

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Análise e caracterização de transistores de porta eletrolítica

Kaynan Rafael de Oliveira Pompeu

Prof. Dr. Lucas Fugikawa-Santos

Rio Claro (SP)

2024

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

Kaynan Rafael de Oliveira Pompeu

Análise e caracterização de transistores de porta eletrolítica

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 a obtenção do grau de
Bacharel em Física.

Rio Claro - SP

2024

P788a	Pompeu, Kaynan Rafael de Oliveira Análise e caracterização de transistores de porta eletrolítica / Kaynan Rafael de Oliveira Pompeu. -- Rio Claro, 2024 36 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Lucas Fugikawa Santos 1. Física. 2. Transistores de efeito de campo. 3. Eletronica. 4. Aparelhos e materiais eletrônicos. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Kaynan Rafael de Oliveira Pompeu

Análise e caracterização de transistores de porta eletrolítica

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 a obtenção do grau de Bacharel em Física.

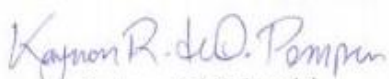
Comissão Examinadora

Professor Doutor Lucas Fugikawa-Santos (Orientador)

Professor Doutor Florian Steffen Günther

Professor Doutor Carlos César Bof Buffon

Rio Claro, 29 de outubro de 2024.


Assinatura do(a) aluno(a)


Assinatura do(a) orientador(a)

*Este trabalho é dedicado à minha avó, a minha namorada e
ao nosso porquinho-da-índia.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda de João Paulo Braga. Que deus te ilumine, e se iluminar, sabemos que fará uma grande sombra.

Gostaria de agradecer ainda, de maneira menos importante, a Pedro Mourão, por ter perdido tantas vezes na sinuca ao ponto de me prover da autoestima necessária para concluir este trabalho. Agradeço ainda ao Carlinhos, por manter-me humilde quando o Mourão me fazia arrogante.

Agradeço ao meu orientador, Lucas Fugikawa-Santos pelos conselhos, ao João Victor Mendes por revelar minha inaptidão para o serviço no laboratório.

Agradeço à Rafaela Silveira pela sempre tão reconfortante lucidez (e me desculpe pelas inconveniências que eu sempre trouxe à tona).

Estando agora ao final do curso, eu gostaria de agradecer aos meus amigos que fizeram parte dessa jornada, agradeço aos originais, Cath, Reis e Lobo, por terem me tolerado desde sempre, e agradeço aos mais recentes, Ash e Mel, que a campanha nunca acabe para nenhum de nós.

Agradeço aos meus companheiros do jiu-jitsu, em especial ao Rafa, pela amizade e apoio, você me abriu os olhos mais de uma vez, e ao professor Dênis, por sempre acreditar e confiar em mim.

Agradeço a minha namorada, Raissa Rufato, por que se eu não te encontrasse jamais iria me encontrar, eu te amo. Para onde quer que eu vá, espero que seja com você.

Infelizmente não posso agradecer todo mundo.

Mas obrigado Fábio Marane (Ovo), foi com você que tudo começou, e eu tenho certeza que só poderia ter sido melhor do que foi se você estivesse concluindo o curso conosco agora.

Este trabalho não poderia ser realizado sem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - 134272/2024-2.

"O produto entre a felicidade e o conhecimento é uma constante." – Lev Landau.

RESUMO

Transistores de porta eletrolítica (EGTs) destacam-se por sua baixa tensão de operação ($\sim 2\text{V}$) e fácil fabricação. Nestes dispositivos o dielétrico da porta é um eletrólito cuja alta capacitância é responsável pelas baixas tensões de operação. Destaca-se aqui o uso de óxido de zinco (ZnO), um semiconductor tipo n, devido a sua alta mobilidade eletrônica, transparência e a presença de armadilhas de carga quando usado como camada ativa, sendo promissor para dispositivos de memória. Com a motivação de se estudar qual o efeito da polarização do eletrólito em suspensão sobre o comportamento destes dispositivos, este trabalho contempla a fabricação e caracterização de um EGT baseado em óxido de zinco, analisando os dados obtidos com o objetivo de estabelecer uma relação entre a variação da concentração iônica e a variação da performance do dispositivo com base em um modelo difusivo para os ions do eletrólito. A deposição da camada ativa, sobre substratos de óxido de silício, foi feita por um aparato de spray-ultrassônico através da pirólise de uma solução precursora de acetato de zinco. O eletrólito da porta é uma solução aquosa de cloreto de sódio, o qual é disposto sobre o dispositivo delimitando-se uma área sobre os eletrodos utilizando PDMS. O resultado é um dispositivo capaz de operar com tensões no dreno e porta de cerca de 1 V sem degradação da porta, apresentando propriedades dependentes da concentração iônica como um aumento de três ordens de grandeza na razão on/off com o aumento da concentração. Utilizou-se o modelo de Gouy-Chapmann para se entender a variação da capacitância com a concentração iônica do eletrólito, contudo, apenas a variação na capacitância específica parece não ser o bastante para se explicar a variação nos parâmetros do dispositivo, especialmente para altas concentrações, onde verifica-se um aumento inesperado na mobilidade no regime de saturação do dispositivo.

Palavras-chave: Transistores de porta eletrolítica; óxido de zinco; concentração iônica.

ABSTRACT

Solution processed electrolyte gated transistors (EGTs) stand out for their low voltage operation ($\sim 2\text{V}$) and easy processing. In these devices the gate dielectric is an electrolyte, whose high capacitance is responsible for the low voltage operation. We highlight the use of the n-type semiconductor, zinc oxide (ZnO), for its high electronic mobility, transparency, and the presence of charge traps when used as the active layer, which makes it quite promising for applications in memory devices. With the motivation to study the effect of electrolyte polarization in suspension on the behaviour of these devices, this work contemplates the fabrication and characterization of an EGT based on zinc oxide, analysing the results with the aim of establishing a relation between the variation of the ionic concentration and the device's performance, using a diffusive model for the electrolyte ions. For the active layer, ZnO is deposited using an ultrasonographic spray device, using a solution of zinc acetate as a precursor, whose pyrolysis leaves behind a thin layer ($\sim 30\text{ nm}$) of ZnO deposited over silicon substrates. As for the electrolyte, a solution of sodium chloride in water is placed over the active layer by delimiting an area over the electrodes using PDMS. The result is a device able to operate in gate and drain voltages of around 1 V without degrading the gate, presenting concentration-dependent properties such as a three-order of magnitude increase in the on/off ratio with the rise in concentration. The Gouy-Chapman model was used to understand the variation of capacitance with the ionic concentration of the electrolyte. However, the variation in specific capacitance alone does not seem to be sufficient to explain the changes in the device parameters, especially at high concentrations, where an unexpected increase in mobility is observed in the device's saturation regime.

Keywords: Electrolyte gated transistors; zinc oxide; ionic concentration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE EM TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO	12
2.1.1. Transporte de cargas no canal	12
2.1.2. Curvas de saída e transferência.....	15
2.2. PROPRIEDADES DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA (EDL) DA PORTA	17
2.2.1. Modelo de Helmholtz.....	18
2.2.2. Modelo de Gouy-Chapmann	20
2.2.3. Espectroscopia de impedância	22
2.3. SOBRE O ÓXIDO DE ZINCO	22
2.4. DEPOSIÇÃO DA CAMADA ATIVA POR SPRAY-PIRÓLISE.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	25
3.1. Extração de parâmetros	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5. CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

Transistores de filme fino (do inglês, *Thin-Film transistors*, *TFTs*) são um tipo especial de transistores de efeito de campo (do inglês, *Field effect transistors*, *FETs*), produzidos pela deposição de filmes finos. Estes dispositivos são capazes de modular um sinal elétrico mediante a aplicação de um campo elétrico em um dos seus terminais, sendo atualmente fundamentais em praticamente todos os produtos de exibição de consumo e profissionais (BROTHERTON, 2013). No geral transistores possuem três terminais, chamados de fonte, dreno e porta, e os diferentes estímulos elétricos aplicados a estes terminais, bem como a sua configuração geométrica e materiais, determinam a sua funcionalidade e performance.

Em *FETs*, por meio da aplicação de um campo elétrico entre a porta e o semicondutor promove-se uma modulação da corrente elétrica entre o dreno e a fonte, região onde encontra-se o semicondutor, chamada de canal. Entre a porta e o semicondutor insere-se um material isolante, cuja polarização é responsável pela indução de portadores no canal (SZE, 1981). O dispositivo assim descrito é basicamente um capacitor, e a capacitância do dielétrico está diretamente relacionado com a corrente no canal.

Dentre estes dispositivos, destaca-se neste trabalho os transistores de porta eletrolítica, mais conhecidos pela sua sigla em inglês, EGTs. Nestes *FETs* o dielétrico da porta é substituído por uma solução eletrolítica ou líquido iônico. Uma das principais motivações para o emprego deste eletrólito é a sua alta capacitância por área, tipicamente da ordem de $1-10 \mu F/cm^2$ (FRISBIE et al, 2013), a qual excede os dielétricos *high-k* convencionais e dielétricos ultrafinos. Tal capacitância permite que estes dispositivos operem em baixas tensões (~ 2 V), reduzindo o consumo de energia e mitigando as mudanças em sua performance devido ao aquecimento após operar por longos períodos (VIEIRA et al, 2022).

EGTs vêm recebendo atenção por suas aplicações em dispositivos de memória, especialmente por sua capacidade de emular sinapses artificiais

(PILLAI et al, 2018). Efeitos de memória em transistores se manifestam como mudanças nas características elétricas do dispositivo, como um deslocamento da tensão de limiar (*Threshold voltage*, V_{th}) ou um aumento/decréscimo da magnitude da corrente do dispositivo em operação (*on current*, I_{on}) após a aplicação de um procedimento específico (VIEIRA et al, 2023).

Existem diversos tipos de transistores de memória, destaca-se aqui os chamados dispositivos de armadilha de carga, onde o material semicondutor da camada ativa possui armadilhas de carga (*Charge trap layer*, CTL), esta que determina a performance geral de memória do dispositivo e é especialmente importante para transistores baseadas em óxidos metálicos (NA e YOON, 2019).

O Óxido de Zinco (ZnO) é um óxido metálico semicondutor considerado altamente promissor para compor a CTL, pois é facilmente processado em solução e provê propriedades desejáveis como alta mobilidade eletrônica, estabilidade química, excelentes características de transporte de cargas e alta transparência ótica (KUMAR et al, 2018). O ZnO emergiu como um material atrativo para várias aplicações em eletrônica, optoeletrônica, biomedicina e sensoreamento (VYAS, 2020).

Com a motivação de se estudar o efeito da polarização do eletrólito em suspensão sobre a densidade de portadores do canal e qual o efeito da concentração iônica sobre a distribuição de cargas, este trabalho contempla a caracterização e análise de um EGT de porta eletrolítica baseado em óxido de zinco, cuja camada ativa é depositada por meio de soluções precursoras de acetato de zinco, utilizando como técnica de deposição spray-pirólise. Estuda-se ainda qual o efeito da concentração iônica do eletrólito da porta no desempenho do dispositivo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando sob o efeito de campos externos, elétrons ou buracos em excesso são adicionados às bandas em adição aos portadores intrínsecos. Conclui-se que a ação de campos externos perturba o equilíbrio térmico dos portadores. Os portadores excessivos não se movem de maneira independente, mas sim exibem movimentos acoplados de deriva, difusão e recombinação, em um tipo de transporte chamado de transporte ambipolar (NEAMAN, 2003). Não é necessário, no entanto, examinar as minúcias do transporte ambipolar para se compreender o funcionamento básico e a caracterização de transistores de efeito de campo. Utiliza-se aqui principalmente as equações de densidade de corrente de deriva (1a) e a equação de Poisson (1b):

$$J = -qn\mu_n E \quad (1a)$$

$$\nabla^2 \phi = -q\rho/\epsilon \quad (1b)$$

2.1. CARACTERÍSTICAS DE TRANSPORTE EM TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO

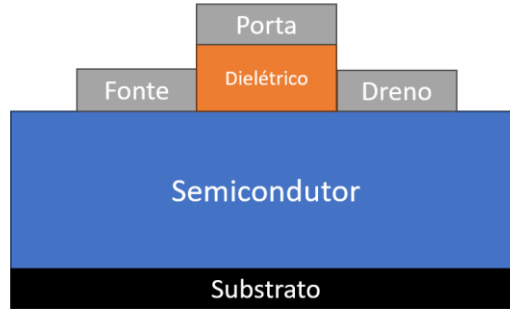
2.1.1. Transporte de cargas no canal

A primeira evidência concreta da concepção de um transistor de efeito de campo pode ser encontrada na patente de 1930 de Lilienfeld (VALIZADEH, 2016), contudo, os dispositivos propostos só puderam ser produzidos com sucesso por volta de trinta anos depois. Um dispositivo genérico está exibido na figura 1. A modulação da corrente é obtida através da aplicação de um campo elétrico entre a porta e o semiconductor, por meio da indução e acumulação de cargas na região entre o dreno e a fonte (WAN, 2019), chamada de canal. Uma vez que se atinja a tensão de limiar, a aplicação de tensões no dreno faz surgir uma corrente apreciável no canal.

O aumento da capacitância do dielétrico/eletrólito da porta ou da tensão aplicada faz aumentar a quantidade de portadores acumulados na interface, o

que deve induzir mais cargas na dupla camada e promover um aumento da corrente no canal. Portanto, um FET, nesse esquema, é basicamente um capacitor.

Figura 1: Esquematização de um FET genérico



Fonte: Acervo pessoal

Supondo que o dispositivo seja unidimensional, o que é uma aproximação bastante boa para dispositivos de filme fino, a densidade de carga induzida no canal é dada por (HOWARD, 2003):

$$qn(x) = C_g(V_g - V_{th} - \phi(x)) \quad (2)$$

Onde V_g é a tensão aplicada na porta, V_{th} a tensão de limiar (*threshold*) e $\phi(x)$ o potencial eletroestático ao longo do canal. Com o uso da equação (1a), ignorando-se a componente difusiva para a corrente e desconsiderando o transporte de buracos no canal, o que não se trata de uma aproximação drástica, pode-se determinar a corrente de portadores por unidade de comprimento:

$$\frac{I}{W} = q\mu n \frac{d\phi}{dx} \quad (3)$$

No estado estacionário a corrente deve ser constante pela equação de continuidade para o caso unidimensional, sendo assim, estabelecendo os limites de integração em x como sendo $[0, L]$, onde L é a distância entre o dreno e a fonte, e a tensão indo de zero (fonte) até V_d no dreno, substituindo (2) em (3) pode-se integrar diretamente:

$$\int_0^L I dx = \mu W C_g \int_0^{V_d} (V_g - V_{th} - \phi) d\phi \quad (4)$$

De forma a se obter uma expressão para a corrente em função dos parâmetros característicos do dispositivo:

$$I_D = \frac{\mu W C_g}{L} \left((V_g - V_{th}) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right) \quad (5)$$

Para tal análise, a qual só é válida para o caso estacionário, assume-se que a mobilidade é constante, o que não é verdadeiro para o caso geral, pois o confinamento das cargas induzidas pelo campo elétrico faz com que a mobilidade diminua com o aumento da tensão na porta (HOWARD, 2003). Um tratamento mais completo necessariamente deve considerar a influência de correntes de difusão, porém mesmo em uma dimensão não é possível realizar um tratamento analítico devido à presença de não-linearidades indesejáveis.

Quando a tensão no dreno é muito menor que a tensão na porta pode-se negligenciar o termo quadrático em (5), e a corrente no dreno torna-se aproximadamente linear:

$$I_d = \frac{\mu W}{L} (V_g - V_{th}) V_d \quad (6)$$

A equação (6) é claramente idêntica à lei de Ohm, onde uma tensão no condutor é diretamente proporcional à corrente no condutor. Por essa razão este regime de operação é chamado de regime ôhmico, ou linear. A mobilidade (μ) nesse regime é chamada de mobilidade de efeito de campo (do inglês, *field effect mobility*). É importante ressaltar que a equação (5) é válida somente no regime ôhmico de operação do transistor, pois a corrente não pode aumentar indefinidamente. Conforme a tensão no dreno aumenta em relação à tensão na porta, o canal aos poucos vai se saturando de cargas devido ao aumento progressivo da região de depleção, diminuindo a corrente através da junção.

Quando a tensão no dreno se torna igual a $V_g - V_{th}$, a região de depleção cresce até estrangular o canal, fenômeno chamado de *pinch-off*. Neste momento a corrente fica impedida de aumentar e o dispositivo entra no chamado de regime de saturação:

$$I_{Ds} = \frac{\mu_s W C_g}{2L} (V_g - V_{th})^2 \quad (7)$$

E assim permanece até o chamado “breakdown”, regime que não é explorado neste trabalho. As equações (5) e (7) são utilizadas rotineiramente para a caracterização de dispositivos, pois fornecem um acesso fácil e direto a

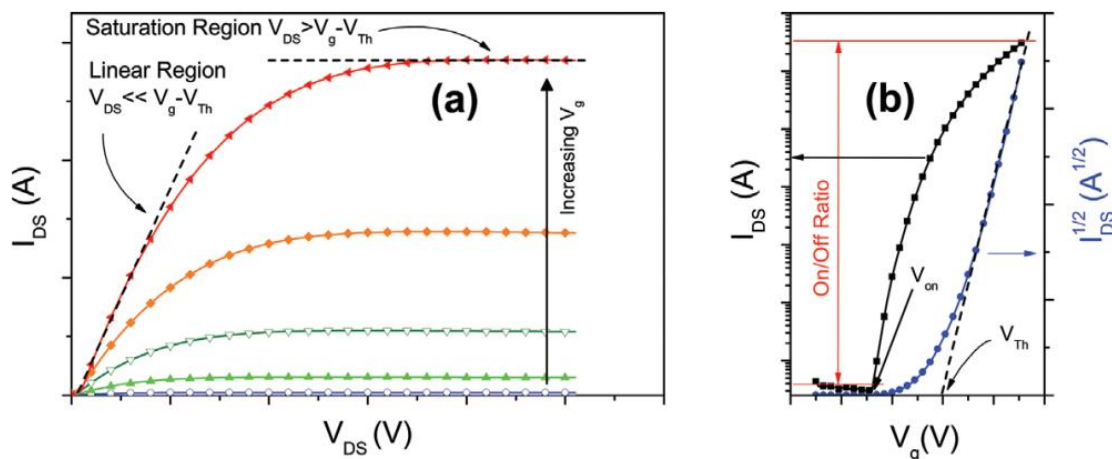
grandezas pertinentes, como a mobilidade no regime de saturação e a tensão de limiar.

2.1.2. Curvas de saída e transferência

Para se acessar os parâmetros experimentais utilizam-se as chamadas curvas de saída e transferência, as quais correspondem a uma medida da corrente entre o dreno e a fonte sob duas varreduras distintas de tensão:

- Curva de saída: É obtida fixando-se a tensão na porta do dispositivo e varrendo-se a tensão aplicada no dreno, dessa forma pode-se observar a modulação da corrente no regime linear e a saturação da corrente no canal conforme previsto pelas equações (5) e (7);
- Curva de transferência: É obtida fixando-se a tensão no dreno e varrendo-se a tensão na porta. Com essa curva pode-se acessar os parâmetros experimentais típicos do dispositivo, uma vez que ela deve corresponder à equação (7).

Figura 2: Curva de saída e transferência típicas de um transistor.



Fonte: BRAGA et al, 2018. Reproduzido com permissão do autor.

Curvas de saída e transferência típicas são exibidas na figura 2. Nota-se que por meio da linearização da curva de transferência pode-se acessar de forma simples os parâmetros experimentais, mais especificamente, a tensão de limiar

pode ser obtida vendo onde a curva intersecta o eixo x e a mobilidade no regime de saturação estudando a derivada da raiz quadrada da corrente:

$$\mu_s = \frac{2L}{CW} \left(\frac{d\sqrt{I_{Ds}}}{dV_G} \right)^2 \quad (8)$$

A análise até aqui apresenta um caráter generalista, e leva naturalmente à questão de qual a vantagem em se empregar um eletrólito, ao invés de um dielétrico sólido por exemplo, na porta. Podemos investigar essa questão levando em conta que a performance elétrica do dispositivo é determinada por uma combinação de fatores, como o seu design, pela razão entre a largura e o comprimento do canal (chamada de razão W/L) e a capacitância do dielétrico da porta. Pode-se observar claramente por inspeção das equações (5) e (7), que tanto um aumento na razão W/L do dispositivo quanto um aumento na capacitância da porta induziriam um aumento na corrente no canal, e consequentemente poder-se-ia operar com o dispositivo em tensões mais baixas. No entanto, existem limitações físicas para o aumento de ambas as grandezas.

O aumento na capacitância pode ser obtido por meio do emprego de dielétricos ultrafinos (<10 nm de espessura) ou com o emprego de materiais com altas constantes dielétricas (VIEIRA et al, 2022). Dielétricos ultrafinos possuem duas principais desvantagens: a produção e a caracterização de camadas finas nestas escalas exigem procedimentos cada vez mais refinados, e nestas escalas diminutas o aumento da corrente de fuga devido ao efeito de tunelamento eletrônico passa a ser relevante (ROBERTSON, 2005). O uso de materiais com altas constantes dielétricas diminui as restrições quanto à sua espessura, como pode-se notar observando a conhecida relação para a capacitância específica:

$$C_e = \frac{\epsilon_0 k}{d} \quad (9)$$

Onde k é a constante dielétrica e d a largura do dielétrico. Contudo, é desafiador encontrar materiais com altas constantes dielétricas adequadas a TFTs, pois eles devem ser escolhidos de forma a serem termodinamicamente estáveis com a camada ativa, agir como um bom isolante para minimizar injeções no canal, além de formar uma boa interface com ele. Utiliza-se convencionalmente óxidos como dióxido de háfnio (HfO_2), dióxido de silício (SiO_2)

e Dióxido de titânio (TiO_2), os quais possuem capacitâncias específicas limitadas, tipicamente menores que $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ (FRISBIE et al, 2013).

O uso de eletrólitos permite contornar essa dificuldade por meio da formação de uma dupla camada em suas interfaces quando sob efeito de campos aplicados. O fato de não possuem restrições particulares quanto a sua forma e serem facilmente processáveis, tornam os EGTs particularmente vantajosos para diversas aplicações. As propriedades da dupla camada e uma análise teórica do efeito da concentração iônica são discutidas na seção seguinte.

2.2. PROPRIEDADES DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA (EDL) DA PORTA

Como mencionado anteriormente, em transistores de porta eletrolítica substitui-se o dielétrico da porta por um eletrólito. Idealmente, o eletrólito é um material que conduz íons sendo isolante elétrico. Os íons móveis no eletrólito podem se deslocar ao longo do campo elétrico e formar uma camada dupla elétrica densa na interface eletrodo/eletrólito. (WAN, 2019). Uma vez que se aplique uma tensão no eletrodo da porta, pode-se observar a migração e acúmulo de íons no eletrodo e na interface entre o eletrólito e o semicondutor, a qual induz uma dupla camada elétrica (em inglês, *Electrical double-layer, EDL*) nestas interfaces. As características eletroquímicas da porta são determinantes para a performance do dispositivo, em especial, sua capacidade de operar em baixas tensões.

Existem diversos modelos que descrevem o comportamento dos íons em um eletrólito sob a ação de um campo elétrico. Alguns destes modelos são discutidos aqui com o objetivo de estabelecer uma relação entre a concentração iônica e a capacitância do eletrólito, a qual é um parâmetro fundamental de FETs. Não se fazem menções a respeito do transporte hidrodinâmico de massa no interior do eletrólito, uma vez que é mais pertinente para o escopo deste trabalho os efeitos na interface. Contudo, é importante fazer uma breve consideração: a densidade de cargas de diferentes espécies iônicas no interior do eletrólito é dada pela soma das concentrações locais de espécies iônicas:

$$\rho = F \sum_i z_i c_i \quad (10)$$

Onde F é a constante de Faraday, a qual possui um valor de aproximadamente $9.6485 \times 10^4 \text{ sA/mol}$. Sendo assim, substituindo (10) na equação de Poisson (1b), nota-se que, devido à ordem de grandeza excepcional de F/ϵ_0 , campos elétricos muito intensos surgem de pequenos desvios da neutralidade elétrica. Sendo assim, é certo que, exceto por regiões imediatamente próximas da interface, pode-se considerar que o interior do eletrólito como eletricamente neutro. Em outras palavras, exceto para sistemas extremamente diminutos (da ordem do comprimento de Debye da camada difusiva de íons, 1-10 nm, dependendo da concentração iônica), o interior do eletrólito deve ser eletricamente neutro (BARSOUKOV e MACDONALD, 2005). Com base nessa consideração, pode-se afirmar que tanto a forma do eletrólito quanto o seu volume são pouco importantes para se descrever os efeitos da interface, os quais são predominantes e são responsáveis diretos pelo comportamento de EGTs.

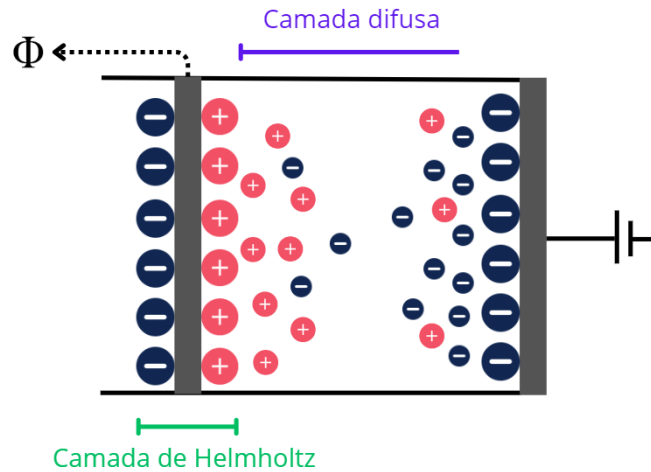
2.2.1. Modelo de Helmholtz

Na figura 3 mostra-se um esquema de uma EDL. Nota-se que ela age como um capacitor de placas paralelas nas imediações da interface, porém, diferente dos capacitores ordinários, o comprimento da dupla camada é da ordem de grandeza do diâmetro dos íons que compõem o eletrólito, de onde se resulta uma imensa capacitância.

No lado do eletrólito, os íons estão organizados em uma camada compacta e uma camada difusa, com a queda de potencial ocorrendo principalmente no Plano de Helmholtz, que tem uma espessura de cerca de 1 nm. Essa fina espessura resulta em uma capacitância específica extremamente alta, variando de 1 a 500 $\mu\text{F/cm}^2$. Nas interfaces, os íons equilibram as cargas de polaridade oposta e concentração equivalente presentes no lado do metal ou semiconductor. Esse forte acoplamento eletrostático pode gerar uma densidade

de portadores muito elevada, superior a 10^{14} cm^{-2} , além de induzir campos elétricos intensos, superiores a $1 \times 10^6 \text{ V/cm}^2$. (WAN, 2019)

Figura 3: Diagrama esquemático de uma EDL com um eletrólito em uma das interfaces



Fonte: Acervo pessoal

O modelo mais simples que descreve as características básicas de um capacitor eletrolítico é o modelo da dupla camada de Helmholtz. Neste modelo considera-se apenas a influência da dupla camada de íons na região imediatamente próxima da interface, a qual é tratada como um simples capacitor de placas paralelas, cuja capacitância específica é dada por:

$$C = \epsilon/\delta \quad (11)$$

Onde δ é o comprimento da camada de Helmholtz, a qual é da ordem de grandeza das espécies iônicas. Este modelo é pertinente pois, embora não considere a natureza dos íons no eletrólito, os quais serão levados em consideração na sessão seguinte, a camada descrita surge nas imediações dos eletrodos por influência da água, a qual é um sistema dipolar. Esta influencia é descrita na seção seguinte.

2.2.2. Modelo de Gouy-Chapmann

O modelo mais simples que estabelece uma relação entre a concentração de ions e a capacitância do eletrólito é chamado de modelo de Gouy-Chapmann (CHANG, 2016). Este modelo considera a difusão de ions sobre o eletrólito, como primeira simplificação se ignora o efeito da dupla camada de Helmholtz e assume-se que:

- A superfície da EDL é plana e carregada uniformemente;
- Os ions da dupla camada são partículas pontuais e se distribuem de acordo com a distribuição de Boltzmann;
- O solvente contribui à física da dupla camada somente com sua constante dielétrica, a qual é constante por todo o eletrólito;
- Assume-se que o eletrólito é simétrico, possuindo número de carga z .

A densidade de portadores obedece à distribuição de Boltzmann, a qual é dada por:

$$n_i = n_{0i} e^{-ze\phi/k_B T} \quad (12)$$

Onde ϕ é o potencial eletroestático. Combinando a densidade de cargas dos portadores positivos e negativos se estabelece uma relação para a densidade total de cargas no eletrólito, assume-se que o mesmo é eletricamente neutro:

$$\rho = ze(n_+ - n_-) = -(2n_0ze) \sinh(ze\phi/k_B T) \quad (13)$$

A solução da equação de Poisson (equação 1.b) determina a forma do potencial eletroestático ao longo do eletrólito. Para os fins desse trabalho considera-se apenas a influência de campos de baixa tensão. Para potenciais da ordem de 1 V, nota-se que o argumento do seno hiperbólico se aproxima de zero mesmo à temperatura ambiente. Sendo assim, pode-se realizar a seguinte aproximação:

$$\nabla^2 \phi \cong \frac{2n_0 z^2 e^2}{\epsilon k_B T} \phi = k^2 \phi \quad (14)$$

Para o caso unidimensional pode-se resolver analiticamente como uma combinação linear de funções exponenciais. Assumindo a neutralidade elétrica

da interface e com base na determinação deste potencial pode-se determinar a densidade superficial de cargas na interface e conseqüentemente a capacitância por área derivando-se a densidade superficial de cargas pelo potencial aplicado nas placas:

$$C_{GC} = \epsilon k \quad (15)$$

Substituindo-se os valores de k e utilizando as unidades adequadas pode-se estabelecer uma relação direta entre a capacitância e a concentração de ions. Para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, em uma solução aquosa cuja concentração, c , é dada em mol/L, pode-se fixar o valor de k como sendo: $k = 0.328 \times 10^{10} \sqrt{c} \text{ m}^{-1}$, o inverso dessa grandeza é chamado de comprimento de Debye (CHANG, 2016). A conclusão que se chega é que o efeito da concentração iônica no modelo de Gouy-Chapmann é equivalente a um capacitor de placas paralelas cuja distância é o comprimento de Debye, o qual depende da raiz quadrada da concentração iônica. É notável como as equações (9), (11) e (15) possuem a mesma forma.

Uma ressalva deve ser feita. Como mencionado na seção anterior, no caso de um solvente polar, tal como a água, deve-se atentar para a sua influência sobre a capacitância do eletrólito. Uma vez que o momento de dipolo de suas moléculas é livre para rotacionar na presença de um campo elétrico, é razoável supor que em uma camada de água próxima à interface haja uma orientação dipolar líquida e, portanto, a água não possuirá sua constante dielétrica normal. Adicionalmente, os ions hidratados não poderão se aproximar indefinidamente da interface. Assim, haverá uma camada de cargas a uma distância mínima do eletrodo, essa distância é determinada pelo tamanho do íon (hidratado). Além dessa camada interna, a camada difusa se estende de volta para a solução (BARSOUKOV e MACDONALD, 2005). A interface, portanto, se comporta como dois capacitores em série: uma camada interna (Helmholtz) e uma camada externa (Gouy-Chapman). Este modelo, que considera tanto a natureza dipolar do solvente quanto alguns efeitos de tamanho finito, é chamado de modelo de Stern, e é especialmente interessante se empregar este modelo quando se lida com baixas concentrações, onde a influência da camada de Helmholtz é maior bem como o comprimento de Debye.

2.2.3. Espectroscopia de impedância

A espectroscopia de impedância elétrica é uma técnica amplamente utilizada para caracterizar as propriedades elétricas e eletroquímicas de materiais e interfaces, permitindo a análise de processos como transferência de carga, difusão de íons, e comportamento dielétrico em uma ampla faixa de frequências. Para os nossos propósitos, a técnica é baseada na aplicação de uma tensão de corrente alternada (AC) e na medição, para uma faixa de frequências, da amplitude e fase da corrente que atravessa a amostra, fornecendo um espectro de impedância complexa (BUSCAGLIA, 2022).

Existem diferentes estímulos elétricos que são utilizados na realização desta técnica, sendo a abordagem mais comum medir a impedância aplicando uma tensão ou corrente de frequência única na interface e medindo o deslocamento de fase e a amplitude, ou as partes real e imaginária, da corrente resultante nessa frequência, utilizando circuitos analógicos ou análise por transformada rápida de Fourier (FFT) da resposta (BARSOUKOV e MACDONALD, 2005), o qual é o método empregado nas análises deste trabalho. É particularmente importante reconhecer o efeito da polarização do eletrólito.

2.3. SOBRE O ÓXIDO DE ZINCO

Os óxidos metálicos estão entre os materiais mais utilizados para se compor a camada ativa de transistores de filme fino. Particularmente, o óxido de zinco se destaca por sua estabilidade química e propriedades eletrônicas e físicas excepcionais, como sua transparência, largo bandgap direto (~ 3.37 eV) e alta mobilidade eletrônica (BRAGA et al, 2018), as vantagens associadas a uma larga banda proibida incluem maiores tensões de ruptura, capacidade de sustentar grandes campos elétricos, menor geração de ruído e operação em altas temperaturas e alta potência (ÖZGÜR et al, 2005), além disso, a temperatura de processamento de nanoestruturas de ZnO é muito baixa.

Portanto, substratos baratos, como vidro e plástico, também podem ser usados para a fabricação de dispositivos à base de ZnO (VYAS, 2020).

Normalmente se refere ao óxido de zinco como um semicondutor tipo-n “não intencional”, pois o desbalanço na concentração de portadores não é causado pelos processos usuais de dopagem. Embora houvesse controvérsias a respeito da origem deste comportamento no material, credita-se a dopagem do óxido de zinco aos defeitos nativos na estrutura cristalina do material. Os defeitos surgem devido desvios na estequiometria, sendo majoritariamente vacâncias no oxigênio e intersítios de zinco, contudo, ainda há controvérsia a respeito de qual destes efeitos é o dominante (VYAS, 2020). Os defeitos, e consequentemente a concentração de portadores e a mobilidade no ZnO são altamente dependentes no método de deposição. As propriedades elétricas do semicondutor são altamente dependentes do tipo de contato utilizado, podendo formar contatos ôhmicos ou barreiras de Schottky a depender do metal utilizado no contato. Para os fins deste trabalho, é pertinente mencionar que o contato entre o ZnO e o alumínio é ôhmico.

2.4. DEPOSIÇÃO DA CAMADA ATIVA POR SPRAY-PIRÓLISE

Dentre as alternativas para se depositar a camada ativa, destaca-se o método de spray-pirólise, onde se utiliza um spray ultrassônico para se depositar a camada semicondutora por meio da pirólise, ou decomposição térmica, de um precursor orgânico. O método de spray-pirólise é especialmente interessante para fabricação em larga escala e de baixo custo quando comparado com as técnicas de deposição convencionais (LIMA et al, 2020).

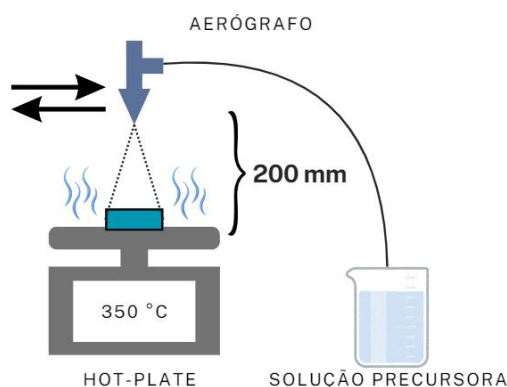
Durante o processo de deposição por spray, as gotículas da solução precursora atingem a superfície do substrato previamente aquecido a uma temperatura superior à de pirólise. Normalmente, essa temperatura é muito mais elevada que a de evaporação do solvente, o que gera uma camada de vapor que impede o contato direto das gotículas subsequentes com a superfície quente. Isso resulta em uma distribuição aleatória de partículas nanométricas do

precursor sobre o substrato. Como este já está a uma temperatura superior à de pirólise, a formação do óxido ocorre quase instantaneamente, criando filmes mais homogêneos e com melhores propriedades óticas e elétricas (BRAGA et al, 2020).

Para os fins deste trabalho, destaca-se o uso de acetato de zinco como precursor orgânico para a formação da camada ativa. A formação do óxido de zinco (ZnO) a partir do acetato de zinco dihidratado ocorre por meio de um processo de decomposição térmica. O acetato de zinco dihidratado, $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, é um composto sólido constituído por íons de zinco ligados a íons acetato e moléculas de água. Quando submetido a um aquecimento controlado, passa por uma série de transformações químicas. Na primeira etapa, entre 100 °C e 150 °C, ocorre a eliminação das moléculas de água de hidratação, resultando na formação do acetato de zinco anidro ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), que mantém as ligações entre os íons de zinco e os íons acetato.

Na etapa seguinte, com o aumento da temperatura para entre 300 °C e 350 °C, o acetato de zinco anidro se decompõe termicamente (LIMA et al, 2020). Essa decomposição quebra as ligações químicas no composto, gerando uma camada fina de óxido de zinco (ZnO) como principal produto. Um diagrama esquemático do arranjo experimental é exibido na figura 4.

Figura 4: Arranjo experimental do processo de spray-pirólise



Fonte: Acervo pessoal

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A produção e caracterização dos EGTs é feita segundo às seguintes etapas:

1. Preparação do substrato;
2. Deposição do material semicondutor (ZnO);
3. Evaporação dos eletrodos (Al) sobre a camada ativa;
4. Montagem e caracterização do dispositivo.

Durante a primeira etapa, utiliza-se substratos de silício com 550 μm de espessura, com uma camada de óxido de silício de 300 nm de espessura crescida termicamente. Segue-se então um processo de limpeza que visa remover resíduos orgânicos, mantendo a superfície tão regular como possível. A escolha do silício como substrato destitui o dispositivo no quesito de flexibilidade e transparência, mas uma vez que a superfície é bastante regular a escolha promove alta estabilidade e reprodutibilidade nas amostras. A limpeza consiste em limpar manualmente os substratos com detergente utilizando uma esponja macia, e em seguida levar ao limpador ultrassônico com detergente alcalino por quinze minutos sob aquecimento. Após retirar os substratos eles são secos e passam por mais duas rodadas de quinze minutos no limpador ultrassônico, uma vez imersos em acetona e outra vez em álcool isopropílico. Durante cada etapa da limpeza deve-se verificar se a superfície se encontra com alguma mancha ou irregularidade. Ao final de todo o processo de limpeza elas devem estar com um aspecto espelhado, então finaliza-se a limpeza hidrofalizando a superfície tratando-a por plasma frio por quinze minutos.

Segue-se então para a segunda etapa, onde uma camada fina (~ 30 nm) de óxido de zinco é depositada por spray-pirólise. Na deposição dos filmes por spray, é utilizado um aerógrafo controlado por microcontrolador. Diversos fatores podem influenciar a formação do filme fino, como a distância entre o bico do aerógrafo e a amostra, a pressão de entrada no aerógrafo, o tempo de deposição, a temperatura da placa de aquecimento, a concentração da solução, o número de camadas e a viscosidade da solução.

O precursor metálico utilizado para a produção dos filmes de ZnO depositados pela técnica de spray-pirólise é o acetato de zinco di-hidratado. O acetato é obtido comercialmente (Sigma Aldrich), e o solvente utilizado é álcool metílico (Synth). A concentração do precursor metálico na solução é de 0,1M. Após o preparo da solução, ela é agitada por 1 hora antes de sua utilização, para garantir a completa dissolução.

Na deposição dos filmes por spray, utiliza-se um aerógrafo controlado via microcontrolador (Arduíno). Múltiplos fatores podem influenciar a formação do filme fino, como a distância entre o bico do aerógrafo e a amostra, pressão de entrada no aerógrafo, tempo de deposição, temperatura da placa de aquecimento, concentração da solução, número de camadas e viscosidade da solução.

A deposição do filme ocorre por meio do acionamento do aerógrafo, que expelle uma nuvem de solução contendo o precursor metálico sobre o substrato, colocado em uma placa de aquecimento pré-aquecida a uma temperatura de 300 °C. A essa temperatura, espera-se que o solvente evapore antes mesmo de entrar em contato com a superfície da amostra e que o precursor degrade rapidamente, formando uma fina camada de óxido metálico. Utiliza-se uma máscara mecânica sobre o substrato para que ocorra deposição seletiva apenas na área desejada.

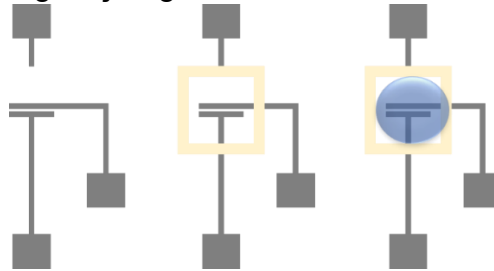
No processo de deposição, realizado em três etapas, faz-se uso dos seguintes parâmetros:

- I - Pressão de saída: 10 psi (0,7 bar).
- II - Tempo de deposição: 5 segundos.
- III - Número de camadas: 3.
- IV - Intervalo de tempo entre as camadas: 60 s.
- V - Temperatura da amostra e da placa de aquecimento: 350 °C.
- VI - Distância entre o bico do aerógrafo e a superfície da amostra: 200 mm

A terceira etapa consiste na evaporação dos eletrodos, o material escolhido para ser empregado nestes dispositivos fora o alumínio. A evaporação

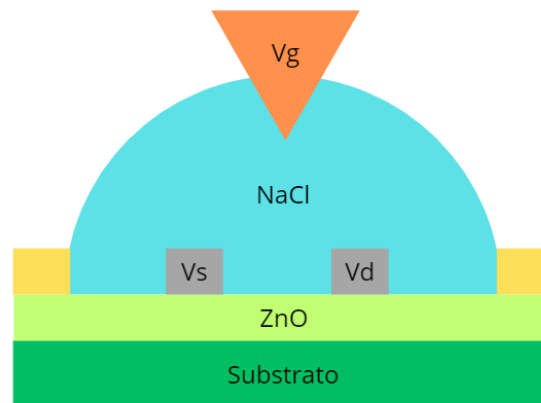
é feita em uma evaporadora utilizando a máscara descrita na figura 5. A razão W/L dos eletrodos exibidos é de aproximadamente 50. Por fim, a última etapa é a montagem do dispositivo, a qual é feita delimitando-se uma pequena área sobre os eletrodos utilizando PDMS, onde se adiciona 20 μL de solução aquosa de NaCl em diferentes concentrações (Figura 5). O dispositivo finalizado possui uma sessão de corte esquematizada na figura 6, onde utiliza-se uma sonda metálica de platina posicionado sobre o eletrólito como eletrodo de porta.

Figura 5: Configuração geométrica dos eletrodos evaporados



Fonte: Acervo pessoal

Figura 6: Sessão transversal do dispositivo produzido



Fonte: Acervo pessoal

3.1. Caracterização do dispositivo

Durante a caracterização, a qual é feita por meio da aplicação de tensões no dreno e na fonte e por meio da medida da corrente no canal, para qual

utilizam-se duas unidades de medida/fontes Keithley 2410-C e Keithley 2430, utilizando faixas de varredura entre 0 e 0.5 V para a curva de saída, fixando-se a tensão na porta em 0.8 V. Para a curva de transferência utilizam-se valores entre -0.4 e 0.8 V para se observar o modo de depleção do dispositivo. A coleta de pontos deve ser mais lenta para minimizar efeitos inerentes à polarização da porta, uma vez que a polarização do eletrólito é um processo inerentemente mais lento que o tempo de relaxação dielétrica dos sólidos convencionais. Pode-se então construir as curvas de saída e transferência do dispositivo. Dessas curvas, como já mencionado anteriormente, pode-se determinar diversos parâmetros experimentais, dentre os quais destacam-se:

- Tensão de limiar: este parâmetro é extraído linearizando a curva de transferência e traçando uma reta sobre a parte linear, observando onde a reta intersecta o eixo x, conforme exibido na figura 2;
- Razão on/off: trata-se da razão entre a maior corrente da curva de transferência e a corrente do dispositivo desligado;
- Subthreshold swing (SS): este parâmetro indica a eficácia com que o dispositivo é capaz de elevar a corrente em uma década a partir da variação da tensão na porta, a qual também pode ser obtida pela curva de transferência, sendo definido por:

$$SS = \left[\frac{\partial V_g}{\partial (\log I_{Ds})} \right]_{min} \quad (16)$$

- Mobilidade de saturação: Trata-se da mobilidade dos portadores no regime de saturação, sendo obtida por meio da equação 8.

Também se determina a capacitância específica do eletrólito em cada concentração iônica por meio de espectroscopia de impedância, utilizando-se o valor encontrado para baixas frequências (0.1 Hz), de forma a compor uma curva da variação da capacitância em função da concentração do eletrólito. Escolheu-se concentrações em massa que variam de 0.5% à 3% da massa de solvente, as quais podem ser convertidas para mol/L, sendo as concentrações convertidas respectivamente 0.083, 0.17, 0.34 e 0.51 mol/L.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas de saída e transferência do EGT produzido sob variação da concentração iônica estão exibidas na figura 7. O intervalo de tempo entre a medida de cada ponto experimental fora de 0.5 s, com intervalos de 0.02 V entre cada ponto da curva de saída. Nota-se uma clara mudança de comportamento do dispositivo quando sob a variação da concentração iônica da porta. Os parâmetros extraídos estão exibidos na tabela 1, onde nota-se um claro aumento na razão on/off e na capacitância específica. Uma vez que se observa um aumento na capacitância, também deve ocorrer uma maior acumulação de cargas na interface, o que deve naturalmente aumentar a corrente induzida no canal. Sabe-se ainda que um aumento na capacitância da porta deve diminuir a corrente sub-limiar em TFTs, portanto o aumento na razão on/off é bastante razoável.

Figura 7.a: Curvas de saída do dispositivo produzido em função da concentração iônica

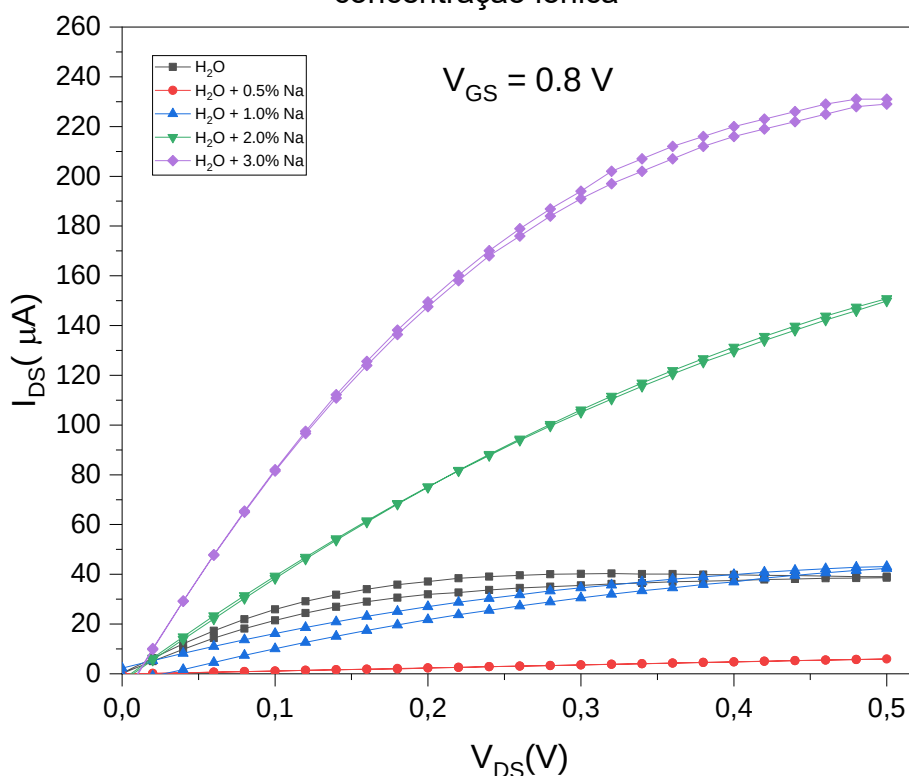
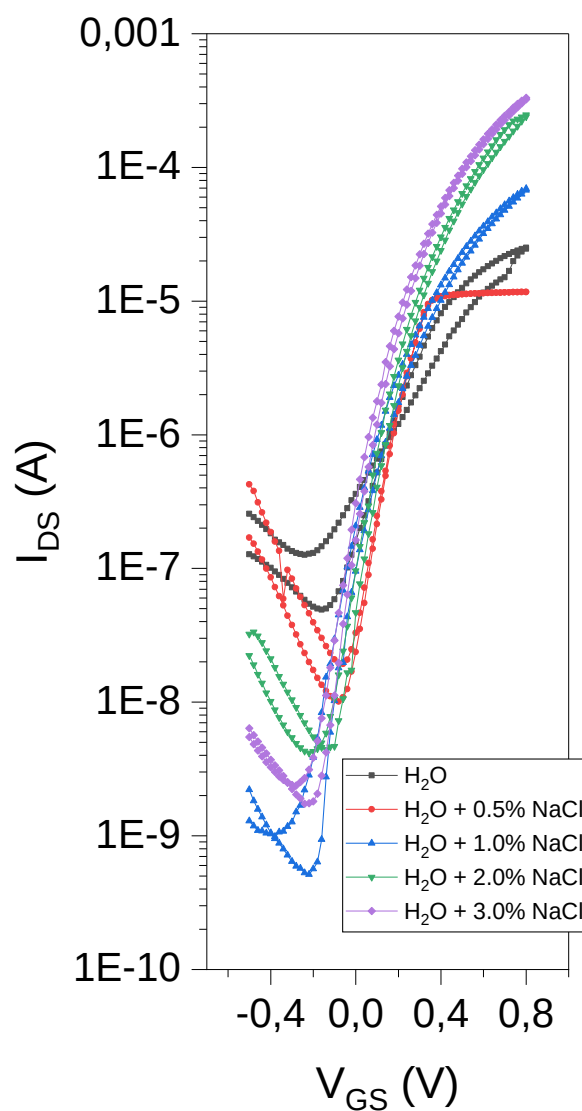


Figura 7.b: Curvas de transferência do dispositivo produzido em função da concentração iônica



Fonte: Acervo pessoal

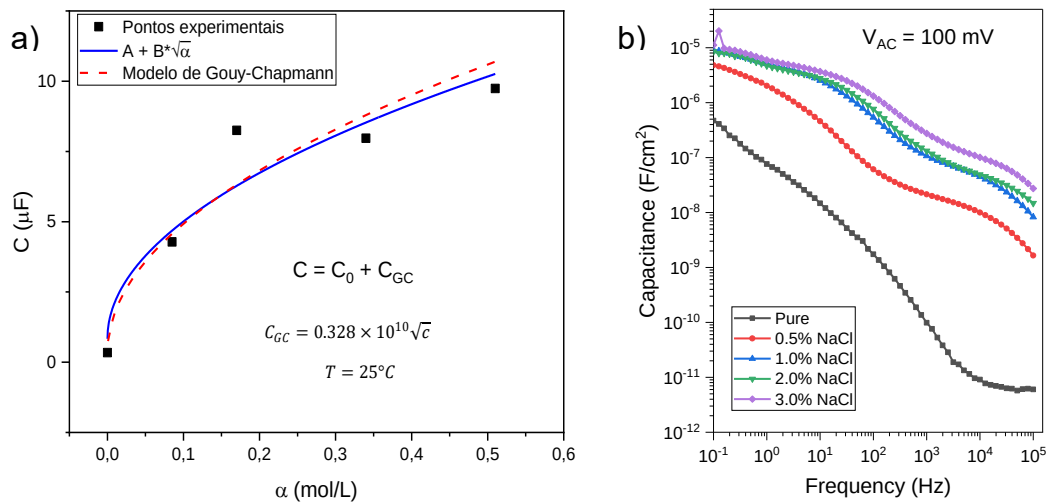
Tabela 1: Parâmetros experimentais extraídos durante a caracterização

NaCl	$I_{on/off}$	SS (mV/dec)	C (μF)	μ_s (cm^2/Vs)	$ \Delta V_{th} $ (mV)
H_2O	$5.10E+02$	246	0.34	15.03	60
0.5%	$1.16E+03$	144	4.28	1.58	1
1%	$1.32E+05$	50	8.25	0.83	40
2%	$5.95E+04$	108	7.97	4.11	20
3%	$1.86E+05$	101	9.74	3.47	20

Fonte: Acervo pessoal

Na figura 8a mostra-se um gráfico da capacitância em função da concentração iônica, bem como um ajuste não linear dos dados e a curva teórica esperada com base no modelo de Gouy-Chapmann. Constatou-se que existe uma concordância razoável entre os dados quando se associa em paralelo uma capacitância inicial, a qual se atribui à água pura. A baixa quantidade de dados faz com que os efeitos da camada de Helmholtz sejam virtualmente inobserváveis, por essa razão não se utilizou o modelo de Stern nas análises.

Figura 8: (a) Variação da capacitância com a concentração iônica e (b) espectro de capacitâncias medidas pelo método de espectroscopia de impedância



Fonte: Acervo pessoal

Na figura 8b encontra-se o espectro de capacitância do eletrólito em função da frequência sob diferentes concentrações. Embora seja possível notar visualmente o aumento na capacitância, utilizou-se valores de capacitância em um único valor de frequência (0.1 Hz) para todas as concentrações, o que compromete seriamente a análise, pois sabe-se que o aumento da concentração iônica leva a uma variação da resistência e capacitância equivalente do circuito, o que por sua vez altera o tempo de relaxação $\sqrt{RC}$ do eletrólito. Para resultados coerentes o inverso da frequência utilizada deve ser menor que o tempo de relaxação, efeito que não foi explorado durante as análises e deve ser levado em conta nas discussões seguintes.

O efeito da variação da tensão de limiar (threshold shift) com a inversão da polaridade da porta, a qual pode ser observada nas curvas de transferência. O módulo dessa variação é exibido na tabela 1. A existência dessa variação pode ser atribuída ao efeito das armadilhas de carga presentes na camada ativa e não parece existir uma correlação direta entre a variação da tensão de limiar e a concentração iônica. A diminuição da razão on/off após a inversão da tensão da porta também é muito provavelmente causada pelo efeito das armadilhas de carga, a qual pode ser entendida como uma diminuição da efetividade do efeito de campo causada pela ocupação das armadilhas (VIEIRA, 2023). Parece existir uma correlação entre os valores de subthreshold swing e a variação da tensão de limiar para concentrações mais elevadas, onde se observa pouca ou nenhuma mudança nestas grandezas. Contudo, não havendo dados o bastante para embasar essa aparente correlação, nada se pode ser afirmado sobre, mas pode-se levantar a hipótese de que o aumento na concentração iônica tenha algum efeito sobre a densidade de armadilhas na interface em altas concentrações, uma vez que a densidade de armadilhas é dada por:

$$N_t = \frac{C_g \Delta V_{th}}{q} \quad (17)$$

Então para que ΔV_{th} permaneça constante quando a capacitância variar, N_t deve variar na mesma taxa. A baixa variação do subthreshold swing neste mesmo regime de concentração corrobora com esta hipótese.

Por fim, enquanto a redução na mobilidade eletrônica é prevista com o aumento da capacitância, seu súbito aumento nos valores mais elevados de concentração não o são, o que indica que apenas a variação da capacitância não é o bastante para se explicar de forma concisa o comportamento do dispositivo sob a variação da concentração iônica do eletrólito de porta, e devem haver efeitos importantes que estão sendo negligenciados por este modelo. Contudo, imaginando-se o cenário em que o aumento da concentração iônica de alguma forma reduza a densidade de armadilhas, pode-se imaginar um correspondente aumento na mobilidade, já que haveriam menor dispersão de portadores. De toda forma, o caráter dessas discussões é meramente

especulativo, pois não existem dados o bastante para se avaliar se essas correlações realmente estão presentes.

É importante mencionar também que existem correções que devem ser feitas nas equações (5) e (7) devido às características topológicas da configuração de probe-gate (SONMEZ, ERTOP e MUTLU, 2017), as quais não são incorporadas neste trabalho, mas o autor acredita que este efeito é pouco relevante para as análises apresentadas nesse capítulo.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se um transistor de porta eletrolítica funcional, descrevendo sua produção através do método de spray-pirólise utilizando-se de um sistema automatizado produzido em nosso laboratório de pesquisa, e analisando os dados obtidos em sua caracterização. Durante a caracterização do dispositivo, avaliou-se qual o efeito da concentração iônica do eletrólito da porta, notando que existe uma mudança apreciável na performance do dispositivo. A princípio especulou-se que a variação nos parâmetros pudesse se dar pela variação na capacitância do eletrólito, cuja relação com a concentração foi avaliada com base no modelo de Gouy-Chapmann.

Embora pareça haver uma concordância com o modelo, a baixa quantidade de dados nos impede de constatar sua validade. Além disso, as medidas de capacitância apresentadas são controversas, pois não se considerou qual o efeito do aumento da concentração iônica sobre o tempo de relaxação do eletrólito. Mesmo assim, constatou-se que a mera variação na capacitância do eletrólito não é o bastante para se analisar os dados, já que se observam efeitos em altas concentrações que não são esperados, como um aumento na mobilidade de saturação, e uma baixa/nula variação do subthreshold swing e do threshold shift. Especula-se que estes efeitos sejam causados por alguma alteração na densidade de armadilhas na interface, mas não se pode corroborar para esta hipótese sem que haja um estudo mais sistemático do comportamento do dispositivo em concentrações mais altas.

Para referências futuras, o estudo da variação da capacitância para concentrações mais baixas não é contemplado neste trabalho e possibilitaria uma observação direta do efeito da dupla camada de Helmholtz. Por outro lado, estudar o efeito de concentrações mais altas pode corroborar com a hipótese de que surgem efeitos imprevistos pelo modelo, uma análise mais robusta poderia ser obtida analisando-se diferentes espécies iônicas e avaliando qual o efeito da variação da concentração sobre a distribuição de portadores, o que pode ser feito teoricamente com o auxílio de simulações numéricas.

BIBLIOGRAFIA

- BARSOUKOV, Evgenij. MACDONALD, J. Ross. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications**. 2005, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2° ed.
- BRAGA, João P.; LIMA, Guilherme R. de; GOZZI, Giovanni; SANTOS, Lucas Fugikawa. **Electrical Characterization of Thin-Film Transistors Based on Solution-Processed Metal Oxides**. (2018), Design, Simulation and Construction of Field Effect Transistors. DOI: [dx.doi.org/10.5772/intechopen.78221](https://doi.org/10.5772/intechopen.78221)
- BROTHERTON, S. D. **Introduction to Thin Film Transistors**. 2013, Springer International Publishing Switzerland, DOI: 10.1007/978-3-319-00002-2, p. 24
- BUSCAGLIA, Lorenzo Antonio. **Development of a Portable Impedance Spectrometer**. 2022, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- CHANG, Qing. **Colloid and Interface Chemistry for Water Quality Control**. 2016, Chemical Industry Press. Elsevier. London – UK, p.87-96
- FRISBIE, C. Daniel; et al. **Electrolyte-Gated Transistors for Organic and Printed Electronics**. Adv. Mater. (2013), 25, 1822–1846. DOI: 10.1002/adma.201202790
- HOWARD, Webster E. **Thin Film Transistors—A Historical Perspective**. (2003). Retirado de: **Thin-Film Transistors**, editado por: Kagan, Cherie; Andry, Paul. Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York, p. 8
- KUMAR, Manoj. JEONG, Hakyung. LEE, Dongjin. **Solution-processed nonvolatile Hf-doped ZnO thin-film transistor memory with SiO₂ micro- and nanoparticles as a trapping médium**. Materials Science & Engineering B 236–237 (2018) 225–2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2018.12.002>.
- LIMA, Guilherme R. de; BRAGA, João P; GOZZI, Giovanni; SANTOS, Lucas Fugikawa. **On the reproducibility of spray-coated ZnO thin-film transistors**. MRS Advances, (2020) Materials Research Society. DOI: 10.1557/adv.2020.199
- NA, So-Yeong; YOON, Sung-Min. **Impacts of HfO₂/ZnO Stack-Structured Charge-Trap Layers Controlled by Atomic Layer Deposition on Nonvolatile Memory Characteristics of In-Ga-Zn-O Channel Charge-Trap Memory Thin-Film Transistors**. IEEE Journal of the Electron Devices Society (Volume: 7), 453 – 461, (2019). DOI: 10.1109/JEDS.2019.2908255
- NEAMAN, Donald. **Semiconductor Physics and Devices**. 2003, 3° ed. McGraw-Hill, New York, p. 79, 91, 176, 210
- ÖZGÜR, Ü; ALIVOV, Ya I.; LIU, C. **A comprehensive review of ZnO materials and devices**. Journal of Applied Physics 98, 041301 (2005). AIP Publishing LLC.
- PILLAI, P.B.; KUMAR, A.; SONG, X.; SOUZA, M.M. De. **Diffusion-controlled faradaic charge storage in high-performance solid electrolyte-gated zinc oxide thin-film transistors**. ACS Appl. Mater. Interfaces 10 (2018) 9782–9791, DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b14768>.
- ROBERTSON, J. **High dielectric constant oxides**. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 28, 265–291 (2004) DOI: 10.1051/epjap:2004206.
- SZE, S. M. **Physics of semiconductor devices**. 1981, 2° Ed. John Wiley & Sons, p. 12, 434

SONMEZ, Bedri Gurkan; ERTOP, Ozan; MUTLU, Senol. **Modelling and Realization of a Water-Gated Field Effect Transistor (WG-FET) Using 16-nm-Thick Mono-Si Film**. 2017, Scientific REpOrtS | 7: 12190 | DOI:10.1038/s41598-017-12439-8.

VALIZADEH, POUYA. **Field Effect transistors: A comprehensive overview**. Willey, 2016, p. 43, 296

VIEIRA, D. et al. **Charge-trap memory effect in spray deposited ZnO-based electrolyte-gated transistors operating at low voltage**. Current Applied Physics 53 (2023) 118–125.

VIEIRA, D. et al. **UV-photocurrent response of zinc oxide-based devices: Application to ZnO/PEDOT: PSS hydrid Schottky diodes**. Materials Science in Semiconductor Processing 121 (2021) 105339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105339>

VIEIRA, D. et al. **ZnO-based electrolyte-gated transistor (EGT) applied as multiparametric UV-sensing device**. Sensors and Actuators: A. Physical 347 (2022) 113989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113989>

VYAS, Sumit. **A Short Review on Properties and Applications of Zinc Oxide Based Thin Films and Devices**. (2020), Johnson Matthey Technol. Rev., 64, (2), 202–218. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651320X15694993568524>

WAN, Changjin. **Electric-Double-Layer Coupled Oxide-Based Neuromorphic Transistors Studies**. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019, p.3