

Projeto para Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPEM

Título: Desenvolvimento de Transistores de Filmes Ultrafinos para Sinapse Artificial

Pesquisador Responsável: Dr. Rafael Furlan de Oliveira

Unidade do CNPEM: Laboratório Nacional de Nanotecnologia – LNNano

Introdução

Com menos de 20 W de consumo de energia, o cérebro humano – a mais perfeita “máquina” existente para o processamento de informações – oferece capacidade de processamento que excede a marca dos petaflops, superando os supercomputadores de última geração em várias ordens de magnitude em termos de eficiência energética e volume [1]. Sua incrível capacidade em processar rapidamente informações paralelas, estruturas complexas de pensamento, coordenar tomadas de decisão, etc. tem motivado pesquisadores a “imitar” a natureza, ao propor o desenvolvimento de sistemas artificiais inspirados nos princípios operacionais do cérebro [1]. Nos últimos anos, presenciamos grandes avanços no campo do aprendizado de máquina, que já fornece desempenho semelhante ao humano em áreas como reconhecimento de fala e objetos, atuação em jogos estratégicos, etc. [2]. Entretanto, em termos de *hardware*, i.e., dos dispositivos físicos que permitam se equiparar a eficiência da rede complexa de neurônios do cérebro humano, ainda estamos distantes de competir com os sistemas neurais biológicos, principalmente em termos de recursos de processamento de informações em tempo real com consumo de energia comparável.

No cérebro humano, a informação é recebida, processada, e transmitida por estruturas complexas (*network*) de inúmeros neurônios integrados entre si através de impulsos elétricos e sinalização química (sinapse, Fig. 1a), cuja extensão pode chegar a 10^{15} conexões [3]. Em sistemas artificiais, essa é uma tarefa dos circuitos elétricos e seus dispositivos eletrônicos integrados (Fig. 1b). A tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), composta por transistores de efeito de campo complementares integrados para a execução de funções lógicas, embora dominante na construção de microprocessadores modernos, não consegue fornecer facilmente algumas das características inerentes à rede neurobiológica, como plasticidade de longo prazo [3,4]. Neste sentido, muitos esforços têm se concentrado no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos baseados em novos materiais, como filmes ultrafinos (< 10 nm de espessura) de semicondutores orgânicos e inorgânicos, e materiais bidimensionais (2D) [5]. O desenvolvimento de dispositivos neurais artificiais para a computação neuromórfica é um caminho promissor para a próxima

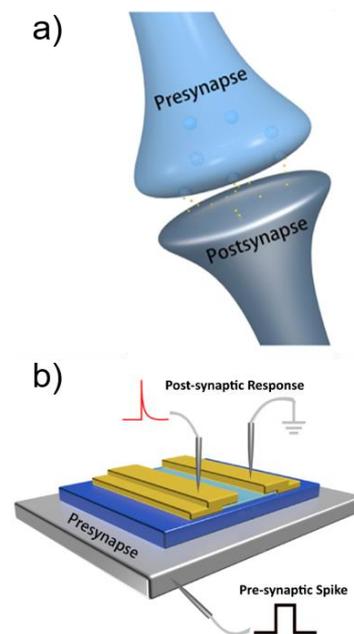


Fig. 1 Sinapse (a) biológica via neurônios e (b) artificial em um transistor.

geração de sistemas de computação inteligente. Neste projeto, fabricaremos e avaliaremos a resposta de transistores de filmes (ultra)finos – TFTs, em inglês – de semicondutores orgânicos e inorgânicos em relação as suas funções sinápticas como corrente pós-sináptica excitatória (EPSC, em inglês), pulso pareado de facilitação (PPF, em inglês) e potencial de longo prazo (LTP, em inglês). Avaliaremos como a resposta dos dispositivos aqui propostos se equiparam ao estado da arte e quais estratégias seriam aplicáveis para alavancar seu desempenho, tornando-os competitivos para emulação de sinapse artificial.

Estado da Arte

O conceito de computação neuromórfica foi proposto no final dos 1980, mas limitações no desenvolvimento de novos materiais e dispositivos adiaram seu progresso até a última década [3]. Nestes últimos 10 anos, houve uma acelerada exploração na fabricação e desenvolvimento de dispositivos para essa finalidade (Fig. 2) [3,4]. Podemos dividir os principais dispositivos neuromórficos entre aqueles com 2 e 3 terminais, como memristors e TFTs, respectivamente. Em particular os TFTs, estes são considerados atrativos por serem dispositivos muito

sensíveis a estímulos elétricos de pequena intensidade, como os potenciais elétricos disparados por neurônios (*action potentials*), que são da ordem de 100 mV [3]. Recentemente, diversos materiais semicondutores foram empregados como camada ativa em TFT para a sinapse artificial, como óxidos metálicos, polímeros condutores, semicondutores moleculares e materiais 2D [5]. Em particular, a natureza ultrafina de filmes moleculares ou de materiais 2D protege os TFTs da perda de desempenho por processos de difusão ao longo do material semicondutor e armadilhas de carga no volume. As principais figuras de mérito (FoM) que permitem quantificar o desempenho de transistores sinápticos são o índice PPF, o tempo de retenção da resposta do dispositivo, seu consumo de energia, além da capacidade deste em desempenhar mais de uma função sináptica (viz. EPSC, PPF, LTP, etc). Por ser um campo novo, não há um consenso quanto a relação entre FoMs, função sináptica, e desempenho nestes dispositivos. Portanto, esta é uma área que oferece diversas oportunidades para a pesquisa fundamental, visando entender como estímulos elétricos semelhantes a sinapse podem ser recebidos e transmitidos por TFTs.

Objetivos

Fabricar transistores de filmes ultrafinos de materiais orgânicos e/ou inorgânicos e avaliar seu desempenho na emulação de sinapse artificial por medidas elétricas.

Metodologia

A metodologia a ser empregada neste trabalho consiste na fabricação de TFTs e na avaliação da sua resposta em relação a estímulos elétricos específicos relacionados a

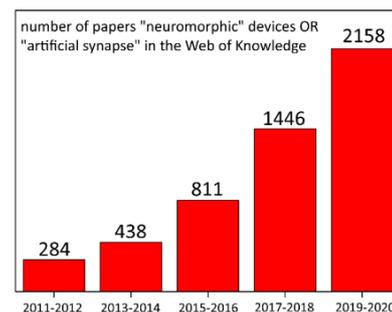


Fig. 2 Número de artigos publicados na última década em dispositivos neuromórficos.

sinapse artificial. Em relação a sua fabricação, TFTs serão produzidos por métodos convencionais de litografia óptica em configuração de *gate* na base e contatos no topo (Fig. 3a). Como material ativo no canal, utilizaremos filmes (ultra)finos (< 10 nm de espessura) a partir de moléculas semicondutoras orgânicas e planares como rubreno e pentaceno (Fig. 3b), ou ainda o material 2D viz. óxido de grafeno reduzido (rGO), depositados respectivamente por evaporação térmica e *self-assembly*. Estes materiais são reconhecidamente utilizados em TFTs do tipo *p*- e ambipolares, respectivamente. Como dielétrico do *gate*, utilizaremos filmes de óxido de alumínio (Al₂O₃) depositado por ALD (*atomic layer deposition*) que, devido sua elevada constante dielétrica ($k = 9$), bandgap amplo (~ 8.8 eV), e quando em espessuras muito finas (< 10 nm), permite operar TFTs em tensões de *gate* < 2V e baixas correntes de fuga (nA) e, portanto, com baixo consumo de energia. Os contatos metálicos de fonte (S) e dreno (D) se darão por eletrodos de Au. Uma vez certificada a fabricação e operação bem-sucedida destes transistores, por meio de suas características de corrente-tensão ($I_{DS} \times V_{GS}$) denominada curva de transferência, avaliaremos o desempenho dos TFTs fabricados em relação a sua resposta sináptica do tipo EPSC (Fig. 3c), PPF (Fig. 3d) e LTP (Fig. 3e). Em TFTs, estas funções sinápticas nada mais são que a resposta elétrica transiente (viz. corrente entre terminais de fonte e dreno) do dispositivo mediante a estímulos elétricos intermitentes aplicados ao terminal de *gate* do transistor. Análises de desempenho serão feitas à luz do estado da arte, visando produzir TFTs sinápticos eficientes.

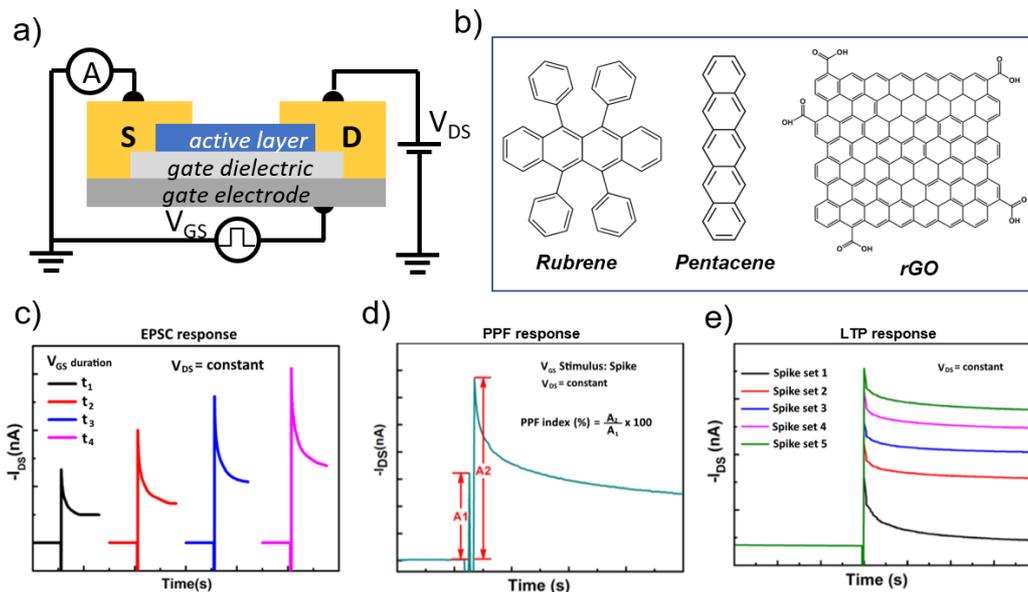


Fig. 3 (a) Transistor de filme ultrafino com *gate* na base e contatos no topo. (b) estrutura química do rubreno, pentaceno e óxido de grafeno reduzido (rGO). Resposta genérica de transistores de filmes finos em termos de as suas funções sinápticas como (c) EPSC (*excitatory post-synaptic current*), (d) PPF (*paired pulse facilitation*) e (e) LTP (*long-term potentiation*).

Referências Bibliográficas

- [1]. Boybat, I. et al, *Nature Communication*, 9, 2514 (2018).
- [2] LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G., *Nature* 521, 436–444 (2015).
- [3] Yu, H. et al, *Small*, 17, 2000041 (2021).
- [4] Ielmini, D. & Ambrogio, S., *Nanotechnology*, 31, 092001 (2019).
- [5] Yang, Q. et al, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 8672-8681 (2021).