

Estudo de transistores orgânicos de efeito de campo com porta eletrolítica

Study of electrolyte-gated organic field-effect transistors

RESUMO

Henrique Schavarski
schavarski@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Douglas José Coutinho
douglasjcoutinho@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Com o crescente avanço da área de eletrônica orgânica, além de aplicações na fabricação de dispositivos eletrônicos, há uma nova vertente para a área, relacionada aos biossensores. Os materiais eletrônicos orgânicos possuem a capacidade de biocompatibilidade, propriedade esta fundamental para a transdução de sinais elétricos e iônicos. Este trabalho tem por objetivo fabricar e investigar as propriedades elétricas de um transistor orgânico de efeito de campo com porta eletrolítica (*electrolyte-gated organic field-effect transistor - EGOFET*). Propõe-se fabricar dispositivos com terminais dreno e fonte do transistor composto de um filme fino interdigitado de ouro. A camada semicondutora, será formada por um polímero semicondutor, variando entre P3HT e PCDTBT. A camada dielétrica será composta por uma solução aquosa e como eletrodo de porta será adotado um fio condutor de Ag/AgCl. Entre as propriedades que serão avaliadas estão a tensão de chaveamento do transistor (VG), tensão de dreno (VD), a corrente de condução do canal, entre outras. Com este trabalho, se propõe mostrar um transistor orgânico de efeito de campo, dotado de boa performance, com os qual pretende-se gerar a competência necessária para a fabricação de outros dispositivos para aplicação em biossensores.

PALAVRAS-CHAVE: Polímeros. Detectores. Semicondutores.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

ABSTRACT

With the growing advance in the area of organic electronics, in addition to applications in the manufacture of electronic devices, there is a new trend for the area, related to biosensors. Organic electronic materials have the ability to biocompatibility, a fundamental property for the transduction of electrical and ionic signals. This work aims to manufacture and investigate the electrical properties of an electrolyte-gated organic field-effect transistor (EGOFET). It is proposed to manufacture devices with drain and source terminals of the transistor composed of an interdigitated thin film of gold. The semiconductor layer will be formed by a semiconductor polymer, varying between P3HT and PCDTBT. The dielectric layer will be composed of an aqueous solution and an Ag / AgCl conducting wire will be used as the gate electrode. Among the properties that will be evaluated are the transistor switching voltage (VG), drain voltage (VD), the conduction current of the channel, among others. With this work, it is proposed to show an organic field effect transistor, with good performance, with which it is intended to generate the necessary competence for the manufacture of other devices for application in biosensors.

KEYWORDS: Polymers. Detectors. Semiconductors.



INTRODUÇÃO

A eletrônica é de importância fundamental nos dias atuais, resultado de anos de pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas do conhecimento, tais como a química, física e engenharia de materiais e ganha especial importância a partir da criação do transistor, em 1947 (BARDEEN; BRATTAIN, 1948).

O transistor é uma das peças fundamentais da eletrônica por ter como função o chaveamento, que é a possibilidade de um de seus contatos alterar o estado da passagem de corrente pelos outros dois demais contatos entre aberto e fechado; E à amplificação de um sinal, isto é, é a base para criação de circuitos, tanto analógicos como digitais. Podemos citar os microprocessadores e as memórias semicondutoras como exemplos de aplicação.

Uma área que tem ganhado espaço neste cenário é a eletrônica orgânica, criada na década de 70, apresenta características que são de grande importância para a competitividade do mercado, tais como baixo custo e rápida produção, além das diversas técnicas de fabricação que são notavelmente mais simples e em temperaturas muito inferiores as utilizadas com o silício e das quais se pode citar a centrifugação, impressão e evaporação.

Os semicondutores orgânicos podem ser encontrados em pequenas moléculas e polímeros baseados em carbono e hidrogênio combinados com outros átomos como nitrogênio e oxigênio. Em suas composições destacam-se ligações pi conjugadas, estruturas com baixa excitação eletrônica. Os polímeros orgânicos são substâncias formadas por moléculas orgânicas muito longas e repetitivas, comumente encontradas em soluções processadas. Estas soluções apresentam excelentes propriedades para formação de filmes.

A eletrônica orgânica abraça aplicações onde a eletrônica convencional, baseada em silício, não se adapta muito bem, tais como na fabricação de telas flexíveis, circuitos sobre roupas e na fabricação de biossensores. Em contrapartida, existem diversos desafios a serem superados como a completa compreensão da interação entre diferentes polímeros bem como a interação com o ambiente e a sua degradação.

Este trabalho tem por objetivo fabricar e investigar as propriedades elétricas de um transistor orgânico de efeito de campo com porta eletrolítica (*electrolyte-gated organic field-effect transistor - EGOFET*) utilizando P3HT (*poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)*) como semicondutor, uma solução aquosa como dielétrico e um fio condutor de Ag/AgCl como eletrodo de porta, a extração das propriedades destes dispositivos e a comparação com a literatura atual.

MATERIAL E MÉTODOS

O substrato é a base de sustentação e onde serão depositadas as demais camadas que compõem o dispositivo. Entre as características que devem ser consideradas estão o coeficiente de expansão térmica, a rugosidade da superfície, a transição vítrea e, no caso onde se utilizam substratos baseados em compostos orgânicos, a solubilidade destes compostos com relação ao solvente utilizado no semicondutor.

A escolha do substrato é de grande importância pois afeta diretamente os processos de produção dos dispositivos, uma vez que alguns materiais podem apresentar limitações, como a inviabilidade de altas temperaturas que podem ser observadas em alguns métodos de produção. Se faz necessário avaliar a compatibilidade entre os materiais e os procedimentos.

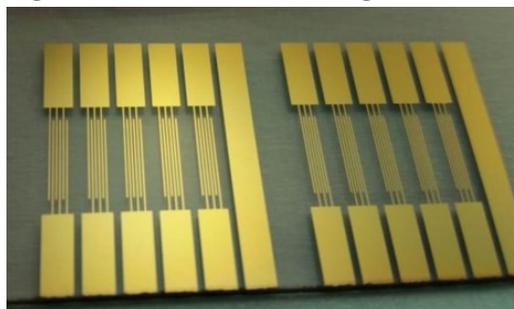
A arquitetura adotada, convencionalmente empregada para EGOFET, permite a utilização da fotolitografia para impressão dos contatos no substrato. Por se tratar de um processo mecanizado e controlado, tem maior fator de reprodutibilidade e não corre o risco de danificar o filme semiconductor que é sensível a deformação mecânica. A proteção do filme deve ser levada em consideração a todo momento uma vez que os dispositivos não apresentam nenhum tipo de encapsulamento.

O processo de deposição dos contatos de dreno e fonte são feitos por meio da fotolitografia, muito comumente utilizado para fabricação de filmes finos por apresentar alta precisão podendo realizar geometrias na casa das dezenas de nanômetros e viabiliza uma ampla gama de formas. Em contrapartida requer um alto grau de controle do ambiente de produção dos filmes. Os substratos que serão utilizados no escopo deste trabalho foram adquiridos através de uma parceria com a USP São Carlos e apresentam os contatos e os interdigitados já impressos.

No escopo deste trabalho serão utilizados substratos de vidro, pois são os que apresentam melhores características para o processamento, haja visto que não apresentam uma deformação relevante com a variação de temperatura, são rígidos, oferecem uma base para uma boa adesão e não interagem com os solventes que virão a ser usados em conjunto com o semiconductor.

Trata-se de uma placa de vidro com dimensões 3 cm x 1,5 cm x 1,1 mm que servirá como base para os contatos e camadas que compõe os dispositivos. Os terminais dreno e fonte do transistor compõem-se de um filme fino interdigitado de ouro, que pode ser visto na Figura 1, fabricado diretamente em cima do substrato de vidro utilizando a técnica de fotolitografia e evaporação térmica.

Figura 1 – Substrato com interdigitado de ouro

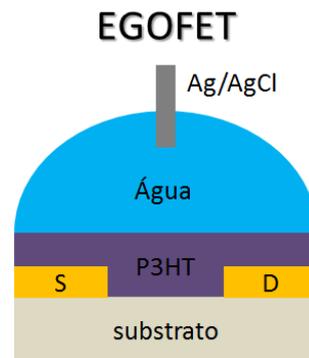


Fonte: Autoria próprio (2019).

O comprimento total do interdigitado é de 3 cm e a distância entre os filamentos que formam o canal variam entre 50 μm e 125 μm . Essa distância entre filamentos pode ser a mesma para os 5 transistores contidos em um mesmo substrato ou apresentar distâncias diferentes, dependendo apenas da máscara utilizada para sua fabricação.

A estrutura escolhida por conveniência de fabricação é definida como *top-gate bottom-contacts*, que indica que os terminais de dreno e fonte se encontram na parte inferior do dispositivo, diretamente à cima do substrato, enquanto a porta encontra-se na parte superior. Esses são separados pela camada isolante. A representação da estrutura pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Configuração do dispositivo



Fonte: A autoria próprio (2019).

Os semicondutores são materiais que apresentam valores de condutividade elétrica intermediários, isso é, valores entre os que classificam um material como metal ou isolante.

O principal motivo para o uso desses materiais é a possibilidade da dopagem, ou seja, alterar as suas propriedades de condução através da adição controlada de outras substâncias em sua composição. Esse conceito é utilizado na construção de diodos, transistores e diversos outros componentes eletrônicos.

O *Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* – P3HT, é um dos polímeros semicondutores mais utilizados em eletrônica orgânica por apresentar boa solubilidade, alta estabilidade térmica e características notáveis de mobilidade em filme fino, variando entre 10^{-3} a 10^{-1} cm^2/Vs . Além disso, o P3HT é muito usado na literatura, o que o torna uma boa fonte de comparação, visto que suas características são conhecidas, além de apresenta compatibilidade com uma vasta gama de solventes. Neste trabalho o P3HT foi empregado para a formação da camada semicondutora utilizado como solvente o Tolueno.

A rotação do *spin-coating* para a deposição do P3HT foi definida como 3500rpm durante 60s é realizada com o substrato devidamente limpo em acetona, água deionizada e álcool isopropílico. A rotação é escolhida de modo a produzir o filme mais uniforme possível.

Um tratamento térmico é realizado logo após a deposição do filme, mantendo o substrato em um *hot plate* à temperatura de 90 °C por 15 min, a fim de evaporar o solvente e melhorando o desempenho do dispositivo. Após o tratamento térmico, o P3HT sobre os contatos de dreno e fonte são removidos com acetona, deixando assim o filme somente sobre o interdigitado.

O dielétrico tem por finalidade isolar eletricamente o eletrodo de porta dos contatos de dreno e fonte, evitando assim que haja passagem de corrente entre estes, a formação do campo elétrico que induz ao efeito de campo e a funcionalização, no caso de aplicações em biossensores.

Neste trabalho, pretende-se adotar uma camada dielétrica composta por uma solução aquosa depositada sobre o filme semicondutor. Considerando que o filme de P3HT é hidrofóbico e tende a repelir a solução aquosa, antes de aplicar a camada dielétrica, se faz necessário posicionar uma fita espessa e com formato adequado, a fim de represar esta solução sobre o filme semicondutor e sobre o interdigitado.

Com os dispositivos já prontos e operantes, se faz necessário a observação da corrente que atravessa a camada isolante, passando da fonte para o eletrodo de porta. Esse fluxo é chamado de corrente de fuga e é indesejado nos dispositivos, contudo, estabelece-se uma faixa aceitável na casa dos nano amperes.

Um fio condutor de Ag/AgCl é utilizado como eletrodo de porta e é posicionado com uma de suas pontas dentro da solução aquosa do dielétrico, de modo a não entrar em contato com o filme semicondutor. Conclui-se então a estrutura do transistor.

Após a fabricação os dispositivos foram avaliados a partir de um *source measure unit* (SMU) KEITHLEY 2614B, de onde se retirou os resultados e possibilitou a caracterização dos dispositivos. A curva de saída a seguir, que relacionam corrente de dreno (I_D) com a tensão de dreno (V_D), é obtida variando a tensão de porta (V_G) de 0 V a -0,5 V em 6 passos e variando V_D de 0 V a -0,5 V em 21 passos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

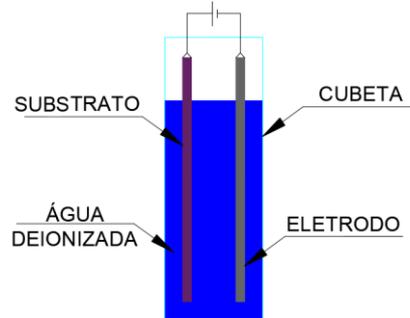
Afim de observar a variação da absorção de luz de um filme de P3HT sob diferentes condições de tensão, foi realizado uma análise de espectroscopia do ultravioleta-visível. A hipótese era que seria possível observar a variação da absorção, em virtude da aplicação de degraus positivos e negativos de tensão.

Para a montagem do experimento, foi depositado um filme fino de P3HT em uma lâmina de *Indium tin oxide* (ITO), de maneira análoga a fabricação dos transistores descrita anteriormente, porém, em um substrato sem o interdigitado de ouro. A lâmina foi alocada dentro de uma cubeta de quartzo preenchida com água deionizada. Com o auxílio de uma fonte de tensão, aplicou-se um polo sobre o P3HT e o outro em contato com um eletrodo de Ag/AgCl, como demonstrado na figura 3;

Com a montagem completa, foram aplicados diferentes níveis de tensão com diferentes faixas de tempo conforme a figura 4, onde foram adotados inicialmente valores de tensão superiores a -2 V, mas a curva de absorção não apresentou mudanças significativas. Na sequência, o filme foi submetido a tensão de -2 V por 10 minutos, seguido de mais uma medida. Em seguida, o processo foi repetido, deixando o filme sob -2 V por 10 minutos, seguido de medida, sob +2 V por 10 minutos, seguido de medida e por fim, sob +2 V por mais 10 minutos seguido de medida.

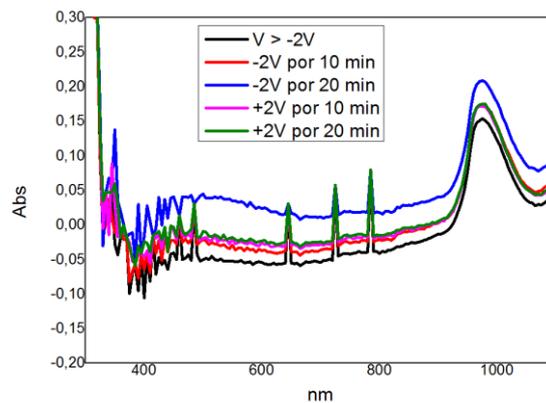
Observando os resultados concluiu-se que através deste método, a aplicação da tensão positiva não reverteu completamente a ação de degradação sofrida pelo filme em virtude da tensão negativa previamente aplicada.

Figura 3 – Montagem da espectroscopia



Fonte: Autoria próprio (2020).

Figura 4 – Curva de absorção do P3HT

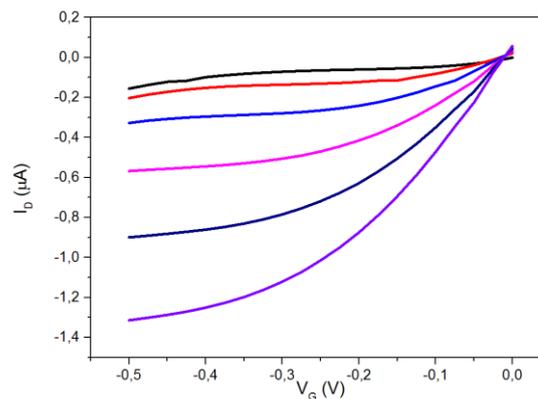


Fonte: Autoria próprio (2020).

Tendo em vista que na estrutura EGOFET a principal forma de condução de cargas é através do transporte iônico, testou-se a hipótese que, se aplicado um degrau de tensão positiva após a aplicação de um degrau negativo, haveria uma reversão do efeito de degradação, uma vez que as cargas acumuladas na superfície do semiconductor seriam dispersadas.

A figura 5 apresenta a curva de saída do transistor, onde observa-se que o ponto ótimo de operação é com V_G de -0,5 V, onde se obtém uma corrente de dreno de aproximadamente 1,4 μA .

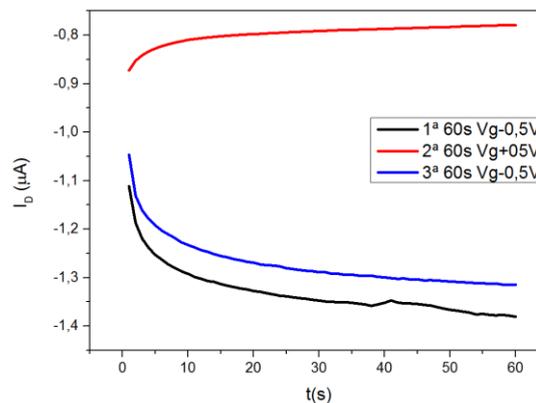
Figura 5 – Curva de saída



Fonte: Autoria próprio (2020).

Em um primeiro momento, este dispositivo foi submetido a uma tensão V_G de -0,5 V e V_D de -0,5 V por 60 segundos, em seguida, V_G foi alterado para +0,5 V, mantendo V_D de -0,5 V por 60 segundos, e por fim, V_G retorna ao valor de -0,5 V, observando sempre a variação da corrente de dreno. O resultado pode ser observado na figura 6, onde a corrente decai de 1,4 μA na primeira medida, para aproximadamente 1,3 μA na terceira medida, concluindo que reversão não é eficaz.

Figura 6 – Curva de corrente de dreno no tempo



Fonte: Autoria próprio (2020).

CONCLUSÃO

Os conhecimentos na área de fabricação de transistores orgânicos vêm gradualmente sendo desenvolvidos no campus no decorrer deste ano de pesquisas, sempre buscando explorar conceitos já visitados pela comunidade científica, bem como desenvolver assuntos ainda não tratados pela literatura vigente.

Pelos resultados apresentados, ainda não foi encontrada uma forma eficaz de reversão da degradação, bem como não são completamente claros os fenômenos que envolvem este processo.

Os dispositivos propostos, ainda que funcionais, apresentam um coeficiente de degradação bastante acentuado, o que por momento limita bastante a sua aplicação prática. Porém, tendo em vista se tratar de uma pesquisa inicial, fica em aberto o estudo do encapsulamento do dispositivo, bem como outros métodos que minimizem os efeitos da degradação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família pelo encorajamento, a UTFPR, ao professor orientador, aos colegas do grupo de pesquisa e a Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BARDEEN, J.; BRATTAIN, W. H. **The transistor**: a semi-conductor triode. New Jersey: Physical Review, v. 74.2, p. 230, 1948.