

Produção de heteroestruturas bidimensionais e fabricação de dispositivos para aplicação em nanoeletrônica

Área de Pesquisa: Nanotecnologia e Nanomateriais

*Pesquisador: **Alisson R. Cadore***

<http://lattes.cnpq.br/7547090345773696>

LNNano/CNPEM

RESUMO: Materiais bidimensionais (2D) isolados tem sido largamente estudado devido a suas propriedades elétricas, mecânicas e ópticas intrínsecas. Recentemente, a combinação de dois ou mais materiais 2D nas chamadas heteroestruturas de van der Waals (vdWHs) permitiu melhorias na qualidade eletrônica dos dispositivos e a observação de novos fenômenos quânticos inexistentes na forma isolada. Consequentemente, isso impulsionou aplicações tecnológicas desses materiais ultrafinos e híbridos, principalmente em áreas relacionadas à nanoeletrônica. Dada a variedade de materiais 2D naturais (metálicos, dielétricos, semicondutores e isolantes topológicos), distintos tipos de nanodispositivos podem ser idealizados e explorados teórica e experimentalmente. Deste modo, é possível vislumbrar o surgimento de novas tecnologias de baixo custo baseadas em dispositivos quânticos (eletro e optoeletrônico) ultrafinos, construídos a partir de vdWHs formadas por apenas materiais 2D. O projeto de pesquisa, aqui proposto, está centralizado na área de obtenção, caracterização e aplicação de materiais 2D e suas vdWHs em novos dispositivos quânticos. Além disso, o projeto busca contribuir para a área de dispositivos eletrônicos de alto desempenho e de baixo custo de produção.

1 – Introdução: Grande parte do desenvolvimento tecnológico que surgiu da física do estado sólido tem sua origem na fabricação e investigação de novos materiais e heteroestruturas semicondutoras. Atualmente, tais estruturas são o objeto de investigação de grande parte dos grupos de pesquisa que atuam em física da matéria condensada, bem como em ciências e engenharia de (nano)materiais e (nano)eletrônica. Isto se deve ao fato de que com a descoberta de novos materiais, dentre eles os 2D, estudos pioneiros de suas propriedades ópticas e eletrônicas surgem. Além disso, interessantes características podem surgir por alterações na estrutura eletrônica de diferentes materiais quando eles são colocados em contato e rodados em relação aos planos cristalinos. Avanços tecnológicos mais surpreendentes são alcançados quando um novo material, com propriedades e dimensionalidade incomum, é descoberto. Além disso, a busca por métodos de fabricação de nanoestruturas (miniaturização) e investigação de suas propriedades únicas tornam-se uma tendência natural. O número de diferentes heteroestruturas que pode ser obtido alterando-se estratégias de processamento é praticamente ilimitado e suas propriedades físicas nem sempre são facilmente previsíveis. Portanto, aplicações que façam uso dessa “nanotecnologia” são praticamente infinitas.

O estudo de materiais 2D cresceu desde a descoberta experimental do grafeno [1]. A investigação intensificada deste nanomaterial deu origem ao seu desenvolvimento em aplicações no campo de nanotecnologia de dispositivos ópticos, eletrônicos e optoeletrônicos [2]. Aliás, a busca por novos materiais 2D, similares ao grafeno, tem sido de grande interesse da comunidade científica [3]. Atualmente, sabe-se que as propriedades eletrônicas desses nanomateriais variam em função do seu número de camadas, do ângulo de alinhamento entre os planos (camadas) e, portanto, a investigação de suas propriedades fundamentais tem sido cada vez maior [4]. Além disso, são largamente estudados através do empilhamento artificial de cristais 2D, nas chamadas vdWHs [4,5], Fig. 1a. Portanto, aplicações inovadoras tornam-se possíveis a partir da criação dessas heteroestruturas 2D que combinam várias propriedades únicas, e que também apresentam características inexistentes nos materiais isolados e, consequentemente, potencializam a realização de nanodispositivos baseados nesses materiais híbridos ultrafinos [4,5], Fig. 1b.

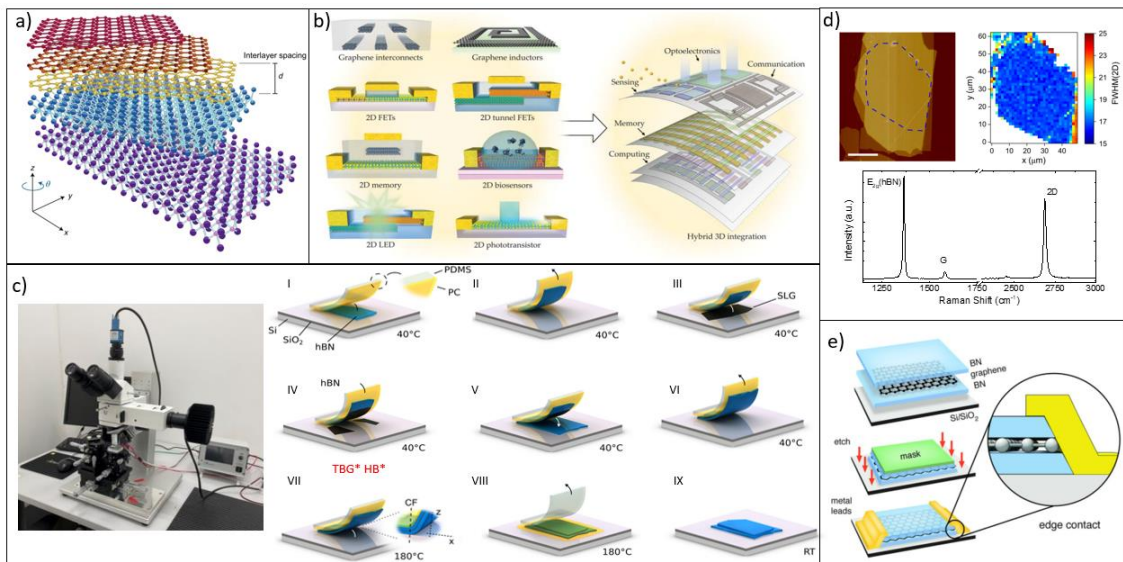


Figura 1: a) Ilustração de uma vdWHs formada por diferentes materiais 2D girados entre si [5]. b) Aplicações envolvendo materiais 2D, integrando dispositivos ultrafinos com diferentes funcionalidades e características [4]. c) Etapas de transferência e formação das vdWHs. Na esquerda mostra-se uma fotografia do sistema instalado no LAM/Sirius. Já as figuras de I-IX ilustram esquemas do processo de fabricação e obtenção de uma vdWHs composta por hBN/grafeno(SLG)/hBN sobre SiO₂/Si. Ao aquecer a base (VIII), o polímero de policarbonato (PC) começa a derreter transferindo a heteroestrutura sobre o substrato de interesse. Ao término da transferência, limpa-se as amostras em clorofórmio e álcool isopropílico para remover restos do PC, restando apenas a vdWHs de interesse. Destaco ainda a etapa IV: repetindo este processo é também possível criar amostras giradas entre si (i.e., “twisted bilayer graphene (TBG)” ou “heterobilayers (HB)” giradas). Os processos II-VI podem ser repetidos quantas vezes forem necessários para empilhar mais cristais 2D. d) Imagem topográfica (painel da esquerda) de uma amostra encapsulada de hBN/grafeno/hBN obtida por AFM. A região demarcada em azul destaca a região do grafeno e livre de bolhas. Já o painel da direita apresenta o mapa Raman da largura a meia altura (FWHM) da banda 2D do grafeno, destacando a homogeneidade do material. O painel inferior exibe o espectro Raman completo da amostra encapsulada, onde se identifica a alta qualidade cristalina do grafeno através da alta relação Intensidade(2D)/Intensidade(G). e) Ilustração do processo de fabricação dos nanodispositivos 2D: corrosão e metalização dos contatos elétricos [6].

2 – Objetivos: O projeto de pesquisa, aqui proposto, está centralizado na área de obtenção, caracterização e aplicação de materiais 2D, que tem, continuamente, revelado novos e interessantes fenômenos quânticos (ópticos e eletrônicos). Deste modo, é possível vislumbrar o surgimento de novas tecnologias baseadas em dispositivos quânticos ultrafinos, construídos a partir da combinação de heteroestruturas formadas por tais materiais 2D. Esses nanodispositivos facilmente agregariam aplicações em diferentes ramos da eletrônica, fônica e optoeletrônica (Fig. 1b). Portanto, como objetivo principal do presente projeto, visa-se o estudo das propriedades fundamentais de novos materiais 2D, com a finalidade de contribuir para a área de física fundamental e com aplicações em dispositivos quânticos ultrafinos. Os objetivos e metas de caráter específico deste projeto são: (i) Produção de materiais 2D por esfoliação micromecânica; (ii) Fabricação de vdWHs ultrafinas através do empilhamento artificial de dois ou mais materiais 2D. (iii) Identificação estrutural por meio de microscopia de força atômica (AFM); (iv) Caracterização óptica através de experimentos de Raman, fotoluminescência e fluorescência; (v) Fabricação e caracterização elétrica dos nanodispositivos constituídos por materiais 2D e suas vdWHs.

3 – Metodologia: Neste projeto os experimentos serão realizados no LNNano e no Sirius. Os dois laboratórios possuem toda a infraestrutura necessária para as etapas do processo de fabricação das vdWHs, caracterização estrutural dos cristais, bem como óptica e elétrica dos nanodispositivos fabricados.

3.1 – Construção das vdWHs: Dentre os métodos de obtenção de materiais 2D é possível destacar o método de esfoliação micromecânica do cristal “bulk” 3D [3]. Esta é a técnica mais comum e barata de obtenção de materiais 2D e pode ser realizada em temperatura e condições ambiente. Com a ajuda de um microscópio óptico é possível identificar candidatos à mono, bi e demais camadas de material devido à diferença de contraste óptico entre as amostras e o substrato. Já para o processo de construção de camadas atômicas empilhadas, existem atualmente diferentes técnicas e métodos: viscoelástico em PDMS; “fully-dry or bubble-free stamping”, “polymer-assisted”, dentre outros. Cada método é indicado para um determinado estudo ou aplicação, a qualidade eletrônica e de limpeza dos materiais 2D dependem também do processo escolhido.

Uma fotografia do sistema de transferência e a ilustração das etapas do processo de construção de uma vdWHs do tipo “bubble-free” são observados resumidamente na Fig. 1c.

3.2 – Fabricação dos nanodispositivos eletrônicos: A Fig. 1d apresenta uma imagem de AFM e uma caracterização Raman onde se identifica a ausência de bolhas na região encapsulada (hBN/SLG/hBN), bem como a alta qualidade e homogeneidade do grafeno pelo mapa e espectro Raman. Uma vez confeccionada e caracterizada a região da heteroestrutura sem bolhas, as amostras passam por uma sequência de procedimentos para fabricação dos contatos elétricos sobre essas nanoestruturas, produzindo-se assim os dispositivos quânticos de interesse. Aqui é necessário mencionar que o processo da fabricação dos eletrodos varia de acordo com a posição do material ativo na vdWHs (i.e., encapsulado entre dois materiais, livre na parte de cima ou recoberto por outro cristal 2D). Assim, ilustra-se aqui o caso mais complexo que é quando o material ativo se encontra totalmente encapsulado entre dois materiais (Fig. 1e). Inicia-se o processo com a dispersão de um filme polimérico (PMMA) fino, homogêneo e sensível à elétrons que terá um papel duplo: atuar como máscara de proteção à corrosão dos materiais 2D, e definir a região a ser metalizada. O processo padrão de fabricação dos dispositivos quânticos (FETs, capacitores e fotodetectores) é realizado seguindo as seguintes etapas: i) com o filme de PMMA homogêneo, ii) a amostra é levada a um microscópio eletrônico, alinhada por procedimentos padrões de localização xy para exposição da região de interesse (pré-definida) da vdWHs à litografia eletrônica, iii) Após a exposição do PMMA com o feixe de elétrons, passa-se para o processo de remoção do PMMA sensibilizado, processo também chamado de “revelação”, utilizando um solvente apropriado de PMMA sensibilizado. iv) com a área revelada exposta, realiza-se a etapa de ataque de corrosão por RIE utilizando diferentes combinações de gases de acordo com os materiais a serem corroídos. O PMMA remanescente (não sensibilizado) funcionará como uma máscara protetora da região ativa da vdWHs (Fig. 1e). Nesta etapa é onde se defini a geometria final do dispositivo de interesse (i.e., quadrado, retangular, circular, barra-Hall, entre outras). v) segue-se então com a deposição dos metais para a criação dos contatos elétricos, que são chamados de contatos do tipo-1D ou “edge-contact” [6]. vi) finaliza-se com o processo de “lift-off” em acetona para remoção do excesso dos metais depositado sobre o PMMA não sensibilizado pela litografia eletrônica e que serviu de máscara protetora. Logo, a camada de metal (Cr/Au) ficará apenas na região pré-determinada no projeto do dispositivo (i.e., FET ou fotodetector), e os contatos metálicos estão finalmente prontos para serem testados eletricamente.

3.3 – Caracterização óptica e elétrica dos nanodispositivos: A caracterização óptica dos materiais isolados quanto das vdWHs será feita por distintas técnicas: espectroscopia Raman e de fotoluminescência. Essas técnicas são amplamente utilizadas na determinação do número de camadas de materiais lamelares 2D, transições ópticas entre a banda de valência e condução, assim como na análise da simetria do cristal e existência de impurezas no cristal. A caracterização elétrica inicial dos nanodispositivos será realizada através de medidas de corrente em função da tensão de porta aplicada (FETs) em função da temperatura e campo magnético. Além de medidas elétricas auxiliares e específicas para um determinado estudo.

4 – Cronograma: Este plano de trabalho é previsto para ser executado em 1 ano:

Resultados	Meses 1-3	Meses 3-6	Meses 6-9	Meses 9-12
Esfoliação dos minerais naturais e fabricação das vdWHs				
Fabricação de nanodispositivos e caracterização geral em temperatura e condições ambiente				
Caracterização elétrica em vácuo e diferentes temperaturas e campo Magnéticos				
Elaboração do relatório e apresentação dos dados				

5 – Referências

- [1] Novoselov K S, et al., 2004 *Science* **306** 666–9
- [2] Ferrari A C, et al., 2014 *Nanoscale* **7** 4598–810
- [3] Novoselov K S, et al., 2005 *Proc Natl Acad Sci U S A* **102** 10451–3
- [4] Ajayan P M, et al., 2016 *Phys Today* **69** 38–44
- [5] Song J C W and Gabor N M 2018 *Nat Nanotech* **13** 986–93
- [6] Wang L, et al., 2013 *Science (1979)* **342** 614–7