



Ángel Luis Álvarez Castillo. Catedrático de Universidad.
Sergio Quesada Sánchez. Investigador Postdoctoral.
Fernando Borrás Rodrigo. Ingeniero de Telecomunicación. Investigador Predoctoral.
Universidad Rey Juan Carlos.

Materiales bidimensionales Construyendo el futuro

Desde los estudios pioneros sobre el grafeno en 2004 de los investigadores A. K Geim y K. Novoselov, por los que fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 2010, los materiales bidimensionales (o 2D) están protagonizando **una de las mayores revoluciones** en el mundo de la ingeniería.



Las aplicaciones del grafeno van desde el almacenaje y generación de energía hasta antenas impresas, fotónica y optoelectrónica, sensores y espintrónica

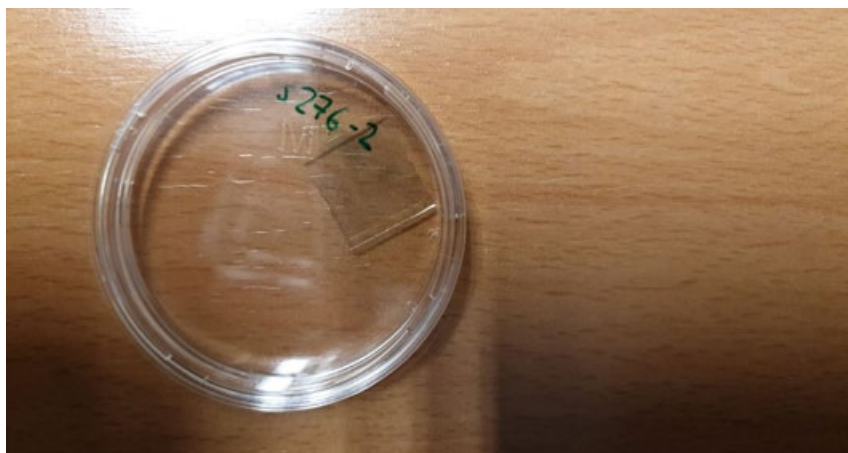
Los materiales 2D están formados por una única capa de átomos, lo que significa un espesor mínimo que se sitúa en torno a 3-5 angstroms. Esta baja dimensionalidad supone grandes mejoras en muchas propiedades (eléctricas, ópticas, térmicas, mecánicas y químicas) respecto a las especies tridimensionales (con mayores espesores), lo que justifica el gran esfuerzo investigador, industrial y empresarial que concentran. Hoy en día se conocen las propiedades y la potencial aplicabilidad de más de 140 materiales 2D.

Entre las formas de clasificación de estos nuevos materiales, la división en metálicos, semiconductores y aislantes resulta la más utilizada. Como máximo representante de los metálicos, encontramos al material 2D quizás más conocido, el grafeno, que con un gap (diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia) teóricamente nulo, puede considerarse en muchas aplicaciones como un conductor perfecto. Pero también encontramos algunos con carácter semiconductor, como el fósforo negro ortorrómbico (BP), y otros aislantes, entre los que destacan el óxido de grafeno y el nitrato de boro hexagonal diatómico (h-BN).

El grafeno, protagonista

Las extraordinarias propiedades de los materiales 2D han llevado en los últimos años a investigadores de todo el mundo a enfocar sus trabajos hacia su estudio, siendo el grafeno el que quizás más atención ha suscitado. De hecho, el consorcio Graphene Flagship financiado por la UE con 1.000 millones de euros para 10 años ya ha avanzado la multitud de aplicaciones de este material, que van desde el almacenaje y generación de energía hasta antenas impresas, fotónica y optoelectrónica, sensores y espintrónica (tecnología experimental que utiliza las propiedades del espín del electrón).

Así, por ejemplo, los transistores de grafeno son una alternativa a los basados en semiconductores del tipo III-V (SiGe) que, hasta el momento, parecían



Muestra de grafeno depositada por CVD sobre cuarzo.

dominar la electrónica de más alta velocidad. Los transistores de grafeno, con longitudes de puerta de menos de 10nm y frecuencias de funcionamiento en el rango de los terahercios, parecen los adecuados para cumplir con las expectativas tecnológicas futuras.

Transistores más pequeños

Los materiales llamados TMDCs (Dicalcogenuros de Metales de Transición) están cobrando interés en el ámbito de la microelectrónica debido a que su carácter semiconductor permite un cómodo desarrollo de transistores y, por tanto, de interruptores on-off, base de la computación actual. En el actual contexto de cuestionamiento de la Ley de Moore, la reducción de la longitud de puerta del transistor hasta distancias cercanas al nanómetro es uno de los grandes retos previstos por la 'Hoja de Ruta para los Semiconductores (ITRS)'. Y uno de los dispositivos que ha mostrado grandes prestaciones a esta escala, presentando el récord de transistor más pequeño, se ha construido sobre monocapas de un material 2D llamado Disulfuro de Molibdeno (MoS₂).

Aislantes para biosensores

Como hemos mencionado anteriormente, dentro de los materiales aislantes

tenemos, entre otros, el óxido de grafeno y el nitruro de boro hexagonal diatómico. El óxido de grafeno no es más que la oxidación por diferentes métodos de una monocapa de grafeno, lo que se consigue mediante procesos químicos. Dado que el óxido de silicio se ha utilizado durante años para el diseño de biosensores necesarios para la inmovilización de anticuerpos y proteínas (proceso clave en biotecnología), cabe pensar que el óxido de grafeno será, por su alta reactividad, una excelente alternativa para esa misma aplicación.

Comunicaciones a alta velocidad

Las propiedades conductoras del grafeno han generado un enorme interés en el campo de las llamadas antenas plasmónicas. Estas antenas utilizan una propiedad cuántica de los electrones para transmitir señales de muy alta frecuencia a través de espacios pequeños. El grafeno puede soportar las ondas superficiales provocadas por esta propiedad en las frecuencias de terahercios debido a su particular estructura de banda electrónica, lo que permite crear nano-dispositivos plasmónicos basados en grafeno que pueden trabajar en frecuencias superiores a un THz, abriendo un campo nuevo en las comunicaciones en este rango de frecuencia.

De esta forma, será posible la transmisión de información dentro de un chip a velocidades que excederían con creces cualquier otra tecnología actual.

Por otro lado, las propiedades ópticas del grafeno también lo convierten en excelente candidato para modulación óptica, fotodetección de banda ancha y operación a alta velocidad, consiguiéndose velocidades de transmisión de datos de hasta 50 Gb/s.

De la IA a la generación de energía

El ámbito de la Inteligencia Artificial es también uno de los campos donde los investigadores están encontrando una clara aplicación de los materiales 2D. El español Mario Lanza, profesor en la Universidad de Soochow (China), ha empleado el aislante h-BN mencionado anteriormente para generar estructuras metal/aislante/metal (MIM) que permiten crear sinapsis electrónicas con vistas a futuras aplicaciones sobre Inteligencia Artificial. Mientras, en el Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia, el profesor José Antonio Garrido explora los transistores de efecto de campo basados en grafeno para interfaces neuronales y aplicaciones relacionadas con la actividad eléctrica del sistema nervioso.

Por otra parte, el mundo de los dispositivos recolectores de energía ofrece un campo muy interesante en el que explorar la aplicación de los materiales 2D. Así, el grupo del profesor Jesús Grajal de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en colaboración con el profesor Tomás Palacios del Massachusetts Institute for Technology, ha empleado el anteriormente mencionado Disulfuro de Molibdeno (MoS₂) para la fabricación de una rectenna; esto es, una antena capaz de convertir la radiación electromagnética de la señal wifi en una señal continua que puede servir para alimentar una carga.

La baja dimensionalidad de los materiales 2D supone grandes mejoras en muchas propiedades respecto a las especies tridimensionales



Sala blanca.

Sensores biomédicos

En el campo de los sensores los materiales 2D también han irrumpido con fuerza. Así, en el ámbito biomédico, se han podido desarrollar sensores amperométricos de ultra-alta sensibilidad basados en óxido de grafeno para detección de moléculas de interés biológico y médico. La tecnología del Internet de las Cosas (IoT), capaz de monitorizar cada vez más nuestras actividades diarias, impulsa igualmente el desarrollo de sensores miniaturizados que son capaces de integrarse en cualquier ambiente. Ya se están diseñando sensores de gas de una monocapa de grafeno integrado monolíticamente con CMOS, de pequeño tamaño y bajo consumo, con radiofrecuencia integrada.

El grafeno también es protagonista en sensores de imagen integrados en CMOS (con matriz de arrays de hasta 388x288) que incluyen fotodetectores de este material y puntos cuánticos que funcionan como una cámara digital de alta sensibilidad para la luz infrarroja.

Retos importantes

En definitiva, los compuestos 2D constituyen hoy uno de los principales y más activos puntos de innovación en el campo de los materiales para tecnología e ingeniería. La combinación de dispositivos microelectrónicos actuales con los nuevos materiales 2D, en los que necesariamente predomina la geometría lateral, nos abre un mundo inexplorado donde podemos ser partícipes de nuevos paradigmas tecnológicos.

La deposición química en fase vapor (CVD, del inglés Chemical Vapor Deposition) es hoy una de las técnicas más empleadas para depositar los materiales 2D sobre diferentes sustratos, proporcionando una alta calidad de sus capas. En el desarrollo de esta técnica destacan grupos como el de los profesores Fernando Calle y Javier Martínez, de la Universidad Politécnica de Madrid, que ha patentado un proceso automatizado de transferencia del grafeno sobre casi cualquier sustrato. Pero la estabilidad a temperatura ambiente en aplicaciones

Fabricando grafeno a gran escala

El Grupo de Optoelectrónica Orgánica (Universidad Rey Juan Carlos) formado por los autores (en la fotografía) ha traspasado una de las fronteras en la fabricación de óxido de grafeno, al sintetizarlo a escalas masivas, de tamaños sin precedentes y con control posicional total a partir de grafeno monocapa, lo que permite obtener plataformas mixtas de inmensa aplicabilidad. Asimismo, han conseguido realizar esta oxidación de superficies macroscópicas de grafeno monocapa a velocidades insólitas en materiales 2D. Así, han logrado escalas que superan los milímetros cuadrados y en tiempos de fabricación de decenas de minutos, lo que constituye un verdadero hito. Estos prometedores resultados son el comienzo de un trabajo que permitirá explotar las posibilidades de los dispositivos 2D en aplicaciones que abarcan desde los sensores biológicos hasta la tecnología de telecomunicaciones.



prácticas es todavía un reto, dado que cualquier dispositivo 2D formado por estos nuevos materiales podría degradarse en cuestión de horas. La flexibilidad mecánica es otro de los objetivos de diseño ya que, si bien los materiales 2D pueden ser transferidos prácticamente a cualquier sustrato, hasta ahora predomina el trabajo sobre muestras muy pequeñas, tipo escamas, de dimensiones aún insuficientes. Pero sin duda, el mayor reto al que se enfrentan estos nuevos materiales para su comercialización masiva es la fabricación a gran escala. ■

Los compuestos 2D constituyen uno de los principales y más activos puntos de innovación en el campo de los materiales para tecnología e ingeniería