

Heteroestructuras de materiales 2D: Abriendo caminos en la nanotecnología del futuro

Selene Concepción Acosta Morales

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

selene.acosta@uaslp.mx

Resumen

Los nanomateriales bidimensionales (2D), compuestos por nanoláminas, exhiben propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas excepcionales. Ejemplos notables incluyen el grafeno y los dicalcogenuros de metales de transición. A partir de estos materiales se pueden crear heteroestructuras 2D-2D que consisten en capas apiladas de diferentes nanomateriales 2D. Estas heteroestructuras integran las propiedades únicas de cada material, lo que las posiciona como candidatos prometedores para revolucionar el desarrollo de dispositivos avanzados, incluidos diodos emisores de luz, transistores, ropa inteligente, celdas solares y sensores.

Palabras clave

Ciencia de materiales, nanotecnología y materiales bidimensionales.

Abstract

Two-dimensional (2D) nanomaterials, composed of nanosheets, exhibit exceptional electronic, optical and mechanical properties. Notable examples include graphene and transition metal dichalcogenides. From these materials, 2D-2D heterostructures consisting of stacked layers of different 2D nanomaterials can be created. These heterostructures integrate the unique properties of each material, positioning them as promising candidates to revolutionize the development of advanced devices, including light-emitting diodes, transistors, smart clothing, solar cells, and sensors.

Keywords

Materials science, nanotechnology and two-dimensional materials.

APA: Acosta, S. C. (2024). Heteroestructuras de materiales 2D: abriendo caminos en la nanotecnología del futuro. *Azcatl*, 3, 28-33.

DOI: [10.24275/AZC2024B006](https://doi.org/10.24275/AZC2024B006)

Un material es todo aquello que tiene una masa que ocupa un espacio y que es utilizado para construir objetos o estructuras con un propósito determinado. Ejemplos de materiales son el vidrio, la madera, un pedazo de metal, un plástico, la biomasa, etcétera. Un nanomaterial es un material en el cual al menos una de sus dimensiones (largo, alto y/o ancho) tiene un tamaño comprendido entre 1 y 100 nanómetros (nm), cuyas propiedades de reactividad química, ópticas, mecánicas y su comportamiento electrónico son significativamente diferentes a las de los materiales con dimensiones macroscópicas.

Los nanomateriales se pueden clasificar según el número de sus dimensiones, las cuales tienen un tamaño en el orden nanométrico. Cuando las tres dimensiones son iguales o menores a 100 nm se denominan materiales cero dimensionales (0D), que incluyen nanopartículas como son las metálicas y puntos cuánticos que son nanopartículas semiconductoras con tamaños menores a 10 nm. Si dos de sus dimensiones tienen tamaño nanométrico, se consideran nanomateriales unidimensionales (1D), como los nanoalambres o nanotubos. En el caso que sólo una dimensión tenga tamaño nanométrico, se denominan materiales bidimensionales (2D) o materiales laminados porque precisamente están formados por nanoláminas (Wang *et al.*, 2021) (Figura 1).

Actualmente, existen diversos tipos de nanomateriales 2D como los dicalcogenuros de metales de transición (TMD por sus siglas en inglés) y el nitruro de boro hexagonal (h-BN) que tienen estructuras químicas y propiedades muy variadas. Hace apenas unas décadas estos materiales sólo existían en la teoría, no se había producido un nanomaterial bidimensional estable a temperatura ambiente. Sorpresivamente, en el año 2004, Konstantín Novoselov, Andre Geim y su grupo de trabajo, en la Universidad de Manchester, descubrieron que podían *deshojar* (el término correcto es exfoliar) cristales de grafito para producir capas muy finas del material hasta obtener hojas de sólo un átomo de grosor al que llamaron grafeno (Figura 2) (Novoselov *et al.*, 2004). El grafeno reportado por Geim y Novoselov exhibía propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y electrónicas nunca antes observadas en otro material. Por ejemplo, es extremadamente flexible

y, a pesar de eso, es también increíblemente resistente. El descubrimiento del grafeno le otorgó el premio Nobel de Física a Geim y Novoselov en 2010 y despertó el interés de numerosos científicos en todo el mundo por estudiar las propiedades y aplicaciones del grafeno y, asimismo, explorar la obtención de otros tipos de materiales 2D. Veinte años después existe una gran variedad de estos nanomateriales que son estables a temperatura ambiente y que presentan asombrosas propiedades como conductividad mejorada, gran resistencia mecánica, térmica y química y una alta área superficial (Acosta, Ojeda y Quintana, 2023; Acosta y Quintana, 2024; Ares y Novoselov, 2022).

Los materiales 2D generalmente se obtienen a partir de cristales de materiales macroscópicos compuestos por múltiples láminas de grafeno, las cuales están colocadas una sobre otra de una forma altamente ordenada (Figura 3). Los átomos que conforman cada lámina están unidos entre sí mediante enlaces covalentes y las láminas inte-

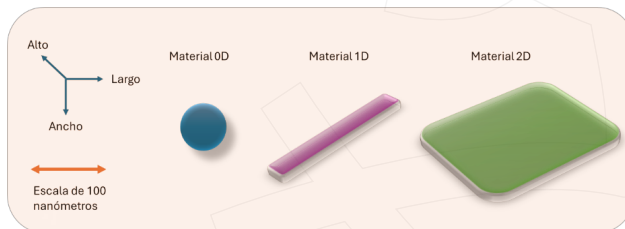


Figura 1. Clasificación de los nanomateriales según sus dimensiones nanométricas.

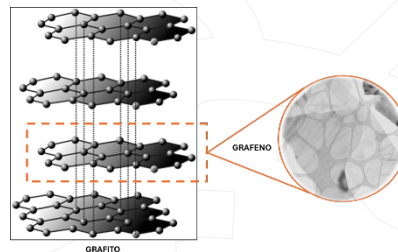


Figura 2. Obtención de grafeno a partir de grafito. La imagen a la derecha fue obtenida en un microscopio electrónico de transmisión y muestra las láminas de grafeno.

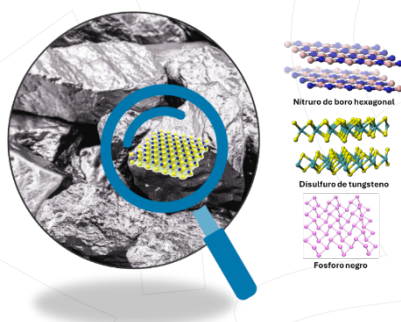


Figura 3. Cristales de materiales 2D de donde se pueden obtener nanoláminas y estructuras de algunos materiales 2D comunes.

raccionan entre ellas mediante fuerzas de atracción débiles no covalentes denominadas fuerzas de van der Waals.

Entre los materiales 2D más estudiados, después del grafeno y sus derivados, se encuentran materiales como los TMD: el disulfuro de molibdeno (MoS_2) y el disulfuro de tungsteno (WS_2). Estos materiales pueden comportarse electrónicamente como aislantes semimetálicos o metálicos, dependiendo el tipo de metal y calcógeno presentes en su estructura (Huang *et al.*, 2020). Otros ejemplos de nanomateriales 2D de alto interés científico son el fósforo negro, el cual es un semiconductor, y el h-BN, que se comporta como aislante eléctrico y que es muy resistente a la manipulación mecánica (Acosta, Pérez *et al.*, 2023; Gusmão *et al.*, 2017). También existen óxidos que tienen estructura laminar, por lo que pueden considerarse una fuente de nuevos materiales 2D, como los óxidos de molibdeno, vanadio y plomo (Figura 4) (Kumbhakar *et al.*, 2021).

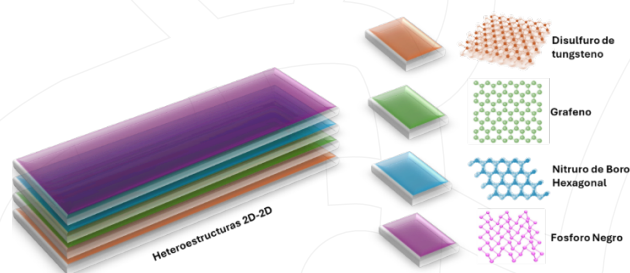


Figura 4. Heteroestructuras de materias 2D.

Los materiales 2D se pueden obtener mediante diversas técnicas, siendo las más utilizadas la exfoliación y la deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) (Shanmugam *et al.*, 2022). En las técnicas de exfoliación se aíslan láminas a partir de estructuras 3D de materiales laminados, mientras que la técnica CVD implica que los precursores en forma de gas reaccionan con la superficie de un sustrato a alta temperatura para formar materiales laminados.

El combinar las propiedades de diferentes materiales para obtener un nuevo material ideal es algo que se ha planteado desde hace tiempo, es decir, crear un material con la alta área superficial del grafeno y la capacidad de las nanopartículas metálicas de unirse covalentemente a biomoléculas. Sin embargo, el mezclar diferentes nanomateriales no siempre lleva a la sinergia de sus propiedades, debido a la posible incompatibilidad en su estructura y propiedades químicas. Por ejemplo, al combinar nanotubos de carbono con nanopartículas de oro, la falta de una adecuada interacción superficial impide que las nanopartículas se dispersen uniformemente sobre la superficie del nanotubo, lo que provoca la formación de aglomerados.

Debido a su estructura laminar, los materiales 2D ofrecen superficies que pueden apilarse una sobre otra de manera muy eficiente para generar heteroestructuras 2D-2D (Figura 4). Estas heteroestructuras son estables debido a que las láminas, provenientes de diferentes materiales pueden unirse entre ellas mediante fuerzas de van der Waals, sin las restricciones de que sus redes cristalinas no sean compatibles (Liu *et al.*, 2016; Novoselov *et al.*, 2016). Por esta razón, las nanoláminas apiladas de diferentes compuestos suelen nombrarse heteroestructuras de van der Waals. Si consideramos el amplio número de materiales 2D estables a temperatura ambiente que se han reportado hasta ahora, se podría fabricar una extensa variedad de heteroestructuras 2D-2D con propiedades ópticas, electrónicas, químicas y mecánicas diferentes.

La técnica más usada para producir heteroestructuras 2D-2D es el ensamblaje mecánico directo, método que fue reportado por primera vez en 2010 por Cory R. Dean y sus colaboradores de la Universidad de Columbia. Este método consiste en apilar manualmente lámi-

nas delgadas de materiales 2D que fueron obtenidas mediante exfoliación o por CVD (Dean *et al.*, 2010). Estas láminas suelen colocarse inicialmente sobre un polímero de sacrificio para facilitar su manipulación. Luego se emplean técnicas de transferencia precisas que utilizan un microscopio óptico y manipuladores micromecánicos para trasladar las láminas de un sustrato a otro, permitiendo la superposición de múltiples capas al remover el polímero de sacrificio.

Por otro lado, los métodos de crecimiento directo de heteroestructuras 2D-2D son las técnicas más prometedoras para fabricar heteroestructuras a mayor escala. Estos métodos involucran el crecimiento secuencial de láminas mediante técnicas como CVD. Mediante estas técnicas se han sintetizado diversos tipos de heteroestructuras, incluyendo grafeno-hBN, MoS₂-grafeno, MoS₂-hBN, WS₂-MoS₂, entre otras (Figura 5) (Gong *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2011; Miwa *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015).

Gracias a su gran versatilidad y control sobre sus propiedades, las heteroestructuras de van der Waals, 2D-2D, han demostrado una notable eficiencia en muchas áreas tecnológicas (Geim y Grigorieva, 2013; Liu *et al.*, 2016). Estas heteroestructuras se emplean en dispositivos electrónicos flexibles y ropa inteligente debido a sus excepcionales propiedades mecánicas, como alta flexibilidad y resistencia (Islam *et al.*, 2023; Xie *et al.*, 2023). Además, se han utilizado en la fabricación de diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés) y láseres, logrando una eficiencia mejorada y una emisión de luz específica (Liao *et al.*, 2019). En el ámbito del almacenamiento de energía, las heteroestructuras 2D-2D se han implementado en celdas solares y fotovoltaicas, ofreciendo soluciones innovadoras para la conversión de energía (Molaei *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2018). Dichas heteroestructuras también han revolucionado la fabricación de transistores, proporcionando dispositivos con alta movilidad de portadores de carga y un menor consumo de energía (Gianazzo *et al.*, 2018). Igualmente se han desarrollado sensores de gases y sensores químicos capaces de detectar moléculas en concentraciones extremadamente bajas, así como biosensores para la detección de biomoléculas, fundamentales para el monitoreo y diagnóstico de enfer-

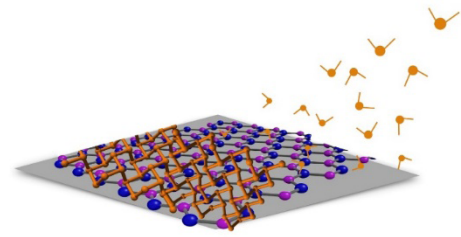


Figura 5. Representación esquemática de la fabricación de heteroestructuras 2D-2D.



Figura 6. Principales aplicaciones de las heteroestructuras de materiales 2D.

medades (Figura 6) (Hou *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021; Sakthivel *et al.*, 2023).

La producción de heteroestructuras de materiales 2D se encuentra en una fase temprana, marcando el comienzo de un campo con un gran potencial. La investigación actual ha generado una gran cantidad de datos científicos interesantes que nos motivan a profundizar en el estudio de estas heteroestructuras y explorar sus posibles aplicaciones en la resolución de problemas tecnológicos contemporáneos. Sin embargo, a pesar de los avances prometedores, las perspectivas para alcanzar una producción en masa de heteroestructuras de materiales 2D todavía son inciertas. Es necesario superar varios desa-

fíos técnicos y económicos antes de que éstas puedan ser fabricadas a gran escala de manera viable y rentable. En consecuencia, se requiere una investigación continua y un esfuerzo coordinado entre la comunidad científica y la industria para transformar las capacidades de estos materiales en realidades tangibles y prácticas.

Agradecimientos

La autora agradece al Laboratorio de Nanoestructuras Multifuncionales del Centro de Investigación en Ciencias de la Salud y Biomedicina (CICSaB) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y al proyecto de Conahcyt Sinergia-UNAM 1564464.

Referencias

- Acosta, S., Ojeda, H. J. y Quintana, M. (2023). 2D materials towards energy conversion processes in nanofluidics. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(36), 24264-24277. <https://doi.org/10.1039/D3CP00702B>
- Acosta, S., Pérez, V., Sánchez, G., Hernández, J. M., Yáñez, B. y Quintana, M. (2023). Wetting properties of thin films of exfoliated hexagonal boron nitride in different solvents. *Revista Mexicana de Física*, 69(4). <https://doi.org/10.31349/REV-MEXFIS.69.041607>
- Acosta, S. y Quintana, M. (2024). Chemically functionalized 2D transition metal dichalcogenides for sensors. *Sensors*, 24(6), 1817 <https://doi.org/10.3390/S24061817>
- Ares, P. y Novoselov, K. S. (2022). Recent advances in graphene and other 2D materials. *Nano Materials Science*, 4(1), 3-9. <https://doi.org/10.1016/J.NA-NOMS.2021.05.002>
- Dean, C. R., Young, A. F., Meric, I., Lee, C., Wang, L., Sorgenfrei, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kim, P., Shepard, K. L. y Hone, J. (2010). Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nature Nanotechnology*, 5(10), 722-726. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.172>
- Geim, A. K. y Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals heterostructures. *Nature*, 499(7459), 419-425. <https://doi.org/10.1038/nature12385>
- Giannazzo, F., Greco, G., Roccaforte, F. y Sonde, S. S. (2018). Vertical transistors based on 2D materials: Status and prospects. *Crystals*, 8(2), 70. <https://doi.org/10.3390/cryst8020070>
- Gong, Y., Lin, J., Wang, X., Shi, G., Lei, S., Lin, Z., Zou, X., Ye, G., Vajtai, R., Yakobson, B. I., Terrones, H., Terrones, M., Tay, B. K., Lou, J., Pantelides, S. T., Liu, Z., Zhou, W. y Ajayan, P. M. (2014). Vertical and in-plane heterostructures from WS₂/MoS₂ monolayers. *Nature Materials*, 13(12), 1135-1142. <https://doi.org/10.1038/nmat4091>
- Gusmão, R., Sofer, Z. y Pumera, M. (2017). Black phosphorus rediscovered: From bulk material to monolayers. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(28), 8052-8072. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201610512>
- Hou, H. L., Anichini, C., Samorì, P., Criado, A. y Prato, M. (2022). 2D Van der Waals heterostructures for chemical sensing. *Advanced Functional Materials*, 32(49). <https://doi.org/10.1002/adfm.202207065>
- Huang, H. H., Fan, X., Singh, D. J. y Zheng, W. T. (2020). Recent progress of TMD nanomaterials: Phase transitions and applications. *Nanoscale*, 12(3), 1247-1268. <https://doi.org/10.1039/C9NR08313H>
- Islam, M. R., Afroj, S. y Karim, N. (2023). Scalable production of 2D material heterostructure textiles for high-performance wearable supercapacitors. *ACS Nano*, 17(18). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.3c06181>
- Kumbhakar, P., Chowde Gowda, C., Mahapatra, P. L., Mukherjee, M., Malviya, K. D., Chaker, M., Chandra, A., Lahiri, B., Ajayan, P. M., Jariwala, D., Singh, A. y Tiwary, C. S. (2021). Emerging 2D metal oxides and their applications. *Materials Today*, 45, 142-168. <https://doi.org/10.1016/J.MAT-TOD.2020.11.023>

- Li, Z., Yao, Z., Haidry, A. A., Luan, Y., Chen, Y., Zhang, B. Y., Xu, K., Deng, R., Hoa, N. D., Zhou, J. y Ou, J. Z. (2021). Recent advances of atomically thin 2D heterostructures in sensing applications. *Nano Today*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101287>
- Liao, W., Huang, Y., Wang, H. y Zhang, H. (2019). Van der Waals heterostructures for optoelectronics: Progress and prospects. *Applied Materials Today*, 16, 435-455 <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.07.004>
- Liu, Y., Weiss, N. O., Duan, X., Cheng, H. C., Huang, Y. y Duan, X. (2016). Van der Waals heterostructures and devices. *Nature Reviews Materials*. 1(9). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.42>
- Liu, Z., Song, L., Zhao, S., Huang, J., Ma, L., Zhang, J., Lou, J. y Ajayan, P. M. (2011). Direct growth of graphene/hexagonal boron nitride stacked layers. *Nano Letters*, 11(5). <https://doi.org/10.1021/nl200464j>
- Miwa, J. A., Dendzik, M., Grønborg, S. S., Bianchi, M., Lauritsen, J. V., Hofmann, P. y Ulstrup, S. (2015). Van der Waals epitaxy of two-dimensional MoS₂-graphene heterostructures in ultrahigh vacuum. *ACS Nano*, 9(6). [https://doi.org/10.1021/acsnano.5b02345](https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b02345)
- Molaei, M. J., Younas, M. y Rezakazemi, M. (2022). Van der Waals heterostructures in ultrathin 2D solar cells: State-of-the-art review. *Materials Science and Engineering: B*. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115936>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. y Firsov, A. A. (2004). Electric field in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1102896/SUPPL_FILE/NOVOSELOV.SOM.PDF
- Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A. y Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353(6298). https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAC9439/ASSET/37D227A0-A4A2-45A7-A10A-9F45126B919B/ASSETS/GRAPHIC/353_AAC9439_FA.JPEG
- Sakthivel, R., Keerthi, M., Chung, R. J. y He, J. H. (2023). Heterostructures of 2D materials and their applications in biosensing. *Progress in Materials Science*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101024>
- Shanmugam, V., Mensah, R. A., Babu, K., Gawusu, S., Chanda, A., Tu, Y., Neisiany, R. E., Försth, M., Sas, G. y Das, O. (2022). A review of the synthesis, properties, and applications of 2D materials. *Particle & Particle Systems Characterization*, 39(6). <https://doi.org/10.1002/PPSC.202200031>
- Wang, L., Huang, L., Tan, W. C., Feng, X., Chen, L., Huang, X. y Ang, K. W. (2018). 2D photovoltaic devices: Progress and prospects. *Small Methods*, 2(3). <https://doi.org/10.1002/SMTD.201700294>
- Wang, P., Jia, C., Huang, Y. y Duan, X. (2021). Van der Waals heterostructures by design: From 1D and 2D to 3D. *Matter*, 4(2), 552-581. <https://doi.org/10.1016/J.MATT.2020.12.015>
- Wang, S., Wang, X. y Warner, J. H. (2015). All chemical vapor deposition growth of MoS₂/h-BN vertical van der Waals heterostructures. *ACS Nano*, 9(5). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b00655>
- Xie, J., Zhang, Y., Dai, J., Xie, Z., Xue, J., Dai, K., Zhang, F., Liu, D., Cheng, J., Kang, F., Li, B., Zhao, Y., Lin, L. y Zheng, Q. (2023). Multifunctional MoSe₂@MXene heterostructure-decorated cellulose fabric for wearable thermal therapy. *Small*, 19(9). <https://doi.org/10.1002/sml.202205853>