrente máxima entre o dreno e a fonte (I_{DS}) fica em torno de microamperes (μA).

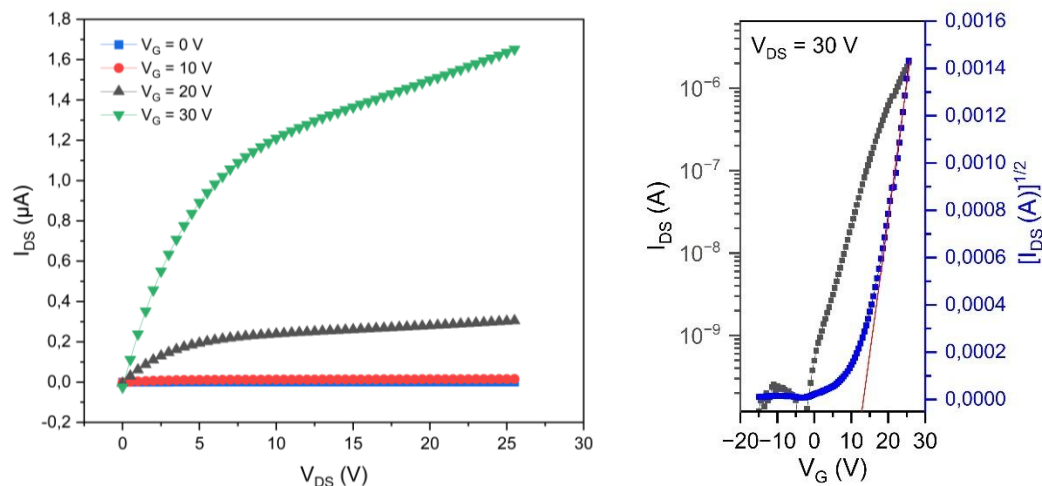


Figura 14 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:0,25. (Autoria própria).

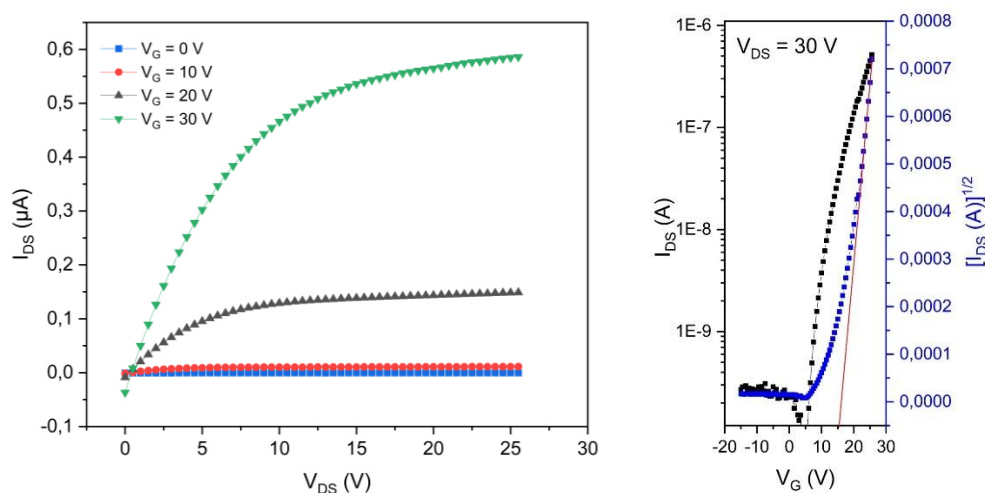


Figura 15 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:0,10. (Autoria própria).

As Figuras 16,17 e 18 mostram as curvas para as razões de 1:0,5, 1:1 e 1:2 Zn:Sn. Consegue-se perceber que tais curvas têm uma razão *on/off* maior que para as razões estequiométricas vista acima, devido à maior quantidade de estanho utilizada na razão entre zinco e estanho, que melhora a condução elétrica, pois é mais condutor que o zinco.

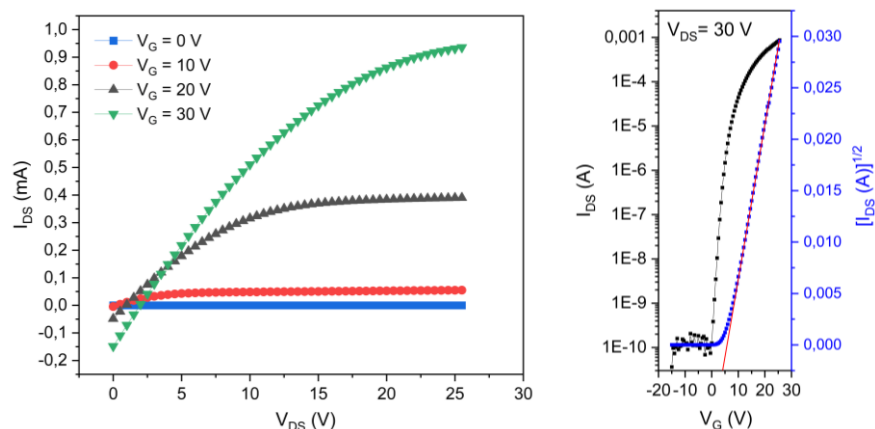


Figura 16 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:0,5. (Autoria própria).

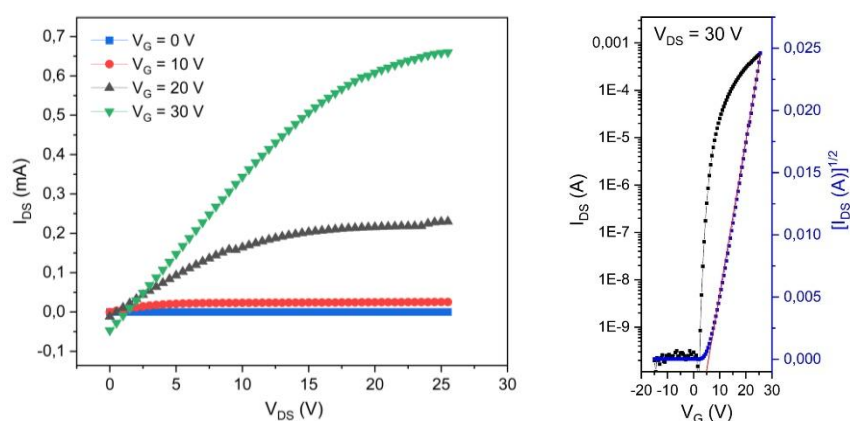


Figura 17 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:1. (Autoria própria).

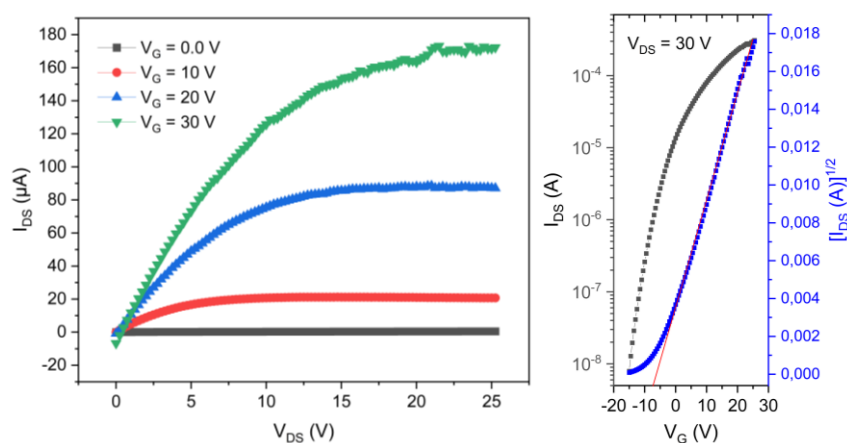


Figura 18 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:2. (Autoria própria).

A Figura 19 mostra as curvas para a razão de 1:4 Zn:Sn. Observa-se que as curvas ficaram bastante condutoras, pois a corrente I_{DS} , na curva de transferência, já começa em valores próximos de 100 μA . Isso indica que o estanho aumenta sua condução elétrica, mas, em proporções de quatro ou mais vezes de estanho para zinco, faz com que os transistores apresentem um comportamento quase ôhmico, como pode ser visto no comportamento das curvas de saída.

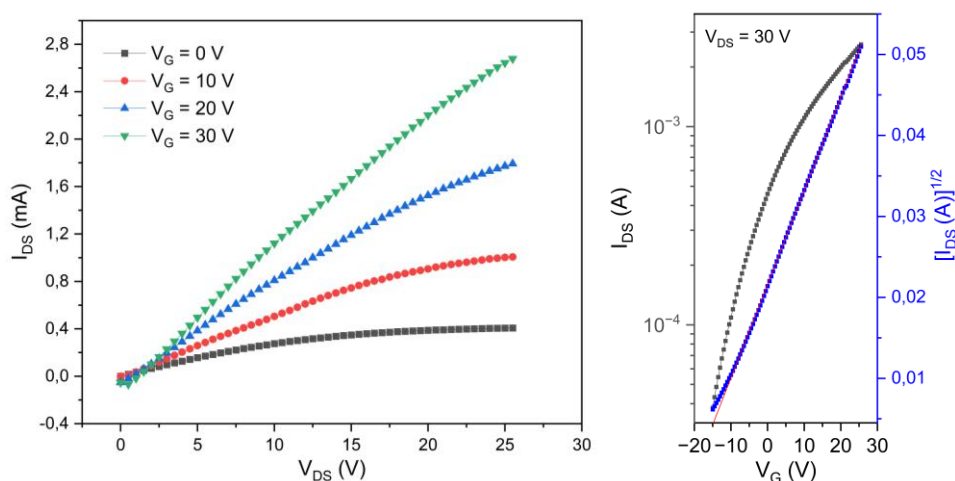


Figura 19 - Gráficos das curvas de saída e transferência, respectivamente, para a concentração de 1:4. (Autoria própria).

Das curvas de transferência mostradas para diferentes razões estequiométricas, foram extraídos os parâmetros de mobilidade de saturação, corrente de *on/off*, *subthreshold swing* e tensão de limiar. Esses resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de mobilidade de saturação (μ_{sat}), corrente de *on/off* ($I_{\text{on/off}}$), *subthreshold swing* (SS) e tensão de limiar (V_{TH}) para as razões estequiométricas de 1:0; 1:1; 1:2; 1:0,5; 1:4; 1:0,25 e 1:0,10.

Concentrações (Zn:Sn)	μ_{sat} ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$I_{\text{on/off}}$	SS (V dec ⁻¹)	V_{TH} (V)
1:0	0,285	$2,1 \cdot 10^4$	7,14	2,2
1:0,10	0,011	$2,1 \cdot 10^3$	5,07	14,6
1:0,25	0,025	$1,2 \cdot 10^4$	5,96	12,4
1:0,5	2,784	$6,7 \cdot 10^6$	2,01	4,2
1:1	2,573	$2,8 \cdot 10^6$	2,49	4,8
1:2	0,380	$4,2 \cdot 10^4$	2,85	- 7,4
1:4	1,533	$7,0 \cdot 10^1$	17,9	-14,8

Quando os parâmetros elétricos dos transistores são analisados, busca-se observar alguns comportamentos, como a alta mobilidade, utilizando como fator de comparação, tem-se que a mobilidade do silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) chega até aproximadamente $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [16,36]. Para a corrente de *on/off* espera-se valores superiores a 10^6 e para o *subthreshold swing* (SS) busca-se valores próximos de zero, pois quanto menor esse valor significa que a corrente aumenta rapidamente consumindo pouca energia. Além disso, espera-se que a tensão de limiar (V_{TH}) seja zero, pois o dispositivo não teria corrente de fuga em tensões negativas e não precisaria de uma tensão alta para o funcionamento do dispositivo.

Com base nesses critérios, pode-se analisar os parâmetros apresentados na tabela 1. Dos resultados obtidos, vê-se que os transistores que apresentaram os melhores parâmetros desejados são os transistores com concentrações próximas de zinco e estanho.

4.2 Dependência com a temperatura.

Com uma faixa menor de concentrações para trabalhar, foram produzidos novos dispositivos para as concentrações 1:0, 1:0,5, 1:1 e 1:2 Zn:Sn. Esses transistores foram medidos dentro de um criostato, para analisar seus comportamentos elétricos em diferentes temperaturas. A Figura 20 apresenta as curvas de transferência para as quatro concentrações, variando a temperatura de 100K a 350K.

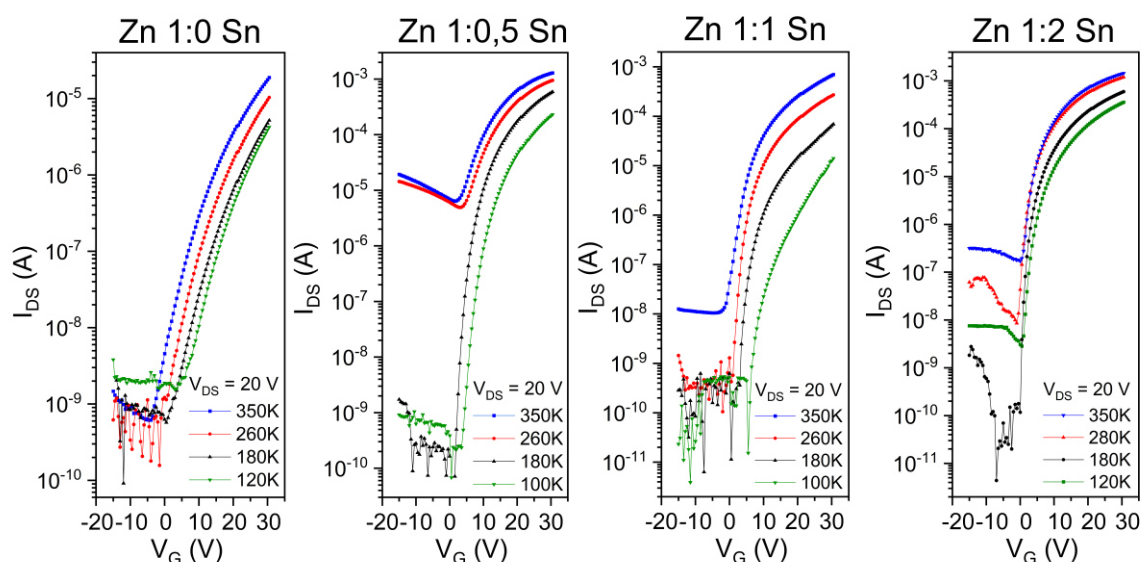


Figura 20 - Dependência da temperatura nas curvas de transferência dos TFT, para transistores de ZTO para diferentes razões estequiométricas de Zn:Sn (1:0, 1:1, 1:2, 1:0,5). (Autoria própria).

Pelos gráficos da Figura 20, observa-se que tanto a razão estequiométrica, quanto a temperatura influenciam fortemente as curvas de transferência. Para as razões estequiométricas de 1:0,5, 1:1 e 1:2 Zn:Sn, pode-se perceber que, para valores maiores de temperatura, houve um aumento para os valores da corrente *off*, esse comportamento pode ser atribuído à presença de armadilhas de carga e ao próprio aumento na concentração intrínseca de portadores de carga, que facilitam a locomoção dos elétrons.

Dessas curvas foram obtidos os parâmetros de mobilidade de saturação (μ_{sat}), corrente de *on/off* ($I_{\text{on/off}}$), *subthreshold swing* (SS), mostrados na Figura 21.

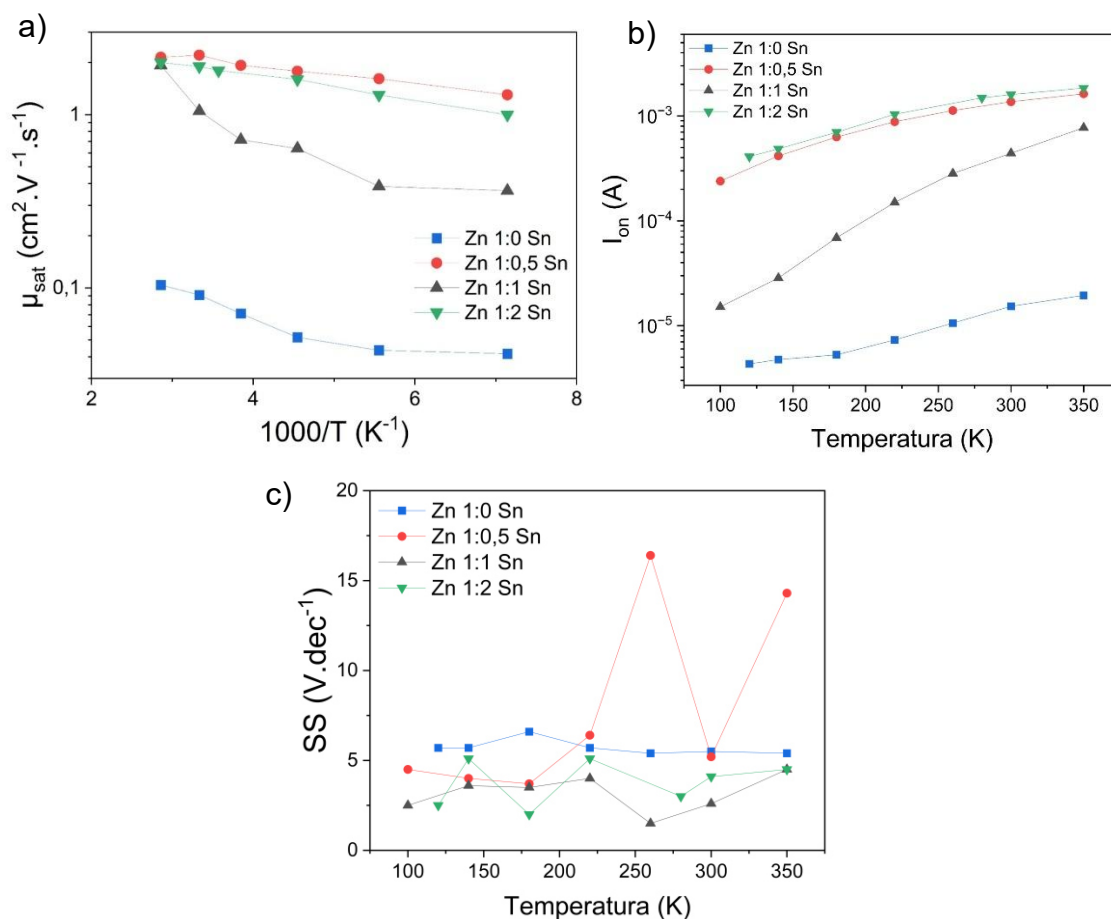


Figura 21 - a) Dependência da temperatura dos TFT para mobilidade de saturação. **b)** Dependência da temperatura da corrente máxima para diferentes razões estequiométricas de Zn:Sn. **c)** Dependência da temperatura do *Subthreshold Swing* (SS) para diferentes razões estequiométricas. (Autoria própria).

Analisando os parâmetros variados em relação a temperatura e razão estequiométrica, primeiramente, na Figura 21a é apresentado o gráfico da mobilidade de saturação. Para analisá-lo, é preciso atentar-se ao eixo com os valores de $1000/T$ (K^{-1}), pois como é dado pelo inverso da temperatura, conforme os valores desse eixo aumentam o valor da temperatura diminui, ou seja, como as curvas da mobilidade de saturação possuem um comportamento decrescente, significa que temos um aumento do valor da mobilidade com a temperatura. Este comportamento é coerente com o que foi discutido no Tópico 2.3 e com os

resultados apresentados no trabalho de Braga *et al.* (2022). Também, nota-se que a composição estequiométrica se altera com o incremento de estanho, elevando a mobilidade de saturação, porém, a concentração de 1:0,5 Zn:Sn está fora do esperado, uma hipótese é que há uma mudança estrutural na mistura. Como o ZnO é nanocristalino, talvez em concentrações menores de estanho, essa cristalinidade ainda se mantenha e, a partir de uma certa concentração, ocorra o aparecimento de uma fase amorfa.

Na Figura 21b, o gráfico da corrente de *on* aumenta junto com a temperatura. Esse comportamento ocorre porque, em temperaturas mais elevadas, os portadores de carga têm mais energia para transitar entre as bandas de energia, o que aumenta a corrente máxima que flui pelo canal do transistor. No caso da estequiometria, o comportamento é dado da mesma forma para a mobilidade.

A Figura 21c apresenta o gráfico do *Subthreshold Swing* (SS). Como discutido por Braga *et al.* (2022), a presença de estados superficiais na região entre o semicondutor e o dielétrico influencia fortemente o transporte de carga através do canal, pois, durante a operação, a maior parte dos portadores se concentra nessa região. Nessa condição, os estados de armadilhas rasas tornam-se dominantes no regime sublimiar, o que significa que este parâmetro é fortemente afetado por esses estados. Entretanto, pelo gráfico, não foi possível identificar uma tendência clara para SS, sendo que os valores apresentam uma grande oscilação. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de defeitos profundos no material, os quais não são efetivamente sondados na região sublimiar.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho estudou o desempenho de transistores de filme fino processados em solução variando a razão estequiométrica entre zinco e estanho, e demonstrou ser possível relacionar os parâmetros elétricos desses materiais com a temperatura. Mesmo que a energia de ativação não possa ser especificamente correlacionada com a temperatura, pode-se observar como a razão estequiométrica de Zn:Sn tem impacto na mobilidade de saturação e na corrente de on dos dispositivos.

Com base nos resultados experimentais obtidos, conclui-se que as razões estequiométricas entre zinco e estanho que produziram melhores dispositivos foram valores próximos de 1:1 Zn:Sn. Sendo que as razões de 1:0,5 e 1:2 Zn:Sn foram as que apresentaram melhores resultados de mobilidade de saturação e corrente de on , porém também foram as razões onde as curvas de transferência apresentaram a maior variação térmica. Já a razão de 1:1 Zn:Sn teve resultados próximos aos parâmetros elétricos apresentados em 1:0,5 e 1:2 Zn:Sn, porém as curvas de transferência mostraram maior estabilidade térmica. Indicando que ainda há necessidade de mais estudos para produzir dispositivos que apresentem uma melhor relação entre o conjunto de parâmetros elétricos esperados e uma boa estabilidade térmica.

Os próximos passos para a continuação deste trabalho são explorar intervalos menores e mais variações de razões estequiométricas indo de 1:0,5 até 1:2 Zn:Sn e a aplicação desses dispositivos em um sistema de detecção de gases e substâncias voláteis em temperaturas distintas.

REFERÊNCIAS

- 1 P. K. Bondyopadhyay. **In the beginning [junction transistor]**. Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 1, pp. 63-77, 1998, doi: 10.1109/5.658760.
- 2 Hiroshi Iwai, Durga Misra. **The Transistor was Invented 75 Years Ago: A Big Milestone in Human History**. Electrochem. Soc. Interface 31, 2022. DOI: 10.1149/2.F13224IF.
- 3 Braga, J. P. **Estudo das propriedades elétricas e morfológicas de transistores de filme fino de óxido de zinco processados por solução**. Tese de doutorado – Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2023. Disponível em: Estudo das propriedades elétricas e morfológicas de transistores de filme fino de óxido de zinco processados por solução. Acesso em: 20 out. 2025.
- 4 Albano, Luíz Gustavo Simão. **ESTUDO DE MATERIAIS E DISPOSITIVOS PARA ELETRÔNICA ORGÂNICA**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/8e27afa4-a191-4bfa-9cca-9d7a5ca2a7b9>. Acesso em: 27 out. 2025.
- 5 Rezende, Sergio M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. Cap.7. p. 217-266.
- 6 Pompeu, Kaynan Rafael de Oliveira. **Análise e caracterização de transistores de porta eletrolítica**. 2024. Tese de conclusão de curso – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/aa13d6bb-af1f-4500-afa4-841faf766fc7>. Acesso em: 13 out. 2025.
- 7 E. Fortunato, P. Barquinha, and R. Martins, **Oxide semiconductor thin-film transistors: A review of recent advances**, Adv. Mater., vol. 24, p. 2945–2986, 2012, DOI: 10.1002/adma.201103228.
- 8 J. P. Braga, G. R. de Lima, G. Gozzi e L. F. Santos. **Electrical Characterization of Thin-Film Transistors Based on Solution-Processed Metal Oxides**. chapter 8, 2018, DOI: 10.5772/intechopen.78221.
- 9 Agnès Tixier-Mita *et al.* **Review on thin-film transistor technology, its applications, and possible new applications to biological cells**, vol 55, 2016, DOI 10.7567/JJAP.55.04EA08.
- 10 Yong-Hoon Kim, Jeong-In Han, and Sung Kyu Park. **Effect of Zinc/Tin Composition Ratio on the Operational Stability of Solution-Processed Zinc–Tin–Oxide Thin-Film Transistors**, vol.33, 2012. DOI: 10.1109/LED.2011.2171913.

11 John F. Wager; Randy Hoffman. **Thin, fast, and flexible**, vol. 48, p 42 - 56, 2011, DOI: 10.1109/MSPEC.2011.5753244.

12 J.P. Braga, C. A. Amorim, G. R. De Lima, G. Gozzi, and L. Fugikawa-, **Materials Science in Semiconductor Processing The role of intrinsic trap states in the semiconductor / insulating interface on the electrical performance of spray-coated thin-film transistors**, vol. 151, September 2021, 2022, DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106984.

13 P. F. Carcia, R. S. McLean; M. H. Reilly; G. Nunes, Jr. **Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering**. Appl. Phys. Lett. 82, 1117–1119, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1553997>.

14 Chien-Yie Tsay. *et al.* **Effect of Sn-doped on microstructural and optical properties of ZnO thin films deposited by sol–gel method**. Thin Solid Films, volume 517, Issue 3, p. 1032-1036, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.06.030>.

15 I. ŞERBAN, A. ENESCA. **Metal Oxides-Based Semiconductors for Biosensors Applications**. Front. Chem., vol. 8, pp. 1–8, 2020, DOI: 10.3389/fchem.2020.00354.

16 K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono. **Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors**. Nature, vol. 432, no. 7016, pp. 488–492, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature03090>.

17 Braga, João Paulo. **Influência da atmosfera e da incidência de radiação ultravioleta nas propriedades elétricas de transistores de filme fino de óxidos metálicos processados por solução**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2018.

18 Qian Zhang *et al.* **High-performance Zinc-Tin-Oxide thin film transistors based on environment friendly solution process**. Volume 19, Issue 2, p. 174-181, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2018.10.012>.

19 Mullings, M. N. *et al.* **Thin film characterization of zinc tin oxide deposited by thermal atomic layer deposition**. Thin Solid Films, volume 556, p. 186-194, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.01.068>.

20 H. Q. Chiang, J. F. Aposta, R. L. Hoffman, J. Jeong, D. A. Keszler. **High mobility transparent thin-film transistors with amorphous zinc tin oxide channel layer**. Appl. Phys. Lett. 86, 013503 (2005). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1843286>.

21 H. Hosono, N. Kikuchi, N. Ueda, H. Kawazoe. **Working hypothesis to explore novel wide band gap electrically conducting amorphous oxides and**

examples. Non-Crystalline Solids, Volumes 198–200, Part 1, p. 165-169, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(96\)80019-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(96)80019-6).

22 O. Kluth, C. Agashe, J. Hupkes, J. Muller, B. Rech. **Magnetron sputtered zinc stannate films for silicon thin film solar cells.** 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 1800-1803, Vol.2, 2003.

23 Y. Zhao *et al.* **Impacts of Sn precursors on solution-processed amorphous zinc–tin oxide films and their transistors.** RSC Adv., 2, 5307-5313, 2012. DOI: 10.1039/c2ra00764a.

24 Jing Sun *et al.* **Synergy of oxygen vacancies, Lewis acid sites, and interfacial chemical bonds on ZnSnO₃/AgI for photodegradation of tetracycline.** Journal of Environmental Chemical Engineering, volume 12, 112458, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112458>.

25 Nguyen, Ngoc Linh *et al.* **Understanding native defect induced photoluminescence in Zn₂SnO₄.** Physical Review B 107, L060102, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.107.L060102>

26 CARMO, GENILSON JULIÃO. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSISTORES MISHEMT COM DIFERENTES DIELÉTRICOS DE PORTA.** Tese de mestrado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São João da Boa Vista, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/235389>. Acesso em: 29 out. 2025.

27 Cai, Minxi *et al.* **A Threshold Voltage Model for AOS TFTs Considering a Wide Range of Tail-State Density and Degeneration.** Electronics, volume 11, issue 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11193137>.

28 M. Cai, R. Yao. **A threshold voltage definition for modeling asymmetric dual-gate amorphous InGaZnO thin-film transistors with parameter extraction technique.** Journal of Applied Physics, 125, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5082999>.

29 E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins. **Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances.** Advanced Materials, Volume 24, Issue 22 pp. 2945-2986. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201103228>. Acesso em: 19/10/2025.

30 CAPARROZ, Luís Felipe Vicentis. **Efeito da radiação em transistores 3D em baixas temperaturas.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-28062017-155642/>. Acesso em: 29 out. 2025.

31 Kim, M. J. *et al.* **Theoretical Modeling of a Temperature-Dependent Threshold-Voltage Shift in Self-Aligned Coplanar IZTO Thin-Film Transistors.**

ACS Appl. Electron. Mater., volume 5, p. 3010–3022. DOI: 10.1021/acsaelm.2c01754.

32 K. Norrman, A. Ghanbari-Siahkali, N. B. Larsen. **Studies of spin-coated polymer films**. The Royal Society of Chemistry. 2005, 101, 174-201. DOI: 10.1039/b408857n.

33 HEDAYAT, N.; DU, Y.; ILKHANI, H. **Review on fabrication techniques for porous electrodes of solid oxide fuel cells by sacrificial template methods**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 77, p. 1221–1239, set. 2017.

34 Fonseca, Lucas Prado. **Acoplamento de filmes finos do semicondutor óxido SnO₂ com derivados quinolínicos para aplicações optoeletrônicas**. 2024. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/b2b091b1-fd31-4c47-9b5c-5a6534cfbaaa/content>. Acesso em: 16 out. 2025.

35 D. Walker *et al.* **High mobility indium zinc oxide thin film field-effect transistors by semiconductor layer engineering**. ACS Applied Materials & Interfaces. 2012. DOI: 10.1021/am302004j.

36 T. Kamiya, H. Hosono. **Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors**. *NPG Asia Mater* 2, 15–22, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.5>.