

Ciencia y Tecnología basados en nanomateriales de carbono: desafíos y perspectivas

El descubrimiento de los nanotubos de carbono hace dos décadas, y el más reciente descubrimiento del grafeno en 2004, han instigado una frenética actividad científica y una gran expectación a nivel tecnológico. El grafeno es una estructura laminar plana de átomos de carbono empaquetados en una red cristalina en forma de panal de abeja mediante enlaces sp^2 , mientras los nanotubos se pueden ver como resultante de una banda de grafeno enrollada que forma un cilindro cuyo diámetro puede llegar a ser de 1 nanómetro (10^{-9} m). A nivel electrónico, nanotubos y grafeno han desvelado unas propiedades espectaculares como la altísima movilidad de portadores superiores a las de otros tipos de material semiconductor (i.e. silicio), y su bajísima resistividad eléctrica.

Asimismo, estos materiales parecen tener propiedades idóneas para ser utilizados como componentes (tipo canal en transistores de efecto de campo (FET)) en circuitos integrados. La dificultad de utilizar nanotubos proviene del desafío que representa una integración masiva (de millones de nanotubos) en *wafers*, substrato de uso común en microelectrónica, mientras el grafeno abre nuevas perspectivas si se consigue optimizar el proceso de crecimiento epitaxial o via métodos catalíticos. Los investigadores están buscando métodos como la transferencia de hojas de grafeno desde el grafito (exfoliación) o el crecimiento epitaxial (como la grafitización térmica de la superficie del carburo de silicio). Más allá de la integración del material, está el diseño de dispositivos cuánticos con propiedades iguales o superiores a los componentes basados en silicio.

Recientemente, un estudio de simulación cuántica ha abierto nuevas perspectivas para beneficiarse de las propiedades electrónicas propias del grafeno, resolviendo al mismo tiempo las limitaciones de las tecnologías de integración CMOS actuales, y así potenciar el uso de estos materiales para la nanoelectrónica. Se demostró que si se usa grafeno dopado químicamente, se puede generar un *gap* de movilidad de hasta 1 electronvoltio debido a los efectos de retrodifusión inherentes al grafeno con impurezas. Este *gap* permite usar *nanoribbons* (bandas de grafeno) de anchura por encima de 10 nanómetros, pero con un fuerte control del nivel de corriente electrones/huecos cruzando el canal de dispositivo. Esta pre-

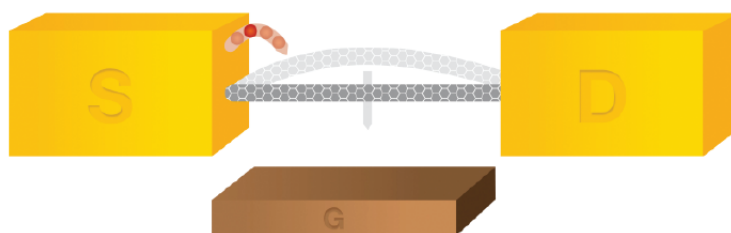
dicción teórica todavía no se ha confirmado experimentalmente, pero proporciona un ejemplo de la necesaria sinergia que hay que establecer entre químicos, físicos experimentales y teóricos para desbloquear un «cuello de botella» tecnológico como éste.

Una atrayente problemática científica reside en la exploración y el control del acoplamiento entre grados de libertad vibracionales y electrónicos de un sistema nanométrico. Ello permite imaginarse el diseño de sensores de última generación detectando la presencia de pocas moléculas, midiendo su masa, su estado de carga o el cambio de su estado de espín. La nanoelectromecánica cuántica es un campo en plena expansión, y el uso de nanotubos de carbono o grafeno promete grandes avances. El grupo Quantum Nanoelectronics del CIN2 ha podido llevar a cabo un estudio de las oscilaciones mecánicas de nanotubos de carbono suspendidos, funcionando también en régimen de transistor de un electrón. El acoplamiento entre grados de libertad mecánicos y de carga se ha demostrado muy intenso y maneja-

ble, hasta llevar las oscilaciones hacia un régimen no lineal.

Un reto actual para experimentales y teóricos está en el control de los modos de deformaciones de objetos mesoscópicos (un nanotubo o un plano de grafeno) en un régimen cuántico, basándose en el acoplamiento entre vibraciones del oscilador y la transferencia de cargas a través de éste. Se podría imaginar, por ejemplo, sondear los estados cuánticos de muy baja energía de tal oscilador, transfiriendo una parte de su energía a un sistema de electrones.

La figura presenta una ilustración del experimento relacionado. Un nanotubo suspendido entre dos electrodos (aunque en situación de equilibrio) vibra con cierta frecuencia. Se podría imaginar recuperar energía del oscilador, mediante electrones transferidos desde los electrodos, hasta bajar su energía a su nivel cuántico fundamental. Este proceso de «enfriamiento» del oscilador ha sido propuesto teóricamente y, cuando sea demostrado experimentalmente, abrirá un nuevo campo de investigación para la física cuántica.



→ Nanodispositivo a base de nanotubo de carbono (tipo transistor efecto campo). La acción de un potencial electrostático aplicado en la puerta (G) induce deformaciones del nanotubo y cambios en las características de conductancia del dispositivo. También, puede haber una retroacción de la carga incorporada en el tubo sobre la energía del modo de oscilación.