



Processo de Fabricação de Transistores de Grafeno para biosensoriamento

Palavras-chave: Transistor; Grafeno; Biossensor

Autores:

Vitor de Oliveira - FEEC

Prof. Dr. José Alexandre Diniz - FEEC

Dr. Fernando César Rufino - FEEC

INTRODUÇÃO

Transistores de Efeito de Campo (do inglês, *Field Effect Transistors* - FET) são dispositivos que funcionam como controladores de fluxo de corrente elétrica em um circuito, no qual uma tensão aplicada em um terminal de controle (porta) cria um campo elétrico que induz a abertura de um canal de condução, e assim, permite a passagem de corrente entre dois terminais (fonte e dreno). De acordo com a Lei de Moore, a quantidade de transistores presentes em um Circuito Integrado dobra a cada dois anos, mantendo o mesmo custo de produção. Para isso, esses transistores são fabricados em dimensões cada vez menores, aumentando a densidade de transistores por área e resultando em uma integração entre dispositivos cada vez maior.

Entretanto, essa redução é limitada, e assim é necessário que a ciência encontre formas de aumentar o desempenho dos dispositivos, seja por meio de novas tecnologias ou novos materiais para a fabricação. Um dos materiais a serem utilizados são os materiais bidimensionais (2D), que podem oferecer uma redução de tamanho e são versáteis, e a depender do material, permitem uma maior mobilidade de portadores. Para este projeto de pesquisa, foi utilizado o grafeno, um material semiconductor bidimensional, formado por uma monocamada de carbono com rede cristalina hexagonal.

Apesar de ser um semiconductor, o grafeno não apresenta uma banda de energia proibida (*bandgap*, que caracteriza este tipo de material). No entanto, o grafeno pode ser aplicado como canal de condução entre fonte e dreno de dispositivos FET, tornando-se uma opção viável para o desenvolvimento de novas tecnologias. Um dos dispositivos a serem construídos é o transistor de grafeno (GFET - *Graphene Field Effect Transistor*). O dispositivo GFET funciona da seguinte forma: Ao aplicar uma tensão entre os terminais de

porta (G) e fonte (S), é gerado um campo elétrico que modifica os níveis de energia no diagrama de bandas do grafeno, permitindo modular uma corrente de saída entre os terminais de fonte e dreno (D), passando pelos canais de condução de grafeno.

Para as estruturas de fonte e dreno, são depositados filmes finos de Nitreto de Titânio (TiN), enquanto que, para o dielétrico de porta, é depositado Óxido de Titânio (TiO₂). O canal de condução é construído a partir de uma monocamada de grafeno. A Figura 1 a seguir apresenta um esquemático do dispositivo:

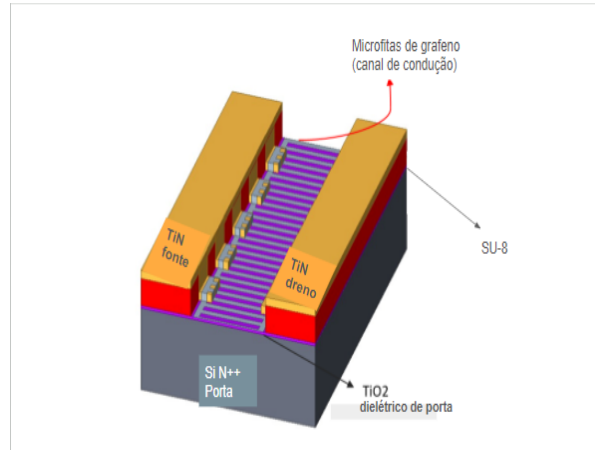


Figura 1 - Diagrama esquemático do dispositivo GFET

Ao introduzir uma diferença de potencial entre a porta e a fonte, é gerado um campo elétrico que modifica os níveis de energia no diagrama de bandas do grafeno - permitindo modular uma corrente de saída. Sua aplicação como biossensor se deve ao fato de que o grafeno é altamente sensível à adsorção de partículas em sua superfície, ocasionando alterações significativas em suas respostas elétricas. Sob esta característica, é possível funcionalizar o GFET a fim de aplicá-lo como biossensor, tornando-o seletivo.

No dispositivo a ser produzido, os analitos (amostras) entram em contato com o óxido de titânio (TiO₂) dos dielétricos de porta, onde ocorrem os processos de protonação ou desprotonação, variando a corrente I_{DS} do dispositivo. Durante a interação, as microfibras de grafeno atuam como coletores de elétrons provenientes da interação entre o analito e o TiO₂.

Uma das formas de caracterização do dispositivo ocorre a partir das curvas de transferência de carga ($I_{DS} \times V_{GS}$). O ponto de mínimo - ou ponto de Dirac - (V_D, I_D) é o ponto de condutividade mínima do dispositivo, localizado na Tensão de Dirac. A detecção da contaminação de um analito pode se dar através da análise das variações das curvas de transferência de carga, podendo ser o deslocamento entre os extremos da curva e/ou deslocamento no ponto de Dirac.

Também pode-se realizar a análise através da variação da transcondutância g_m do dispositivo, dado pela razão entre a variação de tensão na porta e à variação de corrente, tendo forma $g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}$, e depende das dimensões do dispositivo. A detecção de

contaminação em uma mostra é dada pela variação da curva normalizada da transcondutância, relacionando os valores de transcondutância da solução ($g_{m,sol}$) com e sem infecção, e das amostras de controle ($g_{m,ctrl}$), obtendo valores absolutos para g_m , assim não dependendo das dimensões do dispositivo.

OBJETIVOS





Os objetivos deste relatório são apresentar o processo de fabricação dos dispositivos GFET ao longo do período vigente deste projeto, e além disso, realizar a caracterização dos dispositivos e medidas elétricas.

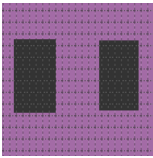
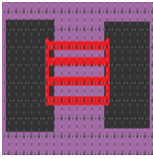

METODOLOGIA

O dispositivo fabricado é do tipo backgate, utilizando uma lâmina de silício do tipo p++ como terminal de porta. Inicialmente, foi realizada a limpeza padrão RCA da lâmina, seguida pelo crescimento térmico de uma fina camada de aproximadamente 50 nm de SiO₂, que atua como óxido de isolamento. Posteriormente, uma camada de TiO₂ com espessura entre 5 e 10 nm foi depositada sobre a região da porta por sputtering. As regiões de fonte e dreno foram definidas por fotolitografia, seguidas da deposição de 150 nm de TiN, também por sputtering.

Após essas etapas, foi realizada a transferência de uma monocamada de grafeno, produzida por CVD, para a superfície do dispositivo utilizando o método de *fishing transfer*. Em seguida, o canal de condução foi definido por fotolitografia e corrosão seletiva do grafeno via plasma *Ashing* com O₂. Os processos de fabricação dos GFETs podem ser definidos nas etapas descritas na Tabela 1. Logo abaixo, será descrito o processo mais detalhado.

Tabela 1 - Processo Resumido da produção do Gfet

Estruturas/Etapas	Esquemático	Processo
Preparação da lâmina de Si		RCA e crescimento de SiO ₂ (a e b)
Óxido de Porta		1. Deposição de TiO ₂ 5~10 nm
Proteção de Fonte, Dreno e contato de Eletrodo		Litografia: Nível 1
Fonte, Dreno e Eletrodo		1. Deposição TiN 150 nm 2. <i>Lift-off</i>

Grafeno		Transferência do Grafeno
Proteção da Região de canal		Litografia: Nível 2
Canal		<ol style="list-style-type: none"> 1. Plasma <i>Ashing</i> de O₂ 2. Limpeza Orgânica

RESULTADOS

Após a definição e fabricação do dispositivo, a visualização da lâmina e a visão microscópica dos dispositivos podem ser vistos na Figura 3 a seguir:

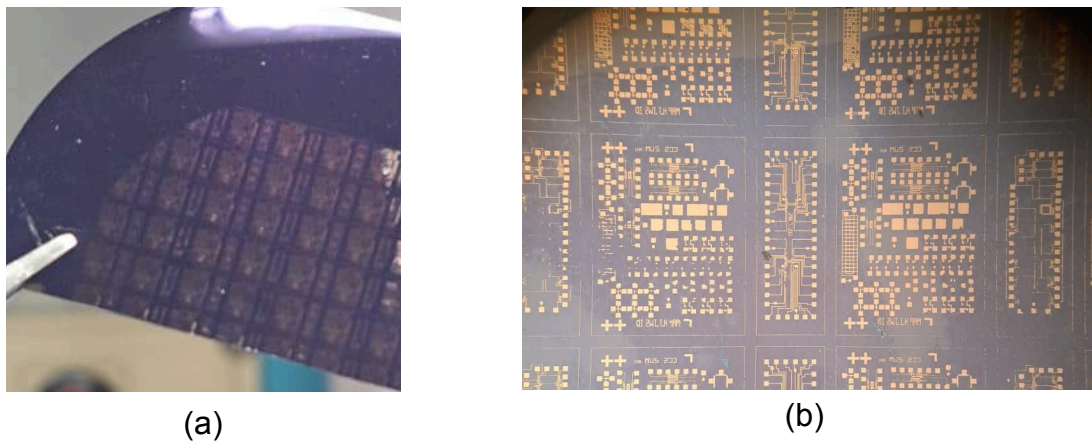


Figura 3 - (a) lâmina após a construção dos dispositivos (b) visão microscópica dos dispositivos

Após isso, foram realizadas medidas elétricas no dispositivo, aplicando uma tensão de porta de -5, 0 e 5V, e gerando a curva $I_D \times V_D$ apresentado na Figura 4 a seguir:

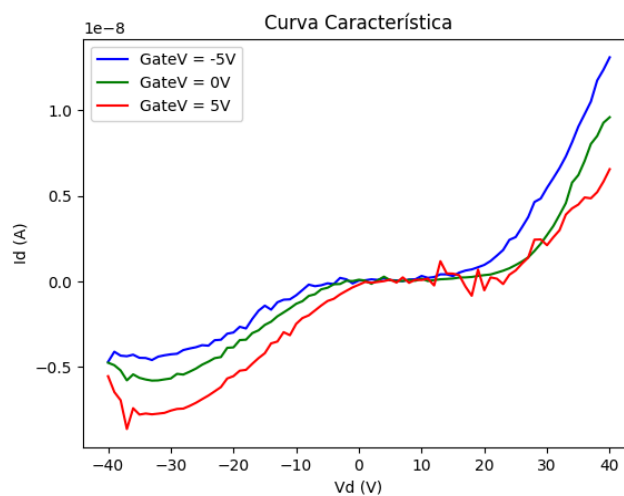


Figura 4 - curva $I_D \times V_D$

Pela curva acima, nota-se o pleno funcionamento do dispositivo, apesar do alto valor necessário para a condução de corrente (valores superiores a $\pm 20V$), e correntes registradas na ordem entre 10^{-9} e 10^{-8} . Isso pode ser explicado devido à baixa mobilidade de portadores de carga, causado por duas possibilidades: a primeira é a degradação dos canais de condução de grafeno, o que dificulta a passagem de elétrons devido à baixa mobilidade de portadores, ou até mesmo a transferência de elétrons devido a rugosidade e/ou descontinuidade do canal degradado, conseqüentemente gerando a diminuição da corrente útil; outra possibilidade é a alta resistência de contato devido à presença de óxido indesejado - crescido naturalmente ou por tempo excessivo num equipamento de deposição -, que aumenta a barreira de Schottky.

Para a validação dessas hipóteses, será necessário a visualização e caracterização da superfície do dispositivo, com equipamentos tais como um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia RAMAN para a caracterização das propriedades físicas do material (por exemplo, orientação cristalina e qualidade estrutural do material)

CONCLUSÃO

Neste relatório, foi discutido o conceito de biossensores, o princípio de funcionamento dos transistores GFET, e suas aplicações para biossensoriamento. Além disso, foi apresentado as etapas do processo de fabricação de um dispositivo GFET do tipo *backgate* com aplicação como biossensor, além de sua caracterização. Por fim, foram apresentados os resultados obtidos acerca do processo de fabricação do dispositivo GFET.

Para as próximas etapas, torna-se essencial a caracterização física do dispositivo, por meio de técnicas de análise de superfície e avaliação de propriedades estruturais, com o objetivo de identificar as causas da elevada tensão necessária para a ativação do canal condutor.

REFERÊNCIAS

SMITH, Alexander D.; JOHANSSON, Andreas; WANG, Shu; ERIKSSON, Jens; SCHRODER, Sebastian; SCHALLER, Andreas; LUNDEBERG, Markus B.; SVENSSON, Johan. **Analyst, Graphene field-effect transistors as bioanalytical sensors: design, operation and performance.** v. 146, n. 1, p. 1-17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0AN01661F>.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica.** 5. ed. São Paulo: Makron Books, 2005.

[4] KÄSLING, Sami. **Introduction to Microfabrication.** 2. ed. Chichester: Wiley, 2010.

[5] NATURE INDEX. **Nanomaterials pave the way for the next computing generation.** 10 ago. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-02147-3>. Acesso em: 1 out. 2024.

[7] RUFINO, Fernando César. **Desenvolvimento e fabricação de transistores de efeito de campo com canais de microfita de grafeno e suas aplicações como biossensor.** 2023. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.