

Nanodispositivos eletrônicos baseados em nanofitas de grafeno

Nanoscale electronic devices based on graphene nanoribbons

Nanodispositivos electrónicos basados en nanocintas de grafeno

Clerisson Monte do Nascimento

Doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará
Belém/PA- Brasil
clerisson@ufpa.br

Fernando Antônio Pinheiro Gomes

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará
Faculdade de Tecnologia da Amazônia
Manaus/AM - Brasil
fgomes@ufpa.br

Victor Dmitriev

Doutor em Dispositivos de Microondas pela Moscowstate Technical University
Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Elétrica
Belém/PA- Brasil
victor@ufpa.br

RESUMO

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

Palavras-chave: Nanodispositivos. Microeletrônica. Nanoeletrônica. Grafeno.

Recebido / Received / Recibido
24/07/12

Aceito / Accepted / Acepto
29/11/12

ABSTRACT

The search for new materials that allow the reduction of the scale of actual devices, with the possibility of increase in efficiency has led to researches on the electronic properties of graphene that enable the construction of nanometric alternatives to the devices currently present in microelectronics. This paper presents a literature review, presenting nanoscale electronic devices that have performance equal or superior to microelectronic devices, and also presents an example of a real application of such nanodevices.

Keywords: Nanodevices. Microelectronics. Nanoelectronics. Graphene.

RESUMEN

La búsqueda por nuevos materiales que permitiesen la disminución de la escala de dispositivos reales, con la posibilidad de aumento en su eficiencia, llevó a pesquisas sobre las propiedades electrónicas del “grafeno” que posibilitasen la construcción de alternativas “nanométricas” para dispositivos presentes actualmente en microelectrónica. Este trabajo revisa la literatura, presentando “nanodispositivos” electrónicos que poseen comportamiento igual o superior a los dispositivos microelectrónicos, así como da un ejemplo de una real aplicación de dichos “nanodispositivos”.

Palabras-clave: Nanodispositivos. Microelectrónica. Nanoelectrónica. Grafeno.

INTRODUÇÃO

Com a crescente busca de dispositivos mais eficientes e em escala cada vez menor, fez-se necessária a busca de novos materiais que apresentassem características iguais ou superiores às presentes em microeletrônica, porém 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*) (DATTA, 2005). 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. Além disso, buscou mostrar que as curvas características dos dispositivos baseados

em grafeno são muito semelhantes ou, em alguns casos, melhores do que as encontradas na microeletrônica.

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

1 AS NANOFITAS DE GRAFENO

O grafeno é um arranjo bidimensional de átomos de carbono com estrutura cristalina hexagonal, também conhecida como estrutura *favo de mel* (GEIM, 2007; KATSNELSON, 2007), como mostra a Figura 1.

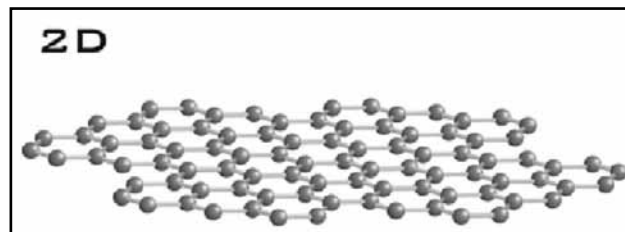


Figura 1: Folha de grafeno.
Fonte: Katsnelson (2007).

Tal estrutura é responsável por notáveis propriedades eletrônicas tais como uma alta mobilidade eletrônica, possibilitando dispositivos que trabalhem a regime balístico (CHOUDHURY, 2011), e uma excelente condutividade térmica, que favorecem a sua utilização como canal de dispositivos eletrônicos (HEER, 2007; NOVOSELOV, 2004).

A tal arranjo hexagonal de átomos de carbono define uma estrutura de bandas que exprime um comportamento metálico (REICH, 2002). Contudo, “cortes” nas folhas de grafeno originam estruturas com uma geometria definida e comportamento metálico, semimetálico ou semiconductor, 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 Figura 2. A Figura 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 semiconductor. Na figura 2b, tem-se representada uma nanofita *Zigzag* (*Zigzag Graphene Nanoribbon* - ZGNR), com um comportamento predominantemente metálico, ainda que determinados fatores como dopagem, pressão mecânica e campo externo propiciem 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 (SON, 2006).

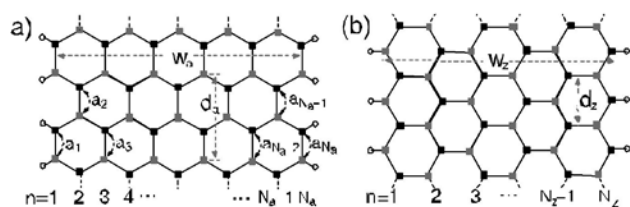


Figura 2: (a) Esquema de uma nanofita *armchair* (AGNR). Os círculos brancos representam átomos de hidrogênio, com o fim de preencher a ligação extra na borda, cada par de átomos preto-cinza simboliza os dois átomos da célula unitária do grafeno (célula não primitiva). a e W_a representam o parâmetro de rede e a largura da fita, respectivamente. (b) O esquema de uma nanofita *Zigzag* (ZGNR).
Fonte: Son (2006).

2 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*) (SEDRA, 2004). Esse funcionamento pode ser inferido a partir do cálculo de valores de corrente em função de valores de tensão, como mostra a Figura 3.

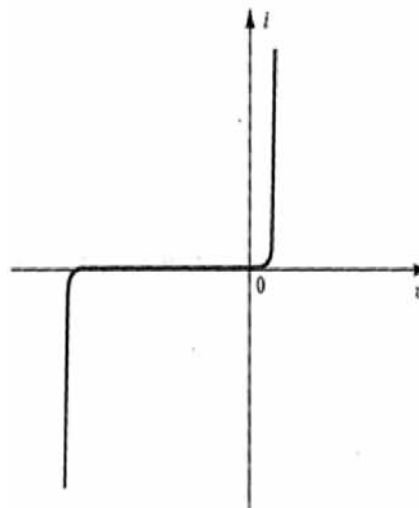


Figura 3: Curvas típicas de tensão e corrente para um diodo convencional da microeletrônica.
Fonte: Sedra (2004).

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 tem se mostrado adequado para aplicações lógicas, devido ao fato de que o grafeno ainda reteria suas características semimetálicas para determinadas quiralidades.

Uma maneira de contornar tal problema seria estabelecer uma junção do tipo *Schottky* (XINMING, 2010), ao invés de usar junções p-n, que é convencionalmente usada em microeletrônica.

Em Sedra (2004) é reportada a fabricação de um dispositivo que tem o comportamento de diodos *Schottky* (CHUN-CHUNG, 2011; ISLAM, 2011), em que 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 o 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 Figura 4.

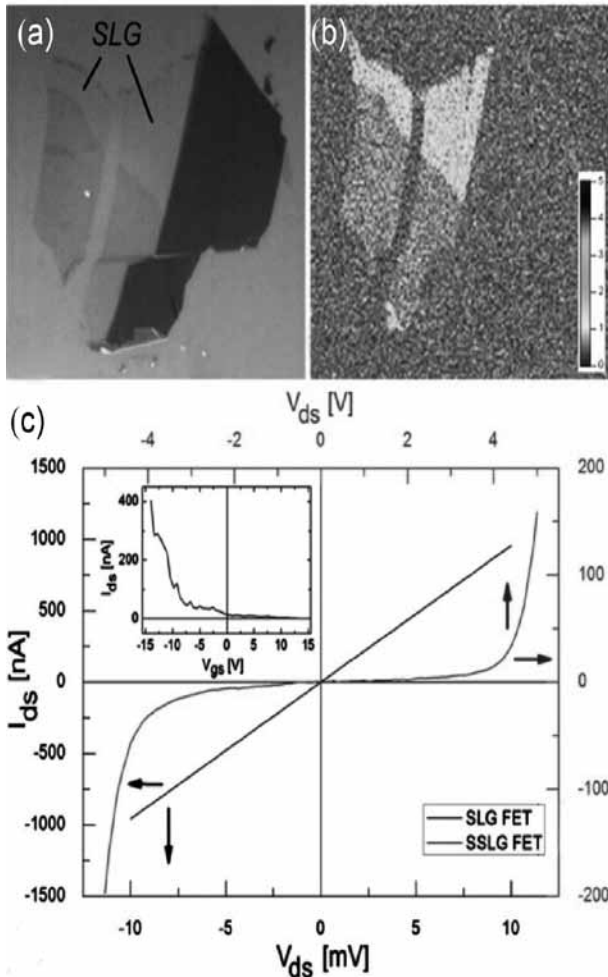


Figura 4: a) Figura ótica à luz branca e (b) a correspondente imagem obtida por espectroscopia fotoluminescente de uma fita de grafeno submetida ao tratamento de plasma de O₂. c) curvas de IV para nanodispositivos à temperatura ambiente e contatos de Cr, com e sem o tratamento de O₂ (SLG e SSLG, respectivamente). No gráfico interno, têm-se as características para uma faixa de tensão de porta. Fonte: Xinming (2010).

O dispositivo Cr-SSLG-Cr pode ser modelado tendo em mente a conexão de dois transistores *Schottky* cuja barreira é formada por Cr, conectando os eletrodos negativos de ambos. A Figura 5b mostra um desenho esquemático dessa 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 Figura 5c mostra a característica para as barreiras Al-SSLG-Pd e Yb-SSLG-pd, respectivamente. Resultados que estão em concordância com Dawson (2011) e Tongay (2011).

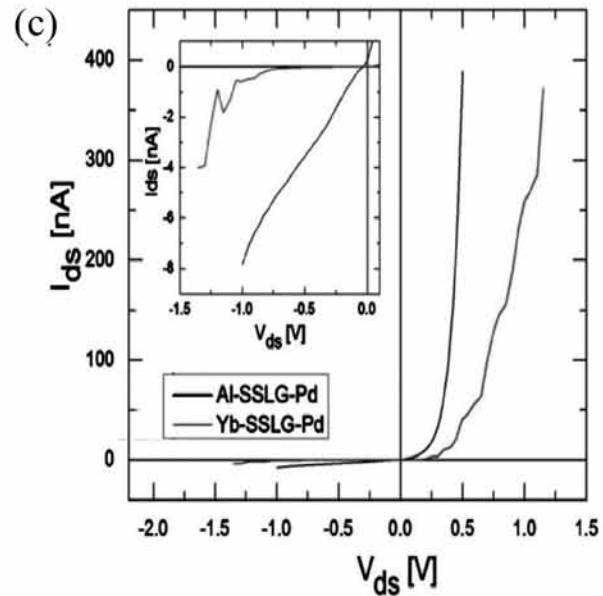
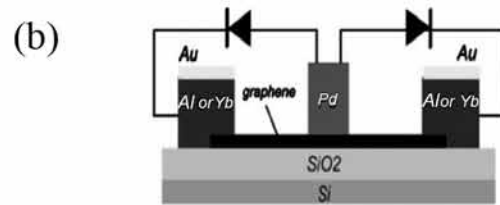
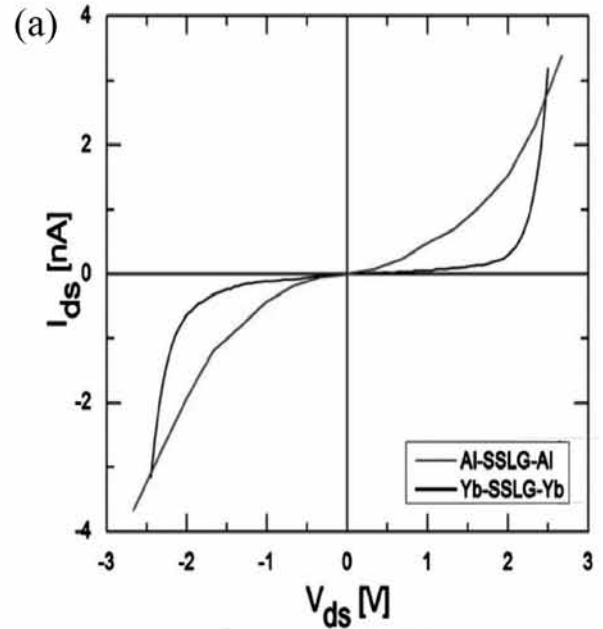


Figura 5: a) Comparação para as curvas IV sob temperatura ambiente para dispositivos AL-SSGL-Al e Pd-SSGL-Pd. (b) Diagrama de diodos *Schottik* fabricados com eletrodos metálicos diferentes. (c) Comparação para as curvas IV para os dispositivos Al-SSLG-Pd e Yb-SSLG-Pd, onde o comportamento retificador é visível. No gráfico interno, há um detalhe do que ocorre entre os valores de 0,0 até -1,5. Fonte: Nourbakhsh (2010).

Outro dispositivo equivalente que apresenta comportamento de diodo *Schottky* é apresentado numericamente em Kargar (2009), em que uma nanofita semicondutora tipo-p é extremada por dois eletrodos metálicos em diferentes funções trabalho, Figura 6.

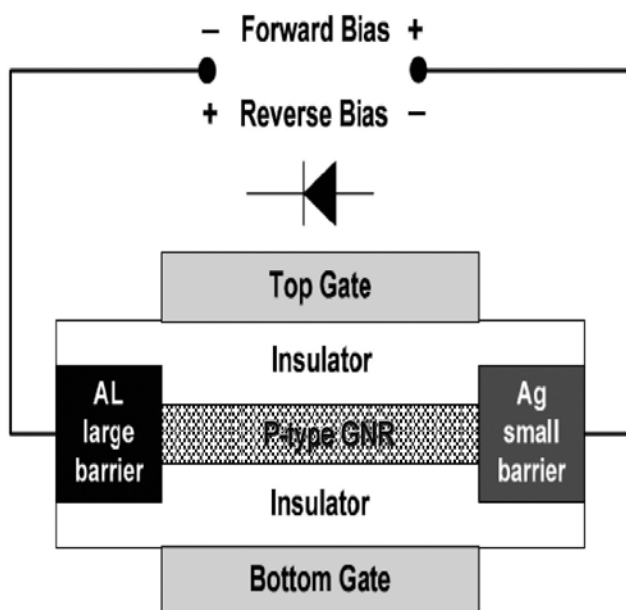


Figura 6: Representação esquemática de um diodo *Schottky* proposto a partir de uma nanofita semicondutora do tipo p, ladeado por dois eletrodos com funções trabalho diferentes, sendo que possuem tensões de porta aplicadas, para controlar as características retificadoras.

Fonte: Kargar (2009).

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

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

3 NANOTRANSISTORES BASEADOS EM NANOFITAS DE GRAFENO

Um transistor de efeito de campo (FET) é uma estrutura onde se têm dois eletrodos metálicos usualmente chamados de fonte (*source*) e dreno (*drain*) interconectados por um canal semicondutor, em que a resistência do material é controlada por

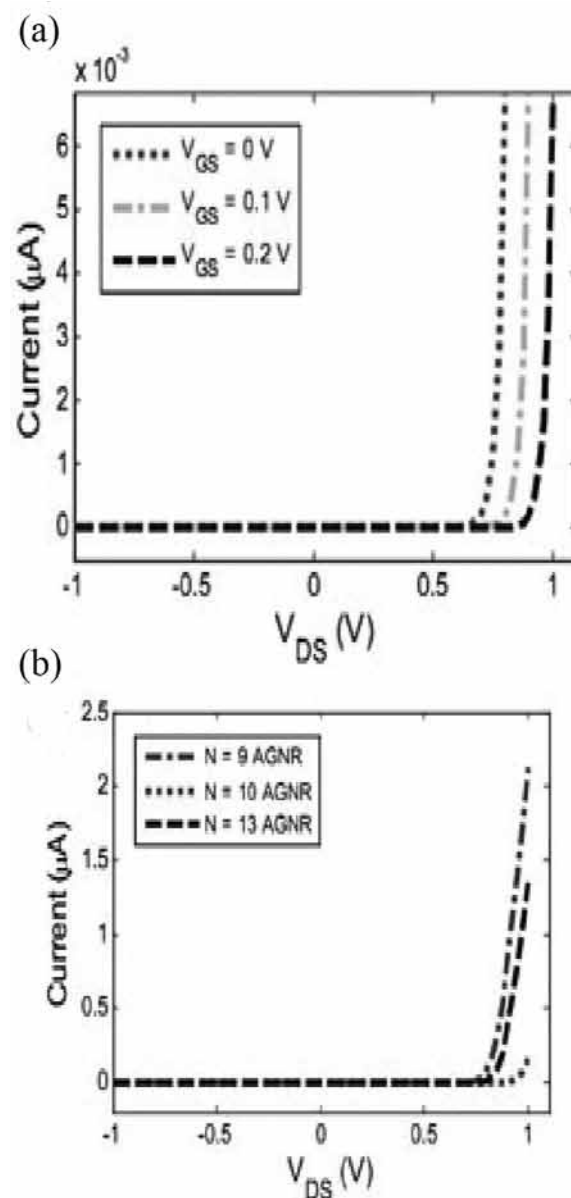


Figura 7: a) Curvas de IV para diodos *Schottky* cujo canal é fabricado com uma nanofita semicondutora de largura em torno de 1,2 nm, *gap* 1,1 eV e função trabalho igual a 4,6 eV. A tensão de *threshold* é variada de acordo com o potencial de porta aplicado, sendo a espessura do isolante igual a 2nm. 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. Fonte: Kargar (2009).

um terceiro eletrodo chamado porta (*Gate*) que é uma camada metálica, separada do canal (A nanofita) por uma camada de óxido (SiO_2 , por exemplo). Os transistores baseados em nanofitas de grafeno possuem essencialmente a mesma estrutura (SCHWIERZ, 2011).

Em Jyotsna (2010) foi proposta 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 aplicada no sentido perpendicular ao plano da fita, sendo este separado por uma camada dielétrica de $t_{ox}=1,5$ nm. Como mostra a Figura 8.

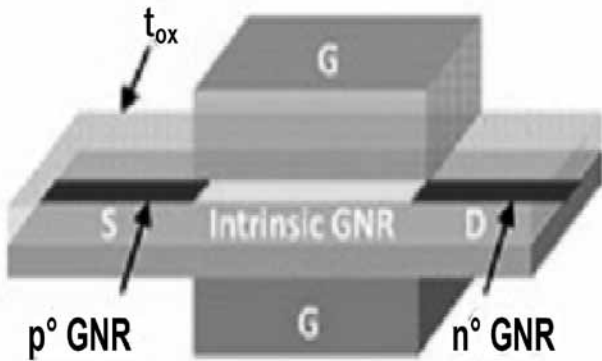


Figura 8: Representação esquemática de um nanotransistor composto de uma nanofita semicondutora, em geral com bordas *armchair* ligadas a dois eletrodos metálicos do tipo-p e tipo-n (obtidas através de dopagem). Há uma porta separada por uma distância, t_{ox} .
Fonte: Jyotsna (2010).

No eletrodo fonte, tem-se uma densidade de estados maior que no eletrodo *dreno*. Isso quer dizer que, enquanto este último (*dreno*) busca preencher os estados no interior do canal (injetando elétrons que se movem sob regime balístico), o primeiro (*fonte*) busca retirar os elétrons do canal, a fim de preencher seus próprios estados. Ao ser aplicada 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 Sai-Kong (2010) 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 Figura 9.

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

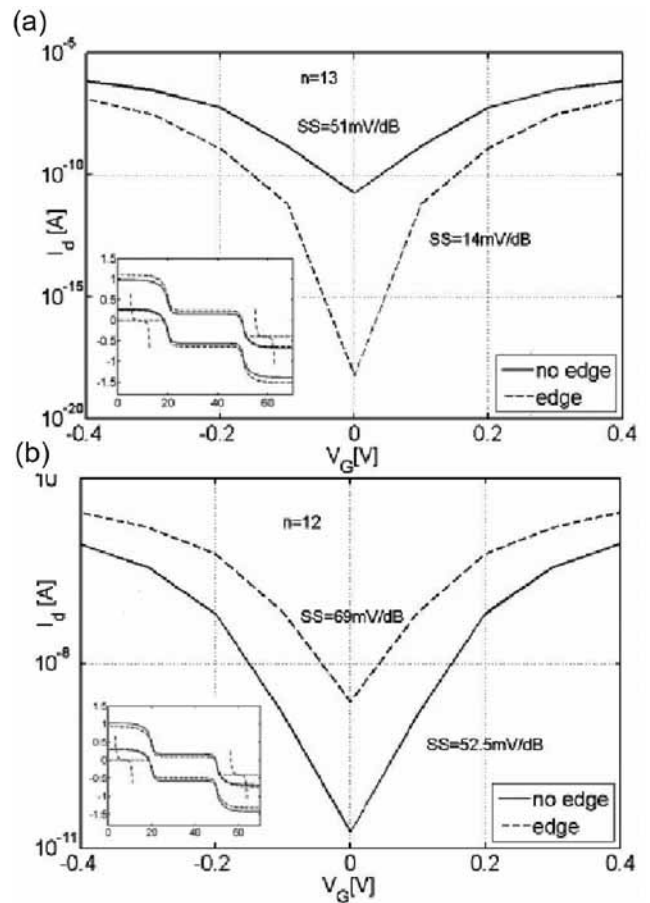


Figura 9: $\log(I_D)$ vs. Tensão de Porta (V_G) para o GNR FET de tunelamento para Tensão de Dreno $V_D=0.4$ V e para (a) $n=13$ AGNR e (b) $n=12$ AGNR. Na presença de relaxação das ligações de borda (pontilhadas) e na ausência (linha sólida). Nos gráficos internos são mostrados os perfis de banda.
Fonte: Jyotsna (2010).

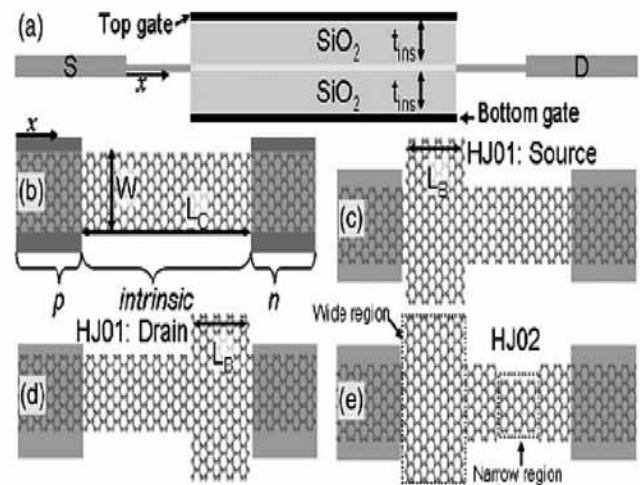


Figura 10: Representação esquemática de FETs baseados em grafeno onde se estabeleceu heterojunções no canal.
Fonte: Kai-Tak (2010).

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) (YU-MING, 2011), como mostra a Figura 11.

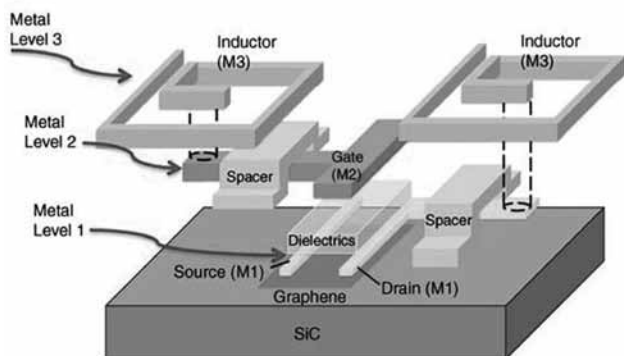


Figura 11: Figura esquemática mostrando a montagem do circuito misturador de RF baseado em grafeno.
Fonte: Yu-Ming (2011).

De acordo com Yu-Ming (2011), 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 Figura 12 mostra um esquema de funcionamento do circuito, em que 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. Já na Figura 13 tem-se o espectro de frequências de saída para sinais de entrada de 3.8 GHz em P1 e 4 GHz em P2.

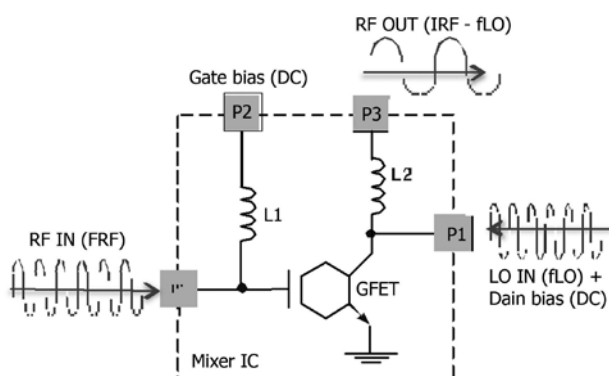


Figura 12: Diagrama do circuito misturador de frequências RF. O FET de grafeno está representado pela estrutura hexagonal.
Fonte: Yu-Ming (2011).

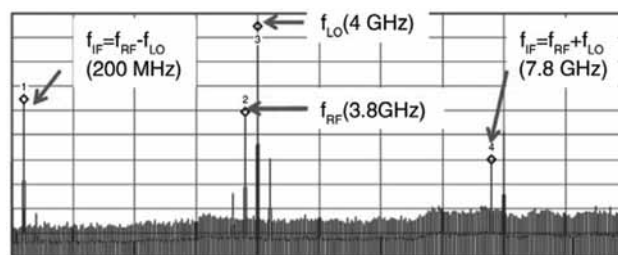


Figura 13: Espectro de saída para uma faixa entre 0 e 10GHz.
Fonte: Geim (2007).

CONCLUSÃO

Os dispositivos em escala nanométrica já são realidade. Contudo, para alcançar tal patamar, fez-se necessária uma mudança na abordagem de confecção de tais instrumentos. Ao invés de meramente “miniaturizar” os componentes, adotou-se uma 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 à 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 iguais ou superiores aos encontrados em microeletrônica.

A começar por estruturas simples na microeletrônica, o grafeno apresentou curvas características muito boas em relação às encontradas 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.

Outros nanodispositivos estudados 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 mostrada uma aplicação real da capacidade de aplicação dos dispositivos baseados em grafeno em um circuito eletrônico misturador de canais de RF, cujo funcionamento se mostrou superior aos usuais, em uma escala nanométrica, mostrando que os dispositivos de grafeno já são realidade.

REFERÊNCIAS

- YU, B.; SOHIER, T. Ultralow-voltage design of graphene PN junction quantum reflective switch transistor. **Applied Physics Lett**, New York, v. 98, p. 213104, 2011.
- BERGER, C. et al. Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial grapheme. **Science**, New York, v. 312, p. 1191-1196, 2006.
- CHOUDHURY, M. R. et al. Graphene nanoribbon FETs: technology exploration for performance and reliability. **IEEE Transactions on Nanotechnology**, New Jersey, v. 10, n. 4, p. 727-736, 2011.
- CHUN-CHUNG, C. et al. Graphene-silicon schottky diodes. **Nano Letters**, Washington, v. 5, 2011.
- DATTA, S. **Quantum transport: atom to transistor**. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- DAWSON, P. et al. The electrical characterization and response to hydrogen of Schottky diodes with a resistive metal electrode-rectifying an oversight in Schottky diode investigation. **Journal of Physics D**, Philadelphia, v. 44, 2011.
- GEIM, A. K.; MACDONALD, A. H. Graphene: exploring carbon flatland. **Physics Today**, New York, v. 60, p. 35-41, 2007.
- GEIM, A. K.; Novoselov, K. S. The rise of grapheme. **Nature Mater**, London, v. 6, p. 183-191, 2007.
- HEER, W. A. de et al. Pionics: the emerging science and technology of graphene-based nano-electronics. In: ELECTRON DEVICES MEETING TECH, 2007, [S.l.]. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2007. p. 199-202.
- ISLAM, Muhammad R. et al. Schottky diode via dielectrophoretic assembly of reduced graphene oxide sheets between dissimilar metal contacts. **New Journal of Physics**, Philadelphia, v. 13, 2011.
- JYOTSNA, C.; JING, G. Atomistic simulation of graphene nanoribbon tunneling transistors. In: NANO-ELECTRONICS CONFERENCE (INEC), 3., 2010, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: IEEE, 2010. p. 200-201.
- KAI-TAK, L. et al. A simulation study of graphene-nanoribbon tunneling FET with heterojunction channel. **IEEE Electron Device Letters**, New Jersey, v. 31, 2010.
- KARGAR, A.; CHENGKUO, L. Graphene nanoribbon schottky diodes using asymmetric contacts. In: IEEE CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY, 9., 2009, Genoa. **Proceedings...** Genoa: IEEE, 2009. p. 243-245.
- KATSNELSON, M. **Graphene: carbon in two dimensions: materials today**. New York: Cambridge University Press, 2007.
- LOHMANN, T.; KLITZING, K. von; SMET, J. H. Four-terminal magneto-transport in graphene p-n junctions created by spatially selective doping. **Nano Letter**, Washington, v. 9, 2009.
- NOORDEN, R. V. Moving towards a graphene world. **Nature**, London, v. 442, p. 228-229, 2006.
- NOURBAKHSH, A. et al. Modified, semiconducting graphene in contact with a metal: characterization of the Schottky diode. **Applied Physics Letters**, Argonne, v. 97, 2010.
- NOVOSELOV, K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. **Science**, New York, v. 306, p. 666-669, 2004.
- PEZOLDT, J.; HUMMEL, C.; SCHWIERZ, F. Graphene field effect transistor improvement by graphene-silicon dioxide interface modification. **Physica E**, Toronto, v. 44, 2011.
- REICH, S. Tight-binding description of graphene. **Physical Review B**, New York, v. 66, n. 3, 2002.
- SAI-KONG, C. et al. Device physics and characteristics of graphene nanoribbon tunneling FETs. **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 57, 2010.
- SCHWIERZ, F. Electronics: industry-compatible graphene transistors. **Nature**, London, v. 472, 2011.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic circuits**. 5th ed. Oxford: Oxford University, 2004. 1 CD-ROM.
- SON, Y. W.; COHEN, M. L.; LOUIE, S. G. Energy gaps in graphene nanoribbons. **Physical Review B**, New York, v. 97, n. 21, 2006.
- TONGAY, S. et al. Tuning Schottky diodes at the many-layer-graphene/ semiconductor interface by doping. **Carbon**, Toronto, v. 49, 2011.
- XINMING, L. et al. Graphene-on-silicon Schottky junction solar cells. **Advanced Materials**, Malden, v. 22, 2010.
- YU-MING, L. et al. Wafer-scale graphene integrated circuit. **Science**, New York, v. 332, n. 6035, p. 1294-1297, 2011.
- ZHANG, Y. et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in grapheme. **Nature**, London, v. 438, p. 201-204, 2005.