

## Control del grafeno mediante sonido

Un estudio teórico sugiere la posibilidad de utilizar ondas mecánicas para gobernar el comportamiento de los electrones en este material bidimensional. El hallazgo podría encontrar aplicaciones en electrónica y en el diseño de materiales inteligentes

GERARDO GARCÍA NAUMIS

En los últimos años, los materiales con espesor de una sola capa de átomos (bidimensionales) han desencadenado una revolución en nanotecnología. Empezaron a despertar interés en 2004, cuando Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Manchester, descubrieron el grafeno, un material formado por monocapas de carbono cuyo hallazgo les valdría en 2010 el premio Nobel de

física. Con el tiempo, esta familia se ha ido ampliando con la incorporación del siliceno (monocapas de silicio), el fosforeno (monocapas de fósforo) y dicalcogenuros bidimensionales de metales de transición ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NiSe}_2$ , etcétera). Todos ellos presentan propiedades electrónicas, ópticas, químicas y mecánicas de gran interés. En particular, se cree que en un futuro podrían reemplazar al silicio en

la electrónica. Para ello, la capacidad de controlar el comportamiento de los electrones en estos materiales reviste un interés fundamental.

El grafeno ha sido apodado el «material maravilla»: es el mejor conductor conocido de la electricidad y el calor, y combina la ligereza del grafito con la resistencia del diamante. Esta resistencia ante deformaciones mecánicas se explica por la fuerza de los enlaces entre sus átomos de carbono, los cuales se disponen en una estructura hexagonal similar a la de un panel. Un material sólido típico puede estirarse hasta un 3 por ciento de su longitud. El grafeno, en cambio, lo hace hasta un 23 por ciento. Además, dicha deformación es elástica: cuando desaparece la fuerza que la causa, recupera su forma original. Por otro lado, su longitud aumenta de manera proporcional a la fuerza de deformación; es decir, se comporta como un resorte, un sistema mecánico que los físicos conocen muy bien.

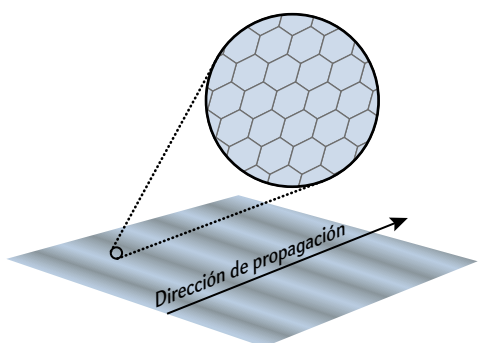
Las deformaciones del grafeno generan todo tipo de cambios en el comportamiento de sus electrones. Esto ha llevado a la idea de desarrollar materiales «inteligentes» que, de manera controlada, modifiquen sus propiedades electrónicas según el esfuerzo aplicado. En principio, ello permitiría modular el modo en que absorben la luz, su conductividad eléctrica, térmica y otras cualidades. En inglés se ha acuñado la palabra *straintronics*, que podríamos traducir como «tensiotrónica», para describir el estudio y la aplicación de este fenómeno.

En un trabajo teórico reciente, realizado junto con Maurice Oliva-Leyva, del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, hemos analizado el efecto de las ondas sonoras en el comportamiento electrónico del grafeno. Nuestros resultados, publicados en *Journal of Physics: Condensed Matter*, sugieren la posibilidad de emplear deformaciones mecánicas para colimar los electrones del material; es decir, para generar un haz que se propague en una dirección determinada. El hallazgo

### DEFORMACIONES MECÁNICAS Y CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

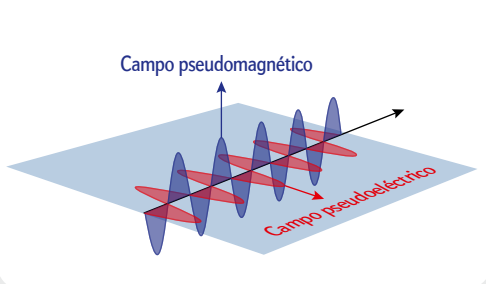
Cuando un esfuerzo mecánico, como una onda de sonido, se propaga en el grafeno (arriba), el comportamiento de los electrones se modifica de manera análoga a como lo haría en presencia de un campo electromagnético (abajo). Por esta razón, se dice que estas deformaciones mecánicas inducen «campos pseudoelectromagnéticos». Un estudio reciente ha explotado esta analogía formal para analizar el comportamiento electrónico del grafeno en presencia de ondas sonoras.

#### Propagación de una onda sonora



Representación esquemática de la propagación de una onda mecánica en una muestra de grafeno. Las zonas grises indican las regiones con mayor densidad de átomos de carbono; es decir, las crestas de la onda sonora en un instante dado. El inserto ilustra la estructura cristalina del grafeno, cuyos átomos se disponen en los vértices de una red hexagonal.

#### Propagación de una onda electromagnética



Desde un punto de vista matemático, los efectos generados por la propagación de una onda sonora en el grafeno resultan equivalentes a los que causaría una onda electromagnética en una muestra sin tensiones mecánicas. Esta figura indica cómo serían el campo eléctrico (rojo, paralelo a la muestra) y el magnético (azul, perpendicular a la muestra) que remedarían los efectos de la onda sonora ilustrada arriba.

supone un primer paso hacia la manipulación de los electrones en el grafeno mediante ondas sonoras y abre la puerta a varias aplicaciones.

### Electrones «relativistas» y ondas electromagnéticas

Los electrones del grafeno se comportan de modo muy distinto al de sus equivalentes en materiales tridimensionales. En un semiconductor tridimensional, como el silicio, la energía de los electrones es proporcional al cuadrado de su velocidad. En el grafeno, en cambio, la energía resulta directamente proporcional a la velocidad de estas partículas. Desde un punto de vista matemático, dicha relación es análoga a la que satisfacen las partículas relativistas; es decir, aquellas que se mueven a velocidades muy próximas a la de la luz.

En general, el comportamiento cuántico de los electrones que avanzan a una velocidad muy cercana a la de la luz queda descrito por la ecuación de Dirac, formulada en 1928 por el físico británico Paul A. M. Dirac. En el caso del grafeno, los electrones obedecen una ecuación de Dirac efectiva. Es importante señalar que nos referimos a ella como «efectiva» porque, en realidad, los electrones del grafeno no se desplazan más rápido que sus homólogos en materiales tridimensionales. Sin embargo, su dinámica sí queda descrita por una ecuación formalmente idéntica a la de Dirac, solo que, en ella, la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s) debe reemplazarse por la de los electrones en el sólido (del orden de  $10^6$  m/s).

Allá por el año 2006, casi inmediatamente después del descubrimiento del grafeno, nuestro grupo de investigación comenzó a estudiar el efecto de las ondas electromagnéticas en los electrones del material. Para ello usamos un truco matemático equivalente a «montarse» sobre la onda; es decir, en lugar de plantear el problema desde el sistema de referencia del grafeno, lo hicimos desde el sistema de referencia que avanza junto con la onda. Gracias a esta técnica, la ecuación de Dirac puede resolverse de manera exacta.

Nuestros resultados, publicados en 2008 en *Physical Review B*, indicaban que, en presencia de una onda electromagnética, el grafeno comenzaba a comportarse como un semiconductor; es decir, aparecía un pequeño intervalo de energías «prohibidas» (no accesibles) para los electrones. Cabe recordar que es esta propiedad bási-

ca de los semiconductores lo que permite emplearlos para fabricar componentes electrónicos, como transistores. Además, los electrones del grafeno desarrollaban una respuesta no lineal que, entre otros efectos, implicaba que las partículas solo podían avanzar durante la mitad del período de oscilación de la onda electromagnética. Dicho de otro modo, aparecía una corriente semejante a la que fluye a través de un diodo en un circuito de corriente alterna.

Varios de estos efectos se han visto confirmados posteriormente de manera experimental, lo que permite entrever varias aplicaciones técnicas. Entre ellas, la fabricación de circuitos electrónicos con frecuencias de reloj (en esencia, el número de operaciones por segundo) mucho más altas que las de las computadoras actuales.

### De las ondas electromagnéticas a las ondas sonoras

En los últimos años, varios trabajos han demostrado que, al aplicar esfuerzos mecánicos al grafeno, el comportamiento de los electrones se modifica de manera similar a como ocurriría en presencia de campos eléctricos y magnéticos. Por esta razón, decimos que tales deformaciones generan «campos pseudo electromagnéticos». A la vista de este resultado, en el estudio publicado en *Journal of Physics* nos planteamos la posibilidad de aprovechar los resultados obtenidos en el caso de las ondas electromagnéticas y adaptarlos para analizar los efectos de su análogo mecánico: las ondas de sonido.

Nuestros cálculos indicaban que, en presencia de una onda mecánica, los electrones del grafeno comenzarían a avanzar en una dirección privilegiada; en concreto, en la misma en la que se propaga la onda. Esta respuesta ofrece la posibilidad de manipular los electrones del material; por ejemplo, para aumentar la corriente eléctrica en una dirección escogida a voluntad. Y, por supuesto, el mismo efecto puede usarse a la inversa, con el objetivo de detectar esfuerzos mecánicos que se traduzcan en corrientes eléctricas.

Pero, además de este efecto de colimación de los electrones, comprobamos que, de manera similar a lo que ocurría en el caso de una onda electromagnética, comenzaban a aparecer valores no accesibles para la energía de los electrones. Este fenómeno se debe a que la ecuación que describe su comportamiento se reduce a

la de un sistema muy simple: un péndulo cuya longitud varía de manera periódica. Un ejemplo famoso de este tipo de movimiento lo hallamos en el botafumeiro de la catedral de Santiago de Compostela. Los *tiraboleiros* tiran de la cuerda que lo sostiene para que este vaya ganando velocidad; pero, para lograrlo, deben escoger cuidadosamente la frecuencia con la que impulsan el incensario. Con los electrones del grafeno sucede algo similar: comienzan a extraer energía de la onda de sonido, pero esta solo se absorberá de manera eficiente si existe una resonancia entre el movimiento de la onda y el de los electrones.

Por último, demostramos que el comportamiento de los electrones quedaba descrito por un «índice de refracción efectivo», análogo al que gobierna la velocidad de la luz en un medio transparente. Ello abre la puerta a controlar la trayectoria y velocidad de los electrones en el grafeno, de modo similar a como ocurre con los fotones en una lente.

Si bien estos resultados son esperanzadores, la manipulación de los electrones del grafeno mediante ondas mecánicas se encuentra todavía en su infancia, tanto en el plano teórico como en el experimental. Aún queda por demostrar en el laboratorio la existencia de los efectos predichos en nuestros estudios y, si así ocurre, extender el modelo a nuevas familias de materiales bidimensionales.

—Gerardo García Naumis  
Instituto de Física  
Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)

#### PARA SABER MÁS

##### Analytic solution for electrons and holes in graphene under electromagnetic waves: Gap appearance and nonlinear effects.

F. J. López-Rodríguez y G. G. Naumis en *Physical Review B*, vol. 78, art. 201406, noviembre de 2008.

##### Sound waves induce Volkov-like states, band structure and collimation effect in graphene.

M. O. Oliva-Leyva y G. G. Naumis en *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 28, n.º 2, art. 025301, enero de 2016.

#### EN NUESTRO ARCHIVO

**Grafeno.** Andre K. Geim y Philip Kim en *lyC*, junio de 2008.

**Electrónica del grafeno.** J. González Carmona, F. Guinea y M.ª A. Hernández Vozmediano en *lyC*, septiembre de 2010.

**Bienvenidos a Planilandia.** Vincenzo Palermo y Francesco Bonaccorso en *lyC*, junio de 2017.