



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

JOSÉ HENRIQUE FERREIRA NOBRE

**Dispositivo Sináptico Baseado nas Propriedades  
Optoeletrônicas de Transistores de Filme Fino de Óxido de  
Zinco**

**JOSÉ HENRIQUE FERREIRA NOBRE**

**Dispositivo Sináptico Baseado nas Propriedades  
Optoeletrônicas de Transistores de Filme Fino de Óxido de  
Zinco**

Tese de Doutorado apresentada ao  
Departamento de Física da Universidade  
Estadual de Londrina, como requisito à  
obtenção do título de Doutor em Física.

Orientador: Prof. Dr. Edson Laureto

Londrina  
2023

JOSÉ HENRIQUE FERREIRA NOBRE

**Dispositivo Sináptico Baseado nas Propriedades  
Optoeletrônicas de Transistores de Filmes Fino de Óxido  
de Zinco**

Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Doutor em Física.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Edson Laureto  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Fabio Luiz Melquíades  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Sidney Alves Lourenço  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

---

Prof. Dr. Neri Alves  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho" – UNESP - Presidente  
Prudente

---

Dr. Gabriel Leonardo Nogueira  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho" – UNESP - Bauru.

Londrina, 28 de julho de 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

NOBRE, JOSE HENRIQUE FERREIRA .

Dispositivo Sináptico Baseado nas Propriedades Optoeletrônicas de Transistores de Filme Fino de Óxido de Zinco. / JOSE HENRIQUE FERREIRA NOBRE. - Londrina, 2023.  
98 f. : il.

Orientador: Edson Laureto.

Tese (Doutorado em Física) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, 2023.  
Inclui bibliografia.

1. Transistor de filme fino - Tese. 2. Fotocondutividade persistente - Tese. 3. Sinapse optoeletrônica. - Tese. 4. Óxido de zinco - Tese. I. Laureto, Edson . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Física. III. Título.

CDU 53

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado forças.

Agradeço aos meus pais, Aparecida e José que se dedicaram muito para que eu pudesse chegar até este momento, com muito suor, carinho, amor e apoio incondicional na minha vida.

Agradeço em especial a minha mulher Fabiana Alvino de Oliveira pela compreensão, companheirismo, carinho e apoio nos momentos mais difíceis desse caminho e com muito amor e carinho esteve ao meu lado, também agradeço a toda sua família.

Agradeço a toda a minha família que sempre me apoiou, em especial a meu irmão João pelo companheirismo, a minha vó Maria, pelo imenso carinho e a minha madrinha Silvana, pelas inúmeras conversas e conselhos, também aos familiares que mesmo distante sempre presentes.

Agradeço imensamente ao meu orientador professor Dr. Edson Laureto, por sua dedicação em prol do meu trabalho e formação acadêmica, também por servir de inspiração, como o grande profissional que é. Serei eternamente grato por todo o apoio.

Agradeço aos membros da banca Fabio, Sidney, Neri e Gabriel, por fazer parte da minha defesa e por todas as contribuições que ocorridas. A todos os amigos que me auxiliaram neste período, os que participaram direta e indiretamente. Em especial aos amigos e companheiros de Grupo ao longo destes anos: Ricardo, Thais, Amer, Neusmar, Flavio, Dari, pelos grandiosos dias de estudos e a todas as pessoas ao meu redor que influenciaram na construção deste.

Agradeço em especial o apoio do Professor Dr. Neri e ao Dr. Gabriel da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" de Presidente Prudente e ao Dr. Dari, pelo apoio técnico e de dedicação levando ao desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Dispositivos e Sensores Orgânicos (LaDSOr) Unesp campo Presidente Prudente; ao LARX (Laboratório de Análise de Raios-X) do Centro Laboratorial Multusuário PROPPG-UEL; UTFPR Campus Londrina; Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) de Campinas-SP, pela parceria e contribuição com

equipamentos essenciais para a análise/desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina; e a UEL, INEO, CNPq e CAPES pelo suporte e apoio financeiro.

*“Há aqueles que lutam um dia; e por isso são bons;  
Há aqueles que lutam muitos dias; e por isso são muito bons;  
Há aqueles que lutam anos; e são melhores ainda;  
Porém há aqueles que lutam toda a vida; esses são os imprescindíveis”.*

*Bertolt Brecht*

Nobre, José Henrique Ferreira. **Dispositivo sináptico baseado nas propriedades optoeletrônicas de transistores de filmes fino de óxido de zinco.** Nome da tese. 2018 - 2023. Número total de 98 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Doutorado em Física – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

## RESUMO

Sinapses optoeletrônicas podem ser geradas com dispositivos que utilizam radiação eletromagnética para emular a plasticidade sináptica e suas funções relacionadas. Tais dispositivos são considerados elementos chave para a implementação de sistemas de computação neuromórfica, ou seja, baseados no funcionamento do cérebro, com propriedades de sensoriamento, memória e aprendizagem. Neste trabalho é demonstrado um dispositivo optoeletrônico com propriedades sinápticas baseado na configuração de transistor de filme fino (TFT), tendo como canal semicondutor um filme de óxido de zinco ( $ZnO$ ) depositado por *RF magnetron sputtering*. As propriedades sinápticas tiram vantagem do fenômeno de fotocondutividade persistente (PPC) apresentado pelo filme de  $ZnO$ . Esse efeito afeta o comportamento da intensidade de corrente elétrica medida entre os eletrodos de dreno e fonte ( $I_D$ ), para uma determinada diferença de potencial aplicada ao eletrodo de porta (gate,  $V_G$ ), mediante a incidência de luz no canal. Com isso, as funções sinápticas de sensoriamento, memória de curto e de longo prazo, aprendizagem e reaprendizagem, e facilitação por pulso emparelhado, são verificadas no TFT de  $ZnO$ . Realizamos a comparação de dispositivos antes e depois de tratamento térmico, apresentando diferentes melhorias com doses menores de exposição à luz para os dispositivos tratados termicamente. As variações em  $I_D$  causadas pela iluminação com radiação ultravioleta (UV) chegam a ser da ordem de  $10^8$  A, o que demonstra a alta sensibilidade do dispositivo, sendo um aspecto crucial para sua eficácia quanto ao reconhecimento e discriminação do estímulo luminoso. Embora o transistor não seja o dispositivo de estrutura mais simples, apresentamos as vantagens e desvantagens da utilização do mesmo como um dispositivo sináptico.

**Palavras-chave:** Transistor de filme fino; óxido de zinco; RF – magnetron sputtering; fotocondutividade persistente; sinapse optoeletrônica.

Nobre, José Henrique Ferreira. **A synaptic device based on the optoelectronic properties of zinc oxide thin film transistors.** 2018 - 2023. Número total de 98 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso de Doutorado em Física – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

## ABSTRACT

Optoelectronic synapses can be generated by devices that use electromagnetic radiation to mimic synaptic plasticity and its related functions. Such devices are considered key elements for the implementation of neuromorphic computing systems, that is, based on the functioning of the brain, with sensing, memory and learning properties. This work demonstrates an optoelectronic device with synaptic properties based on a thin-film transistor (TFT) configuration, with the semiconductor channel consisting by a zinc oxide (ZnO) film deposited by RF magnetron sputtering. The synaptic properties take advantage of the phenomenon of persistent photoconductivity presented by the ZnO film. The incidence of light in the channel increases the electrical current intensity measured between the drain and source electrodes ( $I_D$ ) – for a given potential applied to the gate electrode ( $V_G$ ). With this, the synaptic functions of sensing, short- and long-term memory, learning and relearning, and paired pulse facilitation, are verified in the ZnO TFT. We compared devices before and after heat treatment, showing different improvements with lower doses of light exposure for heat-treated devices. The variations in  $I_{DS}$  caused by lighting with ultraviolet (UV) radiation can reach up to  $10^8$  A, which demonstrates the high sensitivity of the device, a crucial aspect for its effectiveness in terms of recognizing and discriminating the light stimulus. Although the transistor is not the simplest device in structure, we present the advantages and disadvantages of using it as a synaptic device.

**Key words:** Thin film transistor; RF – magnetron sputtering; Persistent photoconductivity; Optoelectronic synapse.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1-1 – Partes principais do computador baseado na estrutura de von Neumann.....	2
Figura 1.1-2 – (a) Comparação da evolução do número de transistores em chips, produzidos pela Intel ao longo do tempo (círculos amarelos), com às previsões da lei de Moore (linhas tracejadas, azul) e dobrando a cada 18 meses o número de transistores nos processadores. (b) Atualização de dados do número de transistores em chips, produzidos pela Intel ao longo do tempo. Fonte @intel. ....	3
Figura 1.1-3 - Estrutura perceptron de rede neural artificial. Círculos representam neurônios individuais, enquanto linhas representam sinapses conectando os neurônios de cada camada com todos os neurônios da camada subsequente. Adaptado de [14]. .....	6
Figura 1.1-4 - Variáveis fundamentais dos circuitos elétricos e os componentes associados. As linhas tracejadas dizem respeito à relação entre $i$ e $q$ , e à relação entre o fluxo magnético e a força eletromotriz, dada pela lei de Faraday ( $R$ - Resistor, $C$ - Capacitor, $L$ - Indutor, $M$ - Memristor). Extraído de [16]. .....	7
Figura 1.1-5 - (a) Representação de uma matriz de barramento transversal com memristores. As tensões de entrada são aplicadas nos eletrodos “linha” (de cima) e as saídas são as correntes medidas nos eletrodos “coluna” (de baixo). (b) O problema da corrente por caminho furtivo (do inglês “sneak-path current”). Em azul, o fluxo desejado para a corrente no circuito. Em vermelho, a corrente por caminho furtivo. Adaptado de [22]. .....	9
Figura 1.1-6 - Ilustração de uma sinapse química envolvendo dois neurônios. Os pontos pretos representam neurotransmissores químicos. (b) Estrutura do dispositivo sináptico optoeletrônico. Com a polarização, a corrente $I_D$ é medida e sua magnitude é aumentada com a incidência de luz UV devido à fotocondutividade persistente do canal de ZnO.....	11
Figura 2.1-1 – Representação do transistor de filme fino, com os eletrodos de fonte e dreno de filme de alumínio (Al), o semicondutor sendo um filme de óxido de Zinco (ZnO), o dielétrico de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o metal de porta dado pelo silício fortemente dopado ( $\text{Si } n^+$ ). .....	13
Figura 2.1-2- Esquema mostrando algumas das estruturas de TFT mais convencionais, de acordo com a posição do eletrodo de porta e à distribuição dos eletrodos em relação ao semicondutor: (a) bottom-gate top-contact, (b) bottom-gate bottom contact, (c) top-gate bottom-contact e (d) top-gate top-contact. As faixas azul, cinza e amarela correspondem ao substrato, ao material isolante (ou dielétrico de gate) e ao material semicondutor, respectivamente.....	14
Figura 2.1-3 – Estrutura de bandas próxima à junção metal-dielétrico-semicondutor (MIS ou MOS). Neste diagrama são desconsideradas as cargas nas interfaces, cargas no dielétrico, e as diferenças entre os níveis de Fermi entre o semicondutor ( $E_{Fs}$ ) e o metal ( $E_{Fm}$ ). Para $V_G < 0V$ , ocorre a depleção no semicondutor tipo-n, ao passo que para $V_G > 0V$ , ocorre a acumulação de elétrons no canal formado na interface semicondutor-dielétrico. ....	15

Figura 2.1-4 – Representação do esquema de polarização do TFT, com as tensões aplicadas entre dreno e fonte $V_{DS}$ e entre porta e fonte $V_G$ do dispositivo.....	16
Figura 2.1-5 - Ilustração dos parâmetros geométricos do transistor de filme fino, comprimento $L$ , largura $w$ e espessura $l$ do canal do semicondutor. ....	17
Figura 2.1-6 - Curva característica de funcionamento do transistor. (a) Curva de saída, dada pela corrente entre dreno e fonte $I_D$ , pela variação da tensão entre dreno e fonte $V_{DS}$ , mantendo $V_G$ fixo. (b) Curva de transferência, sendo a corrente $I_D$ pela variação da tensão na porta $V_G$ , mantendo $V_{DS}$ fixo para cada medida.....	19
Figura 2.2-1 - Geração de pares elétron-buraco (e-h) através da excitação do ZnO com luz de energia maior que o bandgap do material. A incidência de luz também pode ionizar os estados neutros de vacâncias de oxigênio ( $V_0^0$ ).....	23
Figura 2.2-2 - Captura de buracos pelos estados de vacância de oxigênio, gerando estados $V_0^{2+}$ (esses estados possuem energia mais próxima ao fundo da banda de condução do ZnO em comparação com os estados $V_0^0$ ).....	24
Figura 2.2-3 - Recombinação dos portadores fotogerados. Elétrons em excesso permanecerão na banda de condução do material porque a ligação dos buracos no estado $V_0^{2+}$ é bastante estável. ....	24
Figura 2.2-4 - Processo de adsorção de moléculas de oxigênio atmosférico sobre a superfície do ZnO (tipo-n, ou seja, com excesso de elétrons).....	25
Figura 2.2-5 - Com iluminação UV, pares elétron-buraco são foto gerados no ZnO. Os buracos podem se ligar ao íon $O_2^-$ , neutralizando a molécula e formando $O_2$ . ....	25
Figura 2.2-6 - Moléculas de $O_2$ podem ser dessorvidas da superfície do ZnO, deixando o elétron desemparelhado na banda de condução do material, o qual irá contribuir para o aumento de sua condutividade. ....	26
Figura 2.3-1 - Componentes de um neurônio. Extraído da página 26 de [15].....	27
Figura 2.3-2 - Ilustração da região da sinapse, com os neurotransmissores, a fenda sináptica e os demais elementos sinápticos. Extraído da página 115 de [15].....	28
Figura 2.3-3 -(a) Tipos de plasticidade sináptica formada entre neurônios. SM memória sensorial, STM memória de curto prazo, LTM memória de longo prazo. (b) PPF facilitação por pulso emparelhado. (c) PPD inibição por pulsos emparelhados.	30
Figura 3.1-1 Substrato de silício de 8" com filme de Dióxido de silício de 100nm da marca @Ossila. Fonte: Ossila.....	31
Figura 3.1-2 - Ilustração das disposições dos filmes após a deposição do ZnO via RF - magnetron Sputtering.....	32
Figura 3.1-3 – Ilustração da geometria dos eletrodos do dispositivo utilizando a máscara de sombra para a deposição dos eletrodos dos transistores. Fonte: @Ossila. ....	33
Figura 3.1-4 - Ilustração da representação do substrato após a deposição dos eletrodos de dreno e fonte, fazendo utilização da máscara da @Ossila. Adaptado de @Ossila.....	33
Figura 3.2-1 - Esquema de montagem dos eletrômetros da @Keithley modelo 617, e das ligações elétricas para a aquisição de dados. ....	34
Figura 3.2-2 - Layout do software de aquisição de dados dos eletrômetros. ....	35

Figura 3.2-3 - Medida do espectro de emissão do LED 355 nm. $I_0$ é a medida da intensidade emitida diretamente pelo LED, sendo tal intensidade atenuada para 60% e 25% de $I_0$ com o uso de filtros de densidade neutra. Neste trabalho, $I_0 = 70 \mu W.cm^{-2}$ .....	36
Figura 4.1-1 - Curvas de saída do TFT com canal de ZnO. As tensões aplicadas na porta variaram de 0V a 10V. As medidas foram realizadas na ausência de luz.....	38
Figura 4.1-2 - Curvas de transferência do TFT com canal de ZnO. Curva de cor preta, representa a medida na escala logarítmica e a de cor azul realizando o módulo da corrente $I_D$ . A tensão aplicada entre dreno e fonte foi de $V_{DS}=7V$ . As medidas foram realizadas na ausência de luz. ....	39
Figura 4.2-1 - Gráfico de Tauc e a avaliação de band gap para filme de ZnO usado como canal semicondutor em dispositivos sinápticos optoeletrônicos. ....	40
Figura 4.2-2 - Variação do $I_D$ pelo tempo, iluminando a amostra por 2min com o LED vermelho (630 nm). Essa medida é resposta da corrente elétrica $I_D$ ao estímulo luminoso no canal do semicondutor de ZnO em um TFT, mantendo para essa medição, $V_{DS} = 3 V$ e $V_G = -7 V$ .....	41
Figura 4.2-3 - Difratograma de raios X para filme de ZnO de 50nm. Os pontos abertos representam dados experimentais, do filme de ZnO depositado sobre o substrato de vidro. A curva de cor preta é o difratograma calculado, e a curva de cor vermelha é o difratograma experimental, para o filme de ZnO depositado sobre o substrato de silício. A curva de diferença demonstra a precisão do ajuste.....	41
Figura 4.2-4 - Curva de transferência do TFT de canal de ZnO antes da iluminação, imediatamente após a incidência de luz, e medidas após 6, 10 e 15 minutos de iluminação ininterrupta. A fonte de luz foi o LED 355nm e a tensão entre fonte e dreno foi $V_{DS} = 8V$ .....	42
Figura 4.2-5 -Curva de transferência do TFT de canal de ZnO com $V_{DS}=8V$ . Medidas de 0 a 270 minutos após a incidência de luz.....	43
Figura 4.2-6 - Curva de transferência do TFT aplicando uma tensão $V_{DS}=8V$ , antes da iluminação, imediatamente após a incidência de luz, com 15 minutos de iluminação e 210 minutos após a iluminação ter sido interrompida. A fonte de luz LED 355nm....	44
Figura 4.2-7 - Variação da corrente entre fonte e dreno $I_D$ com o tempo aplicando uma, aplicando tensões de $V_{DS} = 6V$ e $V_G = -5V$ . (a) Após 12min exposição ao UV (b) Após 25 min de iluminação UV. ....	44
Figura 4.2-8 - Variação da fotocorrente durante a iluminação e após sua interrupção, com o dispositivo no estado desligado (curva em preto, $V_G= -5 V$ ) e no estado ligado (curva em vermelho, $V_G= 6 V$ ).....	45
Figura 4.3-1 - Ilustração de uma sinapse química envolvendo dois neurônios em comparação com a estrutura do dispositivo sináptico optoeletrônico. Com a polarização, a corrente $I_D$ é medida e sua magnitude é aumentada com a incidência de luz UV devido à fotocondutividade persistente do canal de ZnO. ....	46
Figura 4.3-2 -Diagrama representativo do modelo psicológico de memória e esquecimento do cérebro humano ao receber um estímulo ou múltiplos estímulos.	48

Figura 4.3-3 - Resposta da corrente elétrica $I_D$ ao estímulo luminoso de 2s no canal do semicondutor de ZnO (sensory memory), mantendo para essa medição $V_{DS} = 3$ V e $V_G = -7$ V, usando o LED 355 nm (UV) com a intensidade de $I_0 = 70\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	49
Figura 4.3-4 - Resposta da corrente elétrica $I_D$ ao estímulo luminoso de 0,1s no canal do semicondutor de ZnO (sensory memory), mantendo para essa medição, $V_{DS} = 3$ V e $V_G = -7$ V, usando o LED 355 nm (UV) com a intensidade de $I_0 = 70\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	49
Figura 4.3-5 -Curva de dependência da iluminação com o tempo de dose aplicada, TFT sináptico optoeletrônico, baseado em ZnO. Para essas medidas, $V_{DS} = 3$ V e $V_G=-7$ V.....	50
Figura 4.3-6 - Curva de dependência da iluminação, com a intensidade da dose aplicada no TFT sináptico optoeletrônico, baseado em ZnO. Para essas medições, $V_{DS} = 3$ V e $V_G=-7$ V e o tempo de iluminação de 2s.....	51
Figura 4.3-7 - Efeito de facilitação neural de pulso emparelhado (PPF) emulado pelo dispositivo sináptico. Demonstrado pela variação da $I_D$ pelo tempo, quando o intervalo de tempo entre os pulsos de iluminação é de 25s. A <sub>1</sub> e A <sub>2</sub> são os valores de pico de corrente, na incidência do UV. Para essas medições, $V_{DS} = 3V$ e $V_G=-7V$ e o tempo de iluminação de 2s. ....	52
Figura 4.3-8 - Efeito de facilitação de pulso emparelhado (PPF), emulado pelo dispositivo sináptico ZnO-TFT. Medida da variação percentual, entre os picos de iluminação A <sub>1</sub> e A <sub>2</sub> (como na Figura 4.3-7), pelo intervalo de tempo entre os picos. A linha vermelha contínua é um ajuste de decaimento exponencial aos dados experimentais (tempo de iluminação de 2s).....	53
Figura 4.3-9 - Emulação frequência de repetição de iluminação de 0,02 Hz, e frequência de repetição de iluminação de 0,3 Hz, pelo TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO. Imagem inserida: Ampliação de uma região de intervalo de tempo da medida de alta frequência. Para essas medições, $V_{DS} = 3$ V e $V_G = -7$ V e picos de iluminação de 2s. ..	54
Figura 4.3-10 - Característica de aprendizagem-reaprendizagem (Learning-relearning) do dispositivo sináptico ZnO-TFT. Os retângulos sombreados indicam os tempos de iluminação UV em cada processo, que simulam a etapa de aprendizagem. Para essas medições, $V_{DS} = 3$ V e $V_G = -7$ V.....	55
Figura 4.4-1 - Variação da resistência por folha do filme de ZnO “como depositado” em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda = 355$ nm). (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO “como depositado” em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda = 355$ nm). .....	57
Figura 4.4-2 - Variação da resistência por folha do filme de ZnO “como depositado” após a exposição por 300 min à radiação ultravioleta. (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO “como depositado” após a exposição por 300 min à radiação ultravioleta. ....	57
Figura 4.4-3 - (a) Variação da resistência por folha do filme de ZnO tratado termicamente após a exposição por 10 s à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda = 355$ nm). (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO tratado termicamente após a exposição por 10 s à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda = 355$ nm). O primeiro ponto representa o valor das grandezas antes da exposição ao UV. ....	59

Figura 4.4-4 - Medidas de XPS do filme de ZnO, antes (curva em preto) e depois (curva em vermelho) do tratamento térmico a 450 °C por 1 hora, depositados sobre substrato de (a) vidro, (b) silício.....	59
Figura 4.4-5 - Medidas de XPS, análise da região com o pico O1s, com a deconvolução da curva experimental em três gaussianas centradas em 530,08, 531,18 e 532,01 eV, respectivamente. (a) Amostra em substrato de vidro como depositada; (b) Amostra em substrato de vidro após tratamento térmico (450 °C por 1 hora).....	60
Figura 4.4-6 - – Medidas de XPS, análise da região com o pico O1s, com a deconvolução da curva experimental em três gaussianas centradas em 530,08, 531,18 e 532,01 eV, respectivamente. (a) Amostra em substrato de silício como depositada; (b) Amostra em substrato de silício após tratamento térmico (450 °C por 1 hora).....	60
Figura 4.5-1 - Curvas de saída do transistor de filme fino, com canal de ZnO, tratado termicamente. As tensões aplicadas na porta variaram de 0V a 20V. ....	62
Figura 4.5-2 - Curvas de transferência do TFT com canal de ZnO, tratado termicamente. Curva na cor preta indica a medida na escala logarítmica e a azul apresenta o módulo da corrente $I_D$ . A tensão aplicada entre dreno e fonte foi de $V_{DS} = 6V$ .....	63
Figura 4.5-3 - Curva de transferência do TFT de canal de ZnO, aplicando uma tensão $V_{DS}=6V$ . Antes da iluminação e após 0,1s de iluminação. A fonte de luz usada foi um LED emitindo em 355nm, com intensidade de $10,5\mu W/cm^2$ .....	64
Figura 4.5-4 - Resposta da corrente elétrica $I_D$ ao estímulo luminoso de 0,1s no canal do semicondutor de ZnO. Mantendo para essa medição $V_{DS} = 6 V$ e $V_G = -10 V$ , (região de depleção).....	64
Figura 4.5-5 - Curva da variação da corrente pelo tempo. Medidas de TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO com e sem tratamento térmico. ....	65
Figura 4.5-6 - - Curva da variação da corrente pelo tempo. Medidas da dependência a dose de tempo de iluminação aplicada, TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO. Para essas medições, $V_{DS} = 6 V$ e $V_G = -9 V$ .....	66
Figura 4.5-7 - Efeito de facilitação neural de pulso emparelhado (PPF), emulado pelo dispositivo sináptico. Demonstrado pela variação da corrente pelo tempo, para um intervalo de tempo entre os pulsos de iluminação de 100s. A <sub>1</sub> e A <sub>2</sub> são os valores de pico de $I_D$ após cada de $I_D$ após cada incidência de pulso. Para essa medição, $V_{DS} = 6 V$ e $V_G = -9 V$ e picos de iluminação de 0,5s.....	67
Figura 4.5-8 - Medida de corrente entre fonte e dreno pelo tempo, aplicando uma frequência de repetição de iluminação de 0,02 Hz e 0,3 Hz. Imagem inserida: Ampliação da medida de alta frequência em uma região de intervalo de tempo. Para essas medições, $V_{DS} = 9 V$ e $V_G = -9 V$ e picos de iluminação de 0,2s.....	68

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1-1 - Parâmetros elétricos do transistor, extraídos de sua curva de transferência mostrada na Figura 4.1 2.....	39
Tabela 4.5-2 - Parâmetros elétricos do transistor, extraídos de sua curva de transferência mostrada na Figura 4.5-2 .....	63
Tabela 4.5-3 - Comparaçāo de alguns dispositivos sinápticos na literatura.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- TFT Transistor de Filme fino (Thin Film Transistor)
- PPC Fotocondutividade Persistente (persistent photoconductivity presented)
- PPF Facilitação por pulso emparelhado (pulse-paired facilitation)
- ZnO Óxido de Zinco
- Zn Zinco
- UV Ultra violeta
- RF Rádio Frequência
- CPU Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit*)
- HD Disco Rígido
- IoT Internet das coisas
- ANN redes neurais artificiais
- SNC sistema nervoso central
- SNP sistema nervoso periférico
- EPSC Correntes elétricas pós-sinápticas excitatórias
- SM Memória sensorial
- STM Memória de curto prazo
- LTM Memória de Longo prazo
- PPD Inibição por pulsos emparelhados
- SRDP Plasticidade dependente de taxa de pulso
- SNDP Plasticidade dependente de número de pulsos
- SADP Plasticidade dependente de amplitude de pulso
- LTP Potencialização de longo prazo
- LTD Depressão de longo prazo
- MOS Metal-óxido-semicondutor
- MIS Metal-isolante-semicondutor
- Si Silício
- SiO<sub>2</sub> Dióxido de Silício
- DR-X Difração de raio-X
- LED Diodo emissor de luz (Light Emitting Diode)
- GOF Qualidade de ajuste (Goodness of Fit)
- $I_D$  Corrente entre dreno e fonte
- $V_G$  Tensões na porta

$V_{DS}$	Tensão entre fonte e dreno
$\mu_{ef}$	Mobilidade de efeito de campo
$\mu_{sat}$	Mobilidade de saturação
SS	<i>Subthreshold swing</i>
$V_{th}$	Tensão limiar
$I_{on/off}$	Corrente ligado/ desligado
$I_0$	Intensidade de radiação eletromagnética
$\lambda$	Comprimento de onda

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Computação Neuromórfica .....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	13
2.1	Transistores de Filmes Finos com Canal de Óxido de Zinco .....	13
2.1.1	Curva Característica .....	16
2.1.2	Parâmetros de Caracterização .....	20
2.2	Fotocondutividade Persistente nos Filmes Finos de Óxido de Zinco .....	22
2.2.1	PPC Envolvendo Vacâncias de Oxigênio .....	23
2.2.2	PPC Envolvendo Processo de Adsorção-Dessorção de Oxigênio Atmosférico .....	24
2.3	Sinapse .....	26
3	METODOLOGIA .....	31
3.1	Materiais e Deposição dos Filmes .....	31
3.2	Caracterização .....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1	Transistor de Filme Fino .....	38
4.2	Fotocondutividade Persistente (PPC) no TFT .....	40
4.3	Sinapse Optoeletrônica .....	46
4.4	Efeitos do Tratamento Térmico em Filmes de ZnO Depositado por RF - Sputtering .....	56
4.5	Transistor de Filme Fino com Tratamento Térmico .....	62
5	CONCLUSÕES .....	71
	REFERÊNCIAS .....	73
	ANEXOS .....	77
	ANEXO A – Transistores de Filme Fino .....	77
	ANEXO B – Reprodutibilidade das Propriedades Sinápticas dos TFT .....	79
	ANEXO C - Trabalho Relacionado Diretamente a TESE .....	81

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Computação Neuromórfica

Computadores se tornaram uma ferramenta indispensável na vida cotidiana atual. Eles estão presentes em praticamente todos os setores da sociedade, por exemplo, na área médica, onde ajudam em diagnósticos, tratamentos, gerenciamento de informações e em equipamentos de investigação e monitoramento; na área econômica, com transações bancárias sendo feitas majoritariamente por aplicativos de bancos ou por terminais computadorizados; na educação, proporcionando novas técnicas de ensino e aprendizagem; e na área social, pela disseminação e popularização dos *smartphones* e do acesso a redes sociais e plataformas de compartilhamento de conteúdos audiovisuais. São máquinas multitarefa, de fácil operação e com resposta rápida e eficiente.

Um computador é um equipamento eletrônico que utiliza a eletricidade e um sistema operacional para seu funcionamento. Basicamente, o computador possui dois componentes essenciais: o *hardware* e o *software*. O *hardware* é a parte física do computador, composta de dispositivos capazes de realizar o processamento dos dados. Esses dispositivos são, por exemplo, a unidade central de processamento (CPU), a placa-mãe, a memória RAM, o disco rígido (HD) e a placa de vídeo. Já o *software* é a sua parte lógica, responsável pela organização e metodologia através da qual os dados serão processados. Ele se refere aos programas e sistema operacional do computador. Para o processamento de uma informação, um computador recebe os dados por meio de um dispositivo de entrada, realiza as operações necessárias para processar essa informação, e retorna o resultado por meio de um dispositivo de saída, seguindo um programa de instrução instalado no dispositivo de armazenamento.

Apesar de todo o avanço tecnológico dos computadores ao longo das últimas décadas, o seu funcionamento ainda é baseado na arquitetura computacional proposta por Von Neumann em 1945 [1, 2]. Essa arquitetura é formada por quatro componentes principais: a central de processamento, a memória principal, e os dispositivos de entrada e saída (veja Figura 1.1-1), sendo que todos esses componentes são ligados ao barramento do sistema.

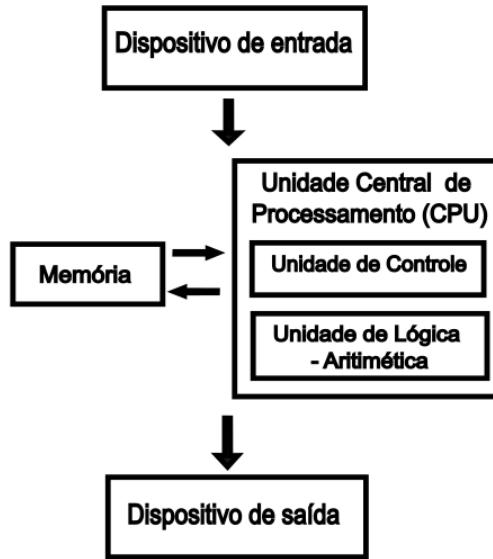


Figura 1.1-1 – Partes principais do computador baseado na estrutura de von Neumann.

A CPU é responsável pela execução das tarefas, e é composta por duas unidades principais: a unidade lógica e aritmética e a unidade de controle. A primeira é responsável pela realização das operações lógicas e aritméticas nos dados que são armazenados na memória principal, enquanto a segunda controla o fluxo das instruções que são executadas pela CPU. Para realizar as tarefas, a CPU busca as instruções na memória principal, a qual armazena tanto as instruções quanto os dados que serão processados pela CPU, assim como os dados depois de processados. Já os dispositivos de entrada e saída são as interfaces entre o computador e o mundo exterior. Finalmente, o barramento do sistema é responsável por conectar todos esses componentes do *hardware*.

É de fato formidável a velocidade e capacidade de processamento com que os computadores executam as mais diversas tarefas que lhes são atribuídas. Isso foi proporcionado pelo desenvolvimento de circuitos integrados, ou o *chip* do computador, com densidades de transistores cada vez maiores, e com integração cada vez maior, o que fez diminuir a distância física entre os componentes proporcionando maior rapidez na taxa de transferência de dados. Essa evolução seguiu a projeção realizada por Gordon E. Moore em 1975, de que o número de transistores em um chip dobraria a pelo menos cada 18 meses, mantidos o espaço ocupado e o seu custo de produção [3]. A Figura 1.1-2 mostra a evolução da miniaturização dos chips e a previsão de Moore.

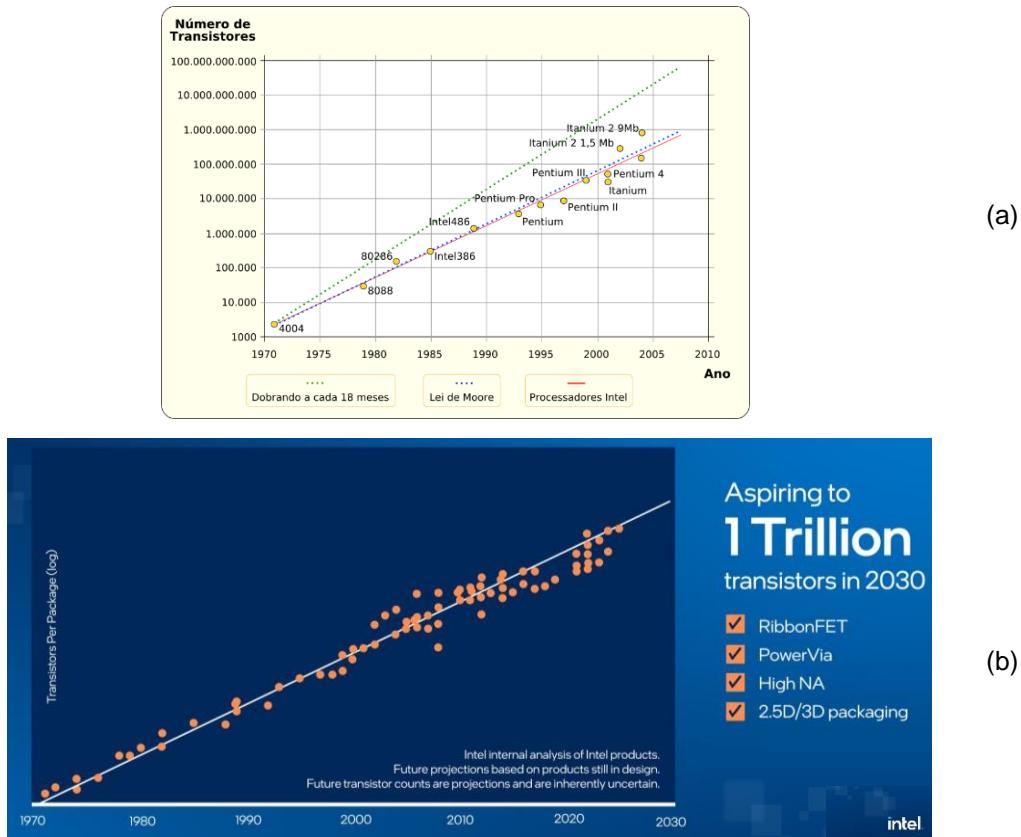


Figura 1.1-2 – (a) Comparação da evolução do número de transistores em chips, produzidos pela Intel ao longo do tempo (círculos amarelos), com às previsões da lei de Moore (linhas tracejadas, azul) e dobrando a cada 18 meses o número de transistores nos processadores. (b) Atualização de dados do número de transistores em chips, produzidos pela Intel ao longo do tempo. Fonte @intel.

Porém, apesar de todos os avanços não somente no processo de miniaturização, mas também devido ao aprimoramento da engenharia de circuitos e à otimização das propriedades dos transistores, já era esperado que a evolução atingisse um ponto de estagnação, causado principalmente por dois fatores: as limitações físicas fundamentais – as leis físicas não são as mesmas em níveis atômicos – e o aumento vertiginoso dos custos para produzir componentes próximos da escala atômica [4].

Por outro lado, com adventos como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e *Big Data*, por exemplo, o volume de dados a serem processados e armazenados exigirá uma capacidade certamente inatingível por computadores baseados na arquitetura tradicional de von Neumann. O principal gargalo reside no fato de que, nesta arquitetura, processamento e armazenamento de dados se dão em espaços distintos, ou seja, o processador está fisicamente separado da unidade de

memória. Isso limita a possibilidade de computação em paralelo e, principalmente, requer um alto consumo de energia para tarefas que exigem alta taxa de transferência de dados [5].

Para sobrepor as dificuldades impostas pelas limitações da arquitetura de von Neumann, novas formas de computação estão sendo propostas pela comunidade científica, tais como a computação óptica [6], a computação quântica [7] e a computação neuromórfica [8].

Na computação óptica, o transporte de informações e a realização de operações lógicas e aritméticas são feitos através da luz, utilizando dispositivos optoeletrônicos para sua manipulação – em contraposição à computação convencional, que utiliza elétrons através de dispositivos eletrônicos como os transistores. Uma das principais vantagens é que os fôtons usados na computação óptica têm uma largura de banda muito maior do que os elétrons usados em computadores convencionais. A largura de banda é a quantidade de informações que podem ser transmitidas por um canal de comunicação em um determinado intervalo de tempo. A largura de banda dos elétrons é limitada pela velocidade com que eles se movem e pela quantidade de energia necessária para movê-los. Nesse sentido, a computação óptica pode ser bem mais rápida e eficiente em termos de energia do que a computação eletrônica. Apesar de ser ainda uma tecnologia em fase experimental, a computação óptica enfrenta grandes desafios, como o alto custo dos componentes ópticos, problemas com a miniaturização desses componentes, complexidade de integração das portas lógicas ópticas e questões de interferência causada por imperfeições ou influências externas, como por exemplo, grãos de poeira interpostos no caminho óptico da informação.

Na computação quântica, as informações são armazenadas em sistemas quânticos de escala sub-atômica, cujos estados podem ser representados pelos chamados *qubits*, em contraste aos bits 0 e 1 em que se baseia a computação convencional. Enquanto os bits só podem estar em dois estados bem definidos (0 ou 1), os *qubits* podem ser 0, 1, ou uma superposição de ambos. Portanto, o *qubit* pode estar em uma superposição de estados, enquanto o bit só pode estar em um estado por vez. Além disso, o fenômeno quântico conhecido como entrelaçamento de estados é um aspecto essencial para que a computação quântica seja vantajosa. Desta forma, a computação quântica tem o potencial de resolver problemas mais complexos que extrapolam a capacidade da computação convencional [9]. No entanto, o computador

quântico tem uma estrutura bem diferente do computador tradicional, uma vez que são dispositivos programáveis que utilizam as leis da mecânica quântica para executar algoritmos e realizar cálculos.

Atualmente, um computador quântico é composto de três segmentos primários: um dispositivo que armazena os *qubits*; um método de execução e medição das operações quânticas envolvendo os *qubits* (denominadas portas lógicas quânticas); e um computador convencional para executar e enviar instruções através de software específico [10]. Apesar de suas potencialidades, como a capacidade de realizar cálculos em paralelo ou de lidar simultaneamente com grandes conjuntos de dados, as quais a tornam ideal para a análise de sistemas altamente complexos – uma crescente demanda da sociedade atual –, a computação quântica ainda é uma tecnologia emergente em seu estágio inicial, e que apresenta grandes desafios para sua implementação. Os computadores quânticos são máquinas intrinsecamente complexas e dependem de um equilíbrio térmico muito delicado, uma vez que, para controlar os *qubits*, os processadores quânticos precisam permanecer em temperaturas próximas ao zero absoluto. *Qubits* são extremamente frágeis e muito susceptíveis à interferência externa. Por exemplo, *qubits* emaranhados perdem coerência rapidamente, de forma que o algoritmo precisa ser extremamente ágil para que as tarefas sejam executadas antes desta perda. Não menos importante é o fato de que um conhecimento avançado em mecânica quântica é inerente aos processos da computação quântica, o que também dificulta sua implementação [9].

Já a computação neuromórfica é inspirada no funcionamento do cérebro humano. Ela foi idealizada por Carver Mead em 1990 com o intuito de usar sistemas de integração em grande escala compostos de componentes eletrônicos e circuitos analógicos para imitar as estruturas neuro-biológicas do sistema nervoso [11, 12]. Assim, a computação neuromórfica é baseada em sistemas conhecidos como redes neurais artificiais (ANN). Tais redes podem ser implementadas através de algoritmos que buscam superar as limitações da computação convencional no processamento de grande volume de dados. Portanto, assim como promover metodologias que permitem a “aprendizagem de máquina”, ou seja, o computador é treinado para reconhecer padrões ou realizar tomada de decisão a partir do recebimento e processamento de dados de entrada – de uma forma equivalente ao que ocorre no sistema nervoso humano [13]. Um exemplo é o perceptron (Figura 1.1-3), concebido ainda na década de 1950 e que ainda é a base desses algoritmos [14]. No entanto,

esses esquemas utilizam tecnologia digital de computadores convencionais para sua execução.

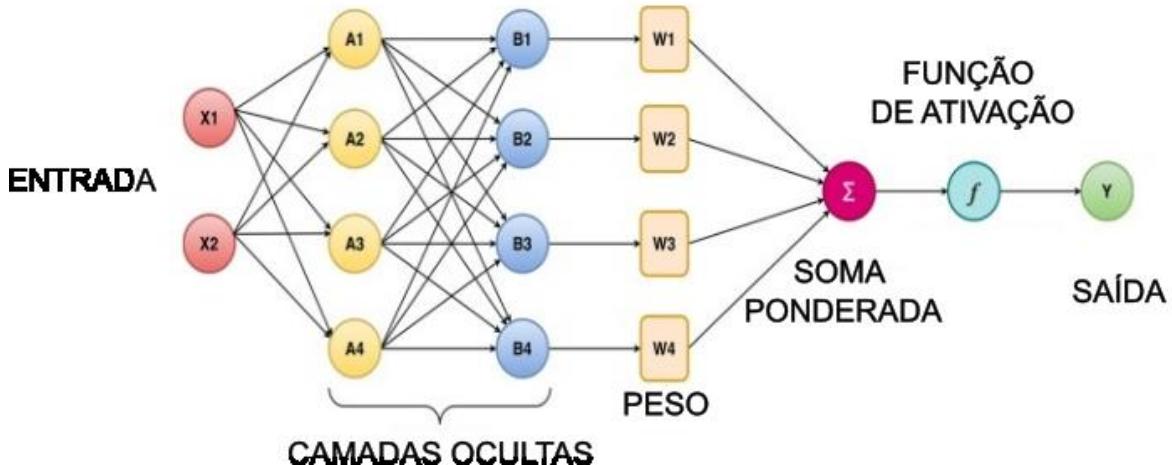


Figura 1.1-3 - Estrutura perceptron de rede neural artificial. Círculos representam neurônios individuais, enquanto linhas representam sinapses conectando os neurônios de cada camada com todos os neurônios da camada subsequente. Adaptado de [14].

Um passo crucial rumo a uma computação genuinamente neuromórfica seria desenvolver *hardware* construído com eletrônica neuromórfica, substituindo os transistores dos chips convencionais por dispositivos com funcionalidades baseadas nas características dos neurônios biológicos. O entendimento dos mecanismos de funcionamento do cérebro e das redes neurais biológicas no sensoriamento, processamento de informações, aprendizagem e tomada de decisões é um assunto em franco desenvolvimento através de estudos das Neurociências [15]. Desta forma, para saber quais propriedades os dispositivos neuromórficos deveriam ter para viabilizar a eletrônica dita neuromórfica, é necessário antes verificar o nível atual de entendimento de como funcionam as redes neurais no cérebro humano. Almeja-se assim desenvolver a parte sensorial e de detecção dos estímulos (por exemplo, luz, pressão, som, gás ou sabor) por meios computacionais com reconhecimento as informações dos estímulos, através de um processo que envolve memória e aprendizagem – e toma decisões apropriadas [16].

Há uma série de atributos que um dispositivo deve apresentar para constituir-se em um “dispositivo neuromórfico”. Ele deve então possuir três elementos básicos: um componente sensível a um determinado estímulo (que pode ser elétrico, mas outras formas de estímulo também podem ser exploradas, como o óptico, por

exemplo), ter um terminal por onde um determinado sinal chegue a esse componente sensível e seja “processado” através de sua interação com o estímulo, e finalmente outro terminal que possa coletar esse sinal processado. Este seria o constituinte fundamental para a implementação neuromórfica por *hardware*. Discutiremos com detalhes no decorrer do trabalho as características esperadas em um dispositivo com capacidade de emular a sinapse humana, o que nos leva a um dispositivo neuromórfico.

Um dos dispositivos que apresentam essas propriedades é o memristor (ou memoristor). Ele foi previsto teoricamente na década de 70 pelo norte-americano Leon Chua, sendo considerado o quarto elemento passivo da eletrônica (depois do resistor, do capacitor e do indutor). As quatro variáveis envolvidas nesses dispositivos são a tensão  $v$ , a corrente elétrica  $i$ , a carga elétrica  $q$  e o fluxo magnético  $\phi$ . A relação entre corrente e carga é a própria definição de corrente elétrica, enquanto a relação entre o fluxo magnético e a tensão é dada pela lei de Faraday. No resistor, temos uma relação entre tensão e corrente. No capacitor, a relação é entre carga e tensão; e no indutor, entre fluxo magnético e carga. Assim, o memristor foi idealizado como o componente que apresentaria a relação que faltava, ou seja, a relação entre o fluxo magnético e a carga elétrica (a memresistência  $M$  é definida como a derivada do fluxo com relação à carga) [16, 17]. A Figura 1.1-4 é um esquema dessas relações que levaram à sugestão do memristor por L. Chua.

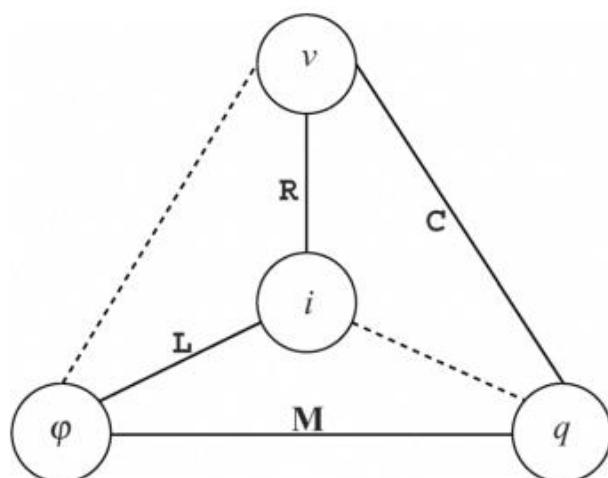


Figura 1.1-4 - Variáveis fundamentais dos circuitos elétricos e os componentes associados. As linhas tracejadas dizem respeito à relação entre  $i$  e  $q$ , e à relação entre o fluxo magnético e a força eletromotriz, dada pela lei de Faraday ( $R$  - Resistor,  $C$  - Capacitor,  $L$  - Indutor,  $M$  - Memristor). Extraído de [16].

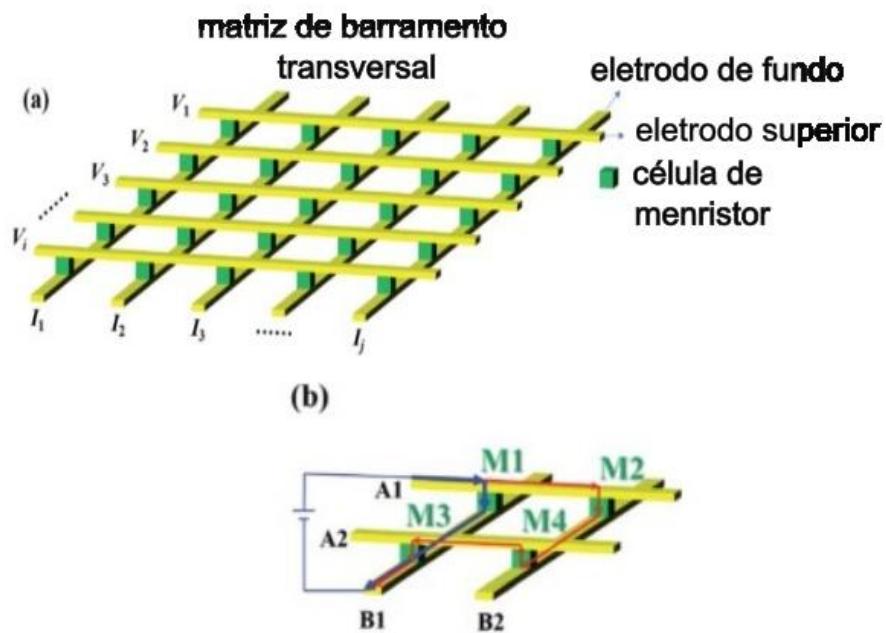
No entanto, o componente físico só foi elaborado em 2008, por pesquisadores da HP Labs [18]. Neste trabalho, o memristor foi construído a partir de uma estrutura metal-semicondutor-metal onde a resistência elétrica (ou condutividade) do semicondutor era alterada em função da diferença de potencial aplicada entre seus terminais. Pode parecer estranho que tal dispositivo tenha sido cunhado de memristor, pois aparentemente não há influência do fluxo magnético em seu funcionamento. No entanto, como argumentado pelos autores deste trabalho, o que de fato importa é que a resistência elétrica do material seja uma função da carga elétrica nele injetada. Foi demonstrado também que os efeitos de memresistência são mais significativos quando a camada semicondutora tem dimensões nanométricas (porque a memresistência varia com o quadrado da espessura do semicondutor). Além disso, esse dispositivo armazena o valor de sua condutividade quando a fonte externa é desligada, e retoma esse valor após ser novamente ligado à fonte. Assim, ele apresenta uma propriedade que pode ser utilizada para registro permanente de informações – a chamada memória não-volátil [19]. No entanto, essa memória não se restringe aos valores binários 0 e 1 das memórias convencionais; de fato, podem assumir qualquer valor entre o mínimo e o máximo valor de condutividade, dependendo basicamente da “história anterior” relativa à tensão aplicada.

Percebe-se também que, além do dispositivo “processar” o sinal de entrada, ele é capaz de armazenar essa informação em si mesmo. Esse é um aspecto peculiar aos neurônios do cérebro, mas é algo totalmente incompatível com a computação convencional de von Neumann.

Outro aspecto inerente ao funcionamento do cérebro diz respeito ao consumo de energia. A potência diária consumida pelo cérebro em atividade normal é de cerca de 20 W, e o consumo de energia de cada sinapse no cérebro é de cerca de  $10^{-13}$  W. Se o tempo de cada evento sináptico for cerca de 100 ms, o consumo de energia é de 10 fJ por evento [20]. Esse é um aspecto que tem chamado a atenção da comunidade científica para a proposição de sistemas computacionais inspirados na atividade cerebral, na intenção de reduzir o consumo de energia no processamento de grande quantidade de dados. Desta forma, a possibilidade de computação neuromórfica, seja por softwares que imitam a estrutura da rede neural do cérebro, seja por hardware baseado nos chamados chips neuromórficos – constituídos por dispositivos com funcionalidades próprias dos neurônios – parece ser uma alternativa

com potencial para suprir as exigências computacionais requeridas por demandas da sociedade que se tornam cada vez mais complexas e sofisticadas.

Os chips neuromórficos baseados em memristores têm sua estrutura concebida na forma de uma matriz de barramento transversal, com eletrodos “linha” e eletrodos “coluna” formando a matriz, e um memristor em cada ponto de contato entre os eletrodos [21]. As tensões de entrada são aplicadas nos eletrodos “linha”, e a corrente resultante em cada eletrodo “coluna” é o resultado das correntes individuais que atravessam o memristor com um valor de resistência elétrica determinada pela tensão de entrada. Para simplificar o circuito de entrada, é preferível utilizar o chamado método de carga, onde a tensão aplicada tem uma amplitude fixa e o que se varia é o tempo de aplicação (largura do pico de tensão). A Figura 1.1-5 é uma representação de uma matriz memristiva de barramento transversal.



*Figura 1.1-5 - (a) Representação de uma matriz de barramento transversal com memristores. As tensões de entrada são aplicadas nos eletrodos “linha” (de cima) e as saídas são as correntes medidas nos eletrodos “coluna” (de baixo). (b) O problema da corrente por caminho furtivo (do inglês “sneak-path current”). Em azul, o fluxo desejado para a corrente no circuito. Em vermelho, a corrente por caminho furtivo. Adaptado de [22].*

Um dos problemas nesse tipo de circuito memristivo surge do efeito conhecido como corrente por caminho furtivo (do inglês “sneak-path current”), representado na Figura 1.1-5(b) para uma matriz 2x2. Ao aplicar a tensão de entrada, o fluxo de corrente elétrica desejado é aquele indicado pelo caminho em azul. No

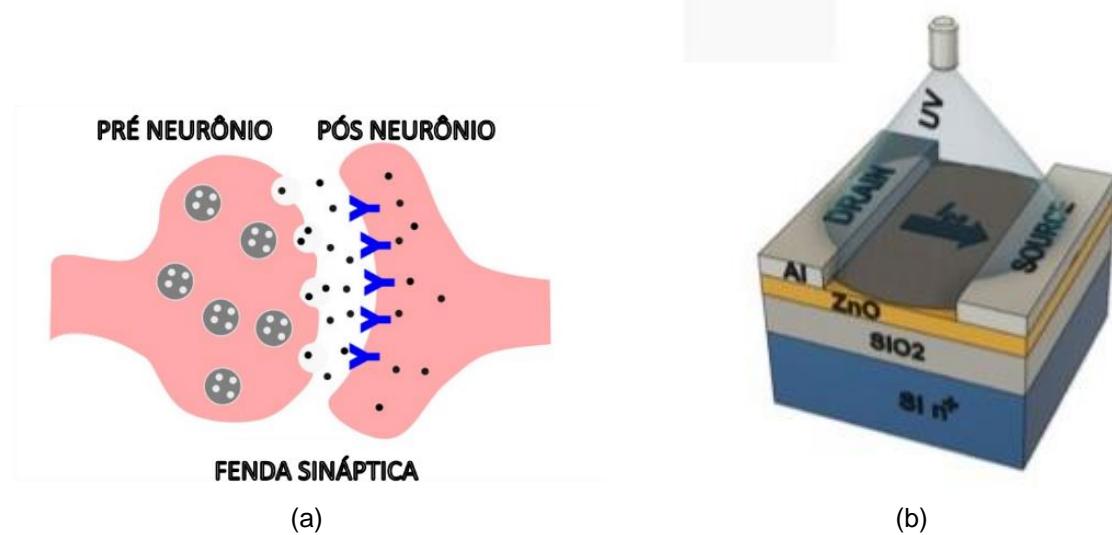
entanto, é possível que a corrente percorra o caminho em vermelho. Como o valor da resistência de cada memristor é uma grandeza que depende da corrente (quantidade de carga por unidade de tempo) que o atravessa, a corrente em caminho furtivo pode afetar a leitura do estado de resistência de cada memristor da matriz, o que gera problemas na modulação da resistência elétrica da matriz como um todo e erro na leitura da corrente de saída. Além disso, essas correntes induzem maior consumo de energia pela matriz. Essa é uma questão cuja solução tem atraído um grande esforço da comunidade científica, e é atualmente um dos grandes obstáculos para a implementação de chips neuromórficos [22].

Diversos materiais em diferentes estruturas de dispositivo já foram relatados na literatura científica como apresentando propriedades memristivas, como alguns óxidos metálicos [23] e compostos de perovskitas [24], em estrutura do tipo metal-semicondutor-metal e transistor de filme fino.

Particularmente interessantes são os dispositivos que têm sua condutividade alterada pela incidência de radiação (luz), os quais são chamados de sinapses optoeletrônicas [20]. Nestes dispositivos, as funções sinápticas relatadas acima são emuladas através da variação da condutividade do semicondutor quando este é exposto à luz. O fato de o estímulo ser de natureza eletromagnética pode trazer algumas vantagens com relação ao caso dos memristores (onde o estímulo é elétrico), principalmente no que diz respeito ao aumento da velocidade computacional e na redução de consumo de energia [25]. Além disso, tem-se que cerca de 80% de toda informação externa adquirida por um indivíduo com visão normal vem através de sua percepção visual [26], o que torna dispositivos sinápticos sensíveis à luz um elemento chave para a implementação de sistemas artificiais de processamento e armazenamento de sinais visuais [27, 28].

Os fenômenos que provocam a variação de condutividade com a luz (espectro eletromagnético), ou seja, geram a fotocondutividade, são diversos. Em óxidos como o ZnO, observa-se o efeito de fotocondutividade persistente [29, 30], o qual, em linhas gerais, é o incremento da condutividade do material quando este é irradiado com luz (geralmente essa radiação deve possuir uma energia superior ao *bandgap* do material). Com a interrupção da iluminação, a condutividade não retorna prontamente ao seu valor original, mantendo um valor maior que este por um determinado intervalo de tempo [31]. Desta forma, é criada uma situação que pode ser utilizada para obter as propriedades de sinapses biológicas [23]. A mudança na

fotocondutividade do óxido pode ser relacionada com a plasticidade sináptica, conforme o comparativo da ilustração mostrada na Figura 1.1-6. Nesse sentido, a estrutura de transistor de filme fino, tendo o ZnO como o canal semicondutor, pode ser vantajosa devido ao fato de que a tensão aplicada ao terminal de porta (*gate*) do transistor pode ser um parâmetro que influencie o valor da fotocondutividade, o que se traduz em uma forma de modulação do peso sináptico. Os terminais de fonte e dreno emulam neurônios pré e pós-sinápticos, respectivamente, e o canal semicondutor desempenha o papel da fenda sináptica [23].



*Figura 1.1-6 - Ilustração de uma sinapse química envolvendo dois neurônios. Os pontos pretos representam neurotransmissores químicos. (b) Estrutura do dispositivo sináptico optoeletrônico. Com a polarização, a corrente  $I_D$  é medida e sua magnitude é aumentada com a incidência de luz UV devido à fotocondutividade persistente do canal de ZnO.*

Neste trabalho será apresentada a fabricação e a caracterização elétrica de transistores de filme fino com canal semicondutor de ZnO que apresentaram fotocondutividade persistente e, por conta disso, foram testados como dispositivos que apresentam sinapses optoeletrônicas, tendo como objetivo a construção de um dispositivo que emule a sinapse humana. Também analisando e comparando seus resultados com amostras tratadas termicamente, e outros dispositivos com configuração semelhantes encontrados na literatura. Um aspecto importante desses dispositivos, além de suas propriedades sinápticas, é o fato de que foram produzidos diretamente sobre substratos de silício. Portanto, totalmente compatíveis com a indústria de dispositivos semicondutores convencional, podendo assim ser integrados facilmente a uma linha de produção.

A tese está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2, são discutidas as propriedades e a forma de extração dos parâmetros elétricos de transistores de filme fino de uma maneira geral. Complementarmente, são abordados os aspectos fundamentais do fenômeno da fotocondutividade persistente, assim como os modelos utilizados para explicar sua origem e mecanismo de operação. No Capítulo 3 são descritos os materiais e a metodologia empregada na investigação realizada neste trabalho. O Capítulo 4 contém os resultados e a discussão das propriedades do transistor como uma sinapse optoeletrônica. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões e as perspectivas futuras do trabalho aqui relatado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se neste capítulo o embasamento teórico do trabalho, no qual iremos discutir e matematizar o funcionamento do transistor de filme fino (TFT, *Thin film transistor*). Discutiremos o seu funcionamento e procedimento operacional, posteriormente desenvolveremos as construções matemáticas das curvas características e os parâmetros que definem o funcionamento do transistor [29, 32]. Complementarmente, serão abordados os aspectos fundamentais do fenômeno da fotocondutividade persistente, assim como os modelos utilizados para explicar sua origem e a descrição do fenômeno físico [33].

### 2.1 Transistores de Filmes Finos com Canal de Óxido de Zinco

De maneira simplificada, transistores são dispositivos com duas finalidades: a primeira é a de controlar o chaveamento de um circuito elétrico; e a segunda é promover a amplificação do sinal de saída com relação ao de entrada. Para realizar essas funções os dispositivos são desenvolvidos com 3 terminais, os quais são usados para aplicação e recebimento de sinais elétricos. Isso é ilustrado na Figura 2.1-1.

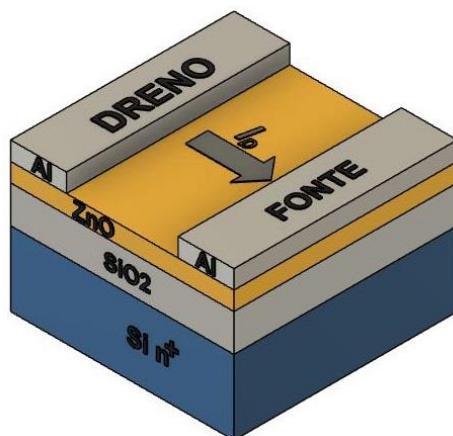


Figura 2.1-1 – Representação do transistor de filme fino, com os eletrodos de fonte e dreno de filme de alumínio (Al), o semicondutor sendo um filme de óxido de Zinco ( $ZnO$ ), o dielétrico de dióxido de silício ( $SiO_2$ ) e o metal de porta dado pelo silício fortemente dopado ( $Si\ n^+$ ).

Os contatos elétricos são denominados porta (*gate*), fonte (*source*) e dreno (*drain*). As diferenças de potencial para polarização do TFT são aplicadas entre dreno e fonte, e entre porta e fonte. Relativo ao seu funcionamento básico, um sinal elétrico quando aplicado na entrada pode fazer o dispositivo passar de um estado desligado para um estado ligado, resultando em um chaveamento binário. Outro efeito é a amplificação, em que a corrente de saída é maior que a de entrada, pelo fato da aplicação de tensão adicional no outro terminal [32, 34].

Temos como estruturas mais comuns para a confecção dos TFTs quatro tipos de geometrias, dependendo da disposição dos eletrodos de fonte-dreno e porta com relação ao semicondutor, como apresentado na Figura 2.1-2. Essas são denominadas (do inglês) (a) *bottom-gate top-contact*, (b) *bottom-gate bottom contact*, (c) *top-gate bottom-contact* e (d) *top-gate top-contact* [32, 34].

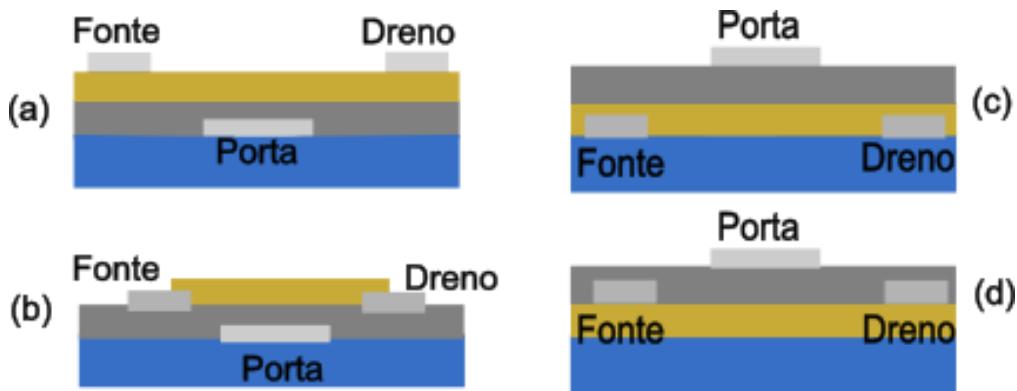


Figura 2.1-2- Esquema mostrando algumas das estruturas de TFT mais convencionais, de acordo com a posição do eletrodo de porta e à distribuição dos eletrodos em relação ao semicondutor: (a) bottom-gate top-contact, (b) bottom-gate bottom contact, (c) top-gate bottom-contact e (d) top-gate top-contact. As faixas azul, cinza e amarela correspondem ao substrato, ao material isolante (ou dielétrico de gate) e ao material semicondutor, respectivamente.

Cada estrutura da Figura 2.1-2 apresenta vantagens e desvantagens, dependendo do tipo de material empregado, método utilizado para a deposição e, principalmente, da aplicação do dispositivo. Para o nosso trabalho adotamos uma arquitetura *bottom-gate top-contact* (Fig. 2.1-2a), a qual forma um capacitor do tipo Metal-Isolante-Semicondutor (MIS) ou Metal-Óxido-Semicondutor (MOS), onde o canal do semicondutor ficará exposto à radiação eletromagnética quando aplicada ao dispositivo.

Para descrever o funcionamento do TFT, temos a construção do dispositivo de acordo com a Figura 2.1-1, em que este é constituído por uma camada de metal,

outra de óxido isolante e outra de óxido metálico semicondutor. No nosso caso utilizamos um substrato de silício fortemente dopado ( $\text{Si n}^+$ ), o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ), respectivamente, formando um capacitor MIS ou MOS.

O sinal de saída do TFT se dá pelos portadores majoritários do semicondutor no canal, região situada entre os eletrodos de fonte e dreno. Para o semicondutor tipo-n os portadores majoritários são elétrons, enquanto para o semicondutor tipo-p esses portadores são buracos. No TFT de ZnO (semicondutor tipo-n), o estabelecimento de uma corrente elétrica entre os terminais de dreno e fonte se dá pelo processo de acumulação de elétrons na interface dielétrico-semicondutor, induzidos pela aplicação de uma diferença de potencial positiva entre os eletrodos de porta e fonte. Isso caracteriza o estado “ligado” do dispositivo. Invertendo a polaridade, ocorre o processo de depleção do canal, situação que leva a uma corrente elétrica desprezível no canal e o dispositivo está em seu estado “desligado”. Esses processos estão ilustrados na Figura 2.1-3, que mostra o diagrama de energia para o regime de equilíbrio, depleção e acumulação em um semicondutor tipo-n, onde a tensão aplicada na porta é  $V_G = 0V$ ,  $V_G < 0V$ , ou  $V_G > 0V$ , respectivamente.  $E_{Fm}$  e  $E_{Fs}$  são as energias de Fermi no metal e no semicondutor, respectivamente, e  $E_c$  e  $E_v$  são as energias das bandas de condução e valência. Percebe-se que o mecanismo de funcionamento do TFT é, portanto, diferente do MOSFET, o qual tem seu funcionamento baseado no processo de inversão [35].

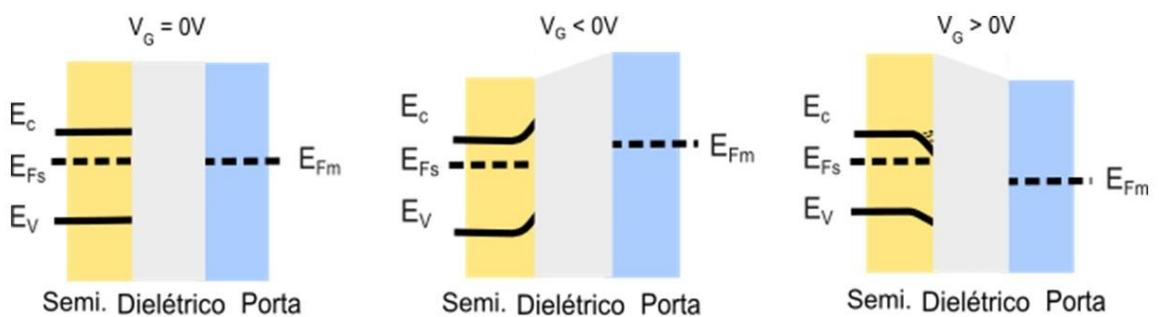


Figura 2.1-3 – Estrutura de bandas próxima à junção metal-dielétrico-semicondutor (MIS ou MOS). Neste diagrama são desconsideradas as cargas nas interfaces, cargas no dielétrico, e as diferenças entre os níveis de Fermi entre o semicondutor ( $E_{Fs}$ ) e o metal ( $E_{Fm}$ ). Para  $V_G < 0V$ , ocorre a depleção no semicondutor tipo-n, ao passo que para  $V_G > 0V$ , ocorre a acumulação de elétrons no canal formado na interface semicondutor-dielétrico.

É importante salientar que, para entrar no regime de acumulação, a tensão de porta deve ser maior do que a tensão de limiar ( $V_{th}$ ) do dispositivo MOS. Essa

tensão é necessária para preencher as armadilhas de carga comumente presentes na interface semicondutor-dielétrico, antes que portadores de carga livres possam se acumular no canal de condução e assim gerar uma corrente elétrica apreciável [36, 37].

### 2.1.1 Curva Característica

A partir daqui, deduziremos os parâmetros que caracterizam o funcionamento do TFT, e então entenderemos os seus mecanismos de operação. Precisamos realizar a construção matemática da equação da corrente entre fonte e dreno  $I_D$ . Para isso definiremos alguns outros parâmetros, tais como a tensão aplicada na porta (gate)  $V_G$  e tensão entre dreno e fonte  $V_{DS}$ . Esses parâmetros são indicados na Figura 2.1-4.

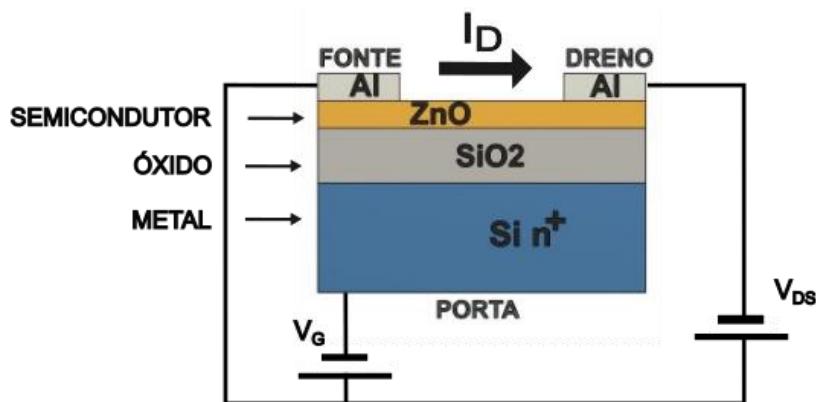


Figura 2.1-4 – Representação do esquema de polarização do TFT, com as tensões aplicadas entre dreno e fonte  $V_{DS}$  e entre porta e fonte  $V_G$  do dispositivo.

A carga para condução disponível no canal é dada pela carga disponível no semicondutor, proveniente da tensão aplicada no eletrodo de porta  $V_G$ . Com isso podemos escrever a carga, como na equação 1:

$$Q_{total} = -C_i \cdot V_{total}(x) \quad (1)$$

Essa equação se dá em termos da capacidade no dielétrico, e pela tensão total no canal do semicondutor. Podemos escrever a tensão total como sendo a ddp aplicada no *gate*, menos a tensão para iniciar o funcionamento do transistor, denominada tensão limiar, menos a tensão aplicada entre dreno e fonte. Ressaltando

que essa diferença de potencial deve depender da posição ao longo da distância entre os terminais de fonte e dreno. Assim, usamos a definição dada na equação (2),

$$V_{total}(x) \equiv V_G - V_{th} - V_{(x)}. \quad (2)$$

Aqui,  $V_G$  é a tensão na porta,  $V_{th}$  é a tensão limiar (*threshold*).  $V_{(x)}$  é a diferença de potencial aplicada entre dreno e fonte, sendo que ela varia com a posição no canal. Note que a variação total do potencial entre os eletrodos de dreno e fonte nos leva a  $V_{(x)} = V_{DS}$ . [32]

Descreveremos também os parâmetros geométricos do dispositivo, como na Figura 2.1-5.

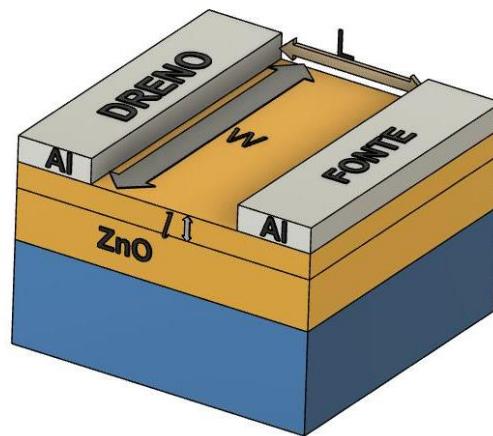


Figura 2.1-5 - Ilustração dos parâmetros geométricos do transistor de filme fino, comprimento  $L$ , largura  $w$  e espessura  $l$  do canal do semicondutor.

$L$  e  $w$  são comprimento e largura do canal respectivamente, e  $l$  é a espessura do canal no semicondutor, de forma que a área transversal ao canal é  $A = w \cdot l$ .

Para a sequência do desenvolvimento matemático consideraremos a densidade de corrente elétrica, dada na equação (3)

$$J = \sigma E, \quad (3)$$

em que,  $J$  é a densidade de corrente,  $\sigma$  é a condutividade elétrica e  $E$  o campo elétrico, e a condutividade elétrica, expressa na equação (4),

$$\sigma = \frac{N \cdot e \cdot \mu}{wLl} \quad (4)$$

em termos do número de portadores de carga  $N$  por unidade de volume (igual a  $w \cdot L \cdot l$  neste caso), a carga elementar  $e$ , e a mobilidade da carga elétrica no semicondutor  $\mu$ .

Também explicitaremos a equação para a carga e campo elétrico, dada na equação (5),

$$Q = N \cdot e \quad ; \quad E = -\nabla V \quad (5)$$

em que  $Q$  é a carga elétrica dada em termos do número de portadores e a carga elementar, e o campo elétrico dado em termos do gradiente do potencial.

Considerando que a densidade de corrente superficial se propaga na direção-x [38], podemos utilizar as equações (3) e (4) e, depois de algumas manipulações algébricas, chegar a

$$J_x = \frac{N \cdot e \cdot \mu}{wLl} E_x \quad \rightarrow \quad \frac{I_D}{A} = \frac{N \cdot e \cdot \mu}{wLl} E_x. \quad (6)$$

Em que  $I_D$  é a corrente entre fonte e dreno,  $N \cdot e = Q_T$  a carga total do canal e  $E_x$  é o campo elétrico na direção do eixo “x”. Agora utilizando as equações (5) e (1), considerando a área transversal ao canal, o gradiente do potencial apenas na direção “x”, temos que

$$\frac{I_D}{A} = \frac{Q_T \cdot \mu}{wLl} \left( -\frac{dV}{dx} \right)_x \quad (7)$$

ou seja,

$$\frac{I_D}{w \cdot l} = \frac{C_i \cdot \mu}{wLl} [V_G - V_{th} - V_{(x)}] \left( \frac{dV}{dx} \right)_x \quad (8)$$

A solução da Eq. (8) considera que a corrente  $I_D$  não é dependente do comprimento  $L$  do canal, e que a diferença de potencial  $V(x)$  varia linearmente entre os eletrodos de fonte e dreno (aproximação de canal gradual) [35]. Desta forma, teremos:

$$\int_0^L \frac{I_D}{w} dx = \int_0^{V_{DS}} c_i \cdot \mu \cdot [V_G - V_{th} - V] dV \quad (9)$$

onde  $c_i$  é a capacidade por unidade de área do dispositivo. Realizando a integração e aplicando os limites, temos finalmente a equação

$$I_D = \frac{c_i \cdot \mu \cdot W}{L} \left[ (V_G - V_{th})V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS}^2 \right] \quad (10)$$

que é a equação característica do funcionamento do TFT.

Para a classificação e parametrização do TFT, utilizamos as curvas de saída, Figura 2.1-6(a), e de transferência, Figura 2.1-6(b). A curva de saída é obtida por meio da medida da corrente  $I_D$  variando a tensão  $V_{DS}$ , para diferentes valores fixos de  $V_G$ . Já a curva de transferência diz respeito à variação de  $I_D$  em termos da tensão na porta  $V_G$ , mantendo  $V_{DS}$  com valor fixo [39].

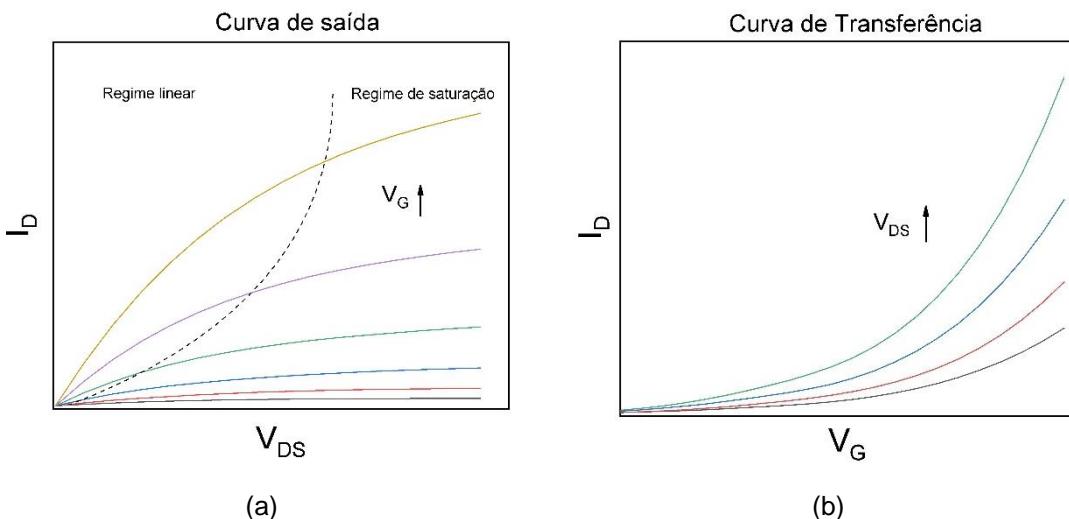


Figura 2.1-6 - Curva característica de funcionamento do transistor. (a) Curva de saída, dada pela corrente entre dreno e fonte  $I_D$ , pela variação da tensão entre dreno e fonte  $V_{DS}$ , mantendo  $V_G$  fixo. (b) Curva de transferência, sendo a corrente  $I_D$  pela variação da tensão na porta  $V_G$ , mantendo  $V_{DS}$  fixo para cada medida.

Podemos analisar o comportamento da curva de saída da seguinte forma. Primeiramente, para valores pequenos de  $V_{DS}$ , (ou seja, quando  $V_{DS} \ll |V_G - V_{th}|$ ), observa-se um comportamento linear da equação. Com o aumento de  $V_{DS}$ , a corrente  $I_D$  começa a desenvolver um comportamento sublinear, já que a carga próxima ao eletrodo de dreno é reduzida pelo potencial do semicondutor. A partir de um certo valor de  $V_{DS}$ , a carga acumulada próxima ao eletrodo de dreno chega a ser quase nula, formando o que é conhecido como “pinch-off” do canal. O aumento adicional em  $V_{DS}$  não irá provocar mais aumento de corrente, situação na qual se observa uma saturação, como indicado na Figura 2.1-6(a).

### 2.1.2 Parâmetros de Caracterização

Neste tópico definiremos e explicitaremos os parâmetros que caracterizam o transistor de filme fino. A mobilidade dos portadores de carga é um dos que qualificam o dispositivo e o filme. Podemos obtê-la a partir da curva de transferência e da equação de corrente no dreno, equação (10).

Existem alguns tipos de mobilidade, nesse trabalho trataremos em específico das mobilidades de efeito de campo  $\mu_{ef}$  e de saturação  $\mu_{sat}$  e para determiná-las realizaremos alguns processos matemáticos. Primeiramente discutiremos a  $\mu_{ef}$  que predomina na região linear de funcionamento do TFT. A interpretação desse parâmetro físico é dada a partir da medida de quão rapidamente os portadores de cargas se movem, em resposta ao campo elétrico no semicondutor. A mobilidade é uma medida da eficiência do transporte de carga em um material, dependendo de vários mecanismos de espalhamento, como vibrações de rede, impurezas ionizadas, limites de grão e outros defeitos estruturais [40].

Para descrever matematicamente  $\mu_{ef}$ , partiremos da equação (10) e também do fato de que o regime linear atua com valores pequenos de  $V_{DS}$ , ou seja,  $V_{DS} \ll |V_G - V_{th}|$ . Realizando uma análise na equação, e levando em conta o regime linear de funcionamento, temos que a corrente  $I_D$  é predominantemente regida pelo termo linear em  $V_G$ , isto é, o termo quadrático será desprezível, pelo fato de  $V_{DS}$  ser muito pequeno [41]. Assim podemos escrever a equação (11) da corrente no regime linear como,

$$I_D = \frac{c_i \cdot \mu_{ef} \cdot w}{L} [(V_G - V_{th})V_{DS}]. \quad (11)$$

Realizando o processo de derivar ambos os lados da igualdade em termos de  $V_{DS}$ , e isolando a mobilidade, temos a equação (12)

$$\mu_{ef} = \frac{L}{c_i \cdot w \cdot V_{DS}} \left( \frac{dI_D}{dV_G} \right). \quad (12)$$

Note que  $V_{DS}$  é fixo e pela curva de transferência temos a variação da corrente  $I_D$  pela tensão  $V_G$ . Os demais parâmetros dependem da geometria do dispositivo e da capacitância no dielétrico. Esta é a estimativa de mobilidade mais comumente usada para TFTs.

Podemos obter também a mobilidade para o regime de saturação  $\mu_{sat}$ . Ela descreve a situação dos portadores, supondo que a taxa de variação do campo elétrico dentro do canal é muito menor que a variação do campo vertical no capacitor. Mesmo que esta aproximação não seja válida em alguns casos, ela descreve razoavelmente bem a maior parte do TFTs que geralmente possuem L muito maior que a espessura dielétrica [42].

A mobilidade  $\mu_{sat}$ , descreve os portadores de cargas em regime de saturação, com isso podemos partir da equação (10), mas levando em conta que temos valores altos para  $V_{DS}$ , ou seja, consideraremos  $V_{DS} \geq |V_G - V_{th}|$ . Assim podemos escrever a equação (13),

$$I_D = \frac{c_i \cdot \mu_{sat} \cdot W}{2L} (V_G - V_{th})^2. \quad (13)$$

Para obter a mobilidade realizaremos alguns processos algébricos, assim podemos escrevê-la como o expressado na equação (14):

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{w \cdot c_i} \left( \frac{d\sqrt{I_D}}{dV_G} \right)^2. \quad (14)$$

Com a equação (14) podemos obter a mobilidade de saturação em termos dos parâmetros geométricos do dispositivo e da capacitância do dielétrico, com a variação da raiz quadrada da corrente entre dreno e fonte, pela tensão aplicada na porta. Essa variação pode ser obtida através da raiz quadrada da curva de transferência [32, 43].

Outros parâmetros importantes na caracterização do TFT são  $I_{on}/I_{off}$ , que se trata da razão entre a corrente elétrica  $I_D$  no estado ligado e o estado desligado do dispositivo. Para a obtenção desses parâmetros utilizamos a corrente  $I_D$  mínima e  $I_D$  máxima. Essa razão  $I_{on/off}$  da ordem de  $10^6$  é desejável para circuitos digitais e interruptores, já com valores proporcionais a  $10^4$  temos dispositivos com valores aceitáveis para circuitos analógicos [44].

Também temos a tensão limiar ou *threshold*  $V_{th}$ , que é a tensão utilizada para ativar o funcionamento do TFT. Essa tensão é necessária, primeiro para preencher as armadilhas de carga, na interface semicondutor-dielétrico, antes que portadores de carga livre possam se acumular no canal de condução. Ela dependerá dos defeitos, impurezas ou rugosidade interfacial [32, 45].

Outro parâmetro que será mensurado para a caracterização do dispositivo, é o *subthreshold swing* (*SS*). O mesmo se trata de uma medida de quão rápido o dispositivo vai do estado desligado para o estado ligado. Dado pela equação (15) abaixo,

$$SS \equiv \frac{\partial V_G}{\partial \log_{10}(I_D)} \quad (15)$$

Temos então da derivação parcial de  $V_G$  pela derivação parcial do logaritmo na base 10 da corrente  $I_D$ , a medida do quão rapidamente a corrente  $I_D$  aumenta com  $V_G$  mantendo  $V_{DS}$  fixo, o parâmetro tem sua unidade dada por V/dec. O *subthreshold* indica quanto de  $V_G$  é necessário, para aumentar a corrente em uma ordem de grandeza. Temos da literatura que  $SS < 100 \text{ mV/dec}$  e  $V_{th}$  próximo de zero são valores desejáveis para reduzir consumo de potência em aplicações em circuitos [29].

Com o discutido temos o necessário para analisar e caracterizar o transistor de filme fino baseado no efeito de campo, a partir de suas curvas características e dos parâmetros delas obtidos, tais como mobilidade dos portadores de carga, tensão limiar, corrente  $I_{on/off}$ , e *subthreshold swing*.

## 2.2 Fotocondutividade Persistente nos Filmes Finos de Óxido de Zinco

Sinapses optoeletrônicas podem basear seu funcionamento no fenômeno da fotocondutividade persistente (PPC), observado em óxidos metálicos como ZnO e SnO<sub>2</sub> [31]. Nestes materiais, ocorre um aumento da condutividade quando há incidência de luz sobre a sua superfície. Com a interrupção da iluminação, observa-se um decaimento da condutividade que geralmente é muito mais lento do que o aumento provocado pela luz. Os principais mecanismos atribuídos à PPC são (i) o aprisionamento de buracos fotogerados por defeitos de vacâncias de oxigênio e (ii) dessorção fotoinduzida de moléculas de oxigênio quimicamente adsorvidas na superfície do óxido. Ambos os efeitos resultam em elétrons livres, os quais contribuem para o aumento da condutividade enquanto o material é iluminado. O fenômeno da PPC é atribuído a eventos que tornam lento o processo de recombinação destes

portadores após o período de iluminação [23]. A seguir são discutidos os aspectos básicos destes dois mecanismos.

### 2.2.1 PPC Envolvendo Vacâncias de Oxigênio

Com incidência de luz com energia maior que o band-gap do ZnO, ocorre a excitação de elétrons para a banda de condução e buracos na banda de valência do semicondutor (Figura 2.2-1). Fótons com essa energia também podem ionizar os estados neutros de vacância de oxigênio (um estado neutro de vacância de oxigênio possui dois elétrons em excesso).

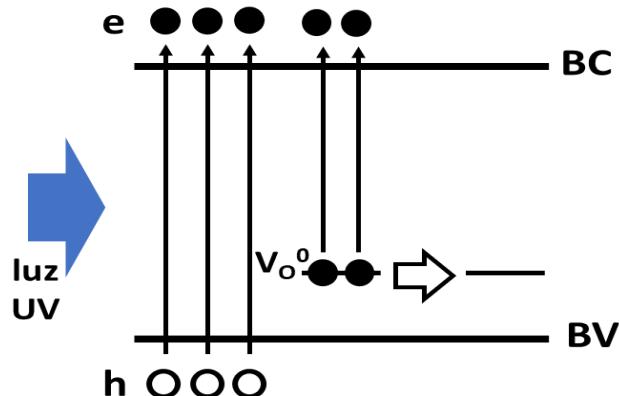


Figura 2.2-1 - Geração de pares elétron-buraco ( $e-h$ ) através da excitação do ZnO com luz de energia maior que o bandgap do material. A incidência de luz também pode ionizar os estados neutros de vacâncias de oxigênio ( $V_O^0$ ).

Vacância de oxigênio é um dos defeitos mais comumente observados em óxidos metálicos [31]. As vacâncias de oxigênio podem aprisionar buracos fotogerados (Figura 2.2-2), formando complexos ( $V_O^{2+}$ ) bastante estáveis [33], segundo a equação (16):



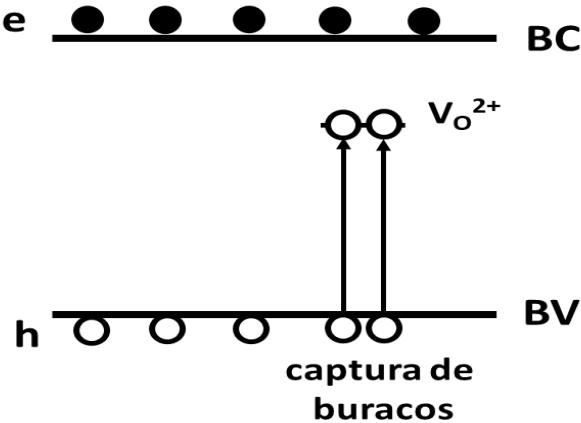


Figura 2.2-2 - Captura de buracos pelos estados de vacância de oxigênio, gerando estados  $V_O^{2+}$  (esses estados possuem energia mais próxima ao fundo da banda de condução do ZnO em comparação com os estados  $V_O^0$ ).

Tais complexos dificultam a recombinação dos pares e-h, fazendo com que uma parcela dos elétrons fotogerados permaneça na banda de condução do material (como ilustrado na Figura 2.2-3) e contribua para a manutenção da photocorrente mesmo depois que a iluminação é interrompida [23, 31].

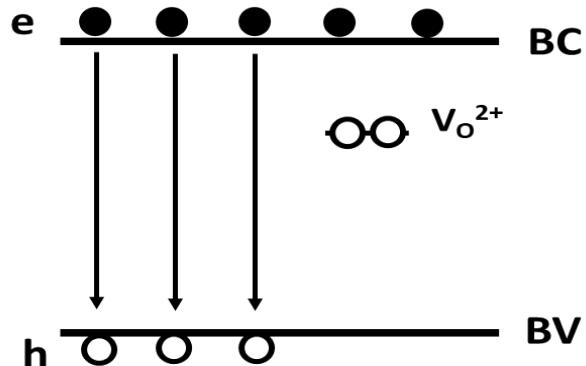


Figura 2.2-3 - Recombinação dos portadores fotogerados. Elétrons em excesso permanecerão na banda de condução do material porque a ligação dos buracos no estado  $V_O^{2+}$  é bastante estável.

## 2.2.2 PPC Envolvendo Processo de Adsorção-Dessorção de Oxigênio Atmosférico

Por outro lado, o oxigênio atmosférico pode interagir com a superfície do filme de ZnO tipo-n (Figura 2.2-4), capturando elétrons livres para formar íons  $O_2^-$  segundo da equação (17):

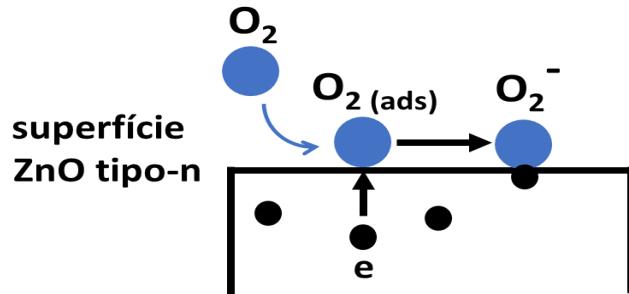


Figura 2.2-4 - Processo de adsorção de moléculas de oxigênio atmosférico sobre a superfície do ZnO (tipo-n, ou seja, com excesso de elétrons).

Com a iluminação, pares e-h são gerados, e os buracos podem se combinar com os íons  $O_2^-$  na superfície do semicondutor, produzindo  $O_2$  neutro, conforme Figura 2.2-5).

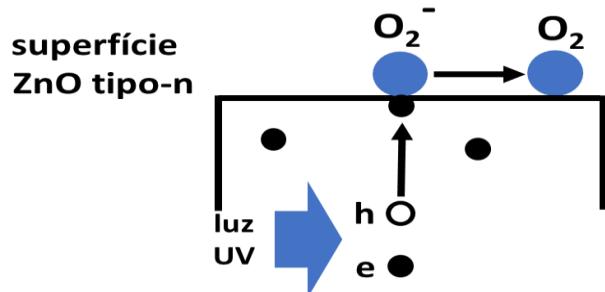


Figura 2.2-5 - Com iluminação UV, pares elétron-buraco são foto gerados no ZnO. Os buracos podem se ligar ao íon  $O_2^-$ , neutralizando a molécula e formando  $O_2$ .

Isso leva à dessorção dessas moléculas de oxigênio, conforme Figura 2.2-6. Os elétrons desemparelhados contribuem então para o aumento da condutividade do semicondutor. Como o processo de re-adsorção de oxigênio na superfície do semicondutor é um processo lento [46], essa fotocondutividade pode persistir por longos períodos após a interrupção da iluminação.

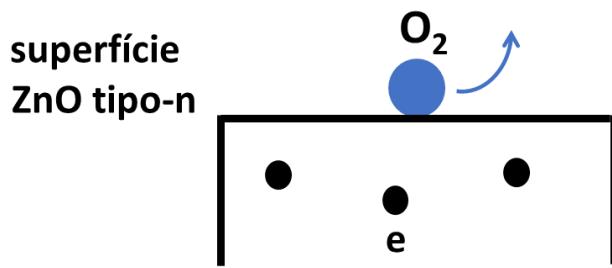


Figura 2.2-6 - Moléculas de O<sub>2</sub> podem ser dessorvidas da superfície do ZnO, deixando o elétron desemparelhado na banda de condução do material, o qual irá contribuir para o aumento de sua condutividade.

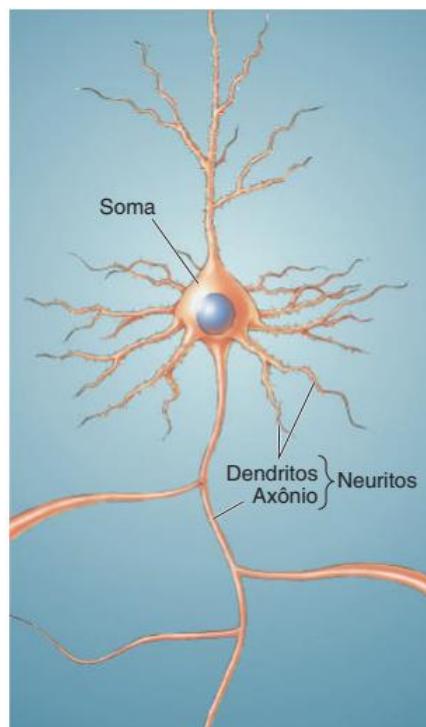
É de se esperar que ambos os mecanismos estejam contribuindo para o fenômeno da PPC observada no TFT de ZnO investigado no presente trabalho.

## 2.3 Sinapse

O sistema nervoso central (SNC) é um computador biológico que pode simultaneamente calcular e memorizar uma quantidade massiva de informações recebida do sistema nervoso periférico (SNP). O SNP consiste em nervos sensoriais e motores. O SNC e o SNP trabalham juntos para reconhecer informações externas, tomar decisões apropriadas e controlar a mecânica do corpo. Os seres humanos podem reconhecer informações de estímulos externos através de um sistema biológico que consiste na parte sensorial do SNP e na parte computacional do SNC. A parte sensorial do SNP (órgãos sensoriais e nervos) detecta o estímulo (por exemplo, luz, pressão, som, gás ou sabor), e a parte computacional do SNC reconhece as informações dos estímulos – através de um processo que envolve memória e aprendizagem – e toma decisões apropriadas [47].

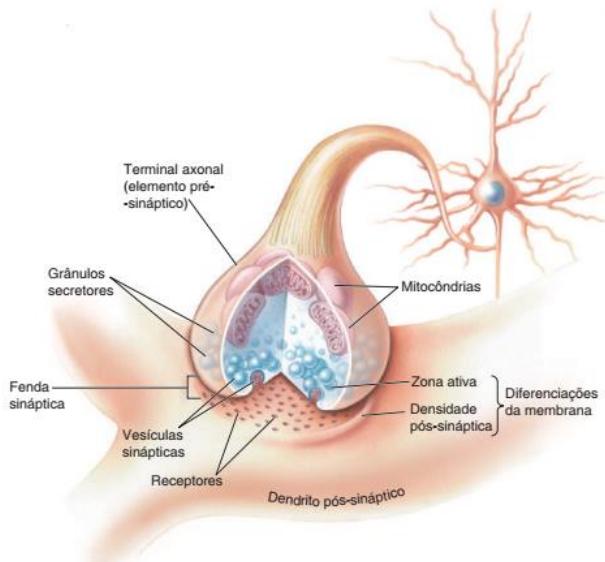
As informações captadas pelo SNP se manifestam como estímulos elétricos no SNC. No cérebro, esses estímulos são recebidos e processados pelos neurônios, que por sua vez se comunicam com outros neurônios – para transmitir esses estímulos – através de sinapses. O cérebro humano é o centro de controle do sistema nervoso, que contém cerca de  $10^{11}$  neurônios conectados por cerca de  $10^{15}$  sinapses. As sinapses agem formando uma rede altamente complexa de interconexões entre os neurônios. Conforme mostrado na Figura 2.3-1, o neurônio em si é composto de três partes: os dendritos, que são canais que recebem os estímulos

que contém a informação; o corpo celular ou soma, onde o estímulo é processado; e o axônio, que é o canal que o estímulo percorre até as terminações do neurônio, que vão se conectar a outros neurônios através das sinapses e então propagar ou não o estímulo [15].



*Figura 2.3-1 - Componentes de um neurônio. Extraído da página 26 de [15].*

Desta forma, cada sinapse possui dois lados: o pré-sináptico, o qual geralmente consiste em uma terminação do axônio, e o pós-sináptico, geralmente um dendrito (mas que também pode ser diretamente o soma). Esses nomes indicam a direção habitual do fluxo de informação de “pré” para “pós”. O espaço entre a membrana pré-sináptica e a pós-sináptica é chamado de fenda sináptica. A Figura 2.3-2 é uma ilustração da região da sinapse. A transmissão de sinal entre o neurônio pré-sináptico e o neurônio pós-sináptico ocorre através de processos químicos que são desencadeados dependendo da magnitude da variação de potencial elétrico causada pelo estímulo, o qual é denominado “potencial de ação”.



*Figura 2.3-2 - Ilustração da região da sinapse, com os neurotransmissores, a fenda sináptica e os demais elementos sinápticos. Extraído da página 115 de [15].*

Os processos químicos envolvem pequenas moléculas, denominadas neurotransmissores, que são liberadas de vesículas nas membranas pré-sinápticas para a fenda sináptica, e então captadas por receptores na membrana pós-sináptica. Isso provoca uma variação no potencial elétrico da membrana, e se essa variação for suficiente para provocar o estímulo do neurônio pós-sináptico, a informação é processada por este neurônio e transmitida através dele. Essa transformação da informação, de-elétrica-para-química-para-elétrica, torna possível muitas das capacidades computacionais do encéfalo. Modificações desse processo estão envolvidas na memória e no aprendizado, e distúrbios nas transmissões sinápticas resultam em certos transtornos mentais. A sinapse também é o local de ação para muitas toxinas e para a maioria das drogas psicoativas [15, 48].

A sinapse, portanto, é formada pelo estímulo que chega a ela pelo terminal transmissor do pré-neurônio, e dependendo dos processos químicos que ocorrem nela, esse estímulo será ou não transmitido ao terminal receptor do pós-neurônio. Pode-se classificar então os processos como excitatórios, quando a transmissão é facilitada, e inibitórios, quando a transmissão é dificultada. As correntes elétricas decorrentes de cada um desses processos são então classificadas como correntes elétricas pós-sinápticas excitatórias (EPSC) e correntes elétricas pós-sinápticas inibitórias (IPSC). Dessa maneira, os processos químicos desencadeados pelo estímulo elétrico causam uma mudança na estrutura da fenda sináptica, que pode

gerar ou não a conexão entre esses neurônios. Essa capacidade de mudar conforme o estímulo que recebe é denominada plasticidade da sinapse. A força de conexão entre neurônios, chamada de peso sináptico, é decisiva para que o estímulo possa chegar ao neurônio adjacente. A mudança no peso sináptico pode reforçar ou abrandar a conexão neural, isto é, provocar maior ou menor alteração na plasticidade da sinapse.

O estabelecimento de conexões entre neurônios é o aspecto fundamental para o processo de aprendizado e formação de memória no cérebro humano, e vale ressaltar que esses processos são dinâmicos, isto é, são dependentes do tempo. Assim, a plasticidade sináptica pode ser de curta (STM) ou de longa (LTM) duração, o que está relacionado com o tempo de retenção da conexão neural. Para STM é da ordem de milissegundos até alguns minutos, enquanto para LTM pode durar de horas até mesmo vários dias.

Em um sistema neural biológico, LTM está relacionada com o reconhecimento e processamento de sinais externos pelo cérebro, e a informação reconhecida é facilmente esquecida. A facilitação por pulsos emparelhados (PPF) e a inibição por pulsos emparelhados (PPD) – pulso aqui diz respeito a um estímulo de curta duração, geralmente da ordem de milissegundos – são funções representativas de eventos sinápticos que refletem a plasticidade de curto prazo. O índice PPF (PPD) é obtido calculando a razão da EPSC (IPSC) gerada pelo segundo pulso (A2) àquela provocada pelo primeiro (A1) [49].

Por outro lado, a LTM representa o tempo de retenção sináptica estendido (várias horas ou mais), e provocará mudanças permanentes na rede neural, permitindo que o cérebro armazene as informações. A transição da plasticidade de curto prazo para a plasticidade de longo prazo pode ser realizada por plasticidade dependente de taxa de pulso (SRDP), plasticidade dependente de número de pulsos (SNDP) e plasticidade dependente de amplitude de pulso (SADP), o que garante a realização da memória no cérebro humano. Todos esses aspectos relacionados à plasticidade sináptica estão esquematizados na Figura 2.3-3

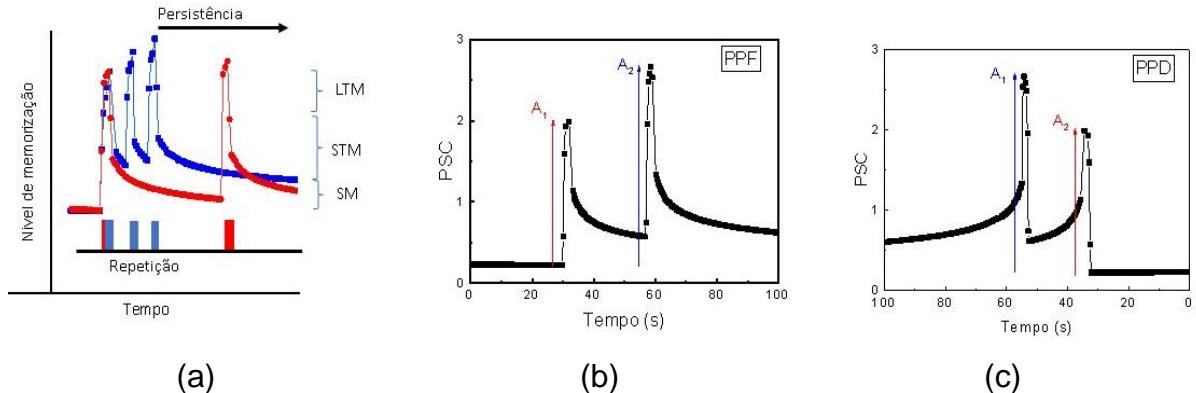


Figura 2.3-3 –(a) Tipos de plasticidade sináptica formada entre neurônios. SM memória sensorial, STM memória de curto prazo, LTM memória de longo prazo. (b) PPF facilitação por pulso emparelhado. (c) PPD inibição por pulsos emparelhados.

A plasticidade sináptica mencionada acima é considerada um importante mecanismo de aprendizagem da teoria de Hebbian, ou seja, aprendizagem contínua e estimulação repetida de neurônios pré-sinápticos para neurônios pós-sinápticos pode melhorar a eficiência da transmissão sináptica [50].

A discussão sobre sinapse realizada acima revela os principais atributos que um dispositivo deve apresentar para constituir-se em um “dispositivo neuromórfico”. Ele deve então possuir três elementos básicos: um componente sensível a um determinado estímulo (que pode ser elétrico, mas outras formas de estímulo também podem ser exploradas, como o óptico, por exemplo), ter um terminal por onde um determinado sinal chegue a esse componente sensível e seja “processado” através de sua interação com o estímulo, e finalmente outro terminal que possa coletar esse sinal processado. Ou seja, para que os dispositivos possam emular as propriedades sinápticas, ele deve apresentar características de: memória sensorial, peso sináptico, facilitação neural, memória de curto e longo prazo e aprendizagem e reaprendizagem. Tais características estão indicadas na Figura 2.3-3.

## 3 METODOLOGIA

No presente capítulo discutiremos como foi realizada a confecção das amostras analisadas no trabalho, a deposição dos filmes e as medidas realizadas para caracterização do ZnO e dos TFT, também as medidas para as análises dos dispositivos sinápticos. Explicitaremos as etapas de construção do TFT e do filme de óxido de zinco. Também discutiremos as medidas e procedimentos utilizados para análise dos dispositivos e filmes empregados neste trabalho.

### 3.1 Materiais e Deposição dos Filmes

Para realização deste trabalho, utilizamos como substrato lâminas de vidro para microscópio e o wafer da marca @Ossila, com o metal de porta de silício e o dielétrico de dióxido de silício (100 nm), como mostrado na Figura 3.1-1,



*Figura 3.1-1 Substrato de silício de 8" com filme de Dióxido de silício de 100nm da marca @Ossila.  
Fonte: Ossila.*

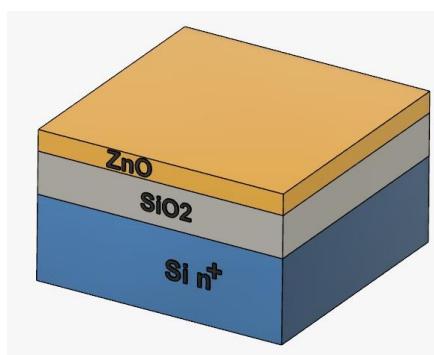
Para a deposição dos filmes utilizamos um alvo de ZnO (99,99% de pureza) da marca @Testbourne Ltd, na técnica de *RF-magnetron sputtering*, e alumínio da marca @Sigma Aldrich, para a deposição via evaporação térmica.

Para a construção das amostras, primeiramente realizamos os cortes e limpeza dos substratos. O corte das lâminas de vidro ou do wafer Si n<sup>+</sup> (Figura 3.1-1) foram realizados com cortadores de vidro com ponta diamantada, resultando em substratos com dimensões de 20 x 15 mm.

Para a limpeza, as lâminas de vidro comercial e ou o silício são submetidas a sete etapas distintas: i) as lâminas foram lavadas, com detergente comercial e água corrente, para retirada de sujeiras superficiais; ii) foram colocadas em um recipiente

com água deionizada e detergente (proporção 1:1), e levadas ao ultrassom, onde foram aquecidas a aproximadamente 50°C e lavadas durante 20 minutos; iii) passaram por um enxágue em água corrente, para a remoção dos resíduos de detergente; iv) foram mantidas novamente em ultrassom aquecido durante 15 minutos, em um recipiente contendo água Mili-Q, onde a cada 5 minutos a lavagem era pausada, para a troca da água Mili-Q; v) os substratos foram lavados novamente em ultrassom aquecido, durante 20 minutos, em um recipiente com acetona; vi) os substratos foram colocados em um recipiente com álcool isopropílico, sendo novamente levados para lavagem em ultrassom aquecido durante 20 minutos; vii) na última etapa da limpeza, os substratos passam por uma secagem em um breve aquecimento no forno.

Para a deposição do filme de ZnO, utilizamos a técnica de pulverização catódica de radiofrequência (RF-magnetron sputtering), o equipamento utilizado é da marca @HHV Ltd, em que depositamos os filmes fino de ZnO com espessura de ~50 nm. Para a deposição utilizamos os seguintes parâmetros para a confecção das amostras: taxa de deposição de 0,5 Å/s; o alvo de ZnO (99,99% de pureza) da @Testbourne Ltd; distância alvo-substrato de 6 cm; pressão da câmara durante a deposição de  $1,5 \times 10^{-2}$  mbar, controlada com o gás de Ar (argônio) de alta pureza (99,999%), e a potência de RF de 75 W. Alguns filmes foram realizados tratamento térmico de aproximadamente 450°C por um tempo de uma hora em ar ambiente. Os dispositivos são ilustrados na Figura 3.1-2 abaixo.



*Figura 3.1-2 - Ilustração das disposições dos filmes após a deposição do ZnO via RF - magnetron Sputtering.*

Com os substratos limpos e realizada a deposição do filme de ZnO, fizemos a evaporação dos eletrodos de fonte e dreno para realizar a montagem do transistor.

Para as análises feitas somente do filme de ZnO não foram depositados os eletrodos de alumínio.

Para a deposição dos eletrodos de alumínio por evaporação térmica, utilizando uma evaporadora da marca @HHV Ltd. A espessura depositada é de aproximadamente 100 nm. A evaporação foi feita sob uma pressão de  $2,3 \cdot 10^{-5}$  mbar. Para obter os contatos no padrão dos eletrodos de *dreno* e *fonte*, como na Figura 1.1-6, é necessário a utilização de uma máscara de sombra. Utilizamos o modelo da marca @Ossila E321, com os parâmetros de comprimento e largura do canal do TFT ditados pela mesma, como na Figura 2.1-5. Portanto, com essa máscara nossos dispositivos possuem  $L = 30 \mu\text{m}$  e  $W = 1 \text{ mm}$ , levando a uma razão  $L/w = 3 \times 10^{-2}$ , a qual é importante na caracterização dos transistores. O design dos eletrodos do dispositivo confeccionado com a máscara E321 é mostrado na Figura 3.1-3.

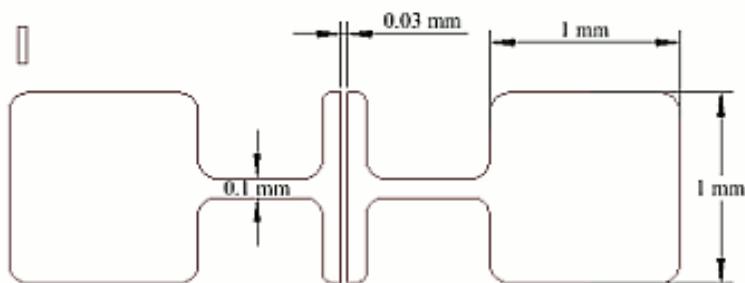


Figura 3.1-3 – Ilustração da geometria dos eletrodos do dispositivo utilizando a máscara de sombra para a deposição dos eletrodos dos transistores. Fonte: @Ossila.

A Figura 3.1-3 mostra os eletrodos de dreno e fonte, assim como o espaçamento entre eles (onde será formado o canal semicondutor) para um único dispositivo. Tendo o substrato as dimensões de 20x15 mm, temos ao final desses processos uma configuração de 20 dispositivos por substrato, como ilustrado na Figura 3.1-4.

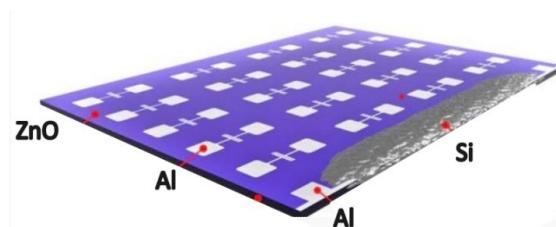


Figura 3.1-4 - Ilustração da representação do substrato após a deposição dos eletrodos de dreno e fonte, fazendo utilização da máscara da @Ossila. Adaptado de @Ossila.

### 3.2 Caracterização

As caracterizações elétricas dos dispositivos foram realizadas através das curvas de saída e de transferência, que são medidas da corrente entre dreno e fonte  $I_D$  e a aplicação das tensões na porta  $V_G$  e entre fonte e dreno  $V_{DS}$ . Os dados elétricos foram obtidos por meio de dois eletrômetros digitais da @Keithley modelo 617, no qual os mesmos são as fontes de tensão. A ligação elétrica com o dispositivo, é dada pelo contato dos *pogo pins* (pino com mola) com os eletrodos do dispositivo. Assim, podemos produzir o gráfico das curvas características com a utilização de um software de aquisição de dados. O acoplamento dos dois eletrômetros e o esquema elétrico dos conectores é representado conforme o esquema mostrado na Figura 3.2-1.

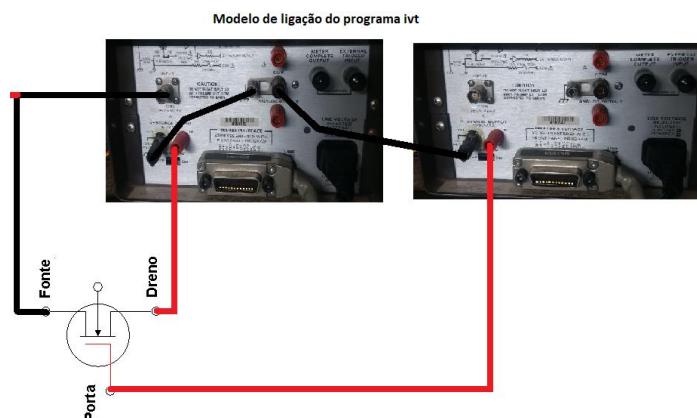


Figura 3.2-1 - Esquema de montagem dos eletrômetros da @Keithley modelo 617, e das ligações elétricas para a aquisição de dados.

Para realização da leitura dos dados de corrente elétrica e tensão utilizamos o software de confecção própria construído no MATLAB que nos fornece os dados de corrente, tensão e os intervalos de tempo das medidas. Em um dos eletrômetros aplicamos a tensão  $V_{DS}$  e medimos a corrente  $I_D$ , no outro equipamento aplicamos a tensão  $V_G$ . O *layout* do software é apresentado na Figura 3.2-2.

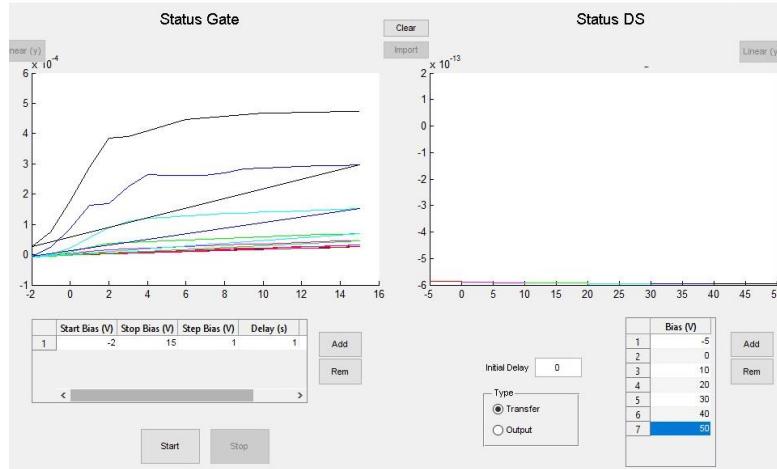
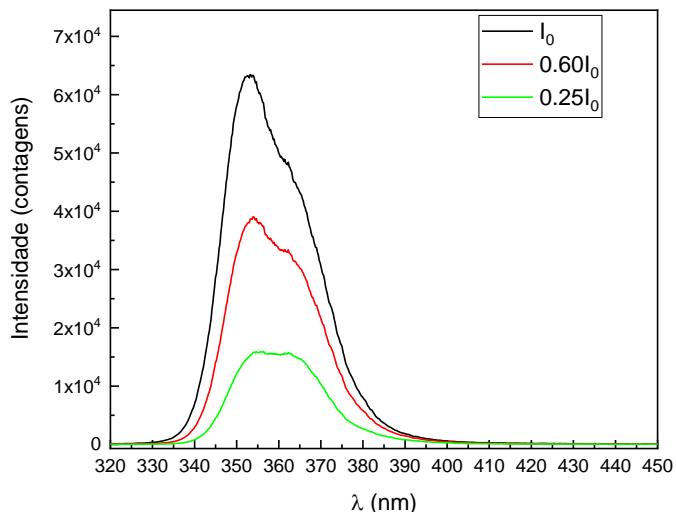


Figura 3.2-2 - Layout do software de aquisição de dados dos eletrômetros.

Os parâmetros que caracterizam o TFT são extraídos da curva de transferência, tais como mobilidade de efeito de campo ( $\mu_{ef}$ ) e de saturação ( $\mu_{sat}$ ), *subthreshold swing* (*SS*), a tensão limiar ( $V_{th}$ ) e a corrente ( $I_{on/off}$ ) que é a razão entre a maior e a menor corrente entre dreno e fonte ( $I_D$ ).

Realizamos medidas para a curva de transferência, com as amostras expostas a um LED com máximo de intensidade no comprimento de onda  $\lambda = 355\text{ nm}$ , na região do ultravioleta como demonstrado na Figura 3.2-3. Os dados elétricos foram obtidos por meio dos eletrômetros digitais da @Keithley 617, em que os mesmos são as fontes de tensão.



*Figura 3.2-3 - Medida do espectro de emissão do LED 355 nm.  $I_0$  é a medida da intensidade emitida diretamente pelo LED, sendo tal intensidade atenuada para 60% e 25% de  $I_0$  com o uso de filtros de densidade neutra. Neste trabalho,  $I_0 = 70 \mu\text{W.cm}^{-2}$ .*

Efetuamos medidas da corrente  $I_D$  pelo tempo, com as amostras expostas ao LED de  $\lambda = 355 \text{ nm}$ . Os dados elétricos também foram obtidos por meio dois eletrômetros digitais da @Keithley 617. As medidas ocorreram variando o tempo de exposição da amostra ao LED UV com intensidade de  $I_0 = 70 \mu\text{W.cm}^{-2}$ , ou seja, mudando a dose de exposição. Também ocorreram medidas variando a frequência de exposição ao LED e variando a intensidade de  $I_0$ . A montagem para a exposição do dispositivo é exemplificada na Figura 1.1-6(b).

Para as medidas realizadas com as amostras sendo expostas ao LED, utilizamos a mesma configuração de montagem apresentada acima, mudando apenas o fato de posicionarmos o LED para iluminar a amostra. Realizamos o controle de tempo para o qual o LED esteve ligado ou desligado. Para isso foi confeccionado um equipamento que controla o tempo de iluminação, o tempo sem iluminação e a frequência com que os estados ligado e desligado são alternados. O equipamento de controle tem como base um microcontrolador (@AtMega 628P) e uma placa do tipo Arduino, onde a programação de controle das funções foi feita na plataforma do Arduino Uno, possibilitando controlar o tempo e a frequência de alimentação elétrica do LED.

Realizamos também medidas de caracterização do filme de ZnO, como 4-pontas, para determinar a resistividade e condutividade do filme; difração de raios X (DR-X), para analisar a cristalografia do filme; e espectroscopia UV-VIS para a obtenção do valor de energia limiar de absorção do semicondutor.

A medida de 4 pontas linear é realizada com o eletrômetro digital da @Keithley (modelo 2400). A técnica é utilizada para medição da condutividade e resistência de folha, a medida consiste em aplicar uma tensão entre os terminais externos das quatro pontas, que estão dispostas linearmente, e a diferença de corrente é medida entre os terminais internos. Com as medidas da corrente e da tensão, temos o valor da resistência por folha e consequentemente a resistividade e condutividade do material, de acordo com sua geometria. A resistência por folha pode então ser calculada usando a seguinte equação (4.1)

$$R_f = 4,53236 \frac{\Delta V}{I}. \quad (4.1)$$

$R_f$  é a resistência de folha,  $I$  é a corrente entre as pontas internas e  $\Delta V$  é a variação da tensão medida entre as pontas externas. Para obter a resistividade/condutividade precisamos da espessura do filme, para então com a resistência de folha calcularmos a resistividade/condutividade, com a equação (4.2),

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R_f l. \quad (4.2)$$

No qual,  $\rho$  e  $\sigma$  são a resistividade e condutividade respectivamente e  $l$  é a espessura do filme.

A caracterização cristalográfica foi realizada no filme crescido em substrato de vidro e silício por DR-X em um difratômetro X'Pert PRO MPD da @PANalytical, com radiação  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) em geometria Bragg-Brentano de 10 a 80° para a variação de  $(2\theta)$ . O mesmo foi usado para quantificar os parâmetros de rede e orientação preferencial. Pseudo Voigt foi usado como uma função de forma de pico. Os cartões de informação cristalográfica usados para o refinamento de Rietveld foram 26170-ICSD para ZnO (Hexagonal P63mc) e 659044 para padrão de silício (cúbico Fd-3m).

O silício policristalino também foi definido como referência para o parâmetro padrão instrumental usado no cálculo do tamanho do cristalito pela equação de Scherrer mostrada abaixo na equação (4.1), abaixo

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta_{2\theta} \cdot \cos \theta}. \quad (4.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda dos raios X,  $\beta_{2\theta}$  é o FWHM corrigido e  $\theta$  é o ângulo de difração [51].

Para a medida da energia de gap do material, utilizamos a espectroscopia de absorção ótica e refletividade, empregando o mini espetrômetro usb 4000 e a lâmpada DT-MINI2-GS da @Ocean Optics. A determinação do "band gap" foi realizada através do método de Tauc.

As medidas de Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) foram realizadas no laboratório LNNano do CNPEM-Campinas/SP, utilizando um espetrômetro da Thermo Scientific. A fonte de raios X foi a linha K-alfa de alvo de Al. O software Avantage® foi usado para aquisição e tratamento dos dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo discutiremos os resultados do trabalho, no qual apresentamos transistores de filme fino e suas propriedades, a análise e caracterização do filme de ZnO, como energia de gap, cristalografia e espectroscopia, condutância e os efeitos de fotocondutividade persistente ao expormos o mesmo ao UV. Apresentaremos e analisaremos as propriedades de PPC no dispositivo, e por consequência as medidas que nos permita comparar o mesmo com a sinapse biológica. Tendo então um dispositivo com propriedades de sinapses optoeletrônicas. Demonstramos também os efeitos para as medidas de PPC e sinapse para um dispositivo que foi tratado termicamente.

### 4.1 Transistor de Filme Fino

Na Figura 4.1-1 são apresentadas as curvas de saída do TFT com canal semicondutor de ZnO. A curva de transferência desse dispositivo é mostrada na Figura 4.1-2Figura 4.1-1. Essas curvas são características de dispositivos do tipo-n, pois o estado ligado ocorre em tensões positivas na porta e no dreno.

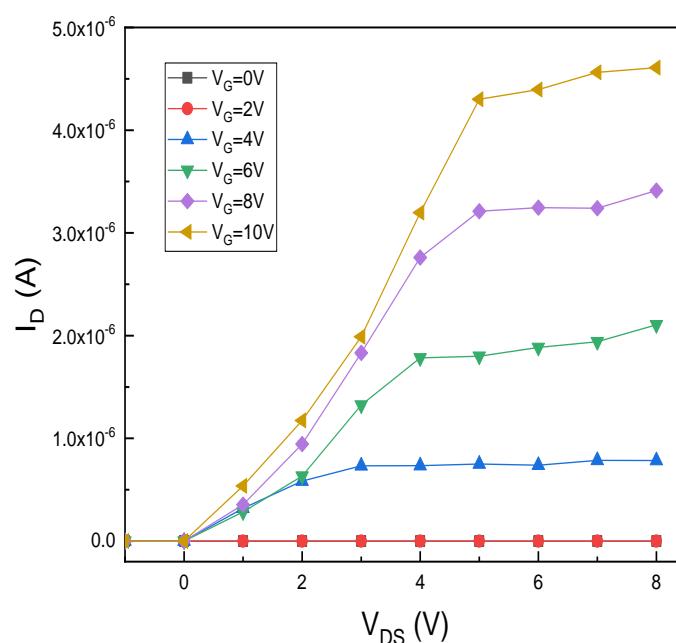


Figura 4.1-1 - Curvas de saída do TFT com canal de ZnO. As tensões aplicadas na porta variaram de 0V a 10V. As medidas foram realizadas na ausência de luz.

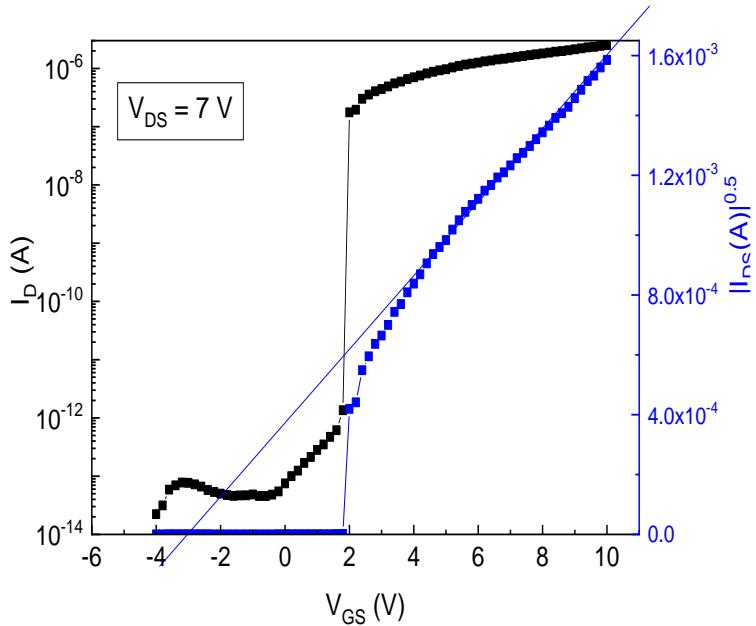


Figura 4.1-2 - Curvas de transferência do TFT com canal de ZnO. Curva de cor preta, representa a medida na escala logarítmica e a de cor azul realizando o módulo da corrente  $I_D$ . A tensão aplicada entre dreno e fonte foi de  $V_{DS}=7V$ . As medidas foram realizadas na ausência de luz.

Da curva de transferência são obtidos os parâmetros listados na Tabela 4.1-1. Esses parâmetros caracterizam o TFT baseado no filme de ZnO investigado neste trabalho. Realizamos a confecção de diversos dispositivos que apresentaram comportamento ideal para o TFT, alguns serão apresentados no Anexo A deste trabalho. Vale salientar que, nas amostras analisadas nesse ponto do trabalho não foi realizado nenhum tipo de tratamento térmico após a deposição do ZnO, o qual geralmente é empregado em TFTs baseados em óxidos metálicos, afim de melhorar a mobilidade dos portadores [39, 52], discutiremos os dados das amostras tratadas termicamente posteriormente. Os valores para  $V_{th}$ , SS e  $I_{on/off}$  são adequados para a aplicação dos dispositivos em circuitos [29].

Tabela 4.1-1 - Parâmetros elétricos do transistor, extraídos de sua curva de transferência mostrada na Figura 4.1 2.

Material	$V_{TH}$ (V)	$\mu_{EF}$ ( $cm^2/Vs$ )	$\mu_{sat}$ ( $cm^2/Vs$ )	SS (V /década)	$I_{on/off}$
ZnO	-2,95	$1,05 \times 10^{-2}$	$7,34 \times 10^{-2}$	0,47	$1,50 \times 10^8$

## 4.2 Fotocondutividade Persistente (PPC) no TFT

Para determinar a fotocondutividade persistente nos transistores de filme fino, realizamos a exposição dos dispositivos ao LED como se demonstra na Figura 1.1-6. Para determinar qual seria o comprimento de onda que nos retornaria o resultado procurado, realizamos uma medida de *band gap* do filme de ZnO, Figura 4.2-1.

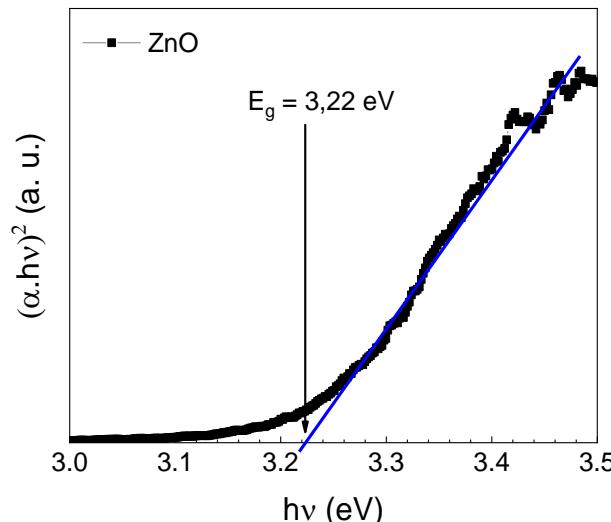


Figura 4.2-1 - Gráfico de Tauc e a avaliação de band gap para filme de ZnO usado como canal semicondutor em dispositivos sinápticos optoeletrônicos.

Com o gráfico de Tauc da Figura 4.2-1, obtemos a energia de gap do filme de ZnO, de  $E_g = 3,22$  eV. Esse resultado, leva a um comprimento de onda de 385nm. Portanto, para as nossas análises utilizaremos o LED 355nm ultravioleta (UV), que apresenta uma energia de 3,49 eV, ou seja, maior que o  $E_g$  do filme de ZnO. Para realizar uma verificação de que não obteremos resposta elétrica ao expormos o dispositivo a um LED de 630nm , realizamos a medida demonstrada na Figura 4.2-2 abaixo,

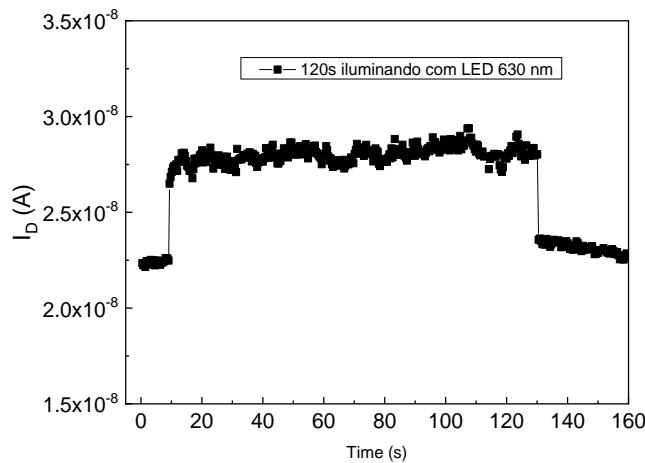


Figura 4.2-2 - Variação do  $I_D$  pelo tempo, iluminando a amostra por 2min com o LED vermelho (630 nm). Essa medida é resposta da corrente elétrica  $I_D$  ao estímulo luminoso no canal do semicondutor de ZnO em um TFT, mantendo para essa medição,  $V_{DS} = 3$  V e  $V_G = -7$  V.

Na Figura 4.2-2, a medida é realizada ligando o LED em 10s e desligando em 130 s. Assim que se ativa a iluminação ocorre uma resposta de corrente, porém a mesma pode ser considerada mínima. Outro ponto é que, após 120s de iluminação a intensidade de  $I_D$  decai para o nível inicial (escuro), instantaneamente. Assim temos que, o efeito de PPC está ausente com a iluminação no vermelho, que possui energia menor que a  $E_g$  do filme.

Analisamos também os dados do difratograma de raios X, para o filme de ZnO, depositado por RF – *sputtering* em substrato de silício e vidro, como mostrado na Figura 4.2-3.

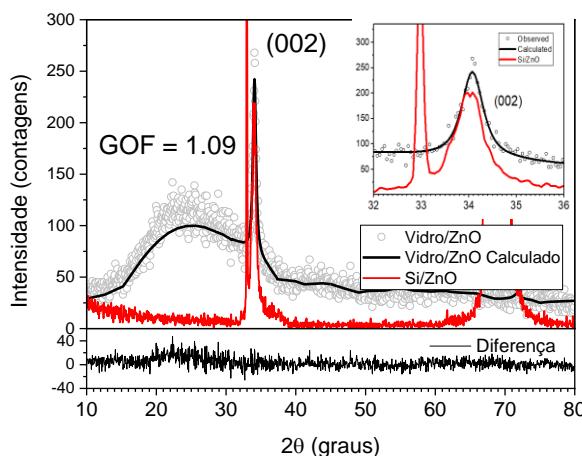


Figura 4.2-3 - Difratograma de raios X para filme de ZnO de 50nm. Os pontos abertos representam dados experimentais, do filme de ZnO depositado sobre o substrato de vidro. A curva de cor preta é o difratograma calculado, e a curva de cor vermelha é o difratograma experimental, para o filme de ZnO depositado sobre o substrato de silício. A curva de diferença demonstra a precisão do ajuste.

O difratograma da Figura 4.2-3 mostra o resultado da difração do filme de ZnO, sobre um substrato de vidro e um substrato de silício. Observa-se no gráfico inserido que o pico de difração do ZnO é idêntico para ambos os substratos. Garantindo assim, que o refinamento Rietveld realizado para o filme de ZnO depositado no vidro, retornará os mesmos resultados do filme depositado no silício. O difratograma de raios X para filme de ZnO sobre um substrato de vidro, mostra a sobreposição de um halo amorfó (15° a 38°). O pico de difração em 34,07° é referente ao plano (002) do filme de ZnO. A Figura também mostra as curvas observadas (círculos cinza), curvas calculadas (linha preta) e curvas de diferença (linha preta na parte inferior do gráfico) do refinamento do filme de ZnO. O refinamento Rietveld apresentou um fator GOF (Goodness of Fit) próximo a 1, mostrando uma excelente simulação. O filme é orientado na direção [002] perpendicular à superfície do substrato. Os valores dos parâmetros de rede são  $a = b = 3,4069 \text{ \AA}$  e  $c = 5,2570 \text{ \AA}$ , com leve expansão volumétrica de 47,6 para 52,8  $\text{\AA}^3$  quando comparado ao padrão ICSD utilizado. O tamanho de cristalito calculado foi de  $25 \pm 3 \text{ nm}$ . Os picos em torno de 33° e 70° estão relacionados ao substrato de Si.

Na Figura 4.2-4 é apresentada a influência da incidência de luz UV sobre a curva de transferência do dispositivo, com uma tensão entre fonte e dreno de  $V_{DS} = 8V$ , (as Figura 4.2-4, 5, 6 e 7 seguem as mesmas configurações). As medidas foram realizadas expondo o dispositivo ao LED simultaneamente a realização de uma medida de transferência. A fonte de luz usada foi um LED 355nm com intensidade de  $70 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

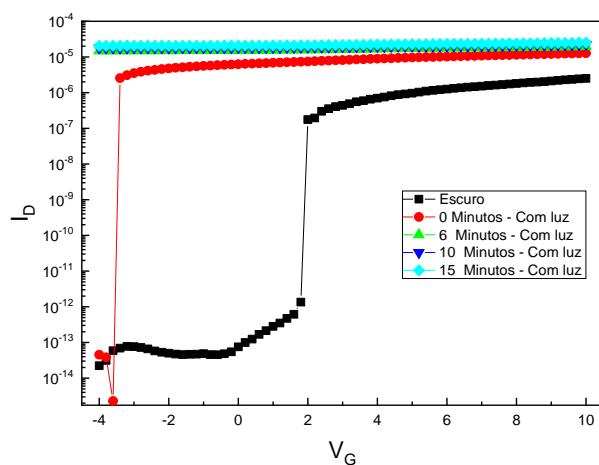


Figura 4.2-4 - Curva de transferência do TFT de canal de ZnO antes da iluminação, imediatamente após a incidência de luz, e medidas após 6, 10 e 15 minutos de iluminação ininterrupta. A fonte de luz foi o LED 355nm e a tensão entre fonte e dreno foi  $V_{DS} = 8V$ .

Com a iluminação, ocorre um aumento acentuado na intensidade da corrente  $I_D$  no estado desligado (região de depleção,  $V_G < -2V$ ) em relação a baixa corrente no escuro. Também temos um aumento significativo da corrente no estado ligado (região de acumulação,  $V_G > -2V$ ). Analisamos o decaimento da corrente após interromper a iluminação, gráfico demonstrado na Figura 4.2-5.

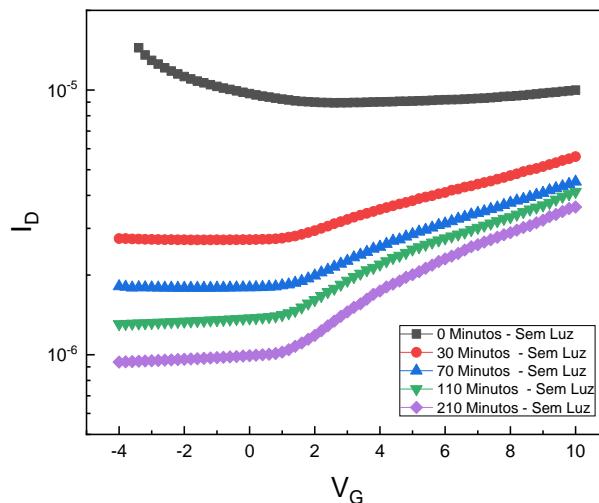


Figura 4.2-5 -Curva de transferência do TFT de canal de ZnO com  $V_{DS}=8V$ . Medidas de 0 a 270 minutos após a incidência de luz.

O dispositivo após a iluminação demonstra dificuldade para retornar para o seu estado inicial, o que caracteriza uma fotocondutividade persistente no semicondutor. Na Figura 4.2-6 é demonstrada a relação da medida no escuro, instantaneamente após a exposição ao LED, após 15 minutos de iluminação ininterruptas e 210 minutos após ocorrer o desligamento do UV.

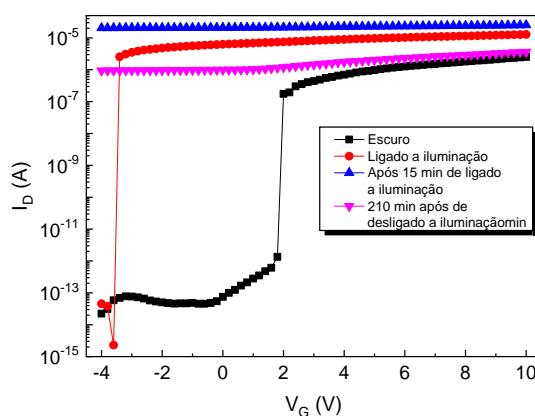


Figura 4.2-6 - Curva de transferência do TFT aplicando uma tensão  $V_{DS}=8V$ , antes da iluminação, imediatamente após a incidência de luz, com 15 minutos de iluminação e 210 minutos após a iluminação ter sido interrompida. A fonte de luz LED 355nm.

Depois de 15 minutos sob iluminação, o dispositivo apresenta uma curva de transferência com corrente de  $2 \times 10^{-5} A$ , praticamente constante nos valores de  $V_G$  medidos. Com a interrupção da incidência de luz UV e passados 210min com o dispositivo no escuro, essa corrente decai para cerca de  $1 \times 10^{-6} A$ , que ainda se trata de sete ordens de grandeza maior que a corrente de estado desligado, que se apresentava antes da iluminação (da ordem de  $10^{-13} A$ ). Esse fato caracteriza o efeito de fotocondutividade persistente. Medidas adicionais mostram que, a fotocondutividade persiste até mesmo depois de 96h com o dispositivo mantido no escuro.

Para melhor demonstrar o efeito de PPC, realizamos medidas de corrente pelo tempo, expondo o dispositivo ao LED 355nm, por um dado tempo. No qual aplicamos tensões de  $V_{DS} = 6V$  e  $V_G = -5V$ . Demonstramos essa medida na Figura 4.2-7, abaixo:

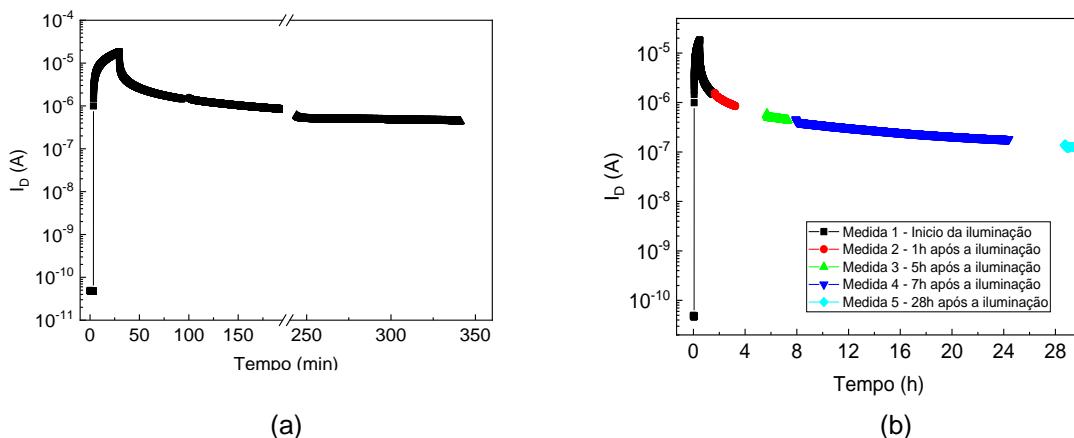


Figura 4.2-7 - Variação da corrente entre fonte e dreno  $I_D$  com o tempo aplicando uma, aplicando tensões de  $V_{DS} = 6V$  e  $V_G = -5V$ . (a) Após 12min exposição ao UV (b) Após 25 min de iluminação UV.

Com uma iluminação de 12 minutos tivemos uma variação da corrente da ordem de  $10^6$  e após a interrupção da luz tivemos uma descarga de apenas duas ordens de grandeza, em cerca de 300 minutos. Esse efeito também pode ser observado na Figura 4.2-7, onde tivemos uma variação de  $\Delta I_D \sim 3,0 \times 10^6 A$  com a exposição ao UV e uma descarga da corrente de  $\Delta I_D \sim 0,5 \times 10^2 A$  em mais de 28 horas no escuro. Esse resultado, vem do fato de que uma iluminação de 25 minutos levaria

mais de um dia para decair apenas duas ordens de grandeza. Demonstrando uma lenta queda da corrente após retirar o LED 355nm.

Com isto, podemos observar o fenômeno de fotocondutividade persistente (PPC), pela manifestação da lenta queda da intensidade da corrente  $I_D$  com o tempo, após o desligamento da iluminação do LED 355nm. Observamos também, que a incidência de luz com comprimento de onda de 630nm não afeta a intensidade da corrente  $I_D$ , o que demonstra a dependência da fotocondutividade persistente com a energia do feixe incidente.

É interessante observar o comportamento da fotocorrente quando a iluminação é realizada no dispositivo polarizado, no estado desligado e no estado ligado, regime de depleção e acumulação, respectivamente. Como ilustra a Figura 4.2-8.

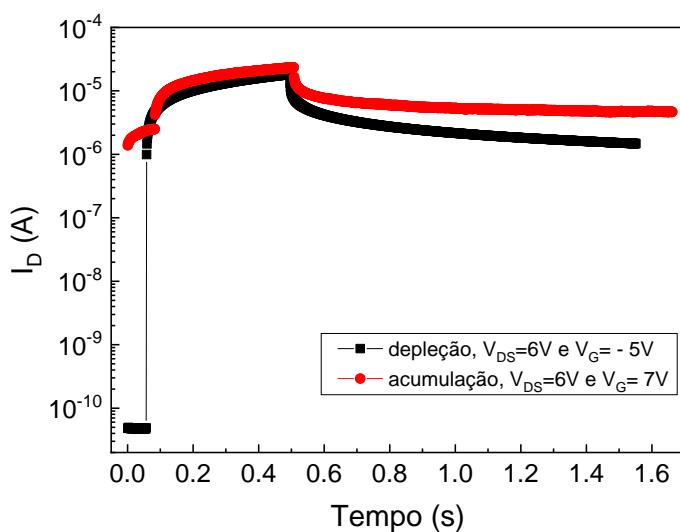


Figura 4.2-8 - Variação da fotocorrente durante a iluminação e após sua interrupção, com o dispositivo no estado desligado (curva em preto,  $V_G = -5 V$ ) e no estado ligado (curva em vermelho,  $V_G = 6 V$ ).

Percebemos que há diferenças, tanto no processo de incremento da corrente, quanto no seu decaimento, após a interrupção da incidência de luz. Tais diferenças estão evidenciadas na comparação das curvas de fotocorrente pelo tempo, mostradas na Figura 4.2-8. Em que, temos a curva no estado desligado  $V_G = -5 V$  e no estado ligado  $V_G = 6 V$ ). O comportamento mostra que a sensibilidade e taxa de decaimento da fotocondutividade persistente, pode ser controlada pela tensão de gate.

Como será visto na próxima seção, o fenômeno da fotocondutividade persistente será utilizado para emular uma sinapse química entre neurônios, e uma forma de modular a intensidade da PPC pode vir a ser um parâmetro adicional no controle da força sináptica ou peso sináptico (*synaptic strength or weight*) em um dispositivo de sinapse optoeletrônica.

### 4.3 Sinapse Optoeletrônica

Uma sinapse química envolve a terminação de um neurônio pré-sináptico, a fenda sináptica e um neurônio pós-sináptico, conforme mostrado na Figura 4.3-1(a). Compostos químicos são liberados do neurônio pré-sináptico para o neurônio pós-sináptico, através da fenda sináptica mediante algum estímulo. Para reproduzir uma sinapse, no presente trabalho utilizou-se um transistor com um canal semicondutor de ZnO. Os terminais de fonte e dreno emulam neurônios pré e pós-sinápticos, respectivamente, e o canal semicondutor desempenha o papel da fenda sináptica (Figura 4.3-1). O estímulo se produz por meio da incidência de radiação UV no canal, provocando assim, uma alteração na intensidade de corrente elétrica entre os terminais fonte e dreno ( $I_D$ ). Além disso, tem-se que cerca de 80% de toda informação externa adquirida por um indivíduo vem através da percepção visual [26], o que torna dispositivos sinápticos que são sensíveis à luz, um elemento chave para a implementação de sistemas artificiais de processamento e armazenamento de sinais visuais [27].

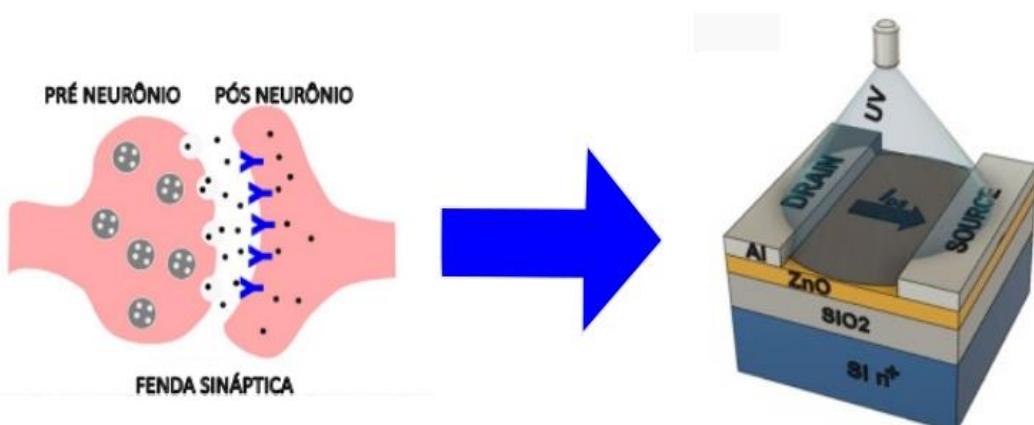


Figura 4.3-1 - Ilustração de uma sinapse química envolvendo dois neurônios em comparação com a estrutura do dispositivo sináptico optoeletrônico. Com a polarização, a corrente  $I_D$  é medida e sua magnitude é aumentada com a incidência de luz UV devido à fotocondutividade persistente do canal de ZnO.

Para ter melhor clareza das propriedades esperadas para esse dispositivo, é útil verificar quais são as características de uma sinapse, e quais elementos são necessários para que o dispositivo possa reproduzi-la. A propriedade principal da sinapse é sua plasticidade, ou seja, a capacidade da sinapse se alterar conforme o estímulo que recebe. A alteração pode ser passageira ou duradoura, dependendo da intensidade ou duração do estímulo, o que é traduzido como, força sináptica ou peso sináptico.

Memória e aprendizagem são aspectos considerados resultantes de estímulos elétricos, que deformam e reorganizam as conexões das redes neurais do cérebro. A magnitude dessa deformação e reorganização leva à retenção do conhecimento. Assim, além do estímulo provocar uma alteração na resposta do dispositivo, é necessário que essa resposta seja retida, pelo menos parcialmente, depois que o estímulo deixar de atuar sobre ele, e que essa retenção seja maior quanto mais intenso ou duradouro for o estímulo, denominado com memória sensorial (SM).

Um aspecto conhecido no processo de aprendizagem é de que algo que o cérebro já aprendeu em uma determinada ocasião, será reaprendido posteriormente com mais facilidade. Esse é uma demonstração do efeito de facilitação de aprendizagem, mediante uma aprendizagem prévia que é chamada de aprender-reaprender (*learn-relearn*).

Outro aspecto importante é a influência da repetição do estímulo sobre os processos de memorização e aprendizagem. Caso haja submissão frequente ao estímulo, acaba se formando uma memória de longa duração (LTM), a respeito da informação transmitida pelo estímulo. Caso contrário, a memória é de curto prazo (STM) e se perde mais facilmente com o passar do tempo. Assim, a atuação do estímulo em alta frequência deve produzir um efeito mais duradouro sobre o dispositivo sináptico do que aquele que atua com menor frequência.

Temos também a facilitação neural, efeito que é interpretado como o fato de que lembrar de um determinado conhecimento é mais fácil do que aprendê-lo. Isso pode ser traduzido pelo efeito de que, uma nova deformação na rede neural, causada por um determinado estímulo, é facilitada pela deformação causada ao repetirmos o estímulo anterior e assim sucessivamente. Esse fenômeno é conhecido como facilitação de pulso emparelhado PPF (paired-pulse facilitation).

Desta forma, as propriedades fundamentais de um dispositivo sináptico devem ser, a capacidade de emular os efeitos citados acima, como memória sensorial (SM) e sua plasticidade, dependente do tempo de duração e da intensidade a partir de um estímulo. O comportamento de experiência de aprendizado, facilitação neural (PPF), memória de curto e longo prazo (STM) e (LTM), respectivamente, [48-53]. Os efeitos e causas dessas propriedades sinápticas são ilustrados em um diagrama na Figura 4.3-2.

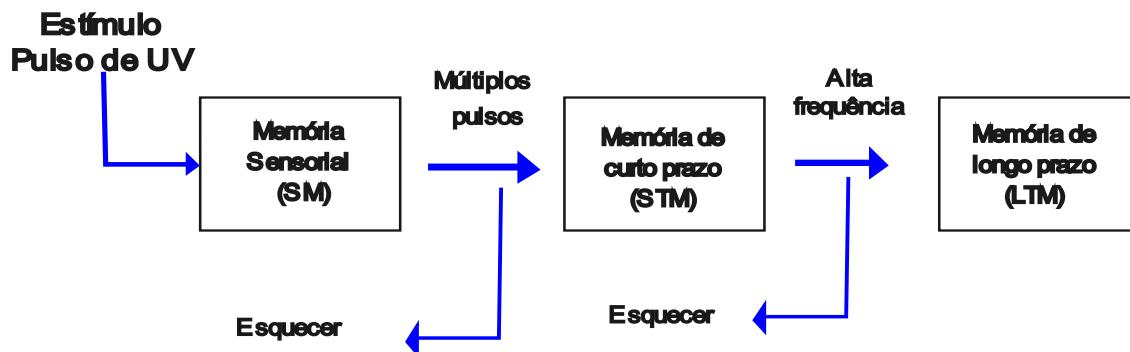


Figura 4.3-2 -Diagrama representativo do modelo psicológico de memória e esquecimento do cérebro humano ao receber um estímulo ou múltiplos estímulos.

Para realizar os testes que nos possibilitam reproduzir as propriedades sinápticas, fizemos a aquisição de dados para os gráficos de corrente  $I_D$ , por tempo, onde expomos a amostra ao LED 355 nm (UV) com a intensidade de  $I_0 = 70\mu\text{w}/\text{cm}^2$ , mantivemos a tensão na porta e entre dreno e fonte constante. As medidas foram realizadas seguindo 7 etapas, em que variamos a frequência de exposição, tempo e intensidade de exposição da amostra sob radiação UV.

Na primeira e segunda medida em um determinado instante, aplicamos um pulso de luz para tempos distintos de exposição ao UV, para observar a dependência da intensidade da corrente com relação ao tempo de exposição a luz, foi escolhido as tensões de  $V_{DS} = 3V$  e  $V_G = -7V$ , simplesmente para estarmos na região de depleção na qual a resposta ao estímulo é mais significativa. A Figura 4.3-3 e Figura 4.3-4, mostram os gráficos com os resultados.

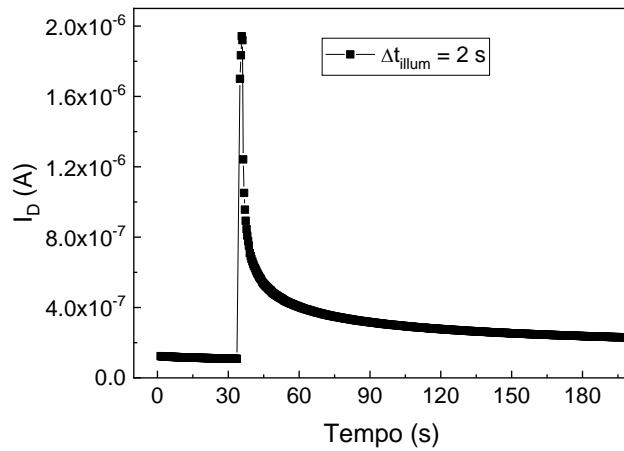


Figura 4.3-3 - Resposta da corrente elétrica  $I_D$  ao estímulo luminoso de 2s no canal do semicondutor de ZnO (sensory memory), mantendo para essa medição  $V_{DS} = 3$  V e  $V_G = -7$  V, usando o LED 355 nm (UV) com a intensidade de  $I_0 = 70\mu\text{w}/\text{cm}^2$ .

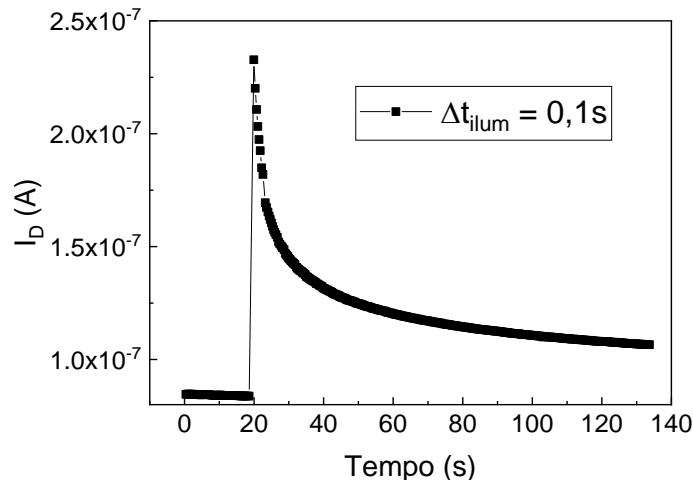


Figura 4.3-4 - Resposta da corrente elétrica  $I_D$  ao estímulo luminoso de 0,1s no canal do semicondutor de ZnO (sensory memory), mantendo para essa medição,  $V_{DS} = 3$  V e  $V_G = -7$  V, usando o LED 355 nm (UV) com a intensidade de  $I_0 = 70\mu\text{w}/\text{cm}^2$ .

Na Figura 4.3-3 mostra-se o comportamento de  $I_D$  frente à incidência de um pulso de luz. Observa-se que a variação na intensidade da corrente supera uma ordem de grandeza, o que se trata de um aspecto importante no que diz respeito à sensibilidade do sistema diante do estímulo. Essa variação é de cerca de 20 vezes a corrente inicialmente no escuro, saindo de uma corrente de  $I_D = 1,08 \times 10^{-7}$  A para uma de  $I_D = 1,98 \times 10^{-6}$  A.

Mesmo um intervalo de tempo de iluminação de somente 100 ms, já é suficiente para provocar uma variação bastante significativa na intensidade de  $I_D$ , aproximadamente 3 vezes, como mostrado na Figura 4.3-4. Adicionalmente, pode-se

perceber que, após cessar o pulso de iluminação, a intensidade de corrente decaiu, porém esse decaimento é mais lento que o aumento provocado pela iluminação. Na Figura 4.3-3 observa-se que, mesmo 200s após a interrupção do pulso luminoso, a intensidade de  $I_D$  ainda é significativamente maior que o seu valor antes da incidência de luz. Essa variação da corrente mediante o pulso luminoso, pode ser relacionada com a memória sensorial (SM), no modelo psicológico de memória e esquecimento do cérebro humano.

Para ter mais clareza das propriedades sinápticas de plasticidade ou peso sináptico, analisamos a resposta para doses diferentes de estímulos. Dados mostrados na Figura 4.3-5.

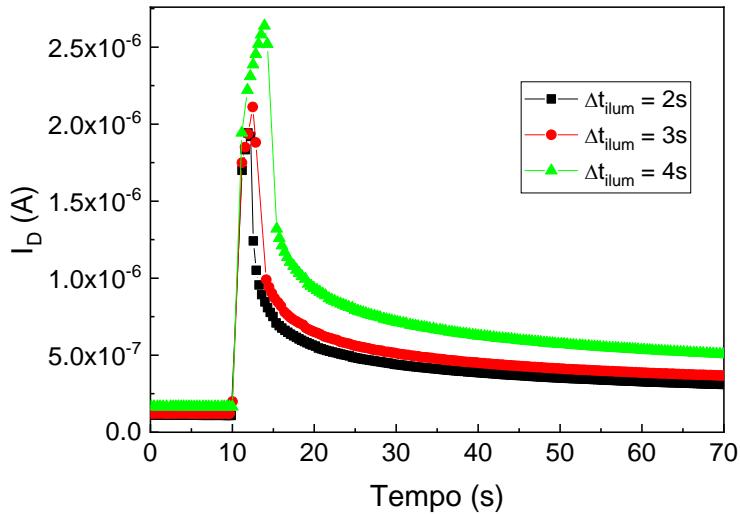


Figura 4.3-5 -Curva de dependência da iluminação com o tempo de dose aplicada, TFT sináptico optoeletrônico, baseado em ZnO. Para essas medidas,  $V_{DS} = 3$  V e  $V_G = -7$  V.

Com essa medida, podemos observar a dependência da resposta da corrente  $I_D$  com relação ao tempo de exposição ao UV. Sendo que, para doses de iluminação maiores, temos intensidade das respostas da corrente. Esse efeito também é observado para intensidades variadas de estímulos, logo, realizamos medidas com intensidades variadas de iluminação,  $I_0$ ,  $0,6I_0$ , e  $0,25I_0$ , no qual  $I_0 = 70\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . A medida da corrente pelo tempo, para a dependência da intensidade luminosa é mostrada da Figura 4.3-6.

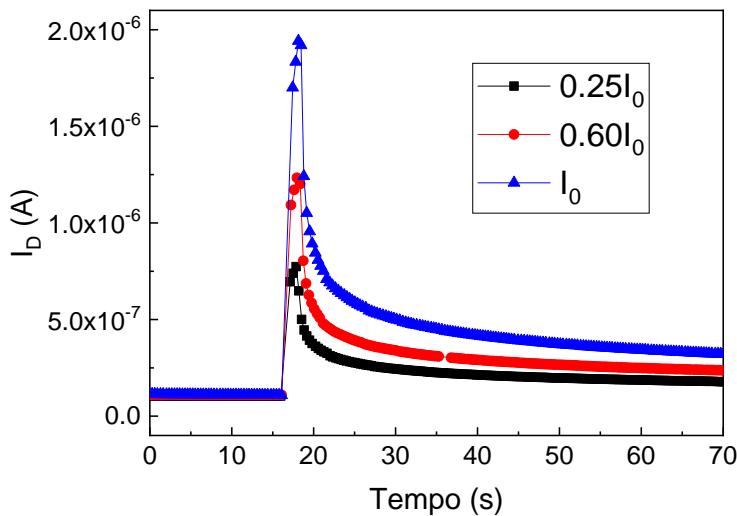


Figura 4.3-6 - Curva de dependência da iluminação, com a intensidade da dose aplicada no TFT sináptico optoeletrônico, baseado em ZnO. Para essas medições,  $V_{DS} = 3\text{ V}$  e  $V_G = -7\text{ V}$  e o tempo de iluminação de 2s.

É interessante observar que o efeito SM é intensificado quando o estímulo é reforçado. No caso do transistor investigado, a variação de intensidade de  $I_D$  é maior, tanto para maiores intensidades de luz no pulso luminoso Figura 4.3-6, quanto para maiores tempos de incidência de luz Figura 4.3-5. Por consequência, também temos maiores efeitos de memória, ou seja, a informação do estímulo estará presente mais tempo no dispositivo. Isso é condizente com o modelo psicológico, como força sináptica ou peso sináptico. Note que, de qualquer forma a retenção de corrente elétrica após a interrupção da luz ainda é significativa em todos os casos, o que também nos retorna o caso de SM.

Na próxima etapa, iluminamos duas vezes a amostra por 2 segundos, com um intervalo entre as exposições ao UV Figura 4.3-7. Analisando o comportamento da corrente perante ao estímo após um determinado tempo é observado o comportamento de facilitação neural.

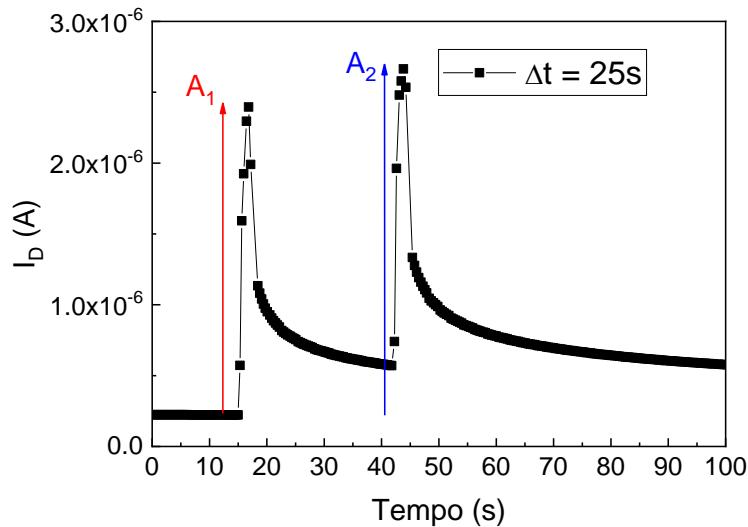


Figura 4.3-7 - Efeito de facilitação neural de pulso emparelhado (PPF) emulado pelo dispositivo sináptico. Demonstrado pela variação da  $I_D$  pelo tempo, quando o intervalo de tempo entre os pulsos de iluminação é de 25s.  $A_1$  e  $A_2$  são os valores de pico de corrente, na incidência do UV. Para essas medições,  $V_{DS} = 3V$  e  $V_G = -7V$  e o tempo de iluminação de 2s.

A Figura 4.3-7 mostra a variação da intensidade de  $I_D$  para os dois pulsos luminosos, quando o intervalo de tempo entre eles foi de 25 s. As intensidades máximas de  $I_D$  após o primeiro pulso ( $A_1 = 2,39 \times 10^{-6} A$ ), e após o segundo pulso ( $A_2 = 2,66 \times 10^{-6} A$ ), nos leva ao fato de que após um certo intervalo de tempo ainda temos informação remanescente da primeira iluminação, e ao realizarmos a exposição da amostra novamente ao UV, ela tem sua resposta aumentada com relação ao mesmo estímulo anterior, isso pelo fato de ocorrer a PPC no filme de ZnO. Isso reproduz o efeito de facilitação neural biológica, em que os estímulos se sobrepõem, aumentando a sua resposta sináptica.

O efeito da facilitação foi investigado no dispositivo repetindo-se o processo, porém variando-se os intervalos de tempo entre os dois pulsos, começando com  $\Delta t = 100s$  entre as exposições à luz, e diminuindo o intervalo de tempo em cada medida, de 15 em 15 segundos até um  $\Delta t = 5s$ . Analisamos então, qual o comportamento da variação da intensidade de corrente com relação ao intervalo de tempo entre os picos (no escuro), em que coletamos as intensidades máximas de  $I_D$  para  $A_1$  e  $A_2$ , e sua razão  $(A_2 - A_1)/A_1$  percentual, como função do intervalo de tempo entre os pulsos luminosos. Os resultados são indicados na Figura 4.3-8.

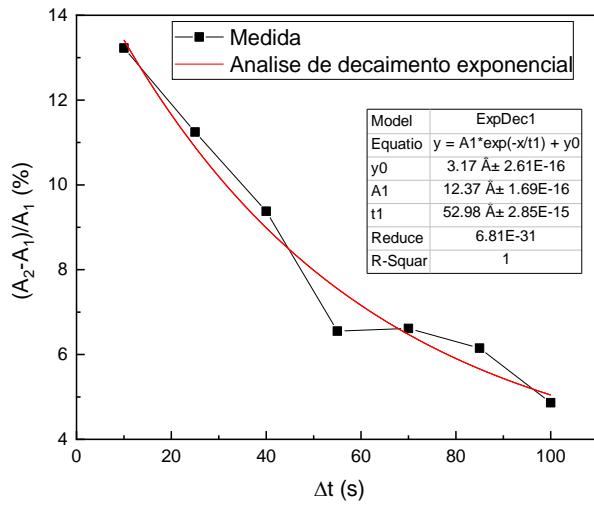


Figura 4.3-8 - Efeito de facilitação de pulso emparelhado (PPF), emulado pelo dispositivo sináptico ZnO-TFT. Medida da variação percentual, entre os picos de iluminação  $A_1$  e  $A_2$  (como na Figura 4.3-7), pelo intervalo de tempo entre os picos. A linha vermelha contínua é um ajuste de decaimento exponencial aos dados experimentais (tempo de iluminação de 2s).

Percebe-se que, à medida que o intervalo de tempo aumenta, o valor do percentual de  $A_2$  em relação a  $A_1$  diminui com uma taxa que pode ser bem aproximada por um decaimento exponencial. Isso demonstra o efeito da facilitação neural, em que o mesmo será maior quanto menor for o intervalo de tempo entre os estímulos de aprendizagem. Esse aspecto é conhecido como *paired-pulse facilitation* (PPF) [27].

Para a próxima análise, realizamos as medidas aplicando pulsos de iluminação, de 2,0s e variamos a frequência em que isso ocorre em um período de 360s, com 0,02 Hz, fizemos a simulação de memória de curto prazo (STM) e com frequência de 0,3 Hz observamos a aquisição de memória de longo prazo (LTM). Como mostra a Figura 4.3-9.

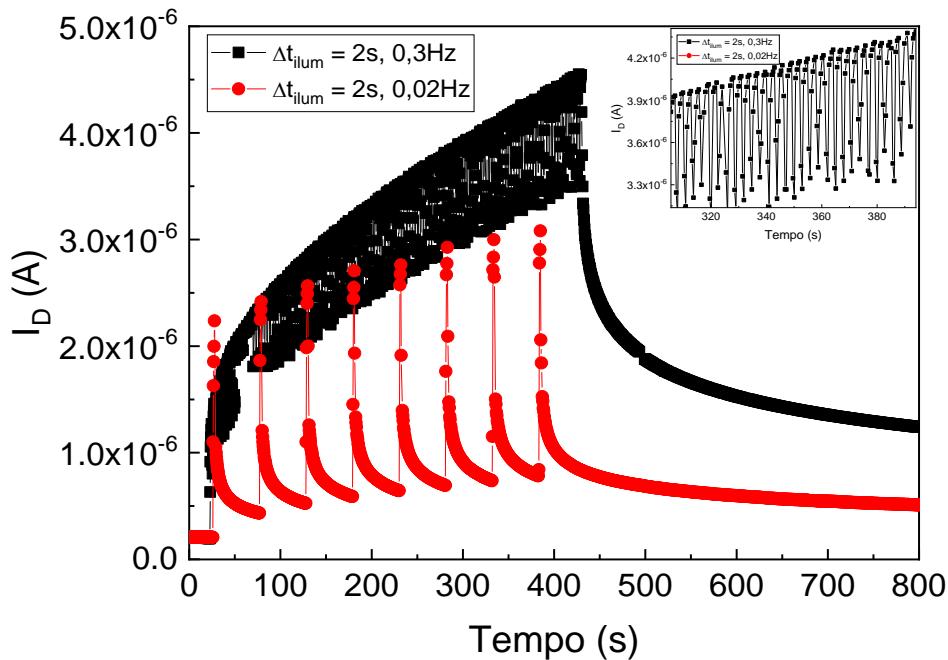


Figura 4.3-9 - Emulação frequência de repetição de iluminação de 0,02 Hz, e frequência de repetição de iluminação de 0,3 Hz, pelo TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO. Imagem inserida: Ampliação de uma região de intervalo de tempo da medida de alta frequência. Para essas medições,  $V_{DS} = 3$  V e  $V_G = -7$  V e picos de iluminação de 2s.

Seguindo o modelo de memória e esquecimento do cérebro humano, o efeito SM pode evoluir para uma memória de curto prazo (STM) mediante a repetição do estímulo. Essa STM, por sua vez, pode ser consolidada como uma memória de longa duração (LTM) se a frequência de repetição do estímulo for suficientemente alta, Figura 4.3-2. Os efeitos STM e LTM foram identificados no dispositivo investigado neste trabalho.

Os resultados de repetição da incidência do pulso luminoso sobre o canal semicondutor são mostrados na Figura 4.3-9. Para uma frequência de repetição baixa (0.02 Hz), a retenção de intensidade de  $I_D = 3,08 \times 10^{-6}$  A é menor que para a alta frequência de repetição  $I_D = 4,55 \times 10^{-6}$  A, simulando uma transição de STM para LTM. Em ambos, as medidas de comportamento de facilitação neural se mostram presentes, como pode ser observado na imagem inserida na Figura 4.3-9.

Na última etapa realizamos a medida aplicando dois pulsos de iluminação, o primeiro com 10s e o segundo até atingirmos a mesma intensidade de corrente da primeira iluminação, para então desligá-lo, (veja Figura 4.3-10).

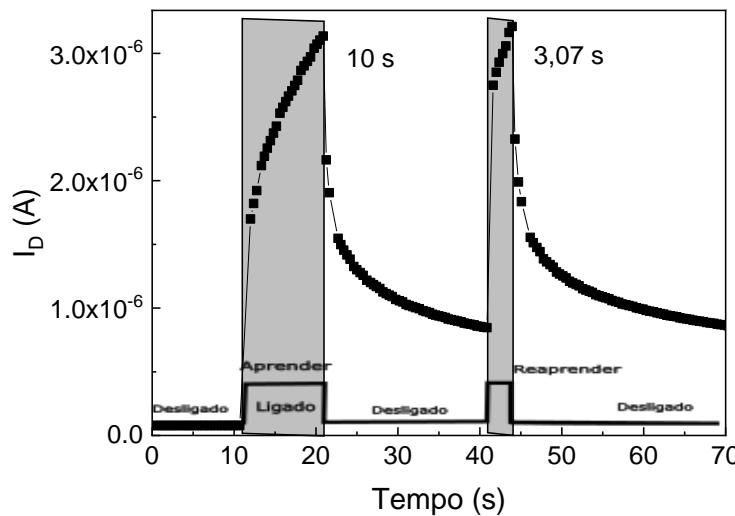


Figura 4.3-10 - Característica de aprendizagem-reaprendizagem (Learning-relearning) do dispositivo sináptico ZnO-TFT. Os retângulos sombreados indicam os tempos de iluminação UV em cada processo, que simulam a etapa de aprendizagem. Para essas medições,  $V_{DS} = 3\text{ V}$  e  $V_G = -7\text{ V}$ .

Um aspecto conhecido no processo de aprendizagem é que algo que já foi apreendido pelo cérebro em uma determinada ocasião, será repreendido posteriormente com mais facilidade. Essa característica de recuperação da aprendizagem também é simulada pelo dispositivo sináptico deste trabalho como mostra a Figura 4.3-10 que contém a mudança da intensidade de  $I_D$  provocada inicialmente por um pulso luminoso com duração de 10s. Com a interrupção do feixe, observamos o decaimento de  $I_D$ , aguardamos então, um intervalo de tempo no escuro de 20s, o suficiente para que  $I_D$  caia até um valor significativamente menor, que o máximo atingido durante o período de iluminação.

Então o dispositivo volta a ser iluminado, e o feixe só é interrompido quando a intensidade de  $I_D$  chega novamente ao máximo obtido durante o processo de iluminação anterior. Como pode ser visto na Figura 4.3-10, o intervalo de tempo de iluminação necessário para provocar o mesmo aumento de corrente  $I_D$ , é significativamente menor no segundo pulso luminoso (3,07s) que no primeiro (10s). Essa é uma demonstração do efeito de facilitação de aprendizagem mediante uma aprendizagem prévia.

Com os resultados discutidos acima, temos o dispositivo de transistor de filme fino com canal semicondutor de óxido de zinco (ZnO), imitando uma sinapse biológica. O mesmo apresenta as propriedades e aspectos de memória sensorial, plasticidade nos neurônios dependendo da intensidade e da dose do estímulo,

facilitação neural, memória de curto e longo prazo e a característica de aprender e reaprender (*learning-relearning*).

Os dados são representativos, outros dispositivos testados neste trabalho são demonstrados como exemplos no Anexo A e B. Os dispositivos com essa capacidade são considerados elementos fundamentais para o desenvolvimento de sistemas computacionais baseados na computação neuromórfica.

#### **4.4 Efeitos do Tratamento Térmico em Filmes de ZnO Depositado por RF - Sputtering**

Nesta seção serão analisadas as características elétricas de filmes de ZnO depositados por *RF-magnetron sputtering* sobre substratos de vidro. Medidas de XPS foram realizadas no sentido de indicar as causas das variações dessas características elétricas quando o filme de ZnO foi submetido a um tratamento térmico a 450 °C por uma hora em atmosfera ambiente.

Na Figura 4.4-1 são mostrados os dados de resistência por folha (em Ohms por quadro, Figura 4.4-1(a) e de condutividade elétrica (Figura 4.4-1(b)) em função do tempo de exposição do filme à radiação UV ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\lambda = 355 \text{ nm}$ ). em atmosfera aberta. Percebe-se que a resistência por folha diminui de cerca de  $850 \Omega/\square$  para aproximadamente  $70 \Omega/\square$  após 200 minutos de irradiação UV. A partir dos dados, observamos uma tendência de saturação no valor de resistência por folha após os 200 minutos de iluminação. A condutividade elétrica mostra uma variação de  $0,005 (\Omega\text{m})^{-1}$  para  $0,06 (\Omega\text{m})^{-1}$  durante o mesmo período de iluminação.

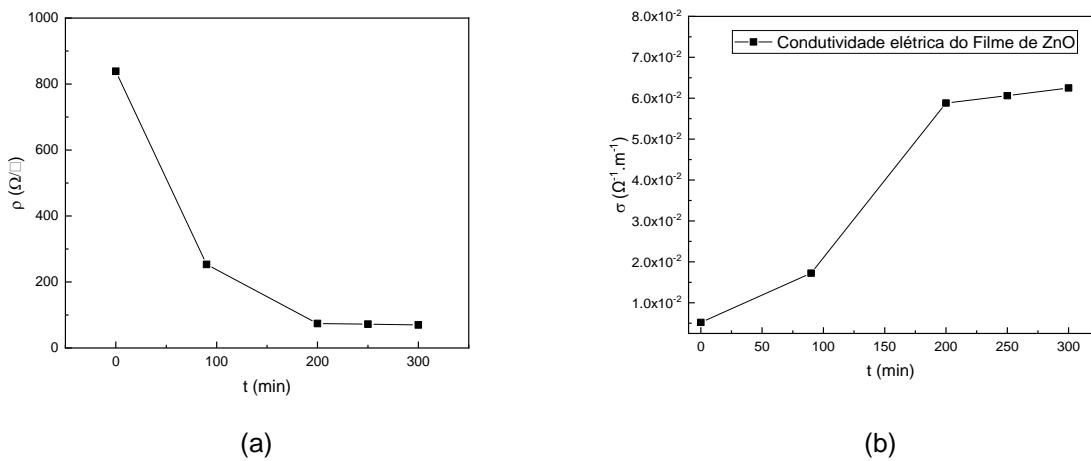


Figura 4.4-1 - Variação da resistência por folha e do filme de ZnO “como depositado” em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W/cm}^2, \lambda = 355 \text{ nm}$ ). (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO “como depositado” em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W/cm}^2, \lambda = 355 \text{ nm}$ ).

Após os 300 minutos de iluminação, a fonte UV foi desligada, e a resistência por folha e condutividade elétricas foram monitoradas mantendo a amostra no escuro (em atmosfera aberta). As variações das grandezas elétricas são mostradas na Figura 4.4-2. Percebe-se que, lentamente, a resistência por folha aumenta, e a condutividade elétrica diminui, à medida que o tempo passa, praticamente recuperando seus valores antes da irradiação UV após cerca de 60 minutos de permanência no escuro. Esse retorno relativamente lento da condutividade elétrica é manifestação do fenômeno de fotocondutividade persistente (PPC) discutido no item 2.2 desta tese.

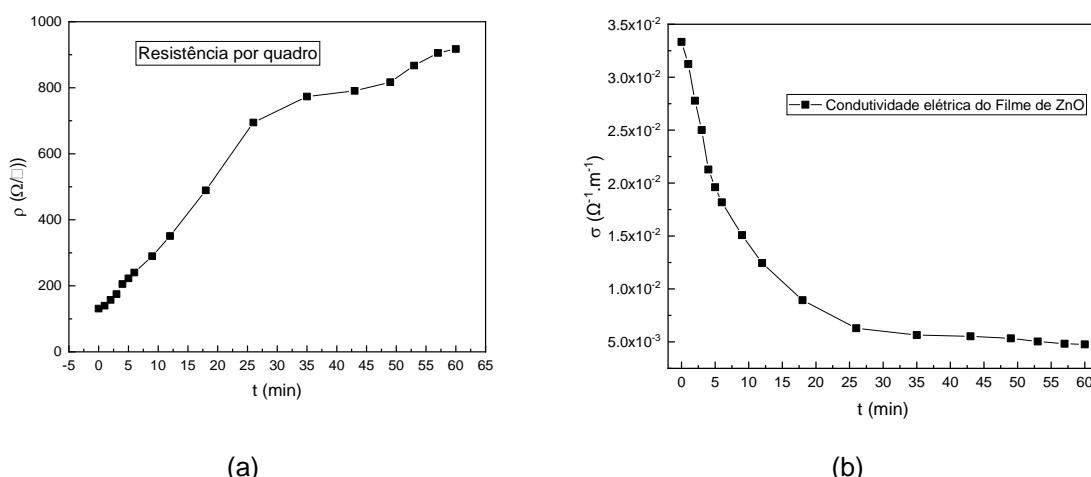
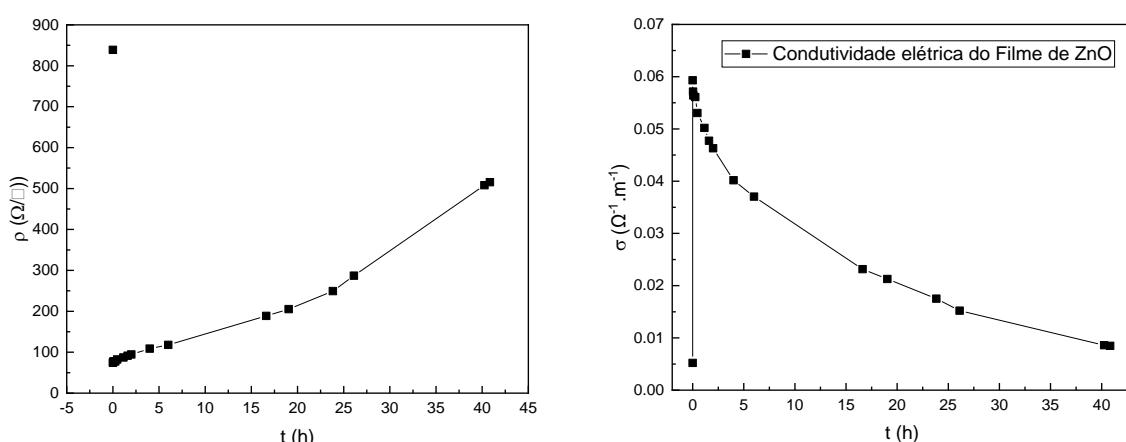


Figura 4.4-2 - Variação da resistência por folha do filme de ZnO “como depositado” após a exposição por 300 min à radiação ultravioleta. (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO “como depositado” após a exposição por 300 min à radiação ultravioleta.

Após a amostra passar pelo tratamento térmico, a superfície do filme de ZnO foi novamente irradiada com luz UV. No entanto, verificou-se uma sensibilidade exacerbada deste filme à influência da iluminação. Somente 10 segundos de irradiação já foram suficientes para causar a mesma variação de resistência por folha do filme que havia sido observada antes do tratamento térmico (neste caso, mediante 200 minutos de irradiação). Esse efeito está mostrado na Figura 4.4-3. Devido a essa variação muito abrupta da resistência por folha (e por conseguinte, da condutividade elétrica), não foi possível monitorar o processo de diminuição da resistência por folha/aumento da condutividade durante o intervalo de tempo de irradiação UV. Na Figura 4.4-3, o ponto inicial dos gráficos de resistência por folha (Figura 4.4-3(a)) e de condutividade elétrica (Figura 4.4-3(b)) dizem respeito ao valor dessas grandezas antes da fonte de luz UV ser ligada.

Após o tempo de irradiação de 10 segundos, a fonte de luz UV foi desligada, e a resistência por folha/condutividade elétrica foi monitorada em função do tempo de permanência da amostra no escuro (em atmosfera aberta). Percebe-se na Figura 4.4-3 que houve uma extensão muito significativa do intervalo de tempo necessário para que essas grandezas retornem aos valores anteriores ao processo de irradiação, quando comparado ao intervalo observado para o filme antes do tratamento térmico. Por exemplo, enquanto a condutividade elétrica retornou ao valor original depois de cerca de 60 minutos após o processo de irradiação antes do tratamento térmico, foram necessários mais que 40 horas de permanência no escuro para que ela voltasse ao valor original depois que o filme foi submetido ao tratamento térmico (veja a Figura 4.4-3(b)).

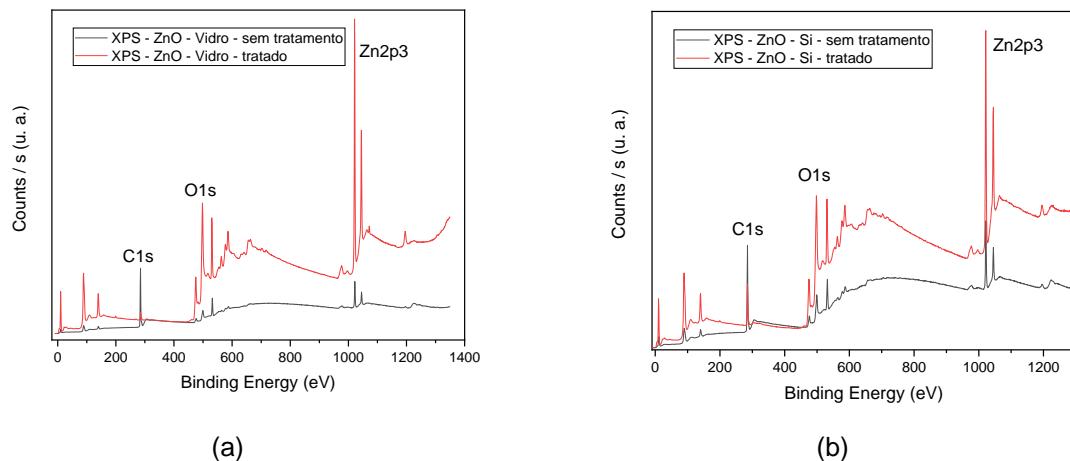


(a) (b)

*Figura 4.4-3 - (a) Variação da resistência por folha do filme de ZnO tratado termicamente após a exposição por 10 s à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\lambda = 355 \text{ nm}$ ). (b) Variação da condutividade elétrica do filme de ZnO tratado termicamente após a exposição por 10 s à radiação ultravioleta ( $I = 23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\lambda = 355 \text{ nm}$ ). O primeiro ponto representa o valor das grandezas antes da exposição ao UV.*

Fica assim evidente que o fenômeno da PPC é muito mais intenso no filme tratado termicamente. Isso também foi constatado nos TFTs de canal de ZnO que foram submetidos ao mesmo tratamento térmico, como será mostrado na próxima seção desta tese.

Com o intuito de buscar informações que pudessem explicar essa mudança tão significativa na intensidade da PPC causada pelo tratamento térmico do filme de ZnO, medidas de XPS foram realizadas tanto no filme como depositado quanto no filme tratado termicamente. Essas medidas são mostradas na Figura 4.4-4(a) para filmes depositados sobre substrato de vidro, e na Figura 4.4-4(b) para filmes depositados sobre substrato de silício. Nas figuras estão indicadas as regiões em energia das transições envolvendo carbono (C<sub>1s</sub>), oxigênio (O<sub>1s</sub>) e Zn (Zn<sub>2p3/2</sub>).



*Figura 4.4-4 - Medidas de XPS do filme de ZnO, antes (curva em preto) e depois (curva em vermelho) do tratamento térmico a 450 °C por 1 hora, depositados sobre substrato de (a) vidro, (b) silício.*

O aspecto geral a ser destacado nesta figura é que, com o tratamento térmico, há um aumento evidente nos sinais de O<sub>1s</sub> e Zn<sub>2p3/2</sub>, ao mesmo tempo que ocorre uma diminuição significativa do sinal referente ao C<sub>1s</sub>.

Nas Figura 4.4-5 e Figura 4.4-6 são comparadas as regiões do O<sub>1s</sub> para os filmes depositados sobre vidro e sobre silício, respectivamente. De acordo com a literatura científica, o sinal O<sub>1s</sub> na região de 520 a 540 eV pode ser deconvoluído em

três gaussianas, centradas em 530,05 eV, 531,13 eV e 532,19 eV, respectivamente, estando relacionadas a átomos de oxigênio nas seguintes ligações [23, 31]:

530,05 eV – ligação de O-Zn na estrutura cristalina do ZnO;

531,13 eV – íons O<sup>2-</sup> em sítios da rede deficientes em oxigênio (defeitos de vacância de oxigênio);

532,19 eV – ligação em hidróxidos absorvidos (por exemplo, OH) e espécies de CO<sub>x</sub> na superfície.

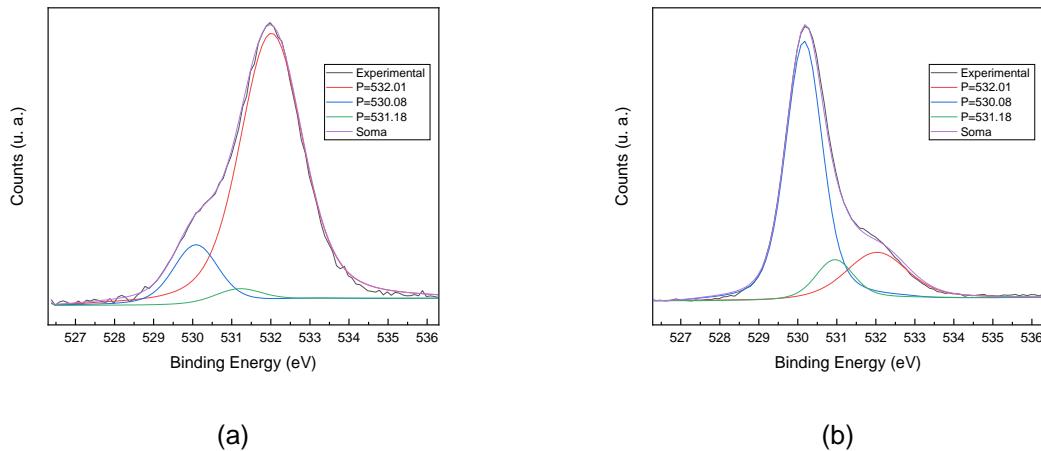


Figura 4.4-5 - Medidas de XPS, análise da região com o pico O1s, com a deconvolução da curva experimental em três gaussianas centradas em 530,08, 531,18 e 532,01 eV, respectivamente. (a) Amostra em substrato de vidro como depositada; (b) Amostra em substrato de vidro após tratamento térmico (450 °C por 1 hora).

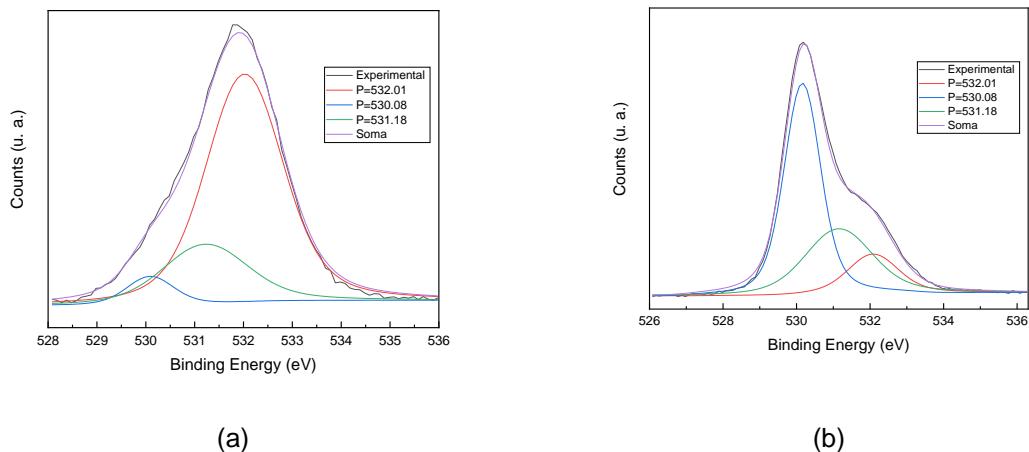


Figura 4.4-6 - Medidas de XPS, análise da região com o pico O1s, com a deconvolução da curva experimental em três gaussianas centradas em 530,08, 531,18 e 532,01 eV, respectivamente. (a) Amostra em substrato de silício como depositada; (b) Amostra em substrato de silício após tratamento térmico (450 °C por 1 hora).

Pode-se perceber uma mudança na intensidade relativa das gaussianas que compõem a banda O<sub>1s</sub> em virtude do tratamento térmico. Se antes do tratamento térmico, a gaussiana centrada em 532 eV é dominante, após o tratamento térmico essa gaussiana perde em intensidade para aquela centrada em 530 eV. Isso provavelmente é decorrência da quebra de ligação dos compostos envolvendo carbono impregnados no filme de ZnO. Como a técnica de XPS é basicamente uma técnica de análise de superfície, os dados indicam que o tratamento térmico provoca uma remoção desses compostos, fazendo com que a banda relacionada ao ZnO prevaleça. Essa hipótese também é corroborada pelo aumento em intensidade dos sinais de O<sub>1s</sub> e Zn<sub>2P3/2</sub> no espectro de XPS, ao mesmo tempo em que se observa a diminuição do sinal na região do C<sub>1s</sub>, como observado na Figura 4.4-5. Havendo a remoção dos compostos de carbono da superfície do filme, os sinais provenientes dos átomos de oxigênio e zinco se tornam mais intensos.

Compostos de carbono, como hidrocarbonetos, podem ser introduzidos durante a deposição do filme de ZnO devido à contaminação da câmara de “sputtering” com vapor de óleo da bomba de vácuo do sistema. A detecção e presença de compostos de carbono é bem reportada na literatura científica para filmes depositados por *RF-magnetron sputtering* [54-56].

No entanto, também é possível que a banda em 531,1 eV – relacionada às vacâncias de oxigênio – tenha aumentado em intensidade relativa depois do tratamento térmico. De fato, isso é difícil de mensurar pela comparação da banda O<sub>1s</sub> antes e depois do tratamento térmico, devido ao aumento considerável da intensidade deste sinal como um todo após o tratamento. Entretanto, a remoção de compostos envolvendo o carbono pode gerar novos defeitos (inclusive vacâncias) na rede do ZnO. Esses efeitos somados têm o potencial de aumentar significativamente os centros de vacância e de superfície que reagem com os pares elétron-buraco gerados pela incidência de luz com energia maior que o *band gap* do ZnO, como discutido na Seção 2.2 desta tese. Isso explicaria tanto a maior sensibilidade do ZnO à irradiação UV, quanto o reforço significativo da fotocondutividade persistente observada nos filmes tratados termicamente, em comparação com os filmes como depositados. Visto dessa forma, o tratamento térmico poderia ser um parâmetro adicional no controle da PPC em dispositivos sinápticos baseados em filmes de ZnO depositados por *RF-magnetron sputtering*.

## 4.5 Transistor de Filme Fino com Tratamento Térmico

Discutir-se-á a partir desse momento, medidas e análises já comentadas em capítulos anteriores, porém, agora para dispositivos tratados termicamente. Esse tratamento foi realizado à uma temperatura de 450° C por um período de uma hora, após o processo de deposição do ZnO, as demais etapas da construção do dispositivo são exatamente idênticas as citadas na discussão acima. O objetivo com o tratamento, é demonstrar e comparar com os filmes sem tratamento, a equivalência das medidas de fotocondutividade persistente e sinapse optoeletrônica.

Iniciaremos mostrando as análises elétricas do dispositivo, na Figura 4.5-1 são apresentadas as curvas de saída do TFT com canal semicondutor de ZnO. A curva de transferência desse dispositivo é mostrada na Figura 4.5-2, e a tabela com os parâmetros de caracterização na Tabela 4.5-1.

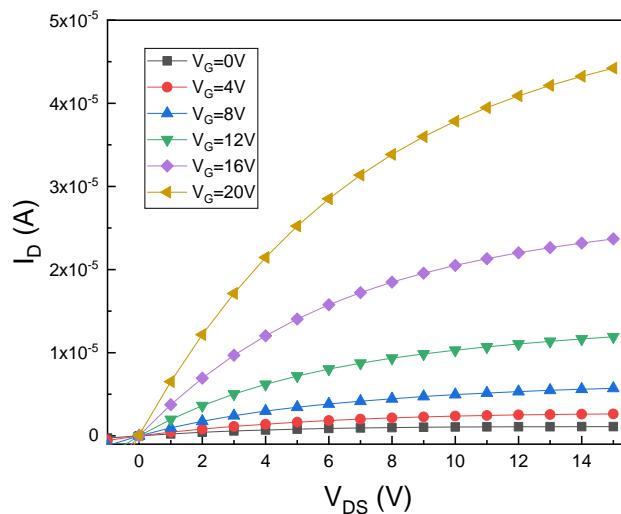


Figura 4.5-1 - Curvas de saída do transistor de filme fino, com canal de ZnO, tratado termicamente. As tensões aplicadas na porta variaram de 0V a 20V.

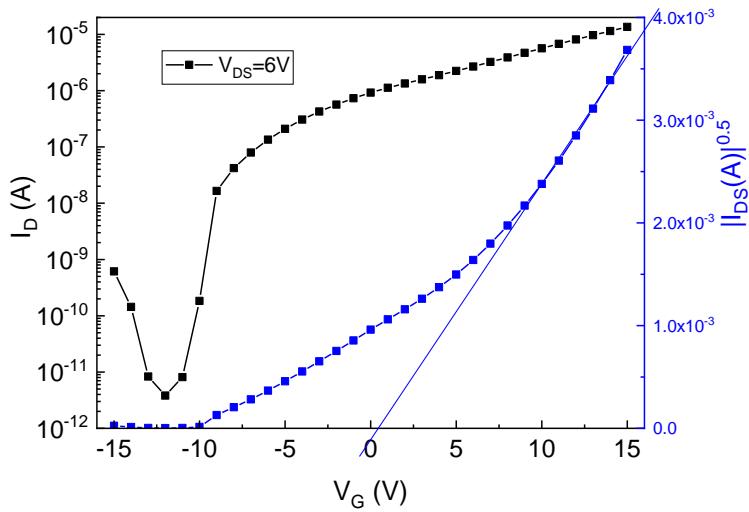


Figura 4.5-2 - Curvas de transferência do TFT com canal de ZnO, tratado termicamente. Curva na cor preta indica a medida na escala logarítmica e a azul apresenta o módulo da corrente  $I_D$ . A tensão aplicada entre dreno e fonte foi de  $V_{DS} = 6V$

Tabela 4.5-2 - Parâmetros elétricos do transistor, extraídos de sua curva de transferência mostrada na Figura 4.5-2.

Material	$V_{TH}$ (V)	$\mu_{EF}$ ( $cm^2/Vs$ )	$\mu_{sat}$ ( $cm^2/Vs$ )	SS (V/década)	$I_{on/off}$
ZnO	0,44	$2,62 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-3}$	0,62	$3,50 \times 10^6$

Da curva de transferência são obtidos os parâmetros listados na Tabela 4.5-2. Esses parâmetros caracterizam o TFT baseado no filme de ZnO, e como os dispositivos sem tratamento, se apresentam adequados para a aplicações em circuitos eletrônicos.

Realizaremos então, na amostra tratada termicamente, as medidas com exposição ao LED 355nm, produzidas da mesma maneira que na seção anterior. Entretanto a intensidade do LED foi alterada, pois os dispositivos estavam extremamente sensíveis ao UV. Para essa situação a intensidade utilizada foi de  $0,15I_0 = 10,5\mu W/cm^2$ .

Repetiu-se a medida da curva de transferência no escuro e após a exposição da amostra ao UV por 0,1s, o resultado é demostrado na Figura 4.5-3.

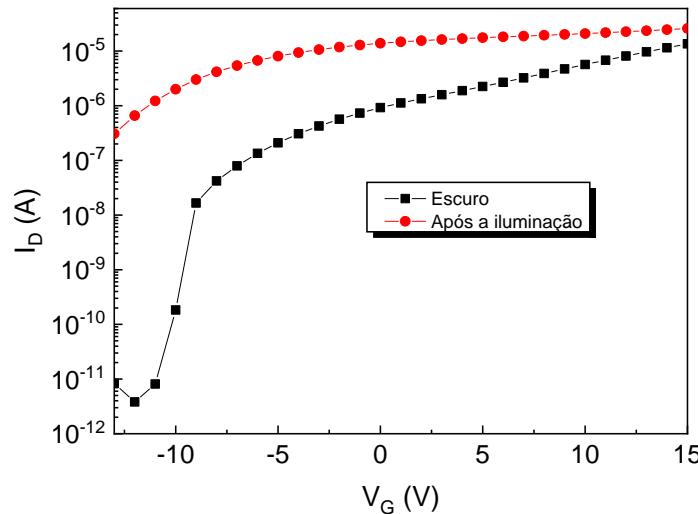


Figura 4.5-3 - Curva de transferência do TFT de canal de ZnO, aplicando uma tensão  $V_{DS}=6V$ . Antes da iluminação e após 0,1s de iluminação. A fonte de luz usada foi um LED emitindo em 355nm, com intensidade de  $10,5\mu W/cm^2$ .

Após a iluminação, o dispositivo apresenta características semelhantes ao sem tratamento, em que na região de acumulação apresentou uma corrente praticamente constante para a variação de  $V_G$  e na região de depleção obteve uma resposta muito mais intensa.

Para demonstrar o efeito de PPC, realizamos medidas de corrente pelo tempo, expondo o dispositivo ao LED 355nm por um dado tempo e analisando o seu decaimento. Demostramos essa medida na Figura 4.5-4,

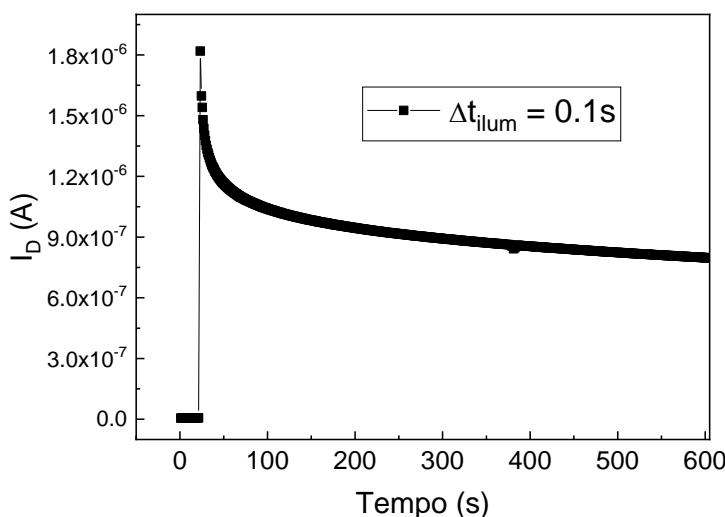


Figura 4.5-4 - Resposta da corrente elétrica  $I_D$  ao estímulo luminoso de 0,1s no canal do semicondutor de ZnO. Mantendo para essa medição  $V_{DS} = 6 V$  e  $V_G = -10 V$ , (região de depleção).

Na Figura 4.5-4 se mostra o comportamento de  $I_D$  frente à incidência de um pulso de luz. Onde iniciamos a medida de corrente pelo tempo, e após 21s iluminamos a amostras por 0,1s. Com essa iluminação obtivemos uma corrente entre fonte e dreno de  $I_D = 1,08 \times 10^{-6}$ . Também podemos observar que, a variação na intensidade da corrente após 600s diminui, para  $I_D = 7,98 \times 10^{-7} A$ . Podemos perceber que, após cessar o pulso de iluminação, a intensidade de corrente decai, porém esse decaimento é mais lento que o aumento provocado pela iluminação do dispositivo sem tratamento térmico. Essa variação da corrente, mediante o pulso luminoso também pode ser relacionada com a memória sensorial. Comparamos os resultados das amostras com e sem tratamento, veja a Figura 4.5-5.

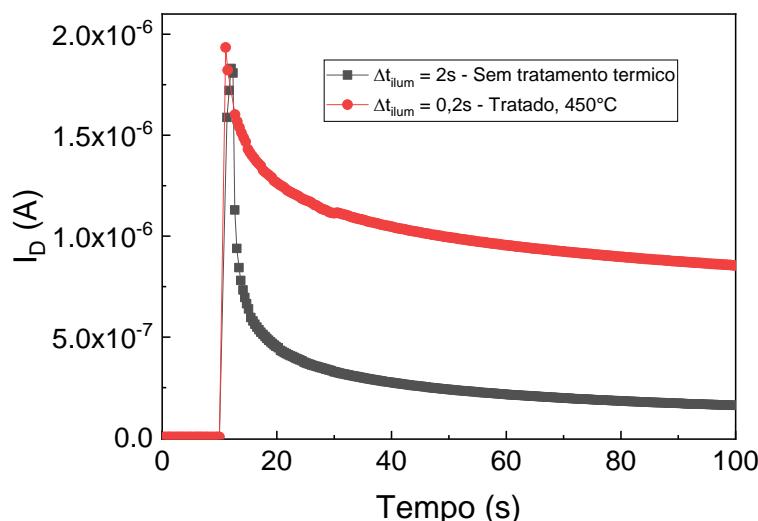


Figura 4.5-5 - Curva da variação da corrente pelo tempo. Medidas de TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO com e sem tratamento térmico.

Em ambas medidas, o comportamento de PPC está presente, comparando os resultados das amostras, temos um efeito significativo para a corrente da amostra tratada, tendo em vista que ela recebeu uma dose de exposição 10 vezes menor com uma intensidade de 15% da intensidade de iluminação da amostra sem tratamento térmico.

Portanto observamos a demonstração de um alto comportamento de PPC, comparado com a amostra sem tratamento térmico, uma alta sensibilidade diante de um estímulo, que é um aspecto importante no que diz respeito a sinapses optoeletrônicas. Também podemos observar o efeito de memória SM.

Realizamos também, medidas para verificar as propriedades sinápticas de plasticidade. Analisamos a resposta para doses diferentes de estímulos, aplicamos  $\Delta t_{ilum} = 0,1s, 0,2s$  e  $0,3s$  de iluminação e repetimos o procedimento anterior, de medir a corrente entre dreno e fonte pelo tempo. Os dados obtidos estão expostos na Figura 4.5-6

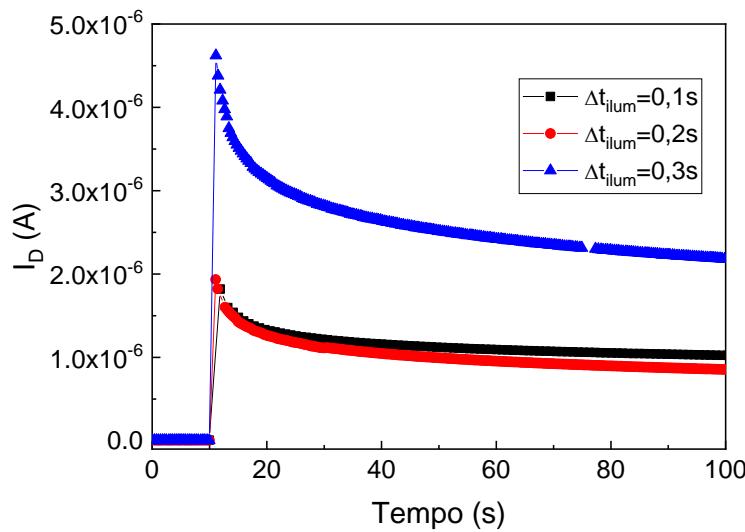


Figura 4.5-6 - - Curva da variação da corrente pelo tempo. Medidas da dependência a dose de tempo de iluminação aplicada, TFT sináptico optoeletrônico baseado em ZnO. Para essas medições,  $V_{DS} = 6$  V e  $V_G = -9$  V.

Com essa medida observamos a dependência da resposta da corrente  $I_D$  com relação ao tempo de exposição ao UV. Sendo que, para doses de iluminação maiores temos respostas mais significativas. Também há a elevada característica de PPC e a plasticidade sináptica decorrente da variação do estímulo aplicado, ou seja, uma alteração ou intensificação da SM. Assim como, para as amostras sem tratamento térmico. Entretanto, ressalta-se que a dose de iluminação é 10 vezes menor nessas amostras.

Na próxima etapa iluminamos duas vezes a amostra por 0,5s com um intervalo entre as exposições ao UV de  $\Delta t = 100s$  Figura 4.5-7

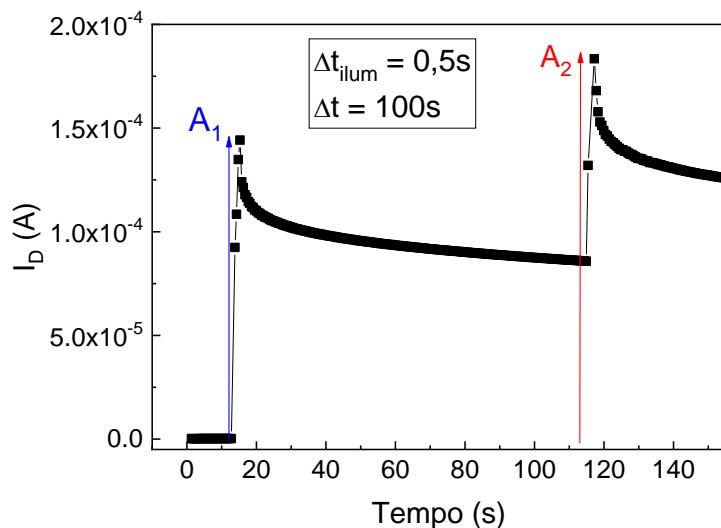


Figura 4.5-7 - Efeito de facilitação neural de pulso emparelhado (PPF), emulado pelo dispositivo sináptico. Demonstrado pela variação da corrente pelo tempo, para um intervalo de tempo entre os pulsos de iluminação de 100s.  $A_1$  e  $A_2$  são os valores de pico de  $I_D$  após cada de  $I_D$  após cada incidência de pulso. Para essa medição,  $V_{DS} = 6$  V e  $V_G = -9$  V e picos de iluminação de 0,5s.

A Figura 4.5-7 mostra a variação da intensidade de  $I_D$  para os dois pulsos luminosos, quando o intervalo de tempo entre eles é de 100s. As intensidades máximas de  $I_D$  após o primeiro pulso ( $A_1 = 1,44 \times 10^{-4} A$ ) e após o segundo pulso ( $A_2 = 1,83 \times 10^{-4} A$ ). Portanto, após um intervalo de tempo, ainda temos informação remanescente da primeira iluminação. Expondo a amostra novamente ao UV, temos um aumento significativo na corrente com relação ao pico anterior.

Desse modo, temos a apresentação do efeito de facilitação neural, ocorrendo também no dispositivo tratado termicamente. Ressaltamos, o fato de que a variação da corrente entre os picos é cerca de 200 vezes maior, comparado com o dispositivo discutido na seção anterior e a PPC é ainda mais persistente.

Para a próxima análise, realizamos as medidas aplicando pulsos de iluminação, de 0,2s e variamos a frequência em que isso ocorre dentro de um período de 360s, com 0,02 Hz para STM e com frequência de 0,3 Hz para LTM, como mostra a Figura 4.5-8

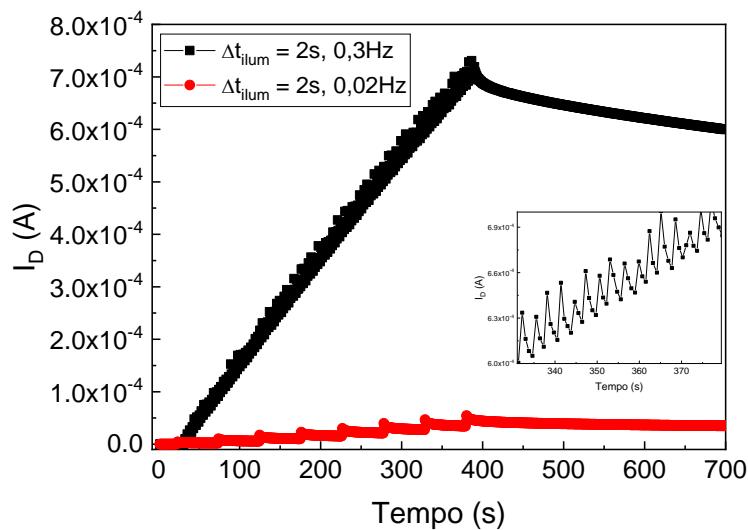


Figura 4.5-8 - Medida de corrente entre fonte e dreno pelo tempo, aplicando uma frequência de repetição de iluminação de 0,02 Hz e 0,3 Hz. Imagem inserida: Ampliação da medida de alta frequência em uma região de intervalo de tempo. Para essas medições,  $V_{DS} = 9$  V e  $V_G = -9$  V e picos de iluminação de 0,2s.

Os efeitos STM e LTM foram identificados no dispositivo investigado neste trabalho. Os resultados de repetição da incidência do pulso luminoso sobre o canal semicondutor, para uma frequência de 0,02 Hz, mostra um acúmulo de correntes, que geram uma intensidade de  $I_D = 5,47 \times 10^{-5}$  A, que é menor do que o observado para a alta frequência de repetição  $I_D = 7,20 \times 10^{-4}$  A, simulando uma transição de STM para LTM.

Em ambas medidas, o comportamento de facilitação neural está presente, como pode ser observado na imagem inserida na Figura 4.5-8. Comparando com o resultado da amostra sem tratamento térmico, temos um efeito muito significativo para o acúmulo de corrente, onde uma amostra apresentou um aumento de corrente 1,5 vezes maior, da baixa para a alta frequência, comparando amostras com e sem tratamento térmico, a que recebeu o tratamento apresenta uma intensidade quase 10 vezes maior para os efeitos de memória de curto e longo prazo, com uma dose de exposição 10 vezes menor e uma intensidade de 15% da intensidade de iluminação inicial.

Com o tratamento térmico, temos um dispositivo apresentando as propriedades para emular a sinapse com elevada fotossensibilidade e fotocondutividade persistente. De certo modo, é uma melhora significativa dos resultados para um transistor de filme fino de canal de óxido de zinco, sináptico

optoeletrônico. Além disso, seu processo de fabricação é simples, pensando que o silício já se trata de um elemento comercial. Embora o transistor não seja o dispositivo de estrutura mais simples, observamos que é vantajoso, pois a intensidade da sinapse emulada pode ser, a princípio, controlada pela tensão da porta. Entretanto, temos pontos negativos apresentados nesses dispositivos discutidos no trabalho, um deles é o fato de não possuirmos maneiras de zerar ou mesmo baixar a corrente fotogerada, instantaneamente. Isso nos leva a um processo lento para a realização das medidas, pois ele necessita de um certo tempo para retornar às condições iniciais. Esse fato é mais significativo quanto maior for o efeito de fotocondutividade persistente, como no caso dos dispositivos tratados termicamente. Portanto, pode-se tornar o dispositivo muito mais difícil de se trabalhar.

Houve também a realização da comparação entre alguns dispositivos reportados na literatura com dois dos nossos dispositivos, um tratado e o outro sem tratamento térmico, o resultado é visto na Tabela 4.5-3.

*Tabela 4.5-3 - Comparação de alguns dispositivos sinápticos na literatura.*

Material fotoativo	Estrutura do dispositivo	Tratamento térmico	Fotossensibilidade	Ref.
ZnO	Si/SiO <sub>2</sub> /ZnO/Al TFT	Não realizado	$\Delta I_D=20$ for $\Delta t_{ilum}=2$ s ( $I_{ilum}=70 \mu W/cm^2$ )	Esta tese
ZnO	Si/SiO <sub>2</sub> /ZnO/Al TFT	450°C/1h	$\Delta I_D=320$ for $\Delta t_{ilum}=0,2$ s ( $I_{ilum}=10,5 \mu W/cm^2$ )	Esta tese
ZnO	Si/SiO <sub>2</sub> /ZnO/Ti/Au “two-terminal device”	500 °C/6 h sob atmosfera de oxigênio	$\Delta I_D=1.9$ for $\Delta t_{ilum}=1$ s ( $I_{ilum}=1.5 mW/cm^2$ )	[23]
ZnO nanowire	Si/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TAO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZnO NW/Ti/Au TFT	720 °C sob atmosfera de oxigênio	$\Delta I_D=0.3$ for $\Delta t_{ilum}=1$ s ( $I_{ilum}=134 \mu W/cm^2$ )	[57]
IGZO	Si/SiO <sub>2</sub> /IGZO/IZO TFT	350 °C/1 h	$\Delta I_D=3.5$ for $\Delta t_{ilum}=25$ s ( $I_{ilum}=0.6 mW/cm^2$ )	[58]
IAZO	Si/SiO <sub>2</sub> /a-IAZO/ITO TFT	300 °C/0.5 h	$\Delta I_D=1.5$ for $\Delta t_{ilum}=1$ s ( $I_{ilum}=0.1 mW/cm^2$ )	[59]
ITZO	Si/SiO <sub>2</sub> /ITZO/Al TFT	350 °C/1 h	$\Delta I_D=4.5$ for $\Delta t_{ilum}=60$ s ( $I_{ilum}$ não reportada)	[60]

Na Tabela 4.5-3 comparamos alguns dispositivos sinápticos optoeletrônicos em relação ao material fotoativo, estrutura do dispositivo, requisitos de pós-tratamento térmico e característica de fotossensibilidade. No qual  $\Delta I_D$  representa a variação da corrente entre dreno fonte quando o dispositivo está sob iluminação UV, o termo  $\Delta t_{ilum}$  são o tempo de iluminação e  $I_{ilum}$  é a intensidade de

irradiação UV aplicada no dispositivo. Podemos observar a relevante variação de corrente na comparação dos dispositivos apresentados no trabalho com os demais, principalmente o tratado termicamente.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados transistores de filme fino (TFT) construídos sobre substrato de silício ( $n+$ ) tendo como dielétrico um filme de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e como semicondutor um filme de óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ). Os mesmos apresentaram comportamento de transistor com parâmetros característicos para a utilização em circuitos eletrônicos. O filme de  $\text{ZnO}$ , com espessura de cerca de 100 nm, foi depositado por *RF-magnetron sputtering*, e apresentou um efeito de fotocondutividade persistente (PPC) quando iluminado com radiação de energia maior que seu *band-gap*.

O filme de  $\text{ZnO}$  foi caracterizado, apresentando  $E_g = 3,22 \text{ eV}$ , uma cristalografia de rede hexagonal com pico de difração de  $34,07^\circ$  com orientação planar na direção (002). O filme também apresenta propriedades de fotocondutividade persistente, após à exposição à iluminação com o LED 355nm. Esse efeito foi constatado pelo rápido aumento da condutividade do filme após a iluminação, e um decréscimo realizada de maneira muito mais lenta.

Obtivemos o efeito de PPC também nos TFTs, em que a amplitude da fotocondutividade pode ser controlada por meio da aplicação da tensão de porta do dispositivo, tendo assim maiores variações na região de depleção e menores na região de acumulação. Os TFTs com canal semicondutor de  $\text{ZnO}$  apresentaram assim propriedades optoeletrônicas que os capacitaram para emular uma sinapse fotossensível. As medidas de intensidade da corrente fotoinduzida  $I_D$  estabelecida entre os terminais de dreno e fonte do transistor, em função da intensidade da iluminação, do tempo de incidência de luz UV, e da frequência com que o feixe de luz incide no canal semicondutor, mostram que esse dispositivo apresenta propriedades que permitam que ele seja utilizado como uma sinapse optoeletrônica. Além disso, os dispositivos têm a capacidade de reproduzir propriedades de memória sensorial, plasticidade da memória, facilitação neural, memória de curto e longo prazo, e características de aprender e reaprender.

Com o tratamento térmico obtivemos um dispositivo apresentando as mesmas propriedades para emular a sinapse, porém, com uma elevada fotossensibilidade e fotocondutividade persistente. Através das medidas de XPS, foi possível observar que o tratamento térmico provocou diminuição significativa do sinal

envolvendo compostos de carbono. A hipótese é que o processo de tratamento térmico provocou a quebra das ligações químicas de hidrocarbonetos no filme, produzindo muito mais centros susceptíveis à interação com a radiação UV, tanto na superfície quanto no volume do filme de ZnO.

Dispositivos com essa capacidade são considerados elementos fundamentais para o desenvolvimento de sistemas computacionais baseados na computação neuromórfica, que atualmente se configura como o novo paradigma para sobrepor os gargalos dos sistemas computacionais baseados na estrutura de Von Neumann.

A continuidade desta linha de pesquisa, com a finalidade de trabalhos futuros, será baseada nas construções de outros tipos de dispositivos com o semicondutor de ZnO, como os memristores, analisando os efeitos da fotocondutividade persistente e propriedades sinápticas, e procurar desenvolver esses dispositivos sobre substratos flexíveis.

## REFERÊNCIAS

1. Kowaltowski, T., *Von Neumann: suas contribuições à Computação*. Estudos Avançados, 1996. **10**: p. 237-260.
2. Godfrey, M.D. and D.F. Hendry, *The computer as von Neumann planned it*. IEEE Annals of the History of Computing, 1993. **15**(1): p. 11-21.
3. Moore, G.E. *Progress in digital integrated electronics*. in *Electron devices meeting*. 1975. Washington, DC.
4. Leiserson, C.E., et al., *There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law?* Science, 2020. **368**(6495): p. eaam9744.
5. Wang, W.S. and L.Q. Zhu, *Recent advances in neuromorphic transistors for artificial perception applications*. Science and Technology of Advanced Materials, 2023. **24**(1): p. 2152290.
6. Kazanskiy, N.L., M.A. Butt, and S.N. Khonina, *Optical computing: Status and perspectives*. Nanomaterials, 2022. **12**(13): p. 2171.
7. Liu, Q., *Comparisons of Conventional Computing and Quantum Computing Approaches*. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2023. **38**: p. 502-507.
8. Ivanov, D., et al., *Neuromorphic artificial intelligence systems*. Frontiers in Neuroscience, 2022. **16**: p. 1513.
9. Acharya, R., et al., *Overcoming I/O bottleneck in superconducting quantum computing: multiplexed qubit control with ultra-low-power, base-temperature cryo-CMOS multiplexer*. arXiv preprint arXiv:2209.13060, 2022.
10. IBM Quantum Computing. 2023.
11. Mead, C., *Neuromorphic electronic systems*. Proceedings of the IEEE, 1990. **78**(10): p. 1629-1636.
12. Guo, W., et al., *Neural coding in spiking neural networks: A comparative study for robust neuromorphic systems*. Frontiers in Neuroscience, 2021. **15**: p. 638474.
13. Kim, C.-H., et al., *Emerging memory technologies for neuromorphic computing*. Nanotechnology, 2018. **30**(3): p. 032001.
14. Thakur, D., J.K. Saini, and S. Srinivasan, *DeepThink IoT: The Strength of Deep Learning in Internet of Things*. Artificial Intelligence Review, 2023: p. 1-68.
15. Bear, M.F., B.W. Connors, and M.A. Paradiso, *Neurociências: desvendando o sistema nervoso*. 2017: Artmed editora.
16. Kavehei, O., et al. *The fourth element: Insights into the memristor*. in *2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems*. 2009. IEEE.
17. Jeong, H. and L. Shi, *Memristor devices for neural networks*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018. **52**(2): p. 023003.

18. Strukov, D.B., et al., *The missing memristor found.* nature, 2008. **453**(7191): p. 80-83.
19. Zahoor, F., et al., *Resistive random access memory: introduction to device mechanism, materials and application to neuromorphic computing.* Discover Nano, 2023. **18**(1): p. 36.
20. Li, Y. and G. Shen, *Advances in optoelectronic artificial synapses.* Cell Reports Physical Science, 2022.
21. Lee, G.H., et al., *Effect of weight overlap region on neuromorphic system with memristive synaptic devices.* Chaos, Solitons & Fractals, 2022. **157**: p. 111999.
22. Shi, L., et al., *Research progress on solutions to the sneak path issue in memristor crossbar arrays.* Nanoscale Advances, 2020. **2**(5): p. 1811-1827.
23. Xiao, W., et al., *High photosensitivity light-controlled planar ZnO artificial synapse for neuromorphic computing.* Nanoscale, 2021. **13**(4): p. 2502-2510.
24. Xu, W., et al., *Organometal halide perovskite artificial synapses.* Advanced Materials, 2016. **28**(28): p. 5916-5922.
25. Wu, Q., et al., *Photoelectric plasticity in oxide thin film transistors with tunable synaptic functions.* Advanced Electronic Materials, 2018. **4**(12): p. 1800556.
26. Wang, G., et al., *Simulation of retinal ganglion cell response using fast independent component analysis.* Cognitive Neurodynamics, 2018. **12**(6): p. 615-624.
27. Lee, G.J., et al., *Bioinspired artificial eyes: optic components, digital cameras, and visual prostheses.* Advanced Functional Materials, 2018. **28**(24): p. 1705202.
28. Cho, S.W., et al., *Progress of Materials and Devices for Neuromorphic Vision Sensors.* Nano-Micro Letters, 2022. **14**(1): p. 1-33.
29. Petti, L., et al., *Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics.* Applied Physics Reviews, 2016. **3**(2): p. 021303.
30. Brinzari, V., *Mechanism of band gap persistent photoconductivity (PPC) in SnO<sub>2</sub> nanocrystalline films: Nature of local states, simulation of PPC and comparison with experiment.* Applied Surface Science, 2017. **411**: p. 437-448.
31. Wu, P., et al., *Instability induced by ultraviolet light in ZnO thin-film transistors.* IEEE Transactions on Electron Devices, 2014. **61**(5): p. 1431-1435.
32. Rezende, S.M., *Materiais e dispositivos eletrônicos.* 2004: Editora Livraria da Física.
33. Peterson, A.H. and S.M. Sawyer, *Oxygen Adsorption and Photoconduction Models for Metal Oxide Semiconductors: A Review.* IEEE Sensors Journal, 2021. **21**(15): p. 16409-16427.
34. Sze, S.M., Y. Li, and K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices.* 2021: John wiley & sons.
35. Kwon, J.Y. and J.K. Jeong, *Recent progress in high performance and reliable n-type transition metal oxide-based thin film transistors.* Semiconductor Science and Technology, 2015. **30**(2): p. 024002.

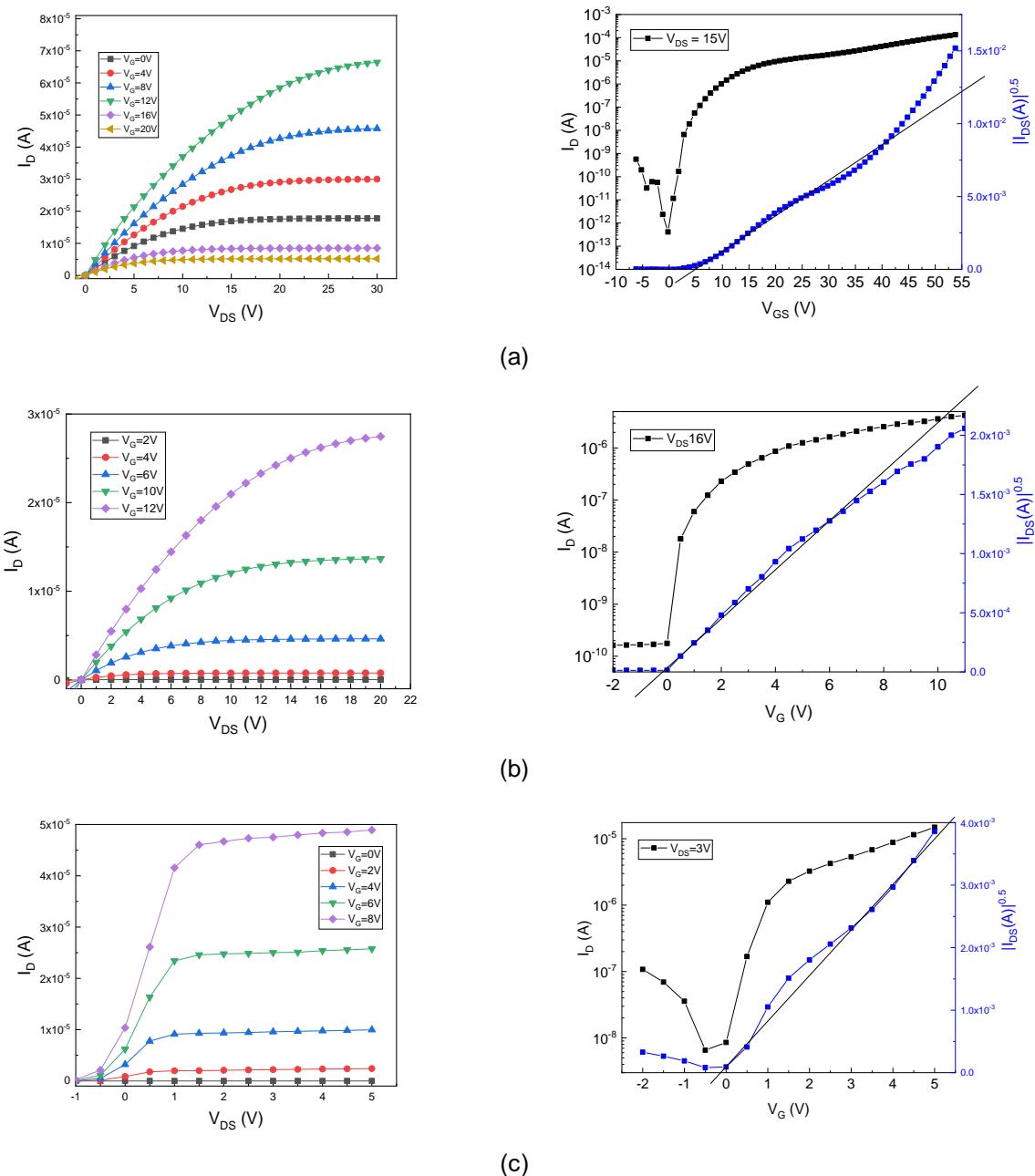
36. Shichman, H. and D.A. Hodges, *Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1968. **3**(3): p. 285-289.
37. Correia, A.P.P., et al., *Thin-film transistors. A Second-Order ΣΔ ADC Using Sputtered IGZO TFTs*, 2016: p. 5-15.
38. Brotherton, S.D., *Introduction to thin film transistors: Physics and Technology of TFTs*. 2013: Springer Science & Business Media.
39. Ngwashi, D.K., T.A. Mih, and R.B. Cross, *The influence of ZnO layer thickness on the performance and electrical bias stress instability in ZnO thin film transistors*. Materials Research Express, 2020. **7**(2): p. 026302.
40. Schroder, D.K., *Semiconductor material and device characterization*. 2015: John Wiley & Sons.
41. Ouyang, Z., et al., *Research Progress of p-Type Oxide Thin-Film Transistors*. Materials, 2022. **15**(14): p. 4781.
42. Barquinha, P.M.C., *Transparent oxide thin-film transistors: production, characterization and integration*. 2010, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).
43. Fortunato, E., P. Barquinha, and R. Martins, *Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances*. Advanced materials, 2012. **24**(22): p. 2945-2986.
44. Lee, J.-H., et al., *Introduction to flat panel displays*. 2020: John Wiley & Sons.
45. Sun, F., et al., *Flexible artificial sensory systems based on neuromorphic devices*. ACS nano, 2021. **15**(3): p. 3875-3899.
46. Melnick, D.A., *Zinc oxide photoconduction, an oxygen adsorption process*. The Journal of Chemical Physics, 1957. **26**(5): p. 1136-1146.
47. Cho, B.Y., J. Jung, and M. Erez. *Accelerating bandwidth-bound deep learning inference with main-memory accelerators*. in *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. 2021.
48. Okano, H., T. Hirano, and E. Balaban, *Learning and memory*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000. **97**(23): p. 12403-12404.
49. López, J.C., *A fresh look at paired-pulse facilitation*. Nature Reviews Neuroscience, 2001. **2**(5): p. 307-307.
50. Seung, H.S., *Half a century of Hebb*. Nature neuroscience, 2000. **3**(11): p. 1166-1166.
51. Langford, J. and A. Wilson, *J. Appl. Cryst.* 1978.
52. Jeong, M.-Y. and J.W. Wu, *Temporally stable and continuously tunable laser device fabricated using polymerized cholesteric liquid crystals*. Japanese Journal of Applied Physics, 2012. **51**(8R): p. 082702.
53. Zucker, R.S. and W.G. Regehr, *Short-term synaptic plasticity*. Annual review of physiology, 2002. **64**(1): p. 355-405.

54. Kuo, F.-L., et al., *Workfunction tuning of zinc oxide films by argon sputtering and oxygen plasma: an experimental and computational study*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012. **45**(6): p. 065301.
55. Noakes, T., et al., *Oxygen plasma cleaning of copper for photocathode applications: A MEIS and XPS study*. Vacuum, 2022. **205**: p. 111424.
56. Mohamed, S., A. Abd El-Rahman, and M.R. Ahmed, *Investigation of zirconium oxynitride thin films deposited by reactive pulsed magnetron sputtering*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007. **40**(22): p. 7057.
57. Shen, C., et al., *ZnO nanowire optoelectronic synapse for neuromorphic computing*. Nanotechnology, 2021. **33**(6): p. 065205.
58. Lee, M., et al., *Brain-inspired photonic neuromorphic devices using photodynamic amorphous oxide semiconductors and their persistent photoconductivity*. Advanced Materials, 2017. **29**(28): p. 1700951.
59. Yang, R., et al., *Optoelectronic Artificial Synaptic Device Based on Amorphous InAlZnO Films for Learning Simulations*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022. **14**(41): p. 46866-46875.
60. Kim, J., et al., *Light-stimulated artificial photonic synapses based on solution-processed In-Sn-Zn-O transistors for neuromorphic applications*. Journal of Alloys and Compounds, 2022. **903**: p. 163873.

## ANEXOS

### ANEXO A – Transistores de Filme Fino

Apresentamos na Figura A-1 os dados obtidos da medida de corrente entre fonte e dreno pela tensão  $V_{DS}$  e também pela tensão no *gate*, que são curvas de saída e transferência respectivamente, para diversos dispositivos testados neste trabalho. A intenção é verificar a reprodutibilidade dos TFT produzidos.



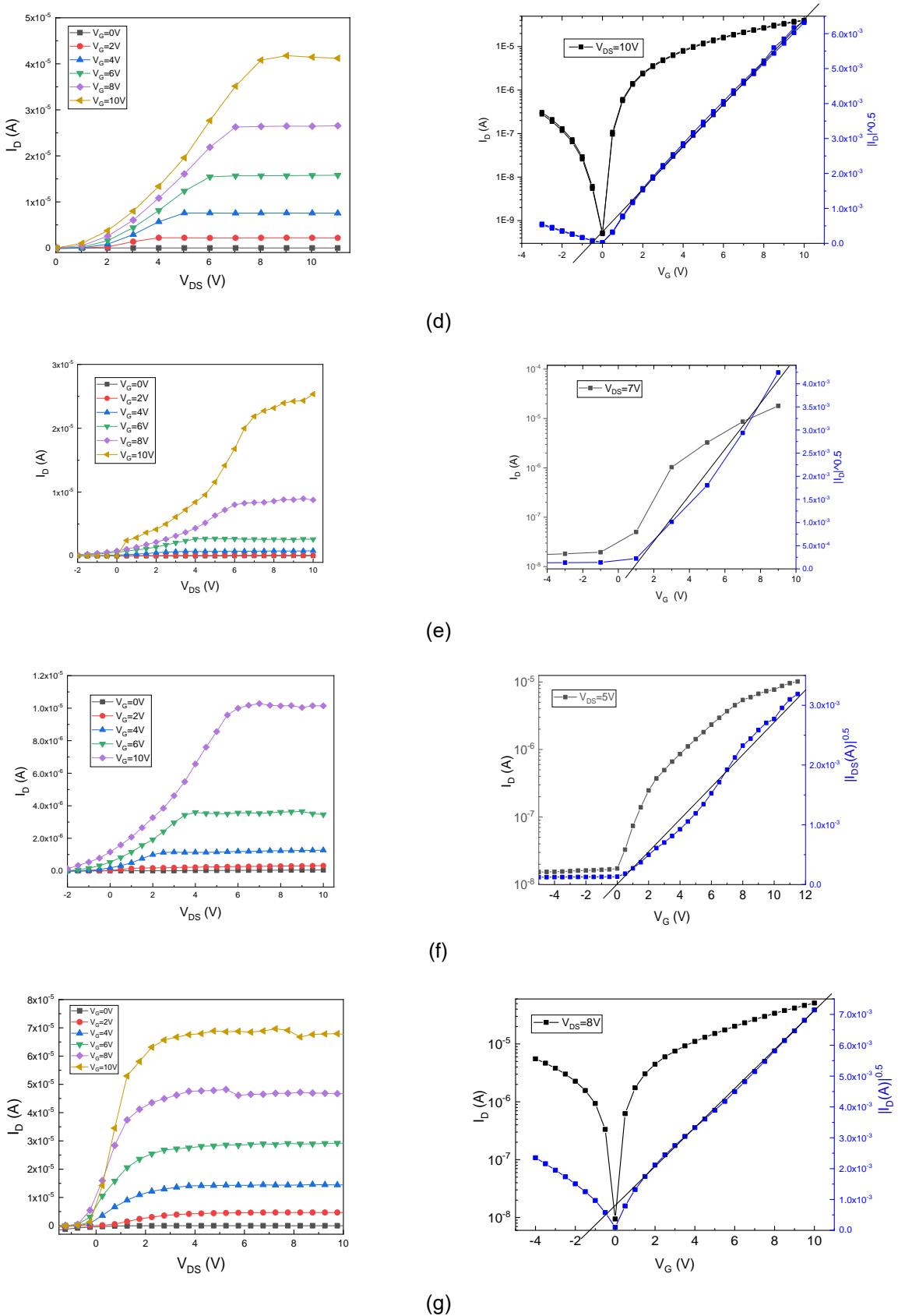


Figura A-1 – Gráficos de saída e de transferências de diversas amostras de transistores de filme fino. Cada linha corresponde a um TFT em específico.

## ANEXO B – Reprodutibilidade das Propriedades Sinápticas dos TFT

Com a Figura B-1, B-2 e B-3 temos a resposta à iluminação UV para dispositivos de transistores sinápticos equivalentes, de modo a testar a reprodutibilidade das propriedades de sinapse optoeletrônica nos TFT. Todos os dispositivos testados apresentaram os comportamentos sinápticos.

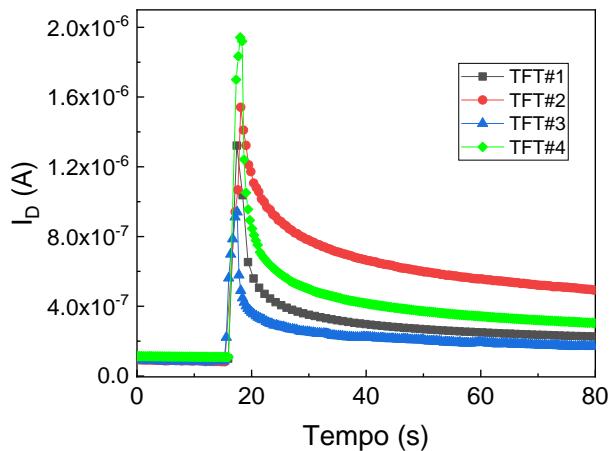


Figura B-1 – Variação do  $I_D$  com o tempo após 2s de iluminação com o UV. Resposta à iluminação UV para quatro transistores sinápticos equivalentes de modo a testar a reprodutibilidade do efeito. Todos foram expostos a um tempo de iluminação de 2 s. Apresentando curvas correspondentes a quatro transistores.

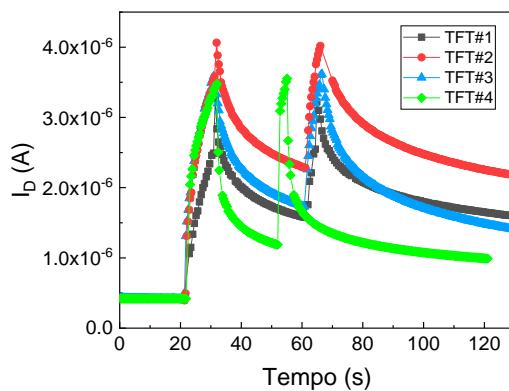


Figura B-2 Variação do  $I_D$  com o tempo. Reprodução em todos os dispositivos da propriedade de aprender e reprender como mostrado na Figura 4.3-10. Todos os dispositivos testados apresentaram os comportamentos sinápticos. Apresentando curvas correspondentes a quatro transistores.

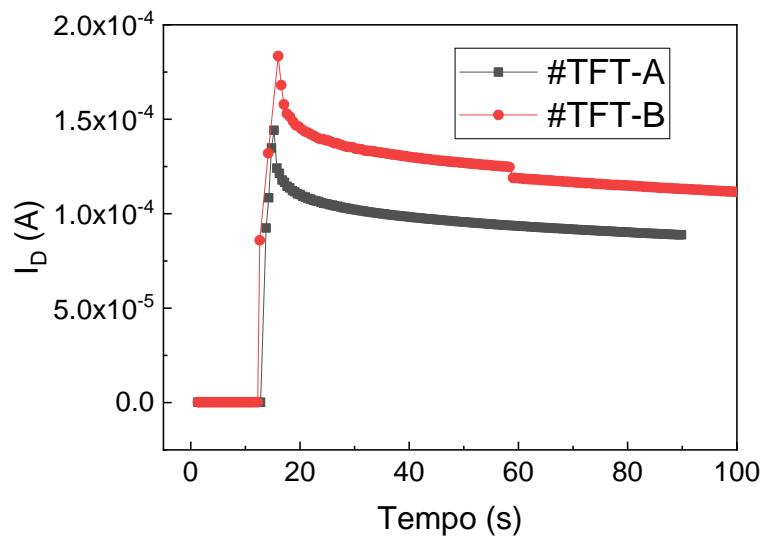


Figura B-3 Variação do  $I_D$  com o tempo após 0,2s de iluminação com o UV. Resposta à iluminação UV de dois transistores sinápticos equivalentes, tratados termicamente a 450° C por uma hora, de modo a testar a reproduzibilidade dos mesmos.

**ANEXO C - Trabalho Relacionado Diretamente a TESE**

Applied Physics A (2023) 129:203  
<https://doi.org/10.1007/s00339-023-06490-8>

**Applied Physics A**  
Materials Science & Processing

**A synaptic device based on the optoelectronic properties of ZnO thin film transistors**

José Henrique Ferreira Nobre<sup>1</sup> · Amer Samir Safade<sup>1</sup> · Alexandre Urbano<sup>1</sup> · Edson Laureto<sup>1</sup>

Received: 23 September 2022 / Accepted: 13 February 2023 / Published online: 21 February 2023  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH, DE part of Springer Nature 2023