

CONTROLE DA DOPAGEM ELÉTRICA EM GRAFENO ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DE TENSÃO ELÉTRICA UTILIZANDO GEL IÔNICO

Jonas Damasceno Silva (IC) e Christiano José Santiago de Matos (Orientador)

Apoio: PIBIC CNPq

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo de pesquisa controlar e aumentar significativamente a dopagem do grafeno através da aplicação de uma voltagem entre o grafeno e um gel iônico. Para isso foi utilizado grafeno CVD em uma montagem de dispositivo capacitivo, utilizando-se um gel iônico a base de Tetraidrofurano (THF) e perclorato de lítio (Li.Cl.O₄). Os resultados foram satisfatórios mostrando a possibilidade de uma dopagem elevada ao utilizar-se desse método, chegando a um deslocamento total de 18,2 cm⁻¹ da banda G Raman do grafeno. Assim, abrem-se possibilidades de utilizar essa montagem para dopagem de grafeno para aplicações plasmônicas em comprimentos de onda no infravermelho.

Palavras-chave: grafeno, dopagem, gel iônico, tensão elétrica.

ABSTRACT

This work aimed to control and significantly increase the doping of graphene through the application of a voltage between graphene and an ionic gel. For this, CVD graphene was used in a capacitive device that used an ionic gel based on Tetrahydrofuran (THF) and lithium perchlorate (Li.Cl.O₄). The results were satisfactory showing the possibility of a high doping level when this method is used, reaching 18,2 cm⁻¹ of total shift in the Raman G band. The work opens up possibilities to use this structure for doping of graphene for plasmonic applications at infrared wavelengths.

Keywords: graphene, doping, ionic gel, electrical voltage.

1. INTRODUÇÃO

O grafeno, o primeiro material bidimensional a ser produzido, vem atraindo grande interesse em diversas áreas como a eletrônica e a óptica devido a conter propriedades únicas, como por exemplo seus portadores de carga exibirem mobilidade intrínseca enorme, podendo percorrer micrômetros sem sofrer espalhamento a temperatura ambiente (GEIM, 2009). Por esse motivo, e por sua excelente capacidade de dissipação térmica, o grafeno pode sustentar densidades de corrente seis ordens de magnitude superiores às do cobre, além de apresentar outras propriedades altamente atraentes, como alta resistência mecânica e impermeabilidade a gases (GEIM, 2009).

O grafeno também apresenta um grande potencial para a obtenção de comportamentos ópticos exóticos, tais como a absorção completa dentro de uma única camada atômica e a implementação de dispositivos de óptica quântica em um ambiente de estado sólido (esses dispositivos normalmente requerem gases a baixas pressões em temperaturas baixíssimas) (ABAJO, 2014). Para que esses comportamentos sejam obtidos, é necessário se excitarem modos de plásmons de superfície no grafeno, que são oscilações coletivas da densidade eletrônicas, e que podem se propagar pela superfície do material acoplados a uma onda eletromagnética (ABAJO, 2014).

Uma forma de excitar os plásmons é a injeção de cargas em grafeno, conhecida como dopagem elétrica. Caso se consiga dopar o grafeno de modo significativo, a atingir 400meV da energia de Fermi, a dopagem altera suas propriedades ópticas e possibilita a excitação de plásmons no infravermelho médio, criando-se grandes perspectivas tecnológicas, com o desenvolvimento de dispositivos nanofotônicos como moduladores eletro-ópticos, sensores, e sistemas plasmônicos para estudos quânticos. Tanto o interesse científico, quanto os avanços tecnológicos permitidos por esses dispositivos, significativamente mais compactos do que dispositivos fotônicos convencionais, justificam a presente proposta.

Entretanto, apesar das excelentes possibilidades oferecidas pela plasmônica em grafeno, a excitação de plásmons em comprimentos de onda ópticos exige uma densidade superficial de portadores de carga elevada. Em geral, esta é obtida pela aplicação de uma voltagem entre o grafeno e um outro terminal elétrico, num arranjo do tipo capacitor. Num capacitor clássico, de placas paralelas, a dopagem requerida requer campos elétricos elevadíssimos, que podem romper a rigidez dielétrica do dielétrico do capacitor. Alternativamente, pode-se utilizar um gel iônico, que apresenta altíssima capacitância e que portanto reduz a voltagem requerida (CHEN et al., 2014). Como será detalhado adiante, esta

pesquisa visa à implementação de uma estrutura capacitadora com grafeno e gel iônico, possibilitando aplicações plasmônicas.

Sendo assim o objetivo principal desta pesquisa é controlar e aumentar significativamente a dopagem do grafeno através da aplicação de uma voltagem entre o grafeno e um gel iônico. Possuindo alguns objetivos específicos como: (1) A transferência do grafeno para um substrato adequado; (2) a preparação e deposição de um gel iônico sobre o grafeno e a realização da montagem para os contatos elétricos; (3) a caracterização da estrutura e da dopagem em função da tensão aplicada, utilizando espectroscopia Raman.

A seguir, apresenta-se um referencial teórico sobre plásmons em grafeno, sobre dopagem elétrica de grafeno e sua caracterização através de espectroscopia Raman, assim como uma breve descrição sobre o gel iônico. Na sequência, a metodologia utilizada para a transferência do grafeno, a preparação do gel, e a montagem do dispositivo é apresentada. Finalmente, os resultados são apresentados, discutidos e analisados, e uma conclusão encerra o artigo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Plásmons de Grafeno

A plasmônica é a área científico-tecnológica que estuda a excitação e propagação de plásmons de superfície, uma forma de excitação eletromagnética que corresponde à oscilação na densidade de carga na superfície de um condutor. Estes plásmons podem se acoplar a uma onda eletromagnética, sendo assim capazes de concentrar a energia da luz em regiões nanométricas, aumentando enormemente sua intensidade e funcionando como antenas ópticas (GHAEMI et al., 1998). Por essa razão a plasmônica ganhou uma grande importância na área da nanofotônica, sendo primeiro desenvolvida em alguns metais (WILLIAMS et al., 2003).

Com o advento do grafeno, em 2004, iniciaram-se pesquisas de plasmônica em grafeno. Uma das primeiras demonstrações foi uma célula solar de grafeno que utilizava nanoantenas plasmônicas consistindo de minúsculas estruturas metálicas, cuidadosamente organizadas sobre o grafeno, que eram capazes de aumentar em 20 vezes a absorção da luz (ECHTERMEYER et al., 2011). Note, entretanto, que nesse caso os plásmons eram excitados no metal, e não no grafeno.

Em 2012, pesquisadores foram capazes de observar, pela primeira vez, plásmons em grafeno (CHEN et al., 2012), utilizando a excitação oferecida por um feixe óptico no infravermelho médio (FEI et al., 2012). O grafeno tem a propriedade de se tornar um bom condutor apenas quando portadores de carga são injetados em sua estrutura. Para isso, um circuito eletrônico do tipo transístor de efeito de campo pode ser criado, aplicando-se uma

tensão de porta entre um eletrodo contactado ao grafeno e um outro eletrodo separado deste material por uma fina camada dielétrica. Além disso, injetando-se cargas no grafeno consegue-se alterar a dispersão dos plásmons, fazendo com que estes sejam observados em diferentes comprimentos de onda (GRIGORENKO; POLINI; NOVOSELOV, 2012).

É interessante a excitação de plásmons utilizando comprimentos de ondas mais curtos no infravermelho médio, uma vez que é nessa região que componentes e dispositivos ópticos estão mais disponíveis. Entretanto, para que plásmons sejam observados nesta faixa espectral, uma dopagem extremamente alta deve ser obtida, o que nem sempre pode ser obtido com estruturas de transistores mais convencionais.

Dopagens consideravelmente mais altas podem ser obtidas aplicando-se uma voltagem entre o grafeno e um gel iônico (LAUCHNER et al., 2015). O gel iônico é uma estrutura em que íons móveis estão dispersos em uma estrutura de gel. Quando uma voltagem é aplicada entre o gel e o grafeno, os íons se acumulam na superfície do grafeno, gerando uma capacitância ultra alta que dopa significativamente o grafeno. Em um trabalho, plásmons amplamente sintonizáveis (atingindo comprimentos de onda de $\sim 7,8 \mu\text{m}$) com tensão relativamente baixa ($\sim 4 \text{ V}$) foram obtidos (HU et al., 2015).

2.2 Espectroscopia Raman do Grafeno Dopado

A espectroscopia Raman é uma das técnicas de caracterização mais utilizadas na ciência e tecnologia do carbono. O espectro Raman é devido ao espalhamento inelástico de uma radiação monocromática (tipicamente um laser) que incide sobre uma molécula ou cristal. A interação da radiação com a molécula/cristal é tal que a molécula/cristal muda de estado vibracional. Para que a energia do processo seja conservada, a energia (e consequentemente a frequência) dos fótons é alterada, dando origem a um espectro óptico espalhado que contém informação sobre os modos vibracionais do material. A medição do espectro Raman do grafeno desencadeou um enorme esforço para se compreender as interações dos fônons (vibrações) e elétrons no grafeno, bem como a influência do número e orientação de camadas, da deformação mecânica, da dopagem elétrica, da desordem, entre outros (MALARD et al., 2009).

A variação do espectro Raman do grafeno em função da dopagem, por exemplo, já foi amplamente estudada (BRUNA et al., 2014). Foi observado, por exemplo, que há um deslocamento do pico Raman conhecido como banda G, com o nível de dopagem (e, portanto, com o nível de Fermi) do grafeno. Para densidades de portadores acima $\approx \pm 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, a energia do fônon da banda G aumenta linearmente com as mudanças na energia de Fermi (YAN et al., 2007). Desta forma, a posição da banda G vem sendo amplamente utilizada como referência para a determinação da dopagem elétrica em grafeno.

2.3 Gel iônico

Geralmente, os eletrólitos em gel são preparados pela mistura de compostos eletricamente condutivos (ácidos, bases ou sais que formam íons de condução) com uma matriz polimérica (por exemplo, álcool polivinílico, PVA, ou polimetil-metacrilato, PMMA) dissolvidos em um líquido como água ou Tetraidrofurano (THF).

A utilização de um gel iônico como dielétrico em uma montagem do tipo de um capacitor, no qual o grafeno é um dos eletrodos, oferece uma maior capacitância (CHEN et al., 2014) facilitando a dopagem do grafeno. O gel utilizado nessa pesquisa é composto por THF, PMMA e perclorato de lítio (LiClO_4), seguindo-se as orientações de um artigo sobre plásmons em estruturas moleculares (LAUCHNER et al., 2015).

3. METODOLOGIA

3.1 Transferência do Grafeno

O Grafeno utilizado para esse projeto foi obtido através do processo CVD (*chemical vapor deposition*), que consiste no crescimento do grafeno sobre uma fina folha de cobre através da decomposição do gás metano sobre o substrato, geralmente realizada a 1000°C (BARCELOS; LACERDA, 2011). O crescimento pode ser realizado em baixa pressão ou em pressão atmosférica, sob uma mistura de um gás carbonáceo e hidrogênio em diversas proporções. Após o crescimento, temos grafeno em os ambos lados do cobre, sendo que deseja-se transferir apenas uma das camadas para o substrato de trabalho.

O processo utilizado para se transferir o grafeno para o substrato desejado foi o processo conhecido como *Wet Transfer* (KIM et al., 2016), que é muito utilizado na literatura, e no qual se introduziram algumas alterações. A primeira parte do processo de transferência consiste em se depositar um filme de PMMA sobre o grafeno em um lado da folha de cobre, que será utilizado para sustentação. Para a preparação do filme, foi utilizada uma solução de 9% de PMMA, em massa, em Anizol. A solução foi colocada sobre o grafeno e através de um processo de *spin coating* foi produzido um filme uniforme de aproximadamente 300 nm. Assim, a face de cima do cobre passa a conter o filme de PMMA sobre o grafeno, enquanto a face de baixo apresenta somente grafeno, como mostrado na Fig. 1(a).

A segunda parte trata da remoção do grafeno da face inferior do cobre. Esse processo é importante para que, quando da remoção do cobre, as folhas de grafeno de ambas as faces se superponham, formando inúmeros defeitos na estrutura final. Para isso foi utilizado um equipamento de limpeza por plasma de O_2 , que remove o grafeno não protegido pelo PMMA.

Em seguida, são utilizados 1,75g de persulfato de amônia dissolvidos em 25ml de água deionizada em uma placa de petri para corroer o cobre da amostra, que é deixada flutuando

sobre a solução por 2 horas, como é demonstrado na Fig. 1(b), até que a amostra esteja totalmente limpa do cobre. Em seguida a amostra (grafeno sob o filme de PMMA) é pescada e colocada em um béquer com água deionizada, como demonstrado na Fig. 1(c), para que resquícios da solução de persulfato de amônia sejam removidos. Essa limpeza dura 20 minutos e é repetida três vezes, trocando-se a amostra de béquer com água deionizada.

Após a limpeza, o grafeno (ainda com o PMMA) é pescado utilizando-se o substrato desejado, que no caso é uma lamínula para microscópios (de vidro), Fig. 1(d). Essa amostra é deixada para secar ao ar por 12 horas e após esse tempo são feitos novos banhos de 2 minutos na acetona e em seguida 2 minutos no álcool isopropílico para a remoção do PMMA. Esses banhos são repetidos três vezes, até que o PMMA tenha sido totalmente retirado. Por fim a amostra é secada por um pequeno fluxo de gás nitrogênio e guardada em uma dissecadora. A vista esquemática superior final é observada na Fig. 1(e).

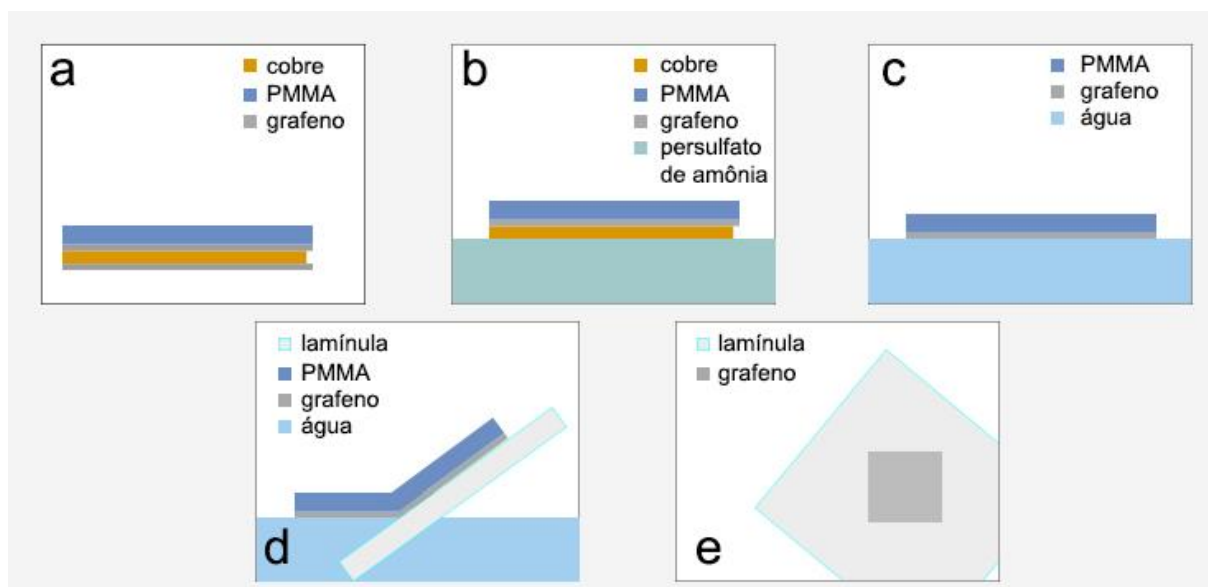


Fig. 1. Desenhos esquemáticos ilustrando os diversos passos do processo de transferência. (a) Amostra depois de depositado o PMMA. (b) Corrosão do cobre. (c) Banhos de água deionizada. (d) Pesca da amostra com o substrato. (e) Resultado final após a transferência. Imagens ilustrativas; tamanhos e proporções não estão corretos.

3.2 Preparação do Gel Iônico

Para a preparação do gel iônico, foram utilizados 10 ml de Tetraidrofurano (THF), 0,212g de perclorato de lítio (LiClO_4) e 1,778g de polimetil-metacrilato (PMMA), que equivale a 20% de massa de THF.

Primeiramente foi montada uma estrutura para a preparação do gel, que consiste em um agitador magnético sobre o qual um frasco segurado por uma garra era posicionado, Fig. 2. Dentro do frasco foram colocados os 10ml de THF e em seguida o LiClO_4 , com o agitador ligado. Depois disso, o frasco foi fechado e uma agulha foi introduzida no septo existente na

tampa para que um pequeno fluxo de gás nitrogênio fosse introduzido, uma segunda agulha vazia também era introduzida para saída do excesso de gás diminuindo a pressão interna, enquanto o perclorato de lítio se dissolvia no THF. Em seguida abria-se o frasco e, sem parar o agitador, adicionava-se aos poucos o PMMA. Assim que o PMMA era introduzido, uma solução esbranquiçada era observada. Novamente o frasco era fechado e posto o pequeno fluxo de gás nitrogênio reiniciado, permanecia introduzida a outra agulha vazia para aliviar a pressão imposta dentro do frasco enquanto a solução era agitada.

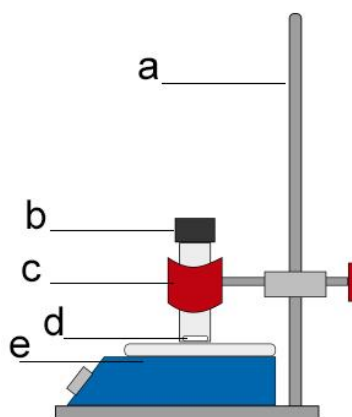


Fig. 2. Estrutura usada para a preparação do gel iônico. (a) Base para a garra; (b) frasco para produção e armazenamento do gel; (c) garra utilizada para segurar o frasco; (d) barrinha magnética utilizado para agitar o gel; (e) agitador magnético.

A agitação era mantida por 1 hora, após o que as agulhas eram retiradas do frasco e este era vedado e deixado em agitação por mais 12 horas, até que a solução ficasse uniforme e transparente. Depois disso a solução estava pronta para uso; o frasco era retirado da agitação e armazenado vedado, para preservação do gel, até sua utilização.

3.3 Montagem da estrutura capacitadora

Para a montagem do dispositivo capacitivo são necessários dois eletrodos, entre os quais é colocado o gel iônico. Um dos eletrodos é o grafeno depositado sobre a lamínula de microscópio, conforme já descrito, já que o objetivo é se introduzir cargas nesse material. O segundo eletrodo utilizado foi um filme de ouro depositado sobre outra lamínula.

3.3.1 Eletrodo de grafeno

O eletrodo feito de grafeno é obtido pela a transferência previamente descrita. Para a utilização desse eletrodo é necessário que o grafeno esteja contínuo e conduza de uma extremidade a outra. Para se confirmar isso, era feito um teste de condução no grafeno. A preparação deste teste se resume em se fixar, utilizando tinta de prata, dois fios de ouro extremamente finos (100µm de diâmetro) em extremidades opostas do grafeno, conforme

observado na Fig. 3. As extremidades opostas dos fios eram afixadas por fitas adesivas condutivas de cobre.



Fig. 3. Desenho esquemático do grafeno sobre lamínula com fios de ouro ligados a este através de tinta de prata. Os fios de ouro terminam em fitas de cobre que podem facilmente ser contactadas eletricamente.

O teste era feito utilizando-se um multímetro e verificando a resistência existente entre uma fita de cobre e a outra. Uma resistência entre 3,5 k Ω e 6 k Ω foi observada em amostras consideradas boas. Após o teste de continuidade, os contatos eram aproveitados para a aplicação de tensão elétrica na montagem final.

3.3.2 Eletrodo de Ouro

Como mencionado, o outro eletrodo utilizado foi um filme de ouro depositado sobre uma lamínula. O processo de deposição era realizado através de *sputtering*, que consiste na ejeção de partículas ouro a partir de um material alvo sólido, no caso ouro, devido ao bombardeamento do alvo por íons energéticos (BEHRISCH; ECKSTEIN, 1981). As partículas ejetadas se depositam com uma espessura estimada entre 25 a 30 nm sobre a amostra, no caso a lamínula. Por final, era colocado em uma extremidade lamínula uma fita de cobre para facilitar os contatos futuros no dispositivo. Observa-se que a utilização de uma lâmina de microscópio, ao invés de uma lamínula, como substrato também seria possível, e teria a vantagem de aumentar a robustez mecânica da montagem.

3.3.3 Montagem

Com os eletrodos e o gel iônico preparados, inicia-se o processo de montagem do dispositivo. Para delimitar a região coberta pelo gel e para que este não escorra, assim como

para separar os dois eletrodos, foi utilizada uma folha de teflon com aproximadamente 1mm de espessura. No centro desta, cortava-se um furo quadrado, no qual o gel era depositado, com um tamanho menor que o grafeno, para que o teflon impedisse o contato do gel com a tinta de prata no grafeno.

A montagem, ilustrada na Fig. 4, era iniciada utilizando-se a lamínula com o eletrodo de ouro como base, sobre a qual colocava-se o teflon. O gel era então introduzido no quadrado delimitado pelo furo no teflon com uma espátula esterilizada. Logo em seguida colocava-se a lamínula com grafeno, com o grafeno voltado para baixo e alinhado com a região em que o gel estava.

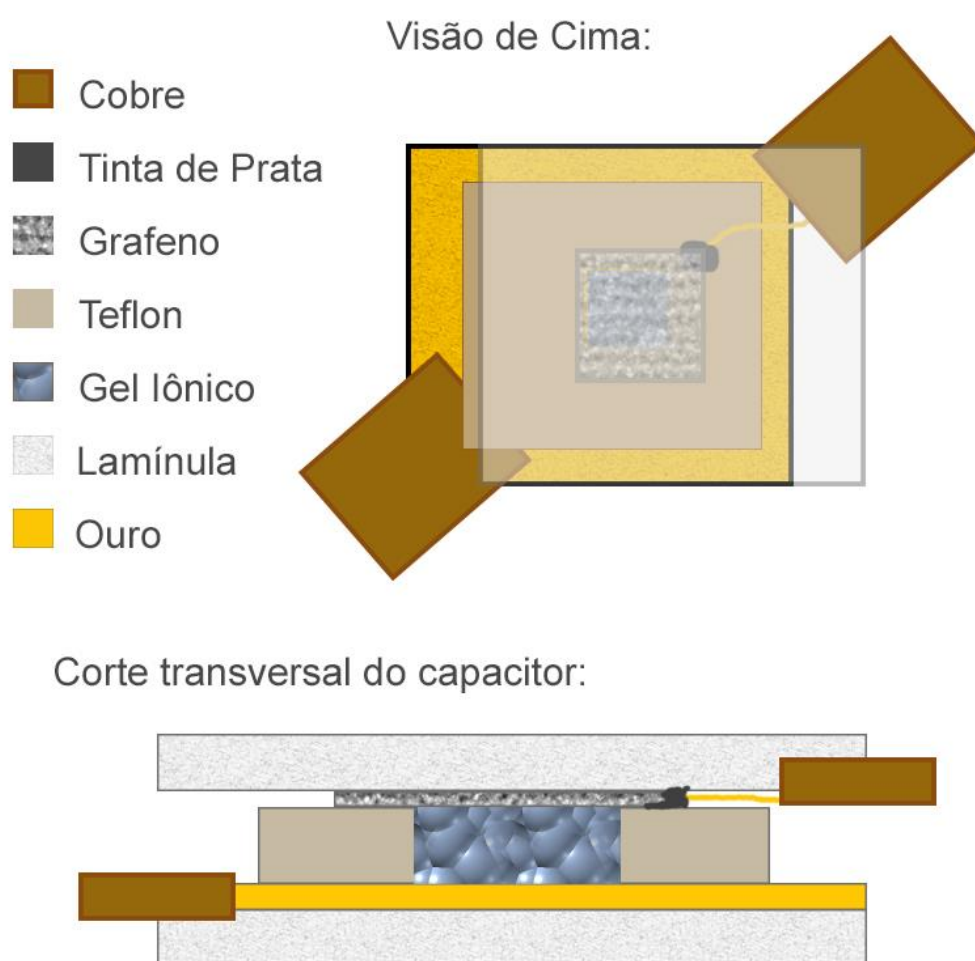


Fig. 4. Desenho esquemático das vistas superior e lateral da montagem final do capacitor.

Por fim, uma leve pressão era aplicada, impedindo que o gel escorresse, utilizando-se dois pregadores afixados, às bordas do dispositivo.

3.4 Aplicação da tensão e monitoramento do espectro Raman

Após a montagem do capacitor, este era levado ao microscópio de espectroscopia Raman no qual foi utilizado o laser de 532nm com uma lente objetiva de 10x, onde para focar

no grafeno o laser atravessava uma lâmina de vidro. Assim a banda G do grafeno, normalmente localizada entre 1585 a 1600 cm^{-1} dependendo da dopagem, era visualizada. A Fig. 5 mostra um espectro típico observado, no qual a banda G localiza-se em 1594 cm^{-1} e o resto do espectro são os picos característicos gerados pelo o gel iônico.

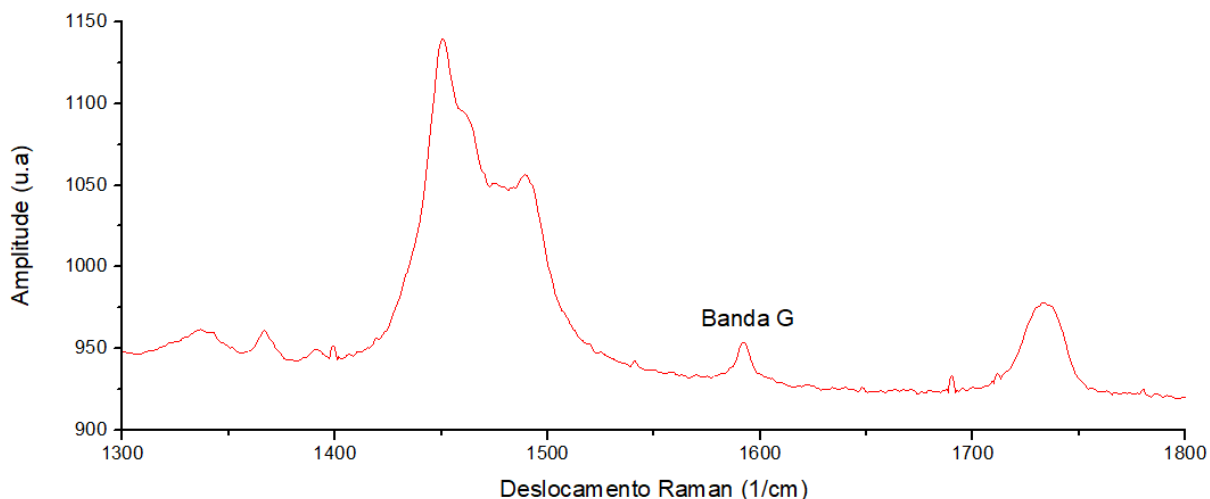


Fig. 5. Espectro Raman típico de um dispositivo montado. A localização da banda G do grafeno é indicada.

Depois que a banda G era identificada, dois cabos eram conectados ao dispositivo, sendo um no eletrodo de grafeno e o outro no outro eletrodo de ouro. Em ambos os casos as fitas de cobre previamente preparadas eram utilizadas. Como mostra a Fig. 6 os cabos eram então conectados aos terminais de uma fonte de tensão DC que pode aplicar entre 0 -30V, com precisão de 0,1 V.

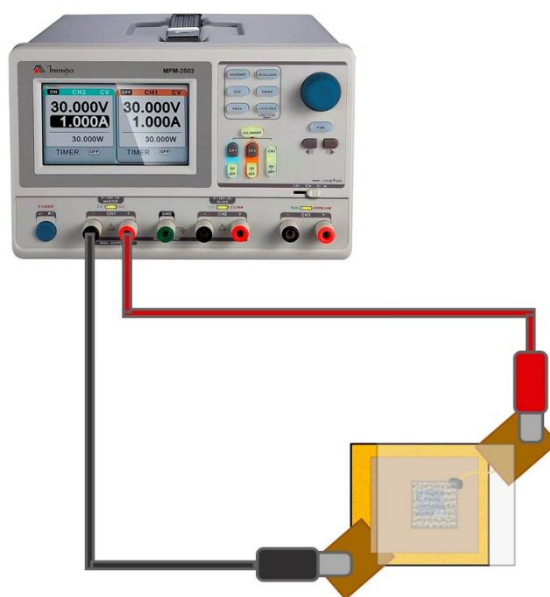


Fig. 6. Desenho esquemático ilustrando a fonte DC conectada ao dispositivo capacitivo através de dois cabos banana-jacaré.

Espectros Raman foram então obtidos em função da tensão aplicada, iniciando-se em 0v e elevando-se a tensão até 2 v, em passos de 0,1V. Após o ajuste da tensão, esperava-se um tempo de 1 minuto antes de se obter um novo espectro. Em seguida, a polaridade da fonte foi invertida para que a faixa entre 0 e -2v fosse medida. Todas as medidas foram realizadas na mesma região do grafeno.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A Fig. 7 mostra as posições da banda G do grafeno em função das tensões aplicadas. Observa-se que a posição da banda está diretamente ligada à tensão aplicada aos terminais do capacitor. Além disso pode-se notar que, para tensões negativas, o deslocamento inicialmente é para a esquerda e, a partir de -1V, o deslocamento passa a ser para a direita. Isso indica que há uma dopagem residual no grafeno, que é removida com a aplicação de uma tensão negativa. Para as maiores tensões aplicadas pode-se notar um grande deslocamento de 18 cm^{-1} além de uma diminuição de amplitude. Esse comportamento é compatível com o grafeno estar sendo dopado (MALARD et al., 2009).

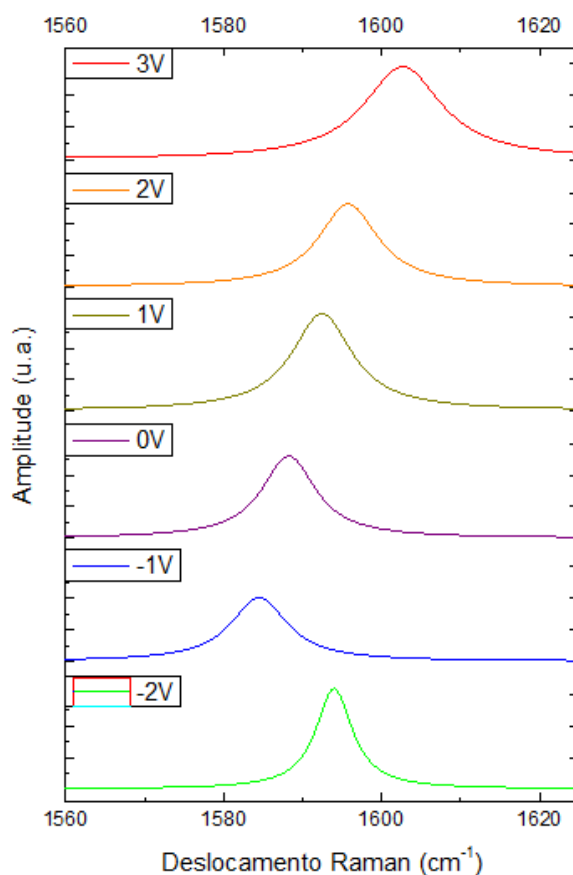


Fig. 7. Espectros Raman mostrando a banda G do grafeno para tensões aplicadas de -2V, -1V, 0V, 1V, 2V e 3V.

A Fig. 8 mostra a posição espectral da banda G em função da tensão elétrica aplicada, para todas as tensões utilizadas. Nota-se que a posição varia de $1584,5 \text{ cm}^{-1}$, para -1 V de tensão, a $1602,7 \text{ cm}^{-1}$, ao se aplicar 3 V de tensão, correspondendo a um deslocamento total de $18,2 \text{ cm}^{-1}$. Estima-se analisando a literatura (MALARD et al., 2009) que este deslocamento corresponde a 454 meV de nível de Fermi considerando uma dependência linear.

Com isso, é visto que ao aplicar a tensão utilizando o gel iônico o grafeno sofre uma dopagem, com a posição da banda G ultrapassando 1600 cm^{-1} . Isso demonstra que houve uma dopagem maior do que a observada em alguns artigos da literatura (MALARD et al., 2009). Se comparado outros resultados da literatura (YAN et al., 2007), o deslocamento observado corresponde a um nível de Fermi superior a $\pm 400 \text{ meV}$, sendo adequado para se trabalhar com efeitos plasmônicos no infravermelho. Isso abre possibilidades para aplicações futuras, como moduladores óticos e outros dispositivos que pode utilizar-se de uma estrutura capacitiva com o gel iônico como dielétrico com a finalidade de dopar o grafeno de modo a afetar comprimentos de ondas no infravermelho.

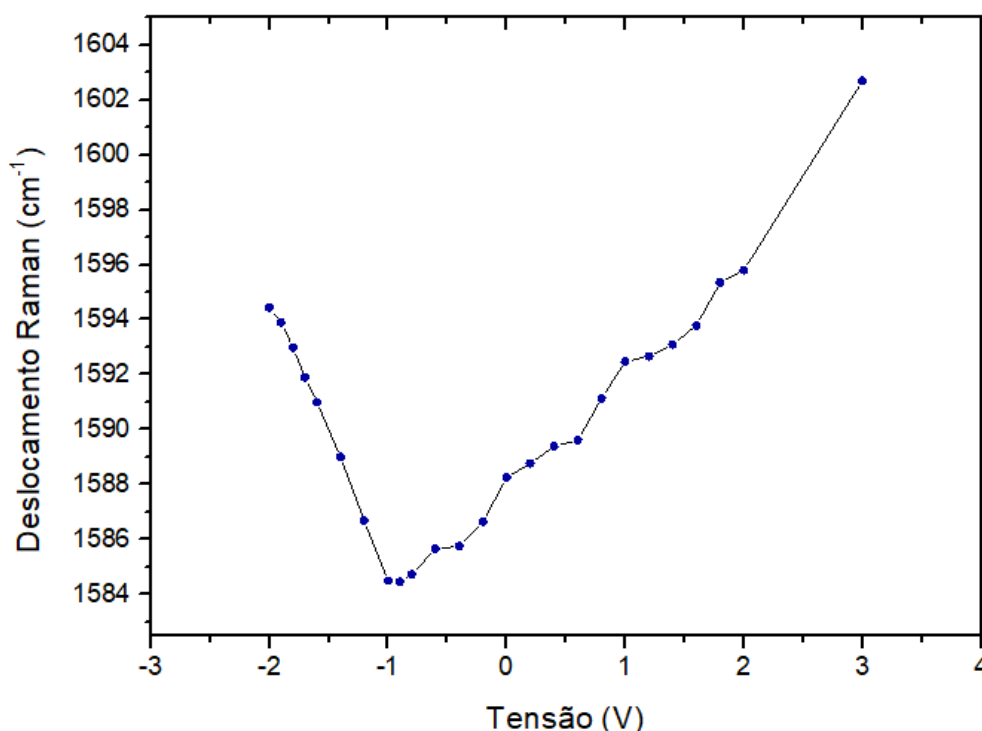


Fig. 8. Posição espectral da banda G em função da tensão elétrica aplicada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais objetivos que eram a transferência do grafeno para um substrato adequado, a preparação e deposição de um gel iônico sobre o grafeno, a realização da montagem para os contatos elétricos e a caracterização da estrutura da dopagem em função da tensão aplicada. Estes foram atingidos com a transferência do grafeno para uma lamínula depositando em cima o gel iônico feito a base de THF e PMMA, realizando assim a montagem do capacitor através de eletrodos de ouro e por fim caracterizando através de espectroscopia Raman enquanto aplicava-se uma tensão elétrica chegando a conseguir um deslocamento de $18,2 \text{ cm}^{-1}$ na banda G do grafeno, que corresponde aproximadamente a $\pm 400 \text{ meV}$ de nível de Fermi.

Acredita-se que maiores valores de dopagem possam ser obtidos utilizando-se a mesma montagem, mas aplicando-se tensões maiores. Estes testes, no entanto, ainda não foram realizados.

Por fim é válido propor melhorias para o dispositivo. Primeiramente, utilizar lâminas de microscópio, ao invés de lamínulas, tanto para deposição do ouro quanto para a transferência do grafeno, pode aumentar a resistência mecânica do dispositivo, fazendo-o mais robusto. Além disso, seria desejável substituir os pregadores por algum adesivo que fixasse o teflon às superfícies das lâminas, tornando o empacotamento do dispositivo mais permanente e robusto.

6. REFERÊNCIAS

ABAJO, F. Javier García de. Graphene Plasmonics: Challenges and Opportunities. *Acs Photonics*, [s.l.], v. 1, n. 3, p.135-152, 11 fev. 2014.

BARCELOS, Ingrid David; LACERDA, Rodrigo Gribel. Crescimento de grafeno por CVD em folhas de cobre. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

BEHRISCH, Rainer; ECKSTEIN, Wolfgang. Sputtering by Particle Bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies. Berlin: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 1981. 509 p.

BRUNA, M. et al. Doping dependence of the Raman spectrum of defected graphene. *Acs Nano*. [s.i]. 16 maio 2014.

CHEN, Jianing et al. Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons. *Nature*, [s.l.], v. 487, n. 7405, p.77-81, 20 jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11254>.

CHEN, Qiao et al. Effect of different gel electrolytes on graphene-based solid-state supercapacitors. *Rsc Adv.*, [s.l.], v. 4, n. 68, p.36253-36256, 2014.

ECHTERMEYER, T.j. et al. Strong plasmonic enhancement of photovoltage in graphene. *Nature Communications*, [s.l.], v. 2, n. 1, 30 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1464>.

FEI, Z. et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature*, [s.l.], v. 487, n. 7405, p.82-85, 20 jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11253>.

GEIM, A. K.. Graphene: Status and Prospects. *Science*, [s.l.], v. 324, n. 5934, p.1530-1534, 18 jun. 2009.

GHAEMI, H. F. et al. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes. *Physical Review B*, [s.l.], v. 58, n. 11, p.6779-6782, 15 set. 1998.

GRIGORENKO, A. N.; POLINI, M.; NOVOSELOV, K. S.. Graphene plasmonics. *Nature Photonics*, [s.l.], v. 6, n. 11, p.749-758, nov. 2012.

HU, Hai et al. Broadly tunable graphene plasmons using an ion-gel top gate with low control voltage. *Nanoscale*, [s.l.], v. 7, n. 46, p.19493-19500, 2015. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c5nr05175d>.

KIM, Seonyeong et al. Robust graphene wet transfer process through low molecular weight polymethylmethacrylate. *Carbon*, [s.l.], v. 98, p.352-357, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.027>.

LAUCHNER, Adam et al. Molecular Plasmonics. *Nano Letters*, [s.l.], v. 15, n. 9, p.6208-6214, 11 ago. 2015. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02549>.

MALARD, L.m. et al. Raman spectroscopy in graphene. *Physics Reports*, [s.l.], v. 473, n. 5-6, p.51-87, abr. 2009.

WILLIAMS, Shaun M. et al. Accessing Surface Plasmons with Ni Microarrays for Enhanced IR Absorption by Monolayers. *The Journal of Physical Chemistry B*, [s.l.], v. 107, n. 43, p.11871-11879, out. 2003.

YAN, Jun et al. Electric Field Effect Tuning of Electron-Phonon Coupling in Graphene. Physical Review Letters, [s.l.], v. 98, n. 16, 18 abr. 2007. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.98.166802>.

Contatos: jonasdamasceno@hotmail.com

cjsdematos@gmail.com