

Nanodispositivos eletrônicos baseados em nanofitas de grafeno

Clerisson Nascimento¹, Victor Dmitriev².

¹Programa de pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Pará, Belém, Pa, 66075-110.

²Programa de pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pa, 66075-110.

Resumo — A busca por novos materiais que permitisse a diminuição da escala de dispositivos reais, com a possibilidade de aumento em sua eficiência, levou à pesquisas acerca das propriedades eletrônicas do grafeno que permitissem a construção de alternativas nanométricas para dispositivos presentes atualmente em microeletrônica. Este trabalho apresenta uma revisão de literatura, apresentando nanodispositivos eletrônicos que possuem comportamento igual ou superior aos dispositivos microeletrônicos, bem com apresenta um exemplo de uma real aplicação de tais dispositivos.

Palavras-Chave — microeletrônica, nanoeletrônica.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente busca de dispositivos mais eficientes e em escala cada vez menor, fez-se necessário a busca de novos materiais que apresentassem características igual ou superior às presentes em microeletrônica, mas com dimensões 10^3 vezes menor.

Nesse contexto, foi proposto utilizar-se das propriedades de transporte elétrico em nanofitas de grafeno para a produção de dispositivos com tais características. Para tanto, foi necessário mudar a abordagem de fabricação para a chamada “abordagem de baixo para cima” (*from the bottom-up*), termo proposto em [1]. Essencialmente, tal abordagem visa modelar o dispositivo controlando átomo a átomo o processo de utilização, ao invés de simplesmente miniaturizar os dispositivos já existentes.

Nesse contexto, este trabalho buscou elaborar uma revisão de literatura acerca de dispositivos nanoeletrônicos baseados em grafeno. A exemplo de nanodiodos e nanotransistores, apresentando suas características e comparativos com os dispositivos já presentes na literatura. A fim de mostrar que as curvas características dos dispositivos baseados em grafeno são muito semelhantes ou, em alguns casos, melhores das encontradas na microeletrônica.

Por fim, apresentar-se-á uma aplicação real de tais dispositivos em circuitos integrados fabricados com dispositivos eletrônicos baseados em grafeno.

II. AS NANOFITAS DE GRAFENO

O grafeno é um arranjo bidimensional de átomos de carbono com estrutura cristalina hexagonal, também conhecida como estrutura de *favo de mel* [2-3], como mostra a fig. 1.

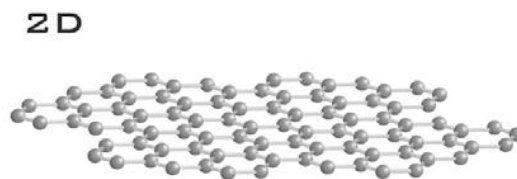


Fig. 1. Folha de grafeno [2].

Tal estrutura é responsável por notáveis propriedades eletrônicas tais como uma alta mobilidade eletrônica possibilitando dispositivos que trabalhem à regime balístico [4], e uma excelente condutividade térmica, que favorecem a sua utilização como canal de dispositivos eletrônicos [5-10].

A tal arranjo hexagonal de átomos de carbono definem uma estrutura de bandas que exprime um comportamento metálico [11]. Contudo “cortes” nas folhas de grafeno originam estruturas com uma geometria definida e comportamento metálico, semimetálico ou semicondutor, dependendo da direção (*Quiralidade*) de corte e da largura da estrutura resultante. Tais cortes em uma folha de grafeno são chamados de nanofitas de grafeno.

Existem duas direções principais de corte, mostradas na fig. 2. A fig. 2a nos mostra uma nanofita *armchair* (*Armchair Graphene Nanoribbon* - AGNR), a sua largura representada por W_a (crescimento lateral da fita) é um dos fatores determinantes para o valor de seu gap de energia uma vez que tal corte apresenta um comportamento essencialmente semicondutor. Enquanto que na fig. 2, tem-se representado uma nanofita *Zigzag* (*Zigzag Graphene Nanoribbon* - ZGNR), com um comportamento predominantemente metálico, ainda que determinados fatores como dopagem, pressão mecânica, campo externo, propiciam o surgimento de gaps de energia, mudando assim o comportamento da estrutura de bandas. Em ambos os casos, os comprimentos das fitas podem ser entendidos como a repetição dessas estruturas na vertical em relação à folha de papel [12].

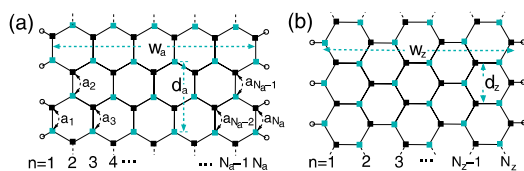


Fig. 2. (a) Esquema de uma nanofita armchair (AGNR). Os círculos brancos representam átomos de hidrogênio, com a finalidade de preencher a ligação extra ficaria nas bordas os cada par de átomos azul-preto simboliza os dois átomos da célula unitária do grafeno (célula não primitiva). d_a e W_a representam o parâmetro de rede e a largura da fita, respectivamente. (b) O esquema de uma nanofita ZigZag (ZGNR) [12].

III. NANODIODOS BASEADOS EM NANOFITAS DE GRAFENO

Um dos componentes eletrônicos que puderam ser projetados à escala nanométrica é o diodo. Sua principal característica é a propriedade de permitir a passagem de elétrons em uma única direção e proibir na direção inversa, o que possibilita a aplicação em circuitos com os retificadores, por exemplo. Tal efeito é obtido devido a uma separação entre elétrons e buracos na junção de materiais do tipo-p e tipo-n, ou na junção entre um metal e um semiconductor com uma dopagem mais branda (diodo Schottky) [13]. Esse funcionamento pode ser inferido a partir do cálculo de valores de corrente em função de valores de tensão, como mostra a fig. 3.

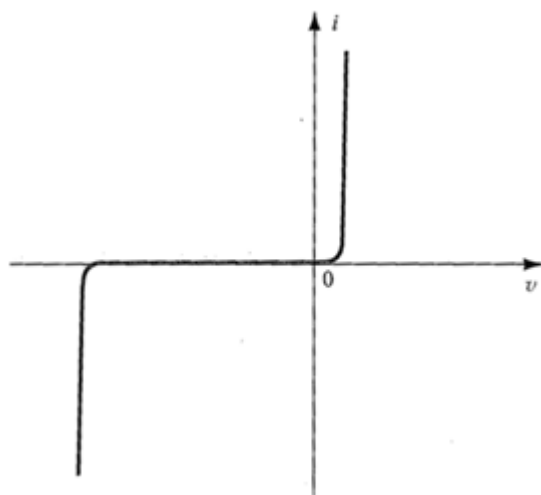


Fig. 3. Curvas típicas de tensão e corrente para um diodo convencional da microeletrônica [13].

Nanodiodos baseados em junções p-n com grafeno podem ser obtidos fazendo dopagens em diferentes áreas da mesma nanofita, ou aplicando determinados potenciais de porta (Gate). Contudo, tal tipo de junção não têm se mostrado adequado para aplicações lógicas, devido ao fato de que o grafeno ainda reteria suas características semimetálicas para determinaras quiralidades.

Uma maneira de contornar tal problema seria estabelecer uma junção do tipo Schottky [16] ao invés de usar junções p-n, convencionalmente usada em microeletrônica.

Em [13] é reportado a fabricação de um dispositivo que tem o comportamento de diodos Schottky [17,18] na qual uma nanofita semicondutora de grafeno foi posta em contato com um eletrodo metálico. Tal estrutura foi obtida pela exposição controlada de uma camada de grafeno a um plasma de O_2 . Tal tratamento de plasma faz-se necessário para obtenção da barreira Schottky, uma vez que oxigênio reage com uma camada de grafeno, formando um composto levemente dopado (tipo-p). O artigo mostra, também, o comparativo para o comportamento retificador de dispositivos feitos com eletrodos de Cr, Al, Yb cujas funções trabalho são 4,5, 4,1 e 2,6 respectivamente. Tanto a montagem experimental quanto as curvas IV são mostradas na fig. 4.

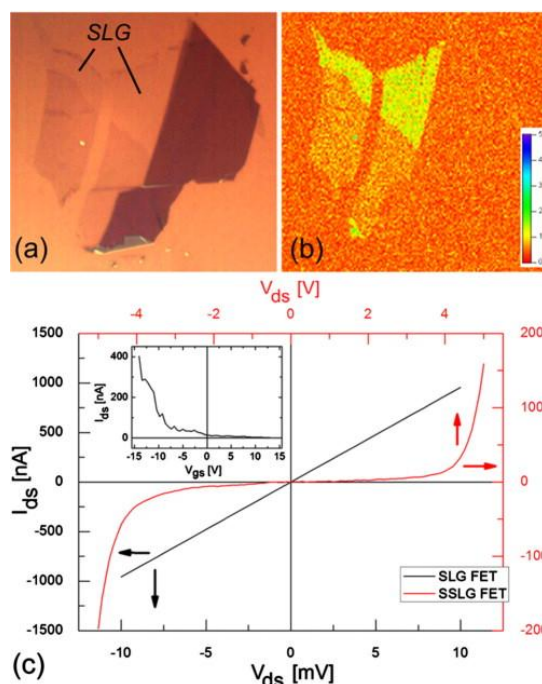


Fig. 4. a) Figura ótica à luz branca e (b) a correspondente imagem obtida por espectroscopia fotoluminescente de uma fita de grafeno submetida ao tratamento de plasma de O_2 . c) curvas de IV para nanodispositivos a temperatura ambiente e contatos de Cr, com e sem o tratamento de O_2 (SLG e SSLG, respectivamente). No gráfico interno, têm-se as características para uma faixa de tensão de porta. [16].

O dispositivo Cr-SSLG-Cr, pode ser modelado tendo em mente a conexão de dois transistores Schottky cuja barreira é formada por Cr, conectando eletrodo negativo de ambos. A fig. 5b. Mostra um desenho esquemático desta ligação para dispositivos com eletrodos de função trabalho menores. As características e comparativos de dispositivos formados por um diodo com eletrodos de Al e Yb e a fig. 5c mostra a característica para as barreiras Al-SSLG-Pd e Yb-SSGL-pd, respectivamente. Resultados que estão em concordância com [19] e [20].

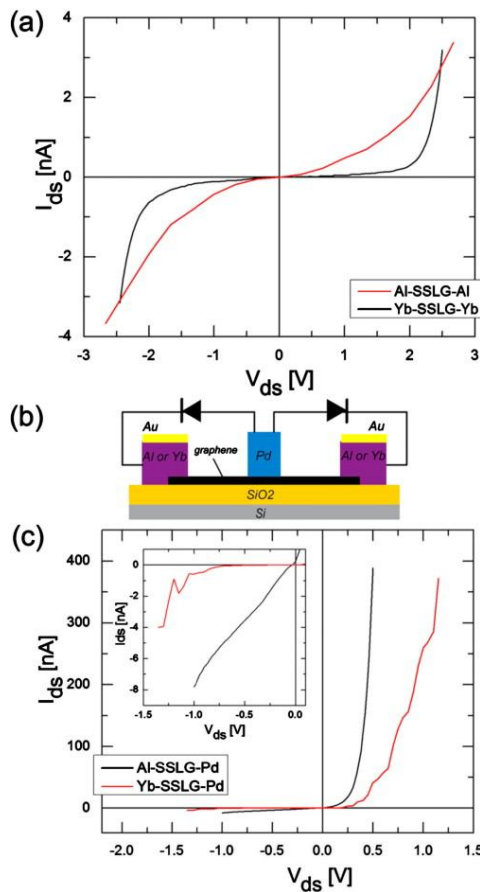


Fig. 5. a) Comparação para as curvas IV sob temperatura ambiente para dispositivos AL-SSGL-Al e Pd-SSGL-Pd. (b) Diagrama de diodos Schottky fabricados com eletrodos metálicos diferente. (c) Comparação para as curvas IV para os dispositivos Al-SSGL-Pd e Yb-SSGL-Pd, no qual o comportamento retificador é visível. No gráfico interno, há um detalhe do que ocorre entre os valores de 0,0 até -1,5. [14].

Outro dispositivo equivalente que apresenta comportamento de diodo Schottky é apresentado numericamente em [21], na qual uma nanofita semicondutora tipo-p é extremada por dois eletrodos metálicos em diferentes funções trabalho. Fig. 6.

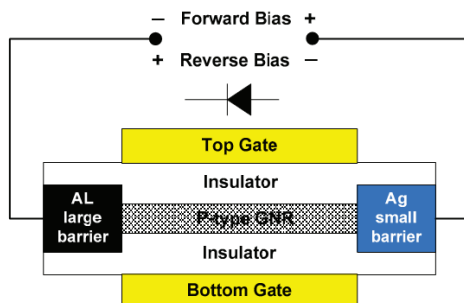


Fig. 6. Representação esquemática de um diodo Schottky proposto a partir de uma nanofita semicondutora do tipo p, ladeada por dois eletrodos com funções trabalho diferente. Sendo tensões de *porta* aplicadas, para controlar as características retificadoras. [21]

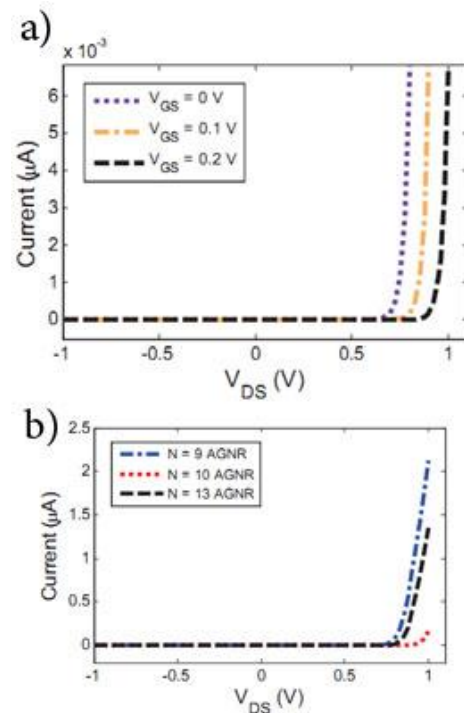


Fig. 7. a) Curvas de IV para diodos Schottky cujo canal é fabricado com uma nanofita semicondutora de largura em torno de 1,2 nm, gap 1,1 eV e função trabalho igual a 4,6 eV. A tensão de threshold é variada de acordo com o potencial de *porta* aplicado, sendo a espessura do isolante igual a 2nm. b) Curvas de IV para fitas de diferentes larguras e com mesmo potencial de porta, igual a 0,1 V e espessura da camada isolante igual a 2nm. [21].

O dispositivo apresenta a possibilidade de variar a tensão de corte, variando a tensão no terminal de porta, como mostra a fig. 7a. Além disso, substituindo a fita de canal por uma fita de largura diferente (simbolizadas por diferentes valores de N), tem-se variações no potencial de corte. Fig. 7b.

Tal característica, a qual não está presente em dispositivos microeletrônicos usuais, aliado à um comportamento retificador satisfatório, coloca o grafeno na posição de uma boa alternativa para a fabricação de diodos em escala nanométrica.

IV. NANOTRANSISTORES BASEADOS EM NANOFITAS DE GRAFENO

Um transistor de efeito de campo (FET) é uma estrutura na qual têm-se dois eletrodos metálicos usualmente chamados de *fonte* (source) e *dreno* (drain) interconectados por um canal semicondutor. Sendo a resistência do material controlada por um terceiro eletrodo chamado *porta* (Gate) que é uma camada metálica, separada do *canal* (A nanofita) por uma camada de óxido (SiO₂, por exemplo). Os transistores baseados em nanofitas de grafeno possuem essencialmente a mesma estrutura [25-27].

Em [22] foi proposto a confecção de um nanotransistor formado por um canal de uma fita de grafeno com terminação armchair, cujo comportamento é semicondutor e comprimento próximo de 30 nm. Os eletrodos são ligados a dois eletrodos com tipos diferentes de dopantes, formando materiais dos tipos p e n, como *fonte* e *dreno*, respectivamente. A passagem dos elétrons é controlada por uma tensão de *porta* aplicado no sentido perpendicular ao

plano da fita, sendo este separado por uma camada dielétrica de $t_{ox}=1,5$ nm. Como mostra a fig 5.

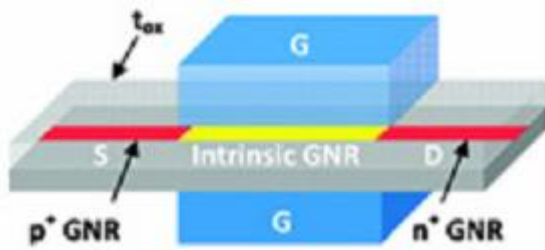


Fig. 8. Representação esquemática de um nanotransistor composto de uma nanofita semicondutora, em geral com bordas armchair ligadas à dois eletrodos metálicos do tipo-p e tipo-n (obtidas através de dopagem). Há uma porta separado por uma distância t_{ox} [22].

No eletrodo *fonte*, tem-se uma densidade de estados maior que no eletrodo *dreno*. Isso quer dizer que enquanto este ultimo busca preencher os estados no interior do canal (injetando elétrons que se movem sob regime balístico), o primeiro busca retirar os elétrons do canal a fim de preencher seus próprios estados. Ao ser aplicado uma tensão de bias, essa diferença de estados acessíveis entre os terminais é mantida, o que mantém o circuito fechado.

Estrutura semelhante é utilizada em [23] para estudar os efeitos de uma faixa de valores para as larguras das fitas (o que influencia diretamente em seu gap de energia) e para um intervalo mais amplo de tensão de porta. Cujas curvas características estão presentes na fig. 9.

Atualmente estão sendo estudados, também, nanotransistores baseados em canais nos quais se estabeleceram heterojunções, a fim de modelar o potencial no interior do mesmo, bem como controlar o processo de tunelamento, servindo como uma maneira de fazer um análogo à engenharia de bandas. Tais heterojunções são apresentadas na fig. 10.

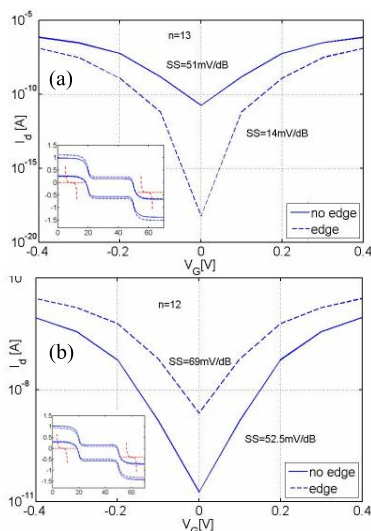


Fig. 9. $\log(I_D)$ vs. Tensão de Porta (V_G) para o GNR FET de tunelamento para Tensão de Dreno $V_D=0.4V$ e para (a) $n=13$ AGNR e (b) $n=12$ AGNR. Na presença de relaxação das ligações de borda (pontilhadas) e na ausência (linha sólida). Nos gráficos internos são mostrados os perfis de banda [22].

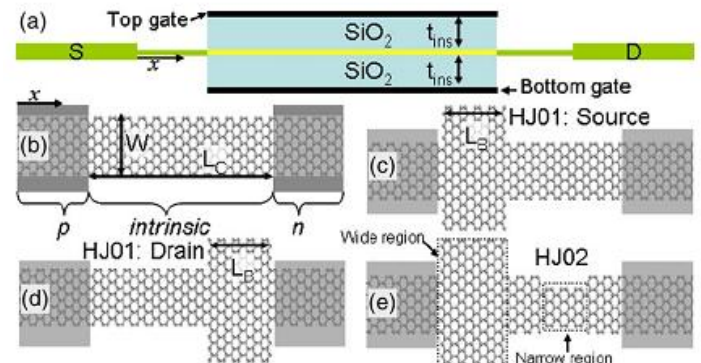


Fig. 10. Representação esquemática de FETs baseados em grafeno no qual se estabeleceu heterojunções no canal [24].

Em Junho de 2011, pesquisadores reportaram a construção de um circuito *RF mixer* baseado em nanotransistor de grafeno, no qual os componentes foram depositados sobre um wafer de carboneto de Silício (SiC) [28]. Como mostra a fig. 11.

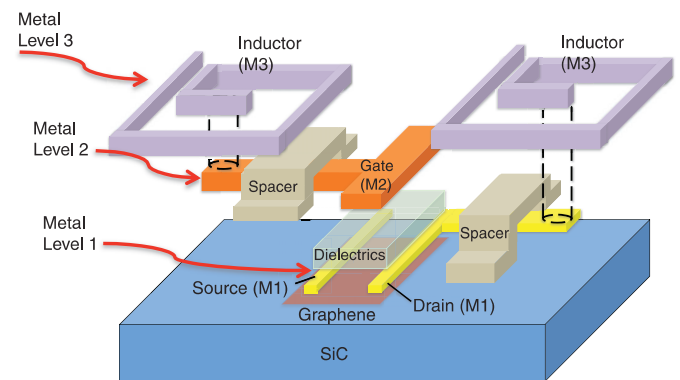


Fig. 11. Figura esquemática mostrando a montagem do circuito misturador de RF baseado em grafeno. Retirada de [28].

De acordo com [28], o circuito consiste em um transistor baseado em nanofita de grafeno e dois indutores sobrepostos em um substrato de SiC, totalizando uma dimensão abaixo de $1mm^2$.

A finalidade de tal circuito em microeletrônica é, essencialmente, a conversão de frequências, finalidade essa que, ainda segundo a literatura, é alcançada mesmo em escala nanométrica, com transistor baseado em grafeno.

A fig. 12, mostra um esquema de funcionamento do circuito, nos quais dois sinais de alta frequência (um sinal RF e um sinal oscilador local) são aplicados aos eletrodos *porta* e *dreno* do nanotransistor (P1 e P4) o qual é modulado pelas duas frequências e produz uma corrente de *dreno* que é composta das duas frequências de entrada. Enquanto na fig. 13 têm-se o espectro de frequências de saída para sinais de entrada de 3.8 GHz em P1 e 4 GHz em P2, o que nos dá uma excelente comprovação de que dispositivos baseados em grafeno pode ser uma realidade.

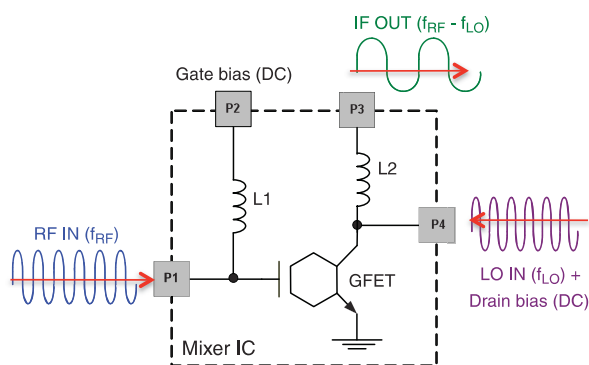


Fig. 12. Diagrama do circuito misturador de frequências RF. O FET de grafeno está representado pela estrutura exagonal [28].

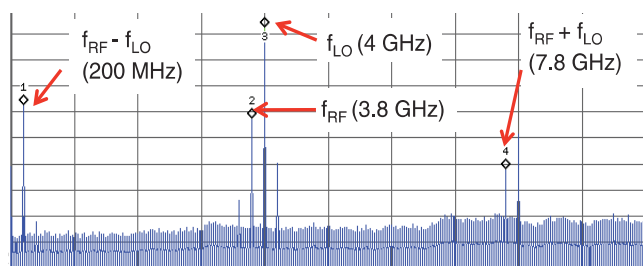


Fig. 13. Espectro de saída para uma faixa entre 0 e 10GHz [9].

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dispositivos em escala manométrica já são realidade. Contudo, para alcançar tal patamar, fez-se necessário uma mudança na abordagem de confecção de tais mecanismos. Ao invés de meramente “miniaturizar” os componentes, adotou-se uma abordagem chamada de “abordagem de baixo para cima”, que consiste em modelar as estruturas átomo por átomo, utilizando-se de ferramentas da mecânica Quântica.

Para tanto, foi necessário quebrar o “paradigma do silício” e demais semicondutores usuais e ir em busca de novos materiais. O grafeno mostrou-se com características ideais para substituir os materiais convencionais de produção de dispositivos eletrônicos, permitindo a construção de componentes cada vez menores com características igual ou superior que as encontrado.

A começar por estruturas simples na microeletrônica, o grafeno apresentou curvas características muito boas em relação aos encontrados atualmente.

Os diodos baseados em grafeno apresentaram um bom comportamento retificador e tensão de cortes tão boas ou até melhores do que os encontrados na microeletrônica. Tais tensões, que podem variar de alguns centésimos de volts até valores de 2 ou 4, são controladas por mecanismos externos ao dispositivo, como a simples mudança na intensidade ou inclinação do campo elétrico aplicado no terminal de porta. Ou a partir de mecanismos internos como, a substituição do canal por uma fita de largura diferente.

Outro nanodispositivo estudado por este trabalho foram os transistores de efeito de campo baseados em grafeno (GFETs). Com uma estrutura semelhante à adotada nos diodos, os GFETs apresentam um comportamento muito semelhante aos FETs usuais da microeletrônica, com a

vantagem de ser ajustável à aplicação pelas mesmas mudanças aplicadas nos diodos baseado em grafeno.

Por fim, foi mostrado uma aplicação real da capacidade de aplicação de tais dispositivos baseados em grafeno em um circuito eletrônico misturador de canais de RF. Cujo funcionamento se mostrou superior aos usuais, em uma escala manométrica, mostrando que os dispositivos de grafeno já são realidade.

REFERÊNCIAS

- [1] S.Datta, Quantum Transport: Atom to Transistor. Cambridge University Press; 2nd edition (July 11, 2005).
- [2] KATSNELSON, Mikhail. “Graphene: carbon in two dimensions”, *Materials Today*, Vol. 10, No. 1-2. (January 2007), pp. 20-27..
- [3] Geim, Andrey K., MacDonald. Allan H., *Physics Today*, Vol. 60, No. 8. (2007), pp. 35-41.
- [4] Choudhury, M. R.; Yoon, Y.; Guo, J.; Mohanram, K.; , “Graphene Nanoribbon FETs: Technology Exploration for Performance and Reliability,” *Nanotechnology*, IEEE Transactions on , vol.10, no.4, pp.727-736, July 2011. doi: 10.1109/TNANO.2010.2073718
- [5] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, “Electric field effect in atomically thin carbon films,” *Science*, vol. 306, pp. 666-669, 2004.
- [6] Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, “Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry’s phase in graphene,” *Nature*, vol. 438, pp. 201-204, 2005.
- [7] C. Berger, Z. Song, X. Li, X. Wu, N. Brown, C. Naud, D. Mayou, T. Li, J. Hass, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First, and W. A. de Heer, “Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial graphene,” *Science*, vol. 312, pp. 1191-1196, 2006.
- [8] R. V. Noorden, “Moving towards a graphene world,” *Nature*, vol. 442, pp. 228-229, 2006.
- [9] A. K. Geim and K. S. Novoselov, “The rise of graphene,” *Nature Mater.*, vol. 6, pp. 183-191, 2007.
- [10] W. A. de Heer, C. Berger, E. Conrad, P. First, R. Murali, and J. Meindl, “Pionics: The emerging science and technology of graphene-based nanoelectronics,” in *Intl. Electron Devices Meeting Tech. Dig.*, 2007, pp. 199-202.
- [11] S. Reich, J. Maultzsch, C. Thomsen, and P. Ordejón. Tight-binding description of graphene. *Phys. Rev. B*, 66(3):035412, Jul 2002.
- [12] Y.-W. Son, M. L. Cohen, and S. G. Louie. Energy gaps in graphene nanoribbons. *Phys. Rev. Lett.*, 97(21):216803, Nov 2006.
- [13] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth Carless. **Microelectronic circuits**. 5th ed. Oxford: Oxford University, 2004. 1 CD-ROM ISBN 0195142519 (enc.)
- [14] Amirhasan Nourbakhsh, et al. *Appl. Phys. Lett.* **97**, 163101 (2010);
- [15] T. Lohmann, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nano Lett.* **9**, 1973 (2009).
- [16] X. Li, H. Zhu, K. Wang, A. Cao, J. Wei, C. Li, Yi Jia, Z. Li, X. Li, and D. Wu, *Adv. Mater.* **22**, 2743 (2010).
- [17] Muhammad R Islam et al 2011 *New J. Phys.* **13** 035021 doi: 10.1088/1367-2630/13/3/035021
- [18] Chun-Chung Chen, Mehmet Aykol, Chia-Chi Chang, A. F. J. Levi, Stephen B. Cronin. *Nano Letters* 2011 11 (5), 1863-1867
- [19] S. Tongay, T. Schumann, X. Miao, B.R. Appleton, A.F. Hebard, Tuning Schottky diodes at the many-layer-graphene/semiconductor interface by doping, *Carbon*, Volume 49, Issue 6, May 2011, Pages 2033-2038, ISSN 0008-6223, DOI: 10.1016/j.carbon.2011.01.029.
- [20] P Dawson et al 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 125101 doi: 10.1088/0022-3727/44/12/125101
- [21] Kargar, A.; Chengkuo Lee; , “Graphene nanoribbon schottky diodes using asymmetric contacts,” *Nanotechnology*, 2009. IEEE-NANO 2009. 9th IEEE Conference on , vol., no., pp.243-245, 26-30 July 2009
- [22] Jyotsna Chauhan; Jing Guo; , “Atomistic simulation of graphene nanoribbon tunneling transistors,” *Nanoelectronics Conference (INEC)*, 2010 3rd International , vol., no., pp.200-201, 3-8 Jan. 2010
- [23] Sai-Kong Chin; Dawei Seah; Kai-Tak Lam; Samudra, G.S.; Gengchiao Liang; , “Device Physics and Characteristics of Graphene Nanoribbon Tunneling FETs,” *Electron Devices*, IEEE Transactions on , vol.57, no.11, pp.3144-3152, Nov. 2010
- [24] Kai-Tak Lam; Dawei Seah; Sai-Kong Chin; Bala Kumar, S.; Samudra, G.; Yee-Chia Yeo; Gengchiao Liang; , “A Simulation Study of

- Graphene-Nanoribbon Tunneling FET With Heterojunction Channel,"
Electron Device Letters, IEEE , vol.31, no.6, pp.555-557, June 2010
- [25] Frank Schwierz. Nature 472, 41–42 (07 April 2011)
doi:10.1038/472041a
- [26] J. Pezoldt, Ch. Hummel, F. Schwierz, Graphene field effect transistor improvement by graphene-silicon dioxide interface modification, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, In Press, Corrected Proof, Available online 10 May 2011, ISSN 1386-9477, DOI: 10.1016/j.physe.2011.05.008.
- [27] Appl. Phys. Lett. **98**, 213104 (2011); doi:10.1063/1.359395
- [28] Yu-Ming Lin et al. Science 10 June 2011: 332 (6035), 1294-1297.
[DOI:10.1126/science.1204428].