

Materiais 2D em Tecnologias Quânticas: Emissores, Sensores e Aplicações Fotônicas

2D Materials in Quantum Technologies: Emitters, Sensors and Photonic Applications

Ingrid D. Barcelos¹, Carmem M. Gilardoni², Bárbara L.T. Rosa^{*3}

¹Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, SP, Brasil.

²Centro Brasileiro de Pesquisa em Física, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Universidade de Campinas, Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Campinas, SP, Brasil.

Recebido em 02 de outubro de 2025. Aceito em 04 de outubro de 2025.

Neste artigo, abordamos o papel dos materiais bidimensionais ou de van der Waals como plataformas versáteis para tecnologias quânticas emergentes. Iniciamos com uma breve revisão dos fundamentos da física quântica e da matéria condensada, destacando como os avanços experimentais permitiram a observação e o controle de fenômenos quânticos em escala nanométrica. Apresentamos a classe de materiais 2D, como TMDs e hBN, e sua importância em emissores de fótons únicos, sensores quânticos e dispositivos optoeletrônicos e fotônicos. Discutimos os mecanismos geradores de defeitos radiativos, bem como as propriedades de heteroestruturas torcidas e acoplamento spin-órbita, ressaltando o potencial de operação em temperatura ambiente. Por fim, destacamos o impacto didático e interdisciplinar desses sistemas, que permitem abordagens experimentais acessíveis ao ensino superior e à divulgação científica. Os materiais 2D unem teoria, técnica e acessibilidade, tornando-se aliados na formação de profissionais preparados para difundir os conceitos da física quântica de maneira clara e inclusiva.

Palavras-chave: Material quântico, emissor quântico, sensor quântico, emissor de fótons únicos, hBN, TMD, material 2D, fotônica.

In this work, we address the role of two-dimensional or van der Waals materials as a versatile platform for emerging quantum technologies. We begin with a brief revision on the fundamentals of quantum mechanics and condensed matter physics, highlighting the experimental progress that enabled observing and controlling quantum phenomena on a nanometric scale. We introduce the 2D materials class, such as hBN and TMDs, and their relevance as single photon emitters, quantum sensors, and optoelectronic and photonic devices. We discuss the mechanisms behind the generation of radiative defects and the properties of twisted-heterostructures and spin-orbit coupling, emphasizing the potential for operation at room temperature. Lastly, we underscore these systems' educational and interdisciplinary impact, enabling accessible experimental approaches for higher education and science outreach. 2D materials bring together theory, technique, and accessibility, becoming allies in forming professionals who are prepared to promote the concepts of quantum physics in a clear and inclusive manner.

Keywords: Quantum material, quantum emitter, quantum sensor, single photon emitter, hBN, TMD, 2D material, photonic.

1. Introdução

1.1. Matéria condensada, física quântica e interação luz-matéria

Desde meados da década de 1930, os campos da física quântica e da física do estado sólido vêm sendo investigados de forma contínua, tanto em seus aspectos fundamentais quanto em suas possíveis aplicações tecnológicas. A interseção entre estas áreas da física começou a ser observada com o surgimento do teorema de Bloch [1], que descreve o comportamento dos elétrons em redes cristalinas periódicas. Em seguida, surgiram,

por exemplo, a teoria da supercondutividade [1], que demonstra que certos materiais, ao atingirem uma temperatura crítica [1], comumente abaixo da temperatura ambiente, podem apresentar resistividade elétrica nula e comportamento diamagnético. A observação do efeito Hall quântico [2] revelou o comportamento quântico de elétrons confinados em sistemas bidimensionais sob condições exatbib bbl file with numberstremas de temperatura e campo magnético.

Nas décadas seguintes, embora diversos campos da física tenham avançado significativamente em nível teórico e experimental, o tema central deste texto – tecnologias quânticas utilizando as propriedades da matéria condensada – ainda não havia se consolidado como campo de pesquisa experimental independente. No entanto, com o progresso em áreas como criogenia, óptica,

*Endereço de correspondência: bltr@unicamp.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

nanofabricação, tecnologias que fazem uso de sistemas de ultra-alto vácuo e, sobretudo, com o domínio da fabricação de dispositivos baseados em sistemas quânticos, hoje tornou-se possível investigar uma série de fenômenos e aplicações que evidenciam a clara interseção entre a física da matéria condensada e os fundamentos da mecânica quântica. Entre alguns exemplos interessantes estão e hoje, os circuitos supercondutores [3], os materiais topológicos [4], os pontos quânticos semicondutores [5–7], os centros de cor em diamantes [8, 9] e os materiais bidimensionais (2D) [10–12].

Em particular, propriedades relacionadas à interação luz-matéria têm sido uma ferramenta poderosa para explorar fenômenos quânticos na matéria condensada e desenvolver dispositivos tecnológicos que fazem parte do cotidiano atual, como lasers [13, 14], diodos emissores de luz [15], células solares [16, 17], dispositivos de memória magnética [18], ressonância magnética [19], entre diversos outros. Por um lado, a primeira revolução quântica explorou o comportamento quantizado de entidades físicas para obter funcionalidades únicas, levou ao desenvolvimento de dispositivos como detectores e células solares [20] baseando-se fortemente no estudo da troca de energia entre fótons e éxcitons [21], quasipartículas na matéria constituídas por elétrons e buracos ligados por interações Coulombianas. Por outro lado, atualmente nós vivemos a chamada segunda revolução quântica [22], onde fenômenos como emaranhamento e coerência são explorados para desenvolver aplicações em computação [23], comunicação [24], e sensoriamento quânticos [25]. Neste contexto, fótons atuam como bits quânticos viajantes, capazes de carregar um estado quântico de um ponto a outro devido à sua esparsa interação com o ambiente [26]. Materiais capazes de gerar e interagir com estados quânticos de fótons são componentes fundamentais para o desenvolvimento destas tecnologias quânticas de segunda geração. A Figura 1 exemplifica a emissão de um fóton único criado a

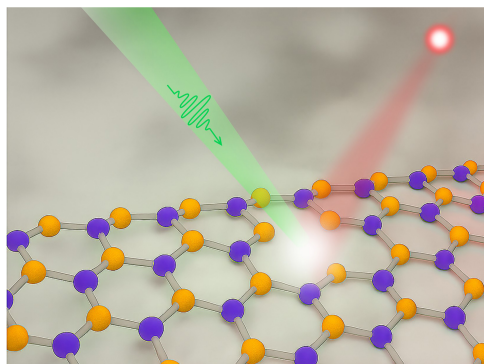


Figura 1: Imagem representativa de uma monocamada de hBN hexagonal, aonde nota-se a ausência de um átomo na rede periódica cristalina do material. Essa vacância pode gerar um estado de defeito radiativo dentro do *band gap* hBN, o que pode levar a emissão de um fóton (em vermelho) após o sistema ser excitado opticamente (laser verde).

partir de defeitos radiativos presentes em um material bidimensional.

1.2. O que são materiais bidimensionais?

Os materiais 2D são constituídos por uma ou poucas camadas atômicas, nos quais os átomos estão fortemente ligados no plano, mas apresentam interações fracas do tipo van der Waals (vdW) entre os planos atômicos [27]. Essa característica estrutural permite que esses materiais sejam facilmente separados em monocamadas – inferiores a 1 nanômetro – e que revelem propriedades físicas únicas, muitas vezes ausentes em sua forma tridimensional. O marco inicial desse campo ocorreu em 2004, com a obtenção do grafeno [27–29] por esfoliação mecânica a partir do grafite. Essa monocamada de átomos de carbono organizadas em uma rede hexagonal apresentou propriedades extraordinárias, como altíssima mobilidade eletrônica [30], elevada condutividade térmica [31] e transparência óptica [32], abrindo caminho para o estudo de toda uma nova classe de materiais lamelares [33, 34].

Desde então, diversos materiais 2D tem sido investigados, revelando uma variedade impressionante de propriedades eletrônicas e ópticas – incluindo comportamentos metálico [35], semicondutor [36, 37], isolante [38, 39], e até supercondutor [40]. Além disso, sua natureza lamelar confere grande eficiência na fabricação de dispositivos híbridos, viabilizando o empilhamento controlado de camadas distintas para formar heteroestruturas com propriedades emergentes [33, 41]. A possibilidade de combiná-los em heteroestruturas artificiais [41], sem a necessidade de compatibilidade de rede cristalina, permite explorar novos graus de liberdade e projetar sistemas com funcionalidades complexas.

Para entendermos a estrutura eletrônica básica de alguns materiais bidimensionais, é instrutivo analisarmos os casos do grafeno, um material formado por monocamadas de átomos de carbono, e do nitreto de boro hexagonal (hBN), um material formado por monocamadas contendo N e B arranjados de forma alternada. Estes materiais possuem redes cristalográficas muito semelhantes, em que os átomos se arranjam, no plano, em uma estrutura de *honeycomb* (seguindo um padrão hexagonal), apresentada esquematicamente em projeções perpendicular e paralela ao plano de uma monocamada na Figura 2a,b respectivamente. Enquanto o grafeno é um material semimetálico [42], o hBN é um isolante com um *band gap* significativo de 6 eV [43]. Em ambos os materiais, cada átomo forma ligações covalentes coplanares com outros três átomos, e a valência eletrônica de cada célula unitária do cristal é formada por 2 elétrons que ocupam os orbitais atômicos do tipo p_z . No grafeno, a célula unitária é formada por 2 carbonos, cada um com um orbital atômico p_z que comporta até dois elétrons. Como os dois C são equivalentes do ponto de vista de eletronegatividade e têm estados desocupados, os elétrons podem fluir livremente

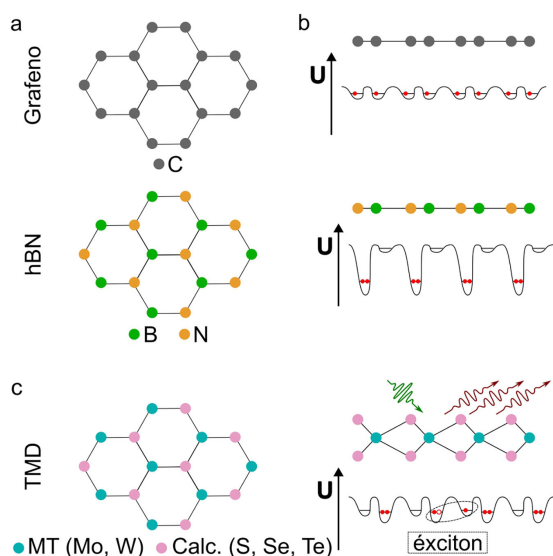


Figura 2: Representação da estrutura cristalina *honeycomb* de grafeno e hBN (a) e do comportamento de elétrons de valência nos materiais (b). (c) Representação da estrutura cristalina de um TMD e da formação de éxcitons no material devido à interação com luz verde, representada pela onda verde. Ao recombinarem, éxcitons geram emissão de luz de menor energia, representada pelas ondas vermelhas.

entre os orbitais p_z de carbonos adjacentes, levando ao comportamento semimetálico do material [44]. Em contraste, no hBN, o N contém mais cargas nucleares e, portanto, é mais eletronegativo do que o B. Assim, os dois elétrons de valência de cada célula unitária ocupam completamente o orbital p_z do N, enquanto o orbital p_z do B fica completamente desocupado. O custo energético para transferir um elétron do orbital p_z de um N para um orbital p_z de um B é alto, explicando o comportamento isolante do material [43]. Esta análise aproximada do comportamento destes dois materiais a partir do preenchimento dos orbitais atômicos de valência dos átomos constituintes é chamada, na literatura, de modelo *tight binding* [45, 46], e apresentada esquematicamente na Figura 2b. Nesta figura, apresentamos o potencial gerado pela estrutura cristalina do material e os resultantes estados eletrônicos disponíveis para os elétrons, representados por círculos preenchidos de vermelho.

Além destes, uma importante classe de materiais 2D são os de semicondutores conhecidos como dicalcogenetos de metal de transição (TMDs), cuja estrutura cristalina está representada esquematicamente na Figura 2c. Nestes materiais, seguindo a análise acima, existe um gap de energia mínimo necessário para transferir elétrons entre orbitais do metal de transição (MT) e dos calcogenetos, mas este gap é significativamente menos energético do que o necessário no caso do hBN. Estes materiais se destacam por apresentarem uma transição de *band gap* indireto (na forma volumosa) para direto (na forma de monocamada), tornando-se opticamente ativos em condições de confinamento extremo [36, 47, 48]. Assim, no

limite da monocamada, este material comporta éxcitons, quasipartículas que descrevem uma excitação local do material, e que liberam energia na forma de emissão de fótons. Estes éxcitons, representados esquematicamente no painel direito da Figura 2c, são formados quando um elétron é transferido de um estado de valência do material, predominantemente formado por orbitais dos MTs, para um estado de condução do material, predominantemente formado por orbitais dos calcogenetos. Esta transferência do elétron deixa para trás uma lacuna no MT, representada pelo disco vazio na figura. Esta lacuna interage com o elétron por forças Coulombianas. A baixa dimensionalidade fora do plano é responsável por dois efeitos que favorecem a estabilidade de éxcitons com elevada energia de ligação e emissão eficiente de luz, mesmo à temperatura ambiente [47, 48]. Por um lado, os pares elétron-lacuna estão confinados ao plano, o que diminui a distância entre eles e aumenta as forças de Coulomb entre as cargas. Por outro lado, a blindagem dielétrica, isto é, a polarizabilidade do material que diminuiria a intensidade das interações de Coulomb, também é limitada pela baixa dimensionalidade do material.

Outro aspecto relevante é que, em monocamadas de TMDs, a combinação entre a simetria do cristal e o acoplamento spin-órbita resulta em uma estrutura eletrônica na qual os graus de liberdade de spin e de vale estão fortemente acoplados às propriedades ópticas [47]. Este comportamento é uma consequência direta da simetria cristalina do material, isto é, de como os átomos se arranjam na monocamada, e como as monocamadas estão empilhadas. TMDs multicamadas possuem uma simetria de inversão espacial [48], simetria que descreve uma equivalência entre direções *para cima* e *para baixo* com relação ao plano das lamelas. Esta equivalência significa que os spins *up* e *down* devem ser degenerados em cada vale [36, 47], evitando que apareça restrição de spin-vale para transições óticas. Em contraste, no caso de monocamadas, a simetria de inversão é quebrada levando a uma separação dos spins em diferentes vales nas bandas de condução e valência [36, 47]. O acoplamento spin-órbita dá origem, então, a uma diferença energética entre estados de spin diferentes em cada um dos vales, e a transições óticas seletivas em spin e vale, viabilizando o controle quântico de estados excitônicos por meio de campos elétricos [49] e magnéticos [50]. Tal comportamento tem impulsionado o avanço de pesquisas em áreas como spintrônica [51], e óptica de vale [52], colocando os materiais 2D no centro das discussões sobre os futuros dispositivos quânticos, fotônicos e optoeletrônicos [53–55].

Do ponto de vista experimental, os materiais 2D podem ser produzidos por diversas rotas. A esfoliação mecânica [27], baseada na separação manual de camadas a partir do volume, é amplamente utilizada em pesquisas básicas por permitir a obtenção de monocamadas de alta qualidade cristalina. Já o crescimento por deposição química em fase de vapor (CVD) [56] é uma técnica

que permite a produção de filmes contínuos em escala maior, particularmente importante para aplicações industriais. Entretanto, a produção de materiais 2D de alta qualidade, isto é, com cristalinidade estendida e baixa concentração de defeitos que degradam suas propriedades óticas e eletrônicas, permanece um desafio. Outros métodos, como esfoliação química [57] ou crescimento epitaxial [58], também têm sido utilizados para classes específicas de materiais. Além de sua ampla gama de propriedades, a facilidade de fabricação de dispositivos [59], o uso de substratos variados e o potencial de baixo custo em alguns casos, como no grafite ou em minerais abundantes como o talco [60], tornam os materiais bidimensionais uma plataforma extremamente atrativa para aplicações em ciência e tecnologia.

2. Emissores quânticos baseados em materiais 2D: mecanismos, engenharia e aplicações

Materiais 2D vêm sendo investigados não apenas em dispositivos optoeletrônicos e fotônicos de escala nano e micrométricas e com desempenho comparável ao de dispositivos tradicionais, mas também como plataformas para aplicações quânticas, como emissores quânticos de luz. De maneira simplificada, esses emissores quânticos [61], conhecidos também como fonte de luz não-clássica ou emissores de fótons únicos (do inglês *single-photon emitters*—SPEs) [61], são sistemas capazes de gerar um único fóton por vez sob excitação elétrica ou óptica. Em contraste, fontes de luz clássica como lâmpadas ou lasers emitem diversos fótons simultaneamente ao serem excitadas. Sistemas na matéria condensada capazes de produzir ou interagir com fótons únicos desempenham papel fundamental para o desenvolvimento de tecnologias quânticas. Como os fótons únicos constituem o meio mais eficiente para a distribuição de estados quânticos entre partes distintas, tais sistemas podem ser considerados blocos fundamentais para a futura construção de uma internet quântica [26], possibilitando então aplicações tecnologias emergentes, como a comunicação e criptografia quânticas [62] e a computação quântica distribuída [63].

SPEs tradicionais são tipicamente baseados em pontos quânticos (do inglês *quantum dots*—QDs) criados em semicondutores tridimensionais tradicionais utilizando técnicas sintéticas e/ou de alto custo de crescimento epitaxial (e.g., QDs de InGaAs) [64] ou deposição coloidal (e.g., QDs de CdSe) [65]. Estes sistemas com baixa dimensionalidade nas três direções formam poços potenciais com estados eletrônicos quantizados, cujo comportamento pode ser em grande parte compreendido baseado na análise de um poço quântico típica de um curso inicial de Mecânica Quântica.

Materiais vdW são uma plataforma interessante para explorarmos o comportamento de sistemas similares a pontos quânticos, uma vez que o material, devido à

sua estrutura lamelar, já apresenta uma redução da dimensionalidade intrínseca. Nas orientações no plano, o potencial eletrostático para portadores de carga pode ser modulado por meio da aplicação de tensão local, por exemplo, transferindo semicondutores de vdW sobre pilares sub-micrométricos [66–68]. Amostras fabricadas desta maneira podem apresentar emissões de fótons únicos devido a hibridização de estados de defeitos, sejam eles intrínsecos (e.g. impurezas) ou gerados (e.g. implantação iônica) com a banda de condução destes materiais [66, 69, 70]. Este processo está representado esquematicamente na Figura 3a. O típico espectro de micro-fotoluminescência de SPEs em monocamadas de WSe₂ transferida sobre pilares de diâmetro sub-micrométrico, como é visto na Figura 3b. Através destes resultados, observamos claramente como a presença de tensão local e defeitos combinados são responsáveis pela criação dos SPEs (curva vermelha), enquanto regiões sem tensão local (curva preenchida cinza) apenas respondem similar à emissão dos estados excitônicos (éxciton e tríon) de uma monocamada de WSe₂.

Além disso, outros materiais de vdW podem conter emissores quânticos que surgem a partir de defeitos pontuais na estrutura cristalina do material [69, 71], representados esquematicamente na Figura 3c, similar aos

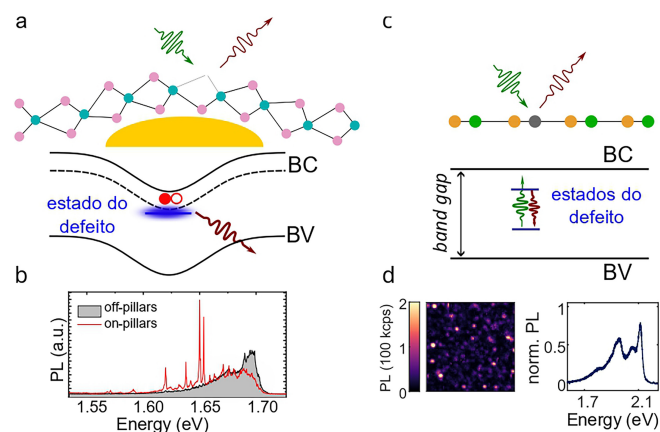


Figura 3: Emissores de fótons únicos em TMDs e em hBN. (a) Em TMDs, os SPEs são formados pela combinação entre um defeito na estrutura cristalina e o efeito de tensão no material, que cria pontos localizados para a recombinação de éxcitons. (b) Micro-fotoluminescência de uma amostra de TMD livre (curva preenchida cinza – *off-pillars*) e quando depositada sobre pilares (curva vermelha – *on-pillars*), mostrando o surgimento de linhas de emissão estreitas e com energia abaixo da energia de recombinação dos éxcitons livres, uma assinatura da presença de SPEs. (c) Em hBN, a emissão de fótons únicos surge devido à presença de defeitos na estrutura cristalina do material, que se comportam como átomos com estados fundamental e excitado bem definidos dentro do gap do material. Transições eletrônicas entre estes estados geram a emissão de fótons únicos. (d) mostra um mapa espacial de micro-fotoluminescência de uma amostra de hBN com defeitos localizados e um espectro de PL referente ao mesmo sistema, evidenciados pela emissão de fótons intensa em pontos específicos da amostra [75].

centros de nitrogênio-vacância em diamantes [8, 9, 72–74], outras conhecidas fontes de luz não-clássica. O mapa espacial de micro-fotoluminescência de uma amostra de hBN com defeitos localizados, no qual notamos uma intensa resposta em pontos específicos da amostra. À direita encontra-se um espectro de emissão deste mesmo sistema, no qual observamos a PL de defeitos muito distante do *band gap* do hBN (6 eV), sendo então uma demonstração que esta emissão de fótons surge de transições entre estados profundos no *band gap* do material. As Figuras. 3a e b são reproduzidas da referência [75]. Esta classe de defeitos em cristais se comporta, em grande parte, como ‘átomos artificiais’: os orbitais atômicos relacionados ao defeito são suficientemente distintos dos orbitais atômicos do material hospedeiro que eles não se misturam. Assim, os elétrons relacionados ao defeito ficam aprisionados em orbitais fortemente localizados e interagem fracamente com os elétrons do material, que serve como um vácuo eletrônico. Como átomos, estes sistemas possuem estados fundamentais e excitados, e transições eletrônicas entre estes estados levam à emissão de fótons únicos.

Uma evidência da versatilidade dos materiais 2D como promissoras plataformas para tecnologias quânticas está na ampla faixa espectral de emissão que eles apresentam, que varia conforme o material utilizado. Por exemplo, nitreto de boro hexagonal (hBN), um isolante de vdW, apresenta SPEs que emitem fótons com energias nas regiões ultravioleta e visível do espectro [38, 71, 75, 76], enquanto monocamadas e bicamadas do semicondutor disseleneto de tungstênio (WSe₂) apresentam SPEs que emitem fótons com energia na região do infravermelho [66, 68, 70, 77–81]. Essa diversidade espectral amplia significativamente o campo de atuação dos materiais 2D em diferentes regimes de energia e aplicações ópticas.

Além das áreas já amplamente exploradas em semicondutores tradicionais e 2D, uma vertente particularmente promissora para a geração de SPEs no campo de materiais vdW é a chamada *twistrônica* [49, 82–86] – termo derivado da palavra em inglês *twist* (torção) – que explora o empilhamento vertical de materiais com ângulos específicos de rotação entre as camadas. A partir dessa estrutura de camadas torcidas, novas propriedades altamente relevantes podem emergir: **1.** a formação de éxcitons intercamadas [83], em que elétrons e buracos estão localizados em camadas diferentes, apresentando características distintas dos éxcitons de monocamada, e **2.** criação de super-redes formadas pelo arranjo das redes atômicas das camadas empilhadas. Conhecido como padrão de Moiré, essa super-rede é capaz de gerar poços potenciais que confinam os éxcitons intercamadas [87] lateralmente, com o confinamento vertical garantido pelo caráter bidimensional do material. Esse confinamento quântico favorece a formação de estados discretos de energia que funcionam como pontos quânticos artificiais. Ou seja, tal estrutura pode favorecer também a geração de emissores de fótons únicos [88].

Outra característica extremamente relevante de algum desses emissores baseados em materiais 2D é sua resposta quântica, ou seja, sua capacidade de gerar apenas um fóton por vez, mesmo à temperatura ambiente, o que representa uma vantagem significativa sobre outras plataformas que exigem criogenia. Tal comportamento foi observado, por exemplo, em hBN [89] e em óxidos metálicos termicamente tratados, como o trióxido de molibdênio (MoO₃) [90], que apresentam emissão quântica robusta mesmo sem resfriamento, favorecendo sua aplicação em dispositivos integráveis e de baixo custo.

Além de sua aplicação estritamente óptica, alguns defeitos pontuais radiativos presentes nos materiais vdW são caracterizados por uma estrutura eletrônica com spin não-nulo em seu estado fundamental [76]. A presença deste spin permite que estes defeitos interajam com campos eletromagnéticos, temperatura, e pressão. Além disso, o ciclo fotofísico – isto é, o conjunto de diferentes mecanismos de relaxação a partir de um estado excitado – destes defeitos apresenta uma acentuada seletividade de spin: isso faz com que cada estado de spin tenha um comportamento específico de fotoluminescência. A detecção do comportamento ótico destes defeitos por meio do estudo da estatística dos fótons emitidos por estes elementos sensores nos permite, desta forma, extrair o estado de spin em que eles se encontram, e por meio disso inferir grandezas do ambiente ao qual eles estão sujeitos. Isso nos permite utilizar estes sistemas como peças fundamentais no desenvolvimento de sensores quânticos [75, 76] em temperatura criogênica ou ambiente. Para fins de sensoriamento, a estabilidade elétrica e magnética do material hospedeiro é de extrema importância, uma vez que a dinâmica de cargas elétricas e momentos magnéticos no material gera um ruído que degrada a informação que deve ser detectada pelo sensor. Em materiais tradicionais utilizados nessas aplicações, como o diamante, este ruído é abundante devido às ligações covalentes não satisfeitas na superfície do material, levando à degradação de sensores próximos à superfície. Em contraste, materiais vdW possuem interfaces naturalmente terminadas, fator que limita a dinâmica superficial. Assim, espera-se que os defeitos sejam mais estáveis próximos a superfícies nestes materiais – tornando-os excelentes hospedeiros de sensores quânticos em escala subnanométrica.

É importante mencionar que os SPEs baseados em materiais 2D ainda não alcançaram a mesma qualidade óptica e performance observada, por exemplo, em pontos quânticos semicondutores epitaxiais III-V [61]. O desafio em obter SPEs estáveis em materiais vdW é, em parte, consequência da dimensionalidade do material. Os SPEs estão diretamente em contato com a atmosfera e com o substrato. A dinâmica de cargas nas interfaces, devido a estados de superfície do substrato ou à interação com moléculas dipolares da atmosfera gera variações de campos elétricos locais que modificam a energia de transição dos SPEs de forma dinâmica. Além disso,

desafios quanto à criação de SPEs de forma determinística, e sua integração com dispositivos eletrônicos e fotônicos é uma área de pesquisa intensa. No entanto, ressaltamos que esta área ainda se encontra em sua primeira década, e muito há para ser investigado e aperfeiçoado, o que torna os materiais 2D plataformas promissoras para a fabricação de dispositivos quânticos inovadores e funcionais.

3. Materiais 2D além dos campos de pesquisa experimental e teórica

Além de seu impacto nas tecnologias emergentes, os materiais 2D oferecem um caminho concreto para o ensino e a popularização da física quântica. A sua estrutura com base em interações de van der Waals fora do plano é única e permite que eles possam ser facilmente transferidos sobre os mais diversos tipos de substratos, o que amplia significativamente a sua aplicabilidade em diferentes áreas do conhecimento. Tanta versatilidade torna possível desenvolver dispositivos baseados em materiais de vdW para áreas tão distintas quanto física, química, engenharia e biologia. Além disso, a obtenção desses materiais por esfoliação mecânica – com o uso de fitas adesivas, um sistema de transferência simples [59] e substratos baratos, como lâminas de vidro para microscopia, Si/SiO₂ – possibilita a preparação de monocamadas de grafeno, MoS₂ ou hBN mesmo em laboratórios com infraestrutura acessível e de baixo-custo.

Outra vantagem importante é que, considerando que alguns destes SPEs operam à temperatura ambiente e apresentam resposta óptica nas faixas do visível e do infravermelho, torna-se viável a realização de experimentos com fontes laser de baixo custo, câmeras CCD e sistemas compactos de fotoluminescência. Ou seja, esses SPEs podem ser integrados a estruturas fotônicas simples, como cavidades ou guias de onda feitos de polímeros ou vidro, permitindo o estudo do acoplamento e da propagação da luz em escala nanométrica [91]. Além disso, tais emissores têm se mostrado promissores em aplicações de biotecnologia [92, 93], utilizando princípios de metrologia quântica para obter imagens com resolução além do limite clássico, bem como detectar mudanças moleculares, variações de pH e marcadores fluorescentes em escala atômica.

As diversas propriedades dos materiais 2D e dos emissores de fótons únicos (SPEs) também permitem que conceitos tradicionalmente restritos a cursos avançados – como estados excitônicos, tunelamento quântico ou polarização de spin – sejam abordados de forma prática em diversas disciplinas universitárias, além de programas de ensino técnico e iniciativas de divulgação científica no ensino básico. Combinando, por exemplo, ao uso de softwares de código aberto para a simulação de propriedades ópticas e eletrônicas, é possível ampliar ainda mais o potencial didático dessas

abordagens, viabilizando atividades educacionais mesmo em instituições que não disponham de infraestrutura experimental avançada.

Por exemplo, a fotoluminescência de uma monocamada de WSe₂ – material cujo *band gap* é direto, como discutido anteriormente – pode ser detectada utilizando uma luz LED para excitação, filtros óticos para a filtragem espectral da fotoluminescência, uma câmera CCD simples, combinação de equipamentos tipicamente disponível em um microscópio para análise de amostras biológicas presente em laboratórios simples [94]. Essa fotoluminescência é reduzida significativamente quando o material torna-se multicamadas, devido à transição do *band gap* direto para indireto que incorre no surgimento de mecanismos não radiativos para a recombinação de éxcitons. Isso pode ser demonstrado pela análise da fotoluminescência de flocos de TMDs contendo partes mono e partes multicamadas esfoliados sobre substratos de vidro. Este experimento é, em tese, de possível execução dada uma infraestrutura laboratorial como a mencionada acima. Este experimento permite discutirmos vários conceitos de Física quântica, inclusive o conceito de *band gap*, estados excitônicos, e fenômenos de relaxamento.

4. Explorando Materiais 2D no Ensino: Propostas Didáticas e Possibilidades Experimentais

A aplicação de materiais bidimensionais no ensino de Física, Química e Engenharia oferece uma oportunidade singular para aproximar a física quântica fundamental de tecnologias emergentes. Entretanto, é fundamental destacar que a produção e caracterização direta desses materiais em ambiente escolar apresenta barreiras de custo e infraestrutura. Nesse sentido, propomos a seguir abordagens que equilibram a viabilidade pedagógica e relevância científica.

4.1. Experimentos introdutórios em materiais 2D

A esfoliação mecânica de cristais, realizada com fitas adesivas transparentes (por exemplo, grafite, dicalcogenetos de metais de transição como WSe₂, e nitreto de boro hexagonal – hBN), pode ser utilizada como atividade demonstrativa em ambiente universitário. Na Figura 4 ilustramos o procedimento didático no qual um cristal é esfoliado sobre um substrato de vidro ou Si/SiO₂. Os flocos obtidos podem ser observados em microscópio óptico sob luz branca ou UV, utilizando filtros específicos para identificar monocamadas pelo contraste óptico ou pela emissão característica.

Materiais necessários: cristal (sintético ou natural), fitas adesivas, lâminas de vidro ou substratos de Si/SiO₂ (ou lâmina de acetato para observações

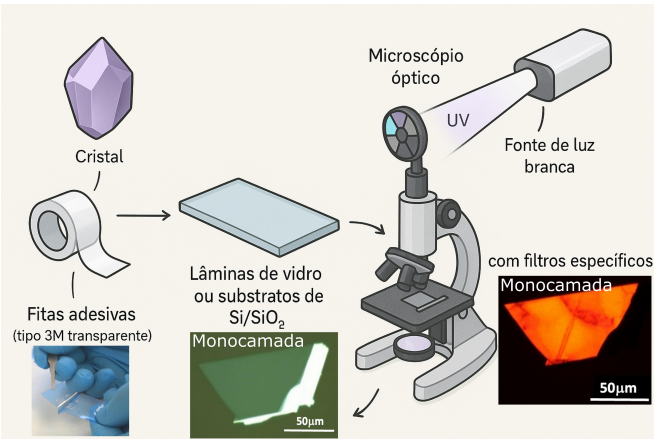


Figura 4: Esquema ilustrativo do procedimento didático para obtenção e caracterização óptica de materiais 2D por esfoliação mecânica. A partir de um cristal comercial ou natural, utiliza-se fita adesiva transparente para transferir flocos para substratos de vidro ou Si/SiO₂. As amostras podem ser observadas em microscópio óptico com iluminação branca ou UV e filtros específicos, permitindo distinguir monocamadas (destacadas nas imagens inferiores) pelo contraste óptico e pela resposta em emissão.

visuais), microscópio óptico com filtros específicos, e fonte de luz branca ou UV.

Atividade proposta: realizar a esfoliação sobre o substrato, observar contraste óptico sob luz branca, comparar flocos de diferentes espessuras, e utilizar filtros para verificar variações no contraste e emissão.

Resultados esperados: realizar a esfoliação sobre o substrato, observar contraste óptico sob luz branca, comparar flocos de diferentes espessuras, e utilizar filtros para verificar variações no contraste e emissão.

4.2. Explorando conceitos de Física Quântica através dos fenômenos observados em Materiais 2D

Uma vez que o interesse de estudantes tenha sido despertado através, por exemplo, do experimento proposto acima, torna-se consideravelmente mais simples introduzir conceitos de física quântica, o que pode ser realizado ao estudar diversos fenômenos observados em materiais 2D, que podem ser discutidos qualitativamente após entrar em contato o experimento que mostrará algumas propriedades quânticas, como a existência de éxcitons em monocamadas de TMD (Figura 4). A partir deste primeiro contato com um conceito fundamentalmente quântico, a quantização de energia, outros princípios quânticos podem ser discutidos de forma clara e acessível, como listado no Quadro 1.

Sob outra perspectiva, é possível contextualizar o movimento de aproximação entre a física fundamental, a física aplicada e o ensino dentro de um panorama mais amplo: o próprio desenvolvimento da mecânica quântica tem avançado, historicamente, em paralelo com o progresso das técnicas experimentais. A criação de ferramentas como a microscopia de força atômica (AFM) [95], a microscopia de tunelamento por varredura (STM) [96] e, mais recentemente, as técnicas de espectroscopia óptica de campo próximo [97], permitiu a investigação e manipulação direta de sistemas na escala nanométrica, revelando propriedades quânticas anteriormente previstas teoricamente. Nesse contexto, os materiais bidimensionais destacam-se como protagonistas: suas superfícies expostas, estrutura atômica simples e ampla gama de propriedades ajustáveis os tornam plataformas ideais tanto para o estudo dos fundamentos da física quântica quanto para a construção de dispositivos. Dessa forma, a convergência entre teoria, instrumentação científica e novos materiais constitui o eixo central da atual revolução tecnológica baseada em

Quadro 1: Exemplos da correspondência entre conceitos fundamentais da mecânica quântica e fenômenos observados em materiais 2D.

Conceitos de Física Quântica	Fenômenos Observados em Materiais 2D
Quantização de energia	Confinamento quântico devido à dimensionalidade sub-nanométrica fora do plano. Formação de éxcitons (pares elétron–buraco) com altas energias de ligação devido à fraca blindagem dielétrica presente em materiais 2D
Princípio da incerteza	O confinamento tridimensional devido a defeitos (impurezas, vacâncias) localizados na rede cristalina leva à formação de estados de energia discretos localizados dentro do <i>gap</i> . Pelo princípio da incerteza, quanto menor o volume do sistema, maior será o espaçamento energético entre os níveis eletrônicos
Confinamento quântico	Éxcitons ou cargas podem ser aprisionados em estados de defeitos radiativos ou potenciais de moiré, resultando em estados discretos emissores de fótons únicos
Tunelamento quântico	Transporte de cargas através de barreiras atômicas em heteroestruturas formadas por monocamadas de van der Waals empilhadas
Interação spin-órbita	Monocamadas de TMD apresentam uma separação da banda de valência em duas bandas com spins opostos e diferença de energia de centenas de meV: a quebra da degenerescência surge do acoplamento spin-órbita forte

quântica – e os materiais 2D ocupam um lugar de destaque nesse cruzamento interdisciplinar.

5. Conclusão

Os materiais bidimensionais têm papel fundamental na física do estado sólido e apresentam uma significativa interdisciplinaridade, abrangendo áreas como biologia, química e engenharia. Seu destaque vai além da abundância e versatilidade, evidenciando propriedades únicas que, até então, eram pouco ou nunca observadas em materiais convencionais. Em resumo, os materiais 2D representam uma combinação excepcional de sofisticação científica e acessibilidade experimental, tornando-se ferramentas indispensáveis para a formação de uma nova geração de estudantes e educadores. Esses profissionais estarão capacitados não apenas a compreender os princípios quânticos fundamentais, mas também a aplicar esses conhecimentos em múltiplos contextos interdisciplinares e sociais.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao suporte financeiro das agências de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Dispositivos Quânticos – INCT-DQ (Processo 408783/2024-9), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo SEI 260003/004572/2025, e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos 2024/05925-7 e 2022/08329-0.

Disponibilidade de Dados

O conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo não está disponível publicamente.

Referências

- [1] N.W. Ashcroft e N.D. Mermin, *Solid State Physics* (Holt, Rinehart and Winston, Philadelphia, 1976), 1 ed.
- [2] R.E. Prange e S.M. Girvin, *The Quantum Hall Effect* (Springer, Berlin, 1987).
- [3] J.Q. You e F. Nori, *Nature* **474**, 589 (2011).
- [4] L. Kou, Y. Ma, Z. Sun, T. Heine e C. Chen, *The Journal of Physical Chemistry Letters* **8**, 1905 (2017).
- [5] F.P. García de Arquer, D.V. Talapin, V.I. Klimov, Y. Arakawa, M. Bayer e E.H. Sargent, *Science* **373**, eaaz8541 (2021).
- [6] T. Kim, D. Shin, M. Kim, H. Kim, E. Cho, M. Choi, J. Kim, E. Jang e S. Jeong, *ACS Energy Letters* **8**, 447 (2022).
- [7] L. Manna, *Nano Letters* **23**, 9673 (2023).
- [8] G.D. Marshall, T. Gaebel, J.C.F. Matthews, J. Enderlein, J.L. O'Brien e J.R. Rabeau, *New Journal of Physics* **13**, 055016 (2011).
- [9] S.B. van Dam, M. Walsh, M.J. Degen, E. Bersin, S.L. Mouradian, A. Galiullin, M. Ruf, M. IJspeert, T.H. Taminiau, R. Hanson et al., *Physical Review B* **99**, 161203 (2019).
- [10] C. Berraquero, M. Barbone, D. Kara, X. Chen, I. Goykhman, D. Yoon, A. Ott, J. Beitner, K. Watanabe, T. Taniguchi et al., *Nature Communications* **7**, 12798 (2016).
- [11] I. Aharonovich, D. Englund e M. Toth, *Nature Photonics* **10**, 631 (2016).
- [12] S.M. Vasconcellos, D. Wigger, U. Wurstbauer, A.W. Holleitner, R. Bratschitsch e T. Kuhn, *Physica status solidi (b)* **259**, 2100566 (2022).
- [13] Sixty years of lasers, *Nature Reviews Physics* **2**, 221 (2020).
- [14] E.P. Santos e A.S.L. Gomes, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **46**, e20240134 (2024).
- [15] P.M. Pattison, J.Y. Tsao, G.C. Brainard e B. Bugbee, *Nature* **563**, 493 (2018).
- [16] E.H.S. Rosa e L.F.R.B. Toledo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200519 (2021).
- [17] L. Wang, M.P.R. Teles, A. Arabkoohsar, H. Yu, K.A.R. Ismail, O. Mahian e S. Wongwises, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **54**, 102864 (2022).
- [18] F.D. Natterer, K. Yang, W. Paul, P. Willke, T. Choi, T. Greber, A.J. Heinrich e C.P. Lutz, *Nature* **543**, 226 (2017).
- [19] C.M.T. Dieguez, L.V. Montanheiro, L.B. Cleto, M.J.C. Bonfim e C.A. Dartora, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e1310 (2017).
- [20] B.A. Gregg, *MRS Bulletin* **30**, 20 (2005).
- [21] M. Fox, *Optical Properties of Solids* (Oxford University Press, Oxford, 2010), v. 3.
- [22] J.P. Dowling e G.J. Milburn, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **361**, 1655 (2003).
- [23] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J.C. Bardin, R. Barends, S. Boixo, M. Broughton, B.B. Buckley e D.A. Buell, *Science* **369**, 1084 (2020).
- [24] N. Gisin e R. Thew, *Nature Photonics* **1**, 165 (2007).
- [25] C.L. Degen, F. Reinhard e P. Cappellaro, *Reviews of Modern Physics* **89**, 035002 (2017).
- [26] H.J. Kimble, *Nature* **453**, 1023 (2008).
- [27] A.K. Geim e K.S. Novoselov, *Nature Materials* **6**, 183 (2007).
- [28] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos e A.A. Firsov, *Nature* **438**, 197 (2005).
- [29] E.P. Randviir, D.A.C. Brownson e C.E. Banks, *Materials Today* **17**, 426 (2014).
- [30] E.H. Hwang, S. Adam e S. Das Sarma, *Physical Review Letters* **98**, 186806 (2007).
- [31] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao e C.N. Lau, *Nano Letters* **8**, 902 (2008).
- [32] K.F. Mak, M.Y. Sfeir, Y. Wu, C.H. Lui, J.A. Misewich e T.F. Heinz, *Physical Review Letters* **101**, 196405 (2008).
- [33] A.K. Geim e I.V. Grigorieva, *Nature* **499**, 419 (2013).
- [34] L. Prozorovska e P.R. Kidambi, *Advanced Materials* **30**, 1801179 (2018).

- [35] B. Zhao, D. Shen, Z. Zhang, P. Lu, M. Hossain, J. Li, B. Li e X. Duan, *Advanced Functional Materials* **31**, 2105132 (2021).
- [36] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan e T.F. Heinz, *Physical Review Letters* **105**, 136805 (2010).
- [37] K.F. Mak e J. Shan, *Nature Photonics* **10**, 216 (2016).
- [38] M.J. Molaei, M. Younas e M. Reza kazemi, *ACS Applied Electronic Materials* **3**, 5165 (2021).
- [39] R. Oliveira, L.A.G. Guallichico, E. Policarpo, A.R. Cadore, R.O. Freitas, F.M.C. Silva, V.C. Teixeira, R.M. Paniago, H. Chacham, M.J.S. Matos et al., *Applied Surface Science* **599**, 153959 (2022).
- [40] D. Qiu, C. Gong, S. Wang, M. Zhang, C. Yang, X. Wang e J. Xiong, *Advanced Materials* **33**, 2006124 (2021).
- [41] K.S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho e A.H. Castro Neto, *Science* **353**, aac9439 (2016).
- [42] J. Jung e A.H. MacDonald, *Physical Review B* **87**, 195450 (2013).
- [43] S. Javvaji, F. Li e J. Jung, *Physical Review Materials* **9**, 024004 (2025).
- [44] P.R. Wallace, *Physical Review* **71**, 622 (1947).
- [45] J.C. Slater e G.F. Koster, *Physical Review* **94**, 1498 (1954).
- [46] C.M. Goringe, D.R. Bowler e E. Hernández, *Reports on Progress in Physics* **60**, 1447 (1997).
- [47] G. Wang, A. Chernikov, M.M. Glazov, T.F. Heinz, X. Marie, T. Amand e B. Urbaszek, *Reviews of Modern Physics* **90**, 021001 (2018).
- [48] S. Manzeli, D. Ovchinnikov, D. Pasquier, O.V. Yazyev e A. Kis, *Nature Reviews Materials* **2**, 17033 (2017).
- [49] Y. Xia, Z. Han, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Shan e K.F. Mak, *Nature* **637**, 833 (2024).
- [50] A.J. Campbell, M. Brotons-Gisbert, H. Baek, V. Vitale, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Lischner e B.D. Gerardot, *npj 2D Materials and Applications* **6**, 79 (2022).
- [51] C.M. Gilardoni, F. Hendriks, C.H. van der Wal e M.H.D. Guimarães, *Physical Review B* **103**, 115410 (2021).
- [52] H. Zeng, J. Dai, W. Yao, D. Xiao e X. Cui, *Nature Nanotechnology* **7**, 490 (2012).
- [53] G. Iannaccone, F. Bonaccorso, L. Colombo e G. Fiori, *Nature Nanotechnology* **13**, 183 (2018).
- [54] M. Turunen, M. Brotons-Gisbert, Y. Dai, Y. Wang, E. Scerri, C. Bonato, K.D. Jöns, Z. Sun e B.D. Gerardot, *Nature Reviews Physics* **4**, 219 (2022).
- [55] A.R.P. Montblanch, M. Barbone, I. Aharonovich, M. Atatüre e A.C. Ferrari, *Nature Nanotechnology* **18**, 555 (2023).
- [56] X. Wang, H. You, F. Liu, M. Li, L. Wan, S. Li, Q. Li, Y. Xu, R. Tian, Z. Yu et al., *Chemical Vapor Deposition* **15**, 53 (2009).
- [57] M. Zhao, C. Casiraghi e K. Parvez, *Chemical Society Reviews* **53**, 3036 (2024).
- [58] C. Liu, T. Liu, Z. Zhang, Z. Sun, G. Zhang, E. Wang e K. Liu, *Nature Nanotechnology* **19**, 907 (2024).
- [59] R. Frisenda, E. Navarro-Moratalla, P. Gant, D.P. De Lara, P. Jarillo-Herrero, R.V. Gorbachev e A. Castellanos-Gomez, *Chemical Society Reviews* **47**, 53 (2018).
- [60] A.B. Alencar, A.P.M. Barboza, B.S. Archanjo, H. Chacham e B.R.A. Neves, *2D Materials* **2**, 015004 (2015).
- [61] M. Esmann, S.C. Wein e C. Antón-Solanas, *Advanced Functional Materials* **34**, 2315936 (2024).
- [62] S. Pirandola, U.L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck, D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani et al., *Advances in Optics and Photonics* **12**, 1012 (2020).
- [63] N. Maring, A. Fyrrillas, M. Pont, E. Ivanov, P. Stepanov, N. Margaria, W. Hease, A. Pishchagin, A. Lemaitre, I. Sagnes et al., *Nature Photonics* **18**, 603 (2024).
- [64] I. Limame, P. Ludewig, C.W. Shih, M. Hohn, C.C. Palekar, W. Stolz e S. Reitzenstein, *Optica Quantum* **2**, 117 (2024).
- [65] B. Lv, H. Zhang, L. Wang, C. Zhang, X. Wang, J. Zhang e M. Xiao, *Nature Communications* **9**, 1536 (2018).
- [66] M. von Helversen, L. Greten, I. Limame, C.W. Shih, P. Schlaugat, C. Antón-Solanas, C. Schneider, B. Rosa, A. Knorr e S. Reitzenstein, *2D Materials* **10**, 045034 (2023).
- [67] C. Palacios-Berraquero, D.M. Kara, A.R.P. Montblanch, M. Barbone, P. Latawiec, D. Yoon, A.K. Ott, M. Lončar, A.C. Ferrari e M. Atatüre, *Nature Communications* **8**, 15093 (2017).
- [68] C.S. Brito, B.L.T. Rosa, A. Chaves, C. Cavallini, C.R. Rabahi, D.F. Franco, M. Nalin, I.D. Barcelos, S. Reitzenstein e Y.G. Gobato, *Nano Letters* **24**, 13300 (2024).
- [69] L. Linhart, M. Paur, V. Smejkal, J. Burgdörfer, T. Mueller e F. Libisch, *Physical Review Letters* **123**, 14 (2019).
- [70] K. Parto, S.I. Azzam, K. Banerjee e G. Moody, *Nature Communications* **12**, 3585 (2021).
- [71] T.T. Tran, K. Bray, M.J. Ford, M. Toth e I. Aharonovich, *Nature Nanotechnology* **11**, 37 (2015).
- [72] C. Bradac, W. Gao, J. Forneris, M.E. Trusheim e I. Aharonovich, *Nature Communications* **10**, 5625 (2019).
- [73] R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz e C.L. Degen, *Annual Review of Physical Chemistry* **65**, 83 (2014).
- [74] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup e L.C.L. Hollenberg, *Physics Reports* **528**, 1 (2013).
- [75] C.M. Gilardoni, S.E. Barker, C.L. Curtin, S.A. Fraser, O.F.J. Powell, D.K. Lewis, X. Deng, A.J. Ramsay, S. Adhikari, C. Li et al., *Nature Communications* **16**, 4947 (2025).
- [76] H.L. Stern, C.M. Gilardoni, Q. Gu, S.E. Barker, O.F.J. Powell, X. Deng, S.A. Fraser, L. Follet, C. Li, A.J. Ramsay et al., *Nature Materials* **23**, 1379 (2024).
- [77] M. Koperski, K. Nogajewski, A. Arora, V. Cherkez, P. Mallet, J.Y. Veuillen, J. Marcus, P. Kossacki e M. Potemski, *Nature Nanotechnology* **10**, 503 (2015).
- [78] S. Kumar, A. Kaczmarczyk e B.D. Gerardot, *Nano Letters* **15**, 7567 (2015).
- [79] O. Iff, D. Tedeschi, J. Martín-Sánchez, M. Moczala-Dusanowska, S. Tongay, K. Yumigeta, J. Taboada-Gutiérrez, M. Savaresi, A. Rastelli, P. Alonso-González et al., *Nano Letters* **19**, 6931 (2019).
- [80] C. Piccinini, A. Paralakis, J. Ferreira Neto, A.A. Madi-gawa, P. Wyborski, V. Remesh, L. Vannucci, N. Gregersen e B. Munkhbat, *Communications Physics* **8**, 158 (2025).
- [81] J.R. Toledo, C.S. Brito, B.L.T. Rosa, A.R. Cadore, C.R. Rabahi, P.E. Faria Junior, A.C.F. Brito, T.S. Ghiasi,

- J. Ingla-Aynés, C. Schüller et al., *Nano Letters* **25**, 13212 (2025).
- [82] Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras e P. Jarillo-Herrero, *Nature* **556**, 43 (2018).
- [83] K.L. Seyler, P. Rivera, H. Yu, N.P. Wilson, E.L. Ray, D.G. Mandrus, J. Yan, W. Yao e X. Xu, *Nature*, **567**, 66 (2019).
- [84] A.C. Gadelha, D.A.A. Ohlberg, F.C. Santana, G.S.N. Eliel, J.S. Lemos, V. Ornelas, D. Miranda, R.B. Nadas, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Rabelo, P.P.M. Venezuela, G. Medeiros-Ribeiro, A. Jorio, L.G. Cançado e L.C. Campos, *ACS Applied Nano Materials* **4**, 1858 (2021).
- [85] B.L.T. Rosa, P.E. Faria Junior, A.R. Cadore, Y. Yang, A. Koulas-Simos, C.C. Palekar, S.A. Tongay, J. Fabian e S. Reitzenstein, *Advanced Physics Research* **2025**, 2400135 (2025).
- [86] C.C. Palekar, P.E. Faria Junior, B. Rosa, F.B. Sousa, L.M. Malard, J. Fabian e S. Reitzenstein, *npj 2D Materials and Applications* **8**, 49 (2024).
- [87] E.M. Alexeev, D.A. Ruiz-Tijerina, M. Danovich, M.J. Hamer, D.J. Terry, P.K. Nayak, S. Ahn, S. Pak, J. Lee, J.I. Sohn et al., *Nature* **567**, 81 (2019).
- [88] H. Baek, M. Brotons-Gisbert, Z.X. Koong, A. Campbell, M. Rambach, K. Watanabe, T. Taniguchi e B.D. Gerardot, *Science Advances* **6**, eaba8526 (2020).
- [89] G. Grosso, H. Moon, B. Lienhard, S. Ali, D.K. Efetov, M.M. Furchi, P. Jarillo-Herrero, M.J. Ford, I. Aharonovich e D. Englund, *Nature Communications* **8**, 705 (2017).
- [90] J. Lee, H. Wang, K.Y. Park, S. Huh, D. Kim, M. Yu, C. Kim, K.S. Thygesen e J. Lee, *Nano Letters* **25**, 1142 (2025).
- [91] M. Blauth, M. Jürgensen, G. Vest, O. Hartwig, M. Prechtel, J. Cerne, J.J. Finley e M. Kaniber, *Nano Letters* **18**, 6812 (2018).
- [92] I.V. Martynenko, A.P. Litvin, F. Purcell-Milton, A.V. Baranov, A.V. Fedorov e Y.K. Gun'ko, *Journal of Materials Chemistry B* **5**, 6701 (2017).
- [93] S. Mondal e A. Pan, em: *Quantum Dots in Biosensing, Bioimaging, and Drug Delivery* (Springer Nature, Singapore, 2022).
- [94] E.M. Alexeev, A. Catanzaro, O.V. Skrypka, P.K. Nayak, S. Ahn, S. Pak, J. Lee, J.I. Sohn, K.S. Novoselov, H.S. Shin et al., *Nano Letters* **17**, 5342 (2017).
- [95] G. Binnig, C.F. Quate e Ch. Gerber, *Physical Review Letters* **56**, 930 (1986).
- [96] G. Binnig e H. Rohrer, *Surface Science* **126**, 236 (1983).
- [97] A.V. Zayats e D. Richards, *Nano-optics and Near-field Optical Microscopy* (Artech House, Norwood, 2009).