

DISPOSITIVOS Y SENSORES PARA LA COSECHA DE ENERGÍA, MÉTODOS PARA FABRICARLOS, Y SU USO

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUD RELACIONADA

La presente solicitud reivindica la prioridad y el beneficio de la solicitud provisional de patente estadounidense N.º 62/438.327, presentada el 22 de diciembre de 2016, que se incorpora en la presente por referencia en su totalidad.

CAMPO

La tecnología divulgada se refiere, en general, a dispositivos y sensores de cosecha de energía, y a métodos para fabricarlos y a su uso.

ANTECEDENTES

La cosecha de energía de vibraciones es la práctica que consiste en captar energía de vibración de fuentes de vibración externas (por ejemplo, vehículos, máquinas, edificios y movimientos humanos). Luego, esta energía capturada se puede usar para distintas aplicaciones. En algunos enfoques de la cosecha de energía de vibraciones, se fija una placa en un extremo, que vibrará en forma ascendente y descendente entre dos extremos cuando es excitada. Al flexionarse y oscilar entre los dos extremos, la deformación y el esfuerzo desarrollados sobre la superficie de la placa se pueden usar para generar energía. Las vibraciones en la escala atómica son omnipresentes, incluso en un entorno mecánicamente tranquilo. Esto se debe a que el material se mantiene a una temperatura por encima de cero, y se denominan vibraciones térmicas. A continuación se presentan distintas formas de realización con respecto a estas y otras consideraciones.

SÍNTESIS

De conformidad con los fines de los dispositivos y métodos divulgados, que se ejemplifican y se describen ampliamente en la presente, el objeto divulgado se refiere a dispositivos y sensores de cosecha de energía, a métodos para fabricarlos, y a su uso.

Los dispositivos y sensores de cosecha de energía pueden comprender una membrana que comprende un material bidimensional (2D) dispuesto sobre un sustrato, en donde la membrana comprende una o más ondulaciones. El material bidimensional puede, por ejemplo, comprender grafeno, MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂, ReS₂, ReSe₂ o una combinación de estos. En algunos ejemplos, el material bidimensional puede comprender grafeno. La membrana puede, por ejemplo, tener un espesor promedio de 0,3 nanómetros (nm) a 3,0 nm. La membrana puede, por ejemplo, tener una dimensión lateral promedio de 0,1 micrómetros a 100 micrómetros. En algunos ejemplos, la

membrana puede tener una tensión por unidad de longitud de 0,0 N/m a 10,0 N/m. La una o más ondulaciones pueden, por ejemplo, tener una longitud promedio de 1 nm a 100 nm. En algunos ejemplos, la una o más ondulaciones pueden tener una altura promedio de 0,1 nm a 2,0 nm.

El sustrato puede, por ejemplo, comprender cobre, silicio, zafiro o una combinación de estos. En algunos ejemplos, el sustrato puede comprender una rejilla que comprende una o más aberturas.

Los dispositivos de cosecha de energía también comprenden un componente acoplado eléctrica, magnética y/o mecánicamente a la membrana y/o al sustrato, de modo que el componente se configure para cosechar energía de la membrana.

En algunos ejemplos, el sustrato es térmicamente conductor, y la membrana está en contacto térmico con el sustrato, en donde la energía térmica del sustrato se puede convertir en una vibración de la membrana, de modo que la membrana tiene una energía vibracional, y el componente se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y así cosechar energía de la membrana. En algunos ejemplos, la energía térmica puede comprender energía térmica ambiente. En algunos ejemplos, la membrana puede tener una energía vibracional, y el componente se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y así cosechar energía de la membrana. En algunos ejemplos, la energía vibracional comprende energía vibracional ambiente. La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 miliHertz (mHz) a 10 gigaHz (GHz).

En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía se puede configurar de modo que la una o más ondulaciones puedan producir una potencia de 1 piconWatt (pW) a 100 pW. En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía puede tener una densidad de potencia de 1 W/m² a 100.000 W/m².

En algunos ejemplos, la membrana puede tener una carga eléctrica, y el componente comprende un condensador dispuesto alrededor de, y acoplado eléctricamente a, la membrana, en donde el condensador se configura para convertir la energía vibracional de la membrana cargada en una corriente eléctrica alterna, y así cosechar energía de la membrana. En algunos ejemplos, el dispositivo también puede comprender un circuito con puente de diodos para convertir la corriente eléctrica alterna en una corriente eléctrica directa. El dispositivo puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente al puente de diodos, de modo que la

corriente directa puede cargar el condensador, y así almacenar la carga generada por la energía vibracional de la membrana cargada.

En algunos ejemplos, la membrana puede comprender también una pluralidad de partículas magnéticas. La pluralidad de partículas magnéticas puede, por ejemplo, comprender hierro, cobalto, niobio, manganeso, níquel o una combinación de estos. En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas puede comprender óxido de hierro, óxido de cobalto o una combinación de estos. La pluralidad de partículas magnéticas puede, por ejemplo, tener un tamaño de partícula promedio de 0,5 nm a 10 nm. En algunos ejemplos, el componente puede comprender un bucle de electrodos acoplados magnéticamente a la membrana, en donde el dispositivo se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en un campo magnético variable con el tiempo, que induce una corriente eléctrica en el bucle de electrodos, y así convertir la energía vibracional de la membrana en una corriente eléctrica y cosechar energía de la membrana. El dispositivo puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente al bucle de electrodos, de modo que la energía cosechada por el dispositivo se pueda almacenar en el condensador.

En algunos ejemplos, el componente puede comprender una ménsula piezoeléctrica, y la membrana tiene un borde que está acoplado mecánicamente a la ménsula piezoeléctrica, en donde la ménsula piezoeléctrica se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en energía eléctrica, y así cosechar energía de la membrana. El dispositivo puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente a la ménsula piezoeléctrica, de modo que la energía cosechada por el dispositivo se pueda almacenar en el condensador.

En algunos ejemplos, la membrana puede ser piezoeléctrica, y el componente comprende una lectura de voltaje acoplada mecánica y eléctricamente a la membrana, en donde la membrana piezoeléctrica se configura para convertir energía vibracional en energía eléctrica, que se puede cosechar mediante la lectura de voltaje. El dispositivo puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente a la lectura de voltaje, de modo que la energía cosechada por el dispositivo se pueda almacenar en el condensador.

En algunos ejemplos, el componente puede comprender una bomba tipo caja acoplada mecánicamente a la membrana y/o al sustrato, en donde la bomba tipo caja comprende una primera válvula de flujo de líquido de una vía y una segunda válvula de flujo de líquido de una vía, y en donde la bomba tipo caja se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en el flujo de un líquido a través de la bomba tipo

caja a través de la primera válvula de flujo de líquido de una vía y/o la segunda válvula de flujo de líquido de una vía, y así convertir la energía vibracional de la membrana en flujo de líquido, y cosechar energía de la membrana.

En algunos ejemplos, la membrana también puede comprender un canal que atraviesa la membrana. El componente puede, por ejemplo, comprender una transportadora tipo trinquete acoplada mecánicamente a la membrana, en donde la transportadora tipo trinquete se configura para convertir la energía vibracional de la membrana en traslación de la transportadora tipo trinquete, de modo que la transportadora tipo trinquete pueda transportarse desde un lado de la membrana al otro a través del canal mediante la vibración de la membrana, y así convertir la energía vibracional de la membrana en energía de traslación de la transportadora tipo trinquete, y cosechar energía de la membrana.

En la presente también se divulgan sensores, en donde los sensores también comprenden un componente acoplado eléctrica, magnética y/o mecánicamente a la membrana y/o al sustrato, de modo que el componente se configure para detectar una señal de la membrana. En algunos ejemplos, el sustrato es térmicamente conductor y la membrana está en contacto térmico con el sustrato, en donde el sustrato se configura para convertir la energía térmica en vibración de la membrana, de modo que la membrana tiene una energía vibracional, y el componente se configura para detectar una señal producida por la energía vibracional de la membrana. La energía térmica puede, por ejemplo, comprender energía térmica ambiente. En algunos ejemplos, la membrana tiene una energía vibracional y el componente se configura para detectar una señal producida por la energía vibracional de la membrana. La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender energía vibracional ambiente. La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 mHz a 10 GHz. El componente puede comprender un electrodo acoplado eléctricamente a la membrana y/o al sustrato. En algunos ejemplos, el electrodo se puede configurar para detectar una frecuencia de la energía vibracional de la membrana, de modo que el sensor se configura para detectar un cambio en la masa de la membrana en función de un cambio en la frecuencia de vibración de la membrana. En algunos ejemplos, el electrodo se puede configurar para detectar una magnitud de una señal de voltaje desde la membrana, de modo que el sensor se configure para detectar un cambio en la carga de la membrana, en función de un cambio en la magnitud de la señal detectada de la membrana.

En la presente también se divulgan métodos para fabricar los dispositivos y sensores de cosecha de energía descritos en la presente. Por ejemplo, los métodos para fabricar los dispositivos y/o sensores de cosecha de energía descritos en la presente pueden comprender: comprimir una lámina de material bidimensional para formar la membrana; disponer la membrana sobre el sustrato; y acoplar eléctrica, magnética y/o mecánicamente el componente a la membrana y/o al sustrato.

Comprimir la lámina de material bidimensional puede, por ejemplo, comprender aplicar una fuerza de compresión lateral a través de la lámina, en donde la fuerza de compresión lateral tiene una magnitud de 1 nanoNewton (nN) a 100 nN. En algunos ejemplos, la lámina de material bidimensional tiene una longitud original, y la lámina comprimida del material bidimensional tiene una longitud comprimida, en donde la longitud comprimida es menor que la longitud original en una cantidad de 0,01 % a 1 %.

En la presente también se divulgan métodos de uso de los dispositivos y/o sensores de cosecha de energía descritos en la presente. Por ejemplo, en la presente también se divulgan métodos para cosechar energía mediante el uso de los dispositivos de cosecha de energía descritos en la presente.

En la siguiente descripción, se establecerán algunas de las ventajas adicionales de los dispositivos y métodos divulgados, y serán, en parte, evidentes a partir de la descripción. Las ventajas de los dispositivos divulgados se descubrirán y se obtendrán mediante los elementos y las combinaciones indicados particularmente en las reivindicaciones adjuntas. Debe entenderse que tanto la descripción general anterior como la descripción detallada a continuación son solo ilustrativas y explicativas, y no limitan los dispositivos y métodos divulgados, según se reivindican.

Los detalles de una o más formas de realización de la invención se exponen en los dibujos adjuntos y en la descripción a continuación. Otras características, objetivos y ventajas de la invención resultarán evidentes de la descripción y los dibujos, y de las reivindicaciones.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Los dibujos adjuntos, que se incorporan y constituyen una parte de la presente memoria descriptiva, ilustran diversos aspectos de la divulgación, y junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la divulgación.

La Figura 1 es un diagrama esquemático de una membrana de grafeno dispuesta en un sustrato que comprende una rejilla de cobre.

La Figura 2 es una ilustración esquemática de las ondulaciones que se forman de manera natural en una membrana de grafeno.

La Figura 3 es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 4 es un diagrama esquemático de la corriente alterna producida por la cosecha de energía que se muestra en la Figura 3 que se convierte en corriente directa y almacenada en un condensador.

La Figura 5 es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 6 es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 7 es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 8A es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 8B es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 9A es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 9B es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 9C es un diagrama esquemático de un dispositivo de cosecha de energía.

La Figura 10 es un diagrama esquemático de un sensor.

La Figura 11 ilustra la implementación en vista superior y vista lateral de una membrana de material bidimensional que presenta la formación de una ondulación.

La Figura 12 ilustra la vista lateral en sección transversal de una implementación de una membrana que presenta la formación de dos ondulaciones con una fuerza de compresión natural en dos extremos separados de la membrana.

La Figura 13 es un diagrama esquemático de la comprensión de una lámina de material bidimensional.

La Figura 14 representa los cambios en la altura del grafeno autoestable en el tiempo.

La Figura 15 es la autocorrelación de los datos de altura-tiempo de la Figura 14.

La Figura 16 es la densidad espectral de potencia calculada a partir de los datos de la Figura 14 y la Figura 15.

La Figura 17 es una imagen de SEM de grafeno pristino autoestable entre soportes de rieles de Cu.

La Figura 18 es un diagrama esquemático de una configuración experimental.

La Figura 19 muestra un trazo de tiempo habitual de la altura de la membrana (superior) y de una muestra rígida (inferior). El recuadro es una vista expandida del trazo de tiempo del grafeno autoestable.

La Figura 20 muestra un perfil de corriente túnel común durante la medición.

La Figura 21 es el desplazamiento cuadrático medio (MSD) de la altura de la membrana como una función del tiempo. Las líneas punteadas representan ajustes con pendientes 1,4 y 0,3. La inserción es el resultado de una simulación usando tiempos de espera exponenciales y longitudes de salto de Cauchy. Nuevamente, las líneas punteadas representan ajustes con pendientes 1,4 y 0,3.

La Figura 22 representa la función de autocorrelación (ACF) de la velocidad y la velocidad instantánea (recuadro) calculadas a partir de la altura de la membrana $z(t)$ que se muestra en la Figura 19.

La Figura 23 representa la función de distribución de probabilidad (PDF) de la velocidad de la membrana de grafeno autoestable (FSG) ajustada a distribuciones de Cauchy-Lorentz y de Gauss, junto con la muestra rígida de control (símbolos cuadrados).

La Figura 24 representa las funciones de distribución de probabilidad de la velocidad y los ajustes de Cauchy-Lorentz (curvas de línea completa) para distintas corrientes túnel.

La Figura 25 es la variación en FWHM de las funciones de distribución de probabilidad de la velocidad con respecto a la corriente túnel en dos puntos de referencia del voltaje de polarización distintos.

La Figura 26 es la altura del átomo de carbono central en el tiempo durante la simulación MD a temperaturas bajas (100 K) y temperaturas altas (3000 K). Se descubrió que los datos de las temperaturas altas pasan de alturas positivas a negativas cuatro veces durante 1 ns. También se muestra la altura con un filtro pasa bajos. Estos cálculos se realizaron usando dinámica acelerada por temperatura (TAD), en donde 1 ns de tiempo de cálculo es 1 ms en tiempo real.

La Figura 27 es la función de distribución de probabilidad de la longitud de salto para los datos de la altura con filtro pasa bajos que se muestran con el mejor ajuste en las distribuciones de Cauchy-Lorentz y de Gauss.

La Figura 28 es una vista en perspectiva de la membrana en una forma de curva descendente indicada como “(c)” en la Figura 26.

La Figura 29 es una vista en perspectiva de la membrana en una curva ascendente indicada como “(d)” en la Figura 26.

La Figura 30 es el resultado informado de las simulaciones de dinámica molecular del estado de la técnica que usan LAMMPS, que muestra los datos de altura-tiempo para el grafeno autoestable previamente pandeado.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Los dispositivos y métodos descritos en la presente se comprenderán con mayor facilidad en referencia a la descripción detallada a continuación de los aspectos específicos del objeto divulgado y los Ejemplos que allí se incluyen.

Antes de divulgar y describir los presentes dispositivos y métodos, cabe destacar que los aspectos descritos a continuación no se limitan a los detalles de construcción y disposición de componentes indicados en la siguiente descripción o ilustrados en los dibujos. La tecnología divulgada puede tener otras formas de realización y se puede llevar a cabo de diversas maneras.

En la siguiente descripción, se hace referencia a los dibujos adjuntos que forman parte de esta y que muestran, a modo de ilustración, formas de realización o ejemplos específicos.

Asimismo, cabe también destacar que la terminología que se usa en la presente tiene como finalidad solamente describir aspectos en particular y no pretende limitarlos. Al describir formas de realización de ejemplo, la terminología se adoptará con fines de claridad. Cabe destacar que cada término contempla su significado más amplio como lo entiende la persona del oficio de nivel medio, e incluye todo equivalente técnico que funcione de manera similar para alcanzar un fin similar. También cabe destacar que la mención de una o más etapas de un método no excluye la presencia de etapas metodológicas adicionales o etapas metodológicas intermedias entre las etapas expresamente identificadas. Las etapas de un método pueden llevarse a cabo en un orden diferente a los descritos en la presente sin apartarse del alcance de la tecnología divulgada. De manera similar, también cabe destacar que la mención de uno o más componentes en un dispositivo o sistema no excluye la presencia de componentes adicionales o componentes intermedios entre los componentes expresamente identificados.

Además, en la presente memoria descriptiva, se hace referencia a diversas publicaciones. Las divulgaciones de estas publicaciones se incorporan en su totalidad a

la presente por referencia, a fin de describir más detalladamente el estado de la técnica al que pertenece el objeto divulgado. Las referencias divulgadas se incorporan individual y específicamente por referencia en la presente por el material que contienen que se analiza en la oración en donde se proporciona la referencia.

Definiciones

En la presente memoria descriptiva y en las reivindicaciones que siguen, se hará referencia a una cantidad de términos que se definirán para tener los significados que se indican a continuación:

En la descripción y las reivindicaciones de la presente memoria descriptiva, la palabra “comprender”, y otras formas de esta palabra, tales como “que comprende” o “comprende”, significa que incluye sin limitación, y no pretende excluir, por ejemplo, otros aditivos, componentes, enteros o etapas.

Como se usa en la descripción y reivindicaciones adjuntas, las formas singulares “un”, “una/uno” y “la/el” también incluyen las referencias plurales a menos que el contexto claramente indique lo contrario. Por lo tanto, por ejemplo, la referencia a “una composición” incluye mezclas de dos o más composiciones de este tipo, la referencia a “el compuesto” incluye mezclas de dos o más compuestos de este tipo, la referencia a “un agente” incluye mezclas de dos o más agentes de este tipo, y similares.

Cabe destacar que en la presente memoria descriptiva los identificadores “primer” y “segundo” se usan solamente para ayudar al lector a distinguir los diversos componentes, características o etapas del objeto divulgado. Los identificadores “primer” y “segundo” no implican ningún orden, cantidad, preferencia o importancia en particular de los componentes o etapas modificados por estos términos.

La expresión “o las combinaciones de estos” como se usa en la presente se refiere a todas las modificaciones o combinaciones de los artículos enumerados que preceden la expresión. Por ejemplo, “A, B, C, o las combinaciones de estos” incluye al menos uno de: A, B, C, AB, AC, BC o ABC, y, si el orden resultara importante en un contexto en particular, también BA, CA, CB, CBA, BCA, ACB, BAC o CAB. Siguiendo con este ejemplo, se incluyen expresamente combinaciones que contienen repeticiones de uno o más artículos o términos, tales como BB, AAA, AB, BBC, AAABCCCC, CBAAAA, CABABB, etc. La persona del oficio de nivel medio comprenderá que en general no existe límite en la cantidad de artículos o términos en cualquier combinación, a menos que lo contrario sea evidente en el contexto.

Dispositivos y sensores para la cosecha de energía

En la presente se describen dispositivos **100** y sensores **140** para la cosecha de energía. Los sensores y dispositivos de cosecha de energía **100** pueden comprender una membrana **102** dispuesta sobre un sustrato **104**, en donde la membrana **102** comprende un material bidimensional (2D) y una o más ondulaciones.

En una forma de realización de ejemplo, se divulga un dispositivo de cosecha de energía **100** que tiene una fuente de energía para la cosecha de energía por vibración ambiente, que tiene una membrana bidimensional **102** para el pandeo a una frecuencia relativamente baja. La energía cinética vibracional anómala de estos materiales bidimensionales, si se usa como el componente activo de un dispositivo de cosecha de energía **100**, puede proporcionar una producción superior de energía en comparación con la tecnología existente. Por ejemplo, en la actual tecnología de cosecha de energía por vibración microelectromecánica (MEM) de silicio, el componente activo puede ser una plataforma de silicio grabado. Esta plataforma no vibrará de manera espontánea ni se pandeará mecánicamente porque es demasiado rígida. El “pandeo mecánico” se entiende en la presente divulgación como un fenómeno no lineal. Los enfoques previos de estructuras MEM de silicio son dispositivos de respuesta lineal. En contraste, la membrana **102** de los dispositivos de cosecha de energía **100** descritos en la presente puede vibrar de manera espontánea y pandearse mecánicamente.

El material bidimensional puede, por ejemplo, comprender grafeno, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ReS_2 , ReSe_2 o una combinación de estos. En algunos ejemplos, el material bidimensional puede comprender grafeno.

La identidad del material bidimensional puede seleccionarse en función de diversos factores. Por ejemplo, la resistencia a la flexión varía entre los diferentes materiales bidimensionales y, por lo tanto, habrá diferentes frecuencias de vibración. Además, la conductividad eléctrica de los diversos materiales bidimensionales varía considerablemente, lo que puede controlar la eficacia de la cosecha de energía mediante un enfoque electrostático. En consecuencia, la identidad del material bidimensional puede seleccionarse para controlar uno o más de estos parámetros.

En algunos ejemplos, la membrana **102** puede comprender grafeno autoestable, que tiene un componente de velocidad sustancialmente grande en la distribución de probabilidad de la velocidad. En algunos ejemplos, la membrana **102** puede presentar movimiento no lineal constante a temperatura ambiente.

La membrana **102** puede, por ejemplo, tener un espesor promedio de 0,3 nanómetros (nm) o más (por ejemplo, 0,4 nm o más, 0,5 nm o más, 0,6 nm o más, 0,7 nm o más, 0,8 nm o más, 0,9 nm o más, 1,0 nm o más, 1,1 nm o más, 1,2 nm o más,

1,3 nm o más, 1,4 nm o más, 1,5 nm o más, 1,6 nm o más, 1,7 nm o más, 1,8 nm o más, 1,9 nm o más, 2,0 nm o más, 2,1 nm o más, 2,2 nm o más, 2,3 nm o más, 2,4 nm o más, o 2,5 nm o más). En algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener un espesor promedio de 3,0 nm o menos (por ejemplo, 2,9 nm o menos, 2,8 nm o menos, 2,7 nm o menos, 2,6 nm o menos, 2,5 nm o menos, 2,4 nm o menos, 2,3 nm o menos, 2,2 nm o menos, 2,1 nm o menos, 2,0 nm o menos, 1,9 nm o menos, 1,8 nm o menos, 1,7 nm o menos, 1,6 nm o menos, 1,5 nm o menos, 1,4 nm o menos, 1,3 nm o menos, 1,2 nm o menos, 1,1 nm o menos, 1,0 nm o menos, 0,9 nm o menos, 0,8 nm o menos, 0,7 nm o menos, 0,6 nm o menos, o 0,5 nm o menos). El espesor promedio de la membrana **102** puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana **102** puede tener un espesor promedio de 0,3 nm a 3,0 nm (por ejemplo, de 0,3 nm a 2,5 nm, de 0,3 nm a 2,0 nm, de 0,3 nm a 1,5 nm, de 0,3 nm a 1,0 nm, o de 0,3 nm a 0,6 nm).

La membrana **102** puede tener, por ejemplo, una dimensión lateral promedio de 0,1 micrómetros (μm) o más (por ejemplo, 0,5 μm o más, 1 μm o más, 1,5 μm o más, 2 μm o más, 2,5 μm o más, 3 μm o más, 3,5 μm o más, 4 μm o más, 4,5 μm o más, 5 μm o más, 6 μm o más, 7 μm o más, 8 μm o más, 9 μm o más, 10 μm o más, 15 μm o más, 20 μm o más, 25 μm o más, 30 μm o más, 35 μm o más, 40 μm o más, 45 μm o más, 50 μm o más, 60 μm o más, 70 μm o más, u 80 μm o más). En algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener una dimensión lateral promedio de 100 μm o menos (por ejemplo, 90 μm o menos, 80 μm o menos, 70 μm o menos, 60 μm o menos, 50 μm o menos, 45 μm o menos, 40 μm o menos, 35 μm o menos, 30 μm o menos, 25 μm o menos, 20 μm o menos, 15 μm o menos, 10 μm o menos, 9 μm o menos, 8 μm o menos, 7 μm o menos, 6 μm o menos, 5 μm o menos, 4,5 μm o menos, 4 μm o menos, 3,5 μm o menos, 3 μm o menos, 2,5 μm o menos, 2 μm o menos, 1,5 μm o menos, o 1 μm o menos). La dimensión lateral promedio de la membrana **102** puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana **102** puede tener una dimensión lateral promedio de 0,1 micrómetros a 100 micrómetros (por ejemplo, de 0,1 μm a 50 μm , de 50 μm a 100 μm , de 0,1 μm a 20 μm , de 20 μm a 40 μm , de 40 μm a 60 μm , de 60 μm a 80 μm , de 80 μm a 100 μm , de 0,5 μm a 95 μm , o de 10 μm a 90 μm).

En algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener una tensión por unidad de longitud de 0,0 newtons por metro (N/m) o más (por ejemplo, 0,01 N/m o más, 0,02 N/m o más, 0,03 N/m o más, 0,04 N/m o más, 0,05 N/m o más, 0,06 N/m o más, 0,07 N/m o más, 0,08 N/m o más, 0,09 N/m o más, 0,10 N/m o más, 0,11 N/m o más, 0,12 N/m o

más, 0,13 N/m o más, 0,14 N/m o más, 0,15 N/m o más, 0,20 N/m o más, 0,25 N/m o más, 0,30 N/m o más, 0,35 N/m o más, 0,40 N/m o más, 0,45 N/m o más, 0,50 N/m o más, 0,60 N/m o más, 0,70 N/m o más, 0,80 N/m o más, 0,90 N/m o más, 1,0 N/m o más, 1,5 N/m o más, 2,0 N/m o más, 2,5 N/m o más, 3,0 N/m o más, 3,5 N/m o más, 4,0 N/m o más, 4,5 N/m o más, 5,0 N/m o más, 6,0 N/m o más, o 7,0 N/m o más). En algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener una tensión por unidad de longitud de 10,0 N/m o menos (por ejemplo, 9,0 N/m o menos, 8,0 N/m o menos, 7,0 N/m o menos, 6,0 N/m o menos, 5,0 N/m o menos, 4,5 N/m o menos, 4,0 N/m o menos, 3,5 N/m o menos, 3,0 N/m o menos, 2,5 N/m o menos, 2,0 N/m o menos, 1,5 N/m o menos, 1,0 N/m o menos, 0,90 N/m o menos, 0,80 N/m o menos, 0,70 N/m o menos, 0,60 N/m o menos, 0,50 N/m o menos, 0,45 N/m o menos, 0,40 N/m o menos, 0,35 N/m o menos, 0,30 N/m o menos, 0,25 N/m o menos, 0,20 N/m o menos, 0,15 N/m o menos, 0,14 N/m o menos, 0,13 N/m o menos, 0,12 N/m o menos, 0,11 N/m o menos, 0,10 N/m o menos, 0,09 N/m o menos, 0,08 N/m o menos, 0,07 N/m o menos, 0,06 N/m o menos, o 0,05 N/m o menos). La tensión por unidad de longitud de la membrana **102** puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana **102** puede tener una tensión por unidad de longitud de 0,0 a 10,0 N/m (por ejemplo, de 0,0 N/m a 8,0 N/m, de 0,0 N/m a 5,0 N/m, de 0,0 N/m a 3,0 N/m, de 0,0 N/m a 1,0 N/m, de 0,0 a 0,5 N/m, de 0,0 a 0,3 N/m, o de 0,03 N/m a 0,12 N/m). La tensión se puede medir mediante microscopía de fuerza atómica.

La una o más ondulaciones pueden, por ejemplo, tener una longitud promedio de 1 nm o más (por ejemplo, 2 nm o más, 3 nm o más, 4 nm o más, 5 nm o más, 6 nm o más, 7 nm o más, 8 nm o más, 9 nm o más, 10 nm o más, 15 nm o más, 20 nm o más, 25 nm o más, 30 nm o más, 35 nm o más, 40 nm o más, 45 nm o más, 50 nm o más, 55 nm o más, 60 nm o más, 65 nm o más, 70 nm o más, 75 nm o más, u 80 nm o más). En algunos ejemplos, la una o más ondulaciones puede tener una longitud promedio de 100 nm o menos (por ejemplo, 95 nm o menos, 90 nm o menos, 85 nm o menos, 80 nm o menos, 75 nm o menos, 70 nm o menos, 65 nm o menos, 60 nm o menos, 55 nm o menos, 50 nm o menos, 45 nm o menos, 40 nm o menos, 35 nm o menos, 30 nm o menos, 25 nm o menos, 20 nm o menos, 15 nm o menos, 10 nm o menos, 9 nm o menos, 8 nm o menos, 7 nm o menos, 6 nm o menos, o 5 nm o menos). La longitud promedio de la una o más ondulaciones puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos. Por ejemplo, la una o más ondulaciones pueden tener una longitud promedio de 1 nm a 100

nm (por ejemplo, de 1 nm a 90 nm, de 1 nm a 80 nm, de 1 nm a 70 nm, de 1 nm a 60 nm, de 5 nm a 50 nm, de 10 nm a 40 nm, o de 20 nm a 30 nm). La longitud de las ondulaciones se puede medir, por ejemplo, mediante microscopía electrónica.

En algunos ejemplos, la una o más ondulaciones pueden tener una altura promedio de 0,1 nm o más (por ejemplo, 0,11 nm o más, 0,12 nm o más, 0,13 nm o más, 0,14 nm o más, 0,15 nm o más, 0,20 nm o más, 0,25 nm o más, 0,30 nm o más, 0,35 nm o más, 0,40 nm o más, 0,45 nm o más, 0,50 nm o más, 0,60 nm o más, 0,70 nm o más, 0,80 nm o más, 0,90 nm o más, 1,0 nm o más, 1,1 nm o más, 1,2 nm o más, 1,3 nm o más, 1,4 nm o más, o 1,5 nm o más). En algunos ejemplos, la una o más ondulaciones pueden tener una altura promedio de 2,0 nm o menos (por ejemplo, 1,9 nm o menos, 1,8 nm o menos, 1,7 nm o menos, 1,6 nm o menos, 1,5 nm o menos, 1,4 nm o menos, 1,3 nm o menos, 1,2 nm o menos, 1,1 nm o menos, 1,0 nm o menos, 0,90 nm o menos, 0,80 nm o menos, 0,70 nm o menos, 0,60 nm o menos, 0,50 nm o menos, 0,45 nm o menos, 0,40 nm o menos, 0,35 nm o menos, 0,30 nm o menos, 0,25 nm o menos, o 0,20 nm o menos). La altura promedio de la una o más ondulaciones puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos. Por ejemplo, la una o más ondulaciones pueden tener una altura promedio de 0,1 nm a 2,0 nm (por ejemplo, 0,1 nm a 1,5 nm, de 0,1 nm a 1,0 nm, de 0,1 nm a 0,70 nm, de 0,20 nm a 0,60 nm, de 0,30 nm a 0,50 nm, o de 0,35 nm a 0,45 nm). La altura de las ondulaciones se puede medir, por ejemplo, mediante microscopía electrónica.

La membrana **102** puede, por ejemplo, fijarse a uno o ambos extremos del sustrato **104**. En algunos ejemplos, la membrana **102** se configura para vibrar a través de su porción central.

El sustrato **104** puede, por ejemplo, comprender cobre, silicio, carburo de silicio, zafiro, o una combinación de estos. En algunos ejemplos, el sustrato **104** puede comprender una rejilla que comprende una o más aberturas.

El siguiente análisis corresponde a un ejemplo determinado en donde la membrana **102** comprende grafeno y el sustrato **104** comprende una rejilla de cobre, pero los mismos conceptos se pueden aplicar a cualquiera de las membranas **102** y/o sustratos **104** descritos en la presente.

En ciertas formas de realización, la membrana **102** puede comprender un único plano atómico de carbono de grafito como su componente activo. Una lámina de grafeno puede colocarse sobre la rejilla de cobre de una o más aberturas. Cada abertura, cubierta con grafeno, puede formar una geometría de marco abierto con grafeno

autoestable en medio. Cuando el grafeno se dispone sobre la rejilla de cobre, se produce una fuerte interacción de van der Waals ($\sim 0,1 \text{ J/m}^2$) entre el borde del grafeno y la pared lateral de la rejilla de cobre (Figura 1). Según la cantidad de grafeno en exceso, la longitud de contacto mostrada como z_0 aumentará o disminuirá naturalmente hasta que las fuerzas se equilibren. Este fenómeno se denomina autotensión. La tensión final puede ser $\sim 0,1 \text{ N/m}$ y la geometría final del grafeno autoestable puede estar compuesta por ondulaciones (Figura 2). Estas ondulaciones pueden formarse de manera natural, y pueden tener una distribución de tamaño habitual de 20-24 nm de longitud y 0,3 a 0,5 nm de altura. Para que se formen las ondulaciones, el grafeno debe estar libre para comprimirse a sí mismo hasta alcanzar la autotensión final.

La deformación por compresión asociada con la geometría de las ondulaciones es el cambio en la longitud dividido por la longitud original. La deformación por compresión puede, por ejemplo, ser 0,01 % o más (por ejemplo, 0,02 % o más, 0,03 % o más, 0,04 % o más, 0,05 % o más, 0,06 % o más, 0,07 % o más, 0,08 % o más, 0,09 % o más, 0,1 % o más, 0,2 % o más, 0,3 % o más, 0,4 % o más, 0,5 % o más, 0,6 % o más, 0,7 % o más, o 0,8 % o más). En algunos ejemplos, la deformación por compresión puede ser 1 % o menos (por ejemplo, 0,9 % o menos, 0,8 % o menos, 0,7 % o menos, 0,6 % o menos, 0,5 % o menos, 0,4 % o menos, 0,3 % o menos, 0,2 % o menos, 0,1 % o menos, 0,09 % o menos, 0,08 % o menos, 0,07 % o menos, 0,06 % o menos, 0,05 % o menos, o 0,04 % o menos). La deformación por compresión puede variar, por ejemplo, de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos. Por ejemplo, la deformación por compresión puede variar de 0,01 % a 1 % (por ejemplo, de 0,01 % a 0,1 %, de 0,1 % a 1 %, de 0,01 % a 0,05 %, de 0,05 % a 0,1 %, de 0,1 % a 0,5 %, de 0,5 % a 1 %, o de 0,05 % a 0,5 %).

Es posible aplicar una carga de tracción al sustrato **104** y al ensamblaje de grafeno, y alterar la forma de las ondulaciones, a medida que el grafeno se estira. La alteración de la forma de las ondulaciones altera la deformación por compresión y altera la velocidad a la que el grafeno invertirá su curvatura de manera espontánea. De manera alternativa, al ajustar la carga externa, las frecuencias de vibración de la membrana **102** pueden alterarse.

Si se mantiene a temperatura ambiente (por ejemplo, 300 K), el grafeno autoestable puede vibrar de manera espontánea, debido a la energía térmica que constantemente fluye desde los soportes de barra de la rejilla de cobre. A nivel atómico, cuando la membrana **102** de grafeno se mantiene a temperatura ambiente, cada átomo de carbono tiene una energía cinética ($0,5 m v^2$, en donde m es la masa del átomo de

carbono y v es la velocidad) igual a $k_B T$ o de alrededor de 25 meV. Esto representa una fuente abundante de energía, dado que el grafeno tiene 4×10^{15} átomos/cm². Los cálculos de energía eléctrica predicen que cada ondulación puede producir 10 pW de potencia, equivalentes a 25.0000 W/m², lo que la ubica en una categoría similar a la producción de energía eólica y solar. Dado que la velocidad no es cero, los átomos en la membrana **102** están en movimiento constante. Puesto que los átomos están conectados entre sí en una red, la membrana **102** completa forma ondulaciones y, por momentos, estas ondulaciones invierten su curvatura. Cada ondulación tiene miles de átomos y cuando la curvatura se invierte, todos los átomos se mueven juntos de manera coherente, en fases, y esta energía puede cosecharse. Este movimiento natural se puede usar como componente activo de un dispositivo de cosecha de energía **100**, o este movimiento natural se puede usar para impulsar el componente activo de un dispositivo convencional de cosecha de energía de vibraciones **100**.

En algunos ejemplos, la membrana **102** puede comprender una ondulación. En algunos ejemplos, la membrana **102** puede comprender una pluralidad de ondulaciones que forman una red de ondulaciones interactivas. Una membrana **102** que mide 10 micrómetros por 10 micrómetros puede, en algunos ejemplos, tener alrededor de 100.000 ondulaciones. El movimiento de una ondulación puede afectar el movimiento de las demás ondulaciones cercanas, lo que proporciona un mecanismo de retroalimentación que mejora la capacidad de cosechar energía.

Los dispositivos de cosecha de energía **100** también comprenden un componente **106** acoplado eléctrica, magnética y/o mecánicamente a la membrana **102** y/o al sustrato **104**, de modo que el componente **106** se configure para cosechar energía de la membrana **102**.

En algunos ejemplos, el sustrato **104** es térmicamente conductor, y la membrana **102** está en contacto térmico con el sustrato **104**, en donde la energía térmica del sustrato **104** se puede convertir en una vibración de la membrana **102** de modo que la membrana **102** tiene una energía vibracional, y el componente **106** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y así cosechar energía de la membrana **102**. En algunos ejemplos, la energía térmica puede comprender energía térmica ambiente.

En algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener una energía vibracional, y el componente **106** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y así cosechar energía de la

membrana **102**. En algunos ejemplos, la energía vibracional comprende energía vibracional ambiente.

La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 miliHertz o más (por ejemplo, 0,5 mHz o más, 1 mHz o más, 5 mHz o más, 10 mHz o más, 50 mHz o más, 100 mHz o más, 500 mHz o más, 1 Hz o más, 5 Hz o más, 10 Hz o más, 50 Hz o más, 100 Hz o más, 500 Hz o más, 1 kiloHertz (kHz) o más, 10 kHz o más, 50 kHz o más, 100 kHz o más, 500 kHz o más, 1 megaHertz (MHz) o más, 5 MHz o más, 10 MHz o más, 50 MHz o más, 100 MHz o más, 500 MHz o más, o 1 GigaHertz (GHz) o más). En algunos ejemplos, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 10 GigaHertz (GHz) o menos (por ejemplo, 5 GHz o menos, 1 GHz o menos, 500 MHz o menos, 100 MHz o menos, 50 MHz o menos, 10 MHz o menos, 5 MHz o menos, 1 MHz o menos, 500 kHz o menos, 100 kHz o menos, 50 kHz o menos, 10 kHz o menos, 5 kHz o menos, 1 kHz o menos, 500 Hz o menos, 100 Hz o menos, 50 Hz o menos, 10 Hz o menos, 5 Hz o menos, 1 Hz o menos, 500 mHz o menos, 100 mHz o menos, 50 mHz o menos, 10 mHz o menos, o 5 mHz o menos). La frecuencia de las vibraciones de la energía vibracional puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos. Por ejemplo, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 mHz a 10 GHz (por ejemplo, de 0,1 mHz a 1 kHz, de 1 kHz a 10 GHz, de 0,1 mHz a 1 Hz, de 1 Hz a 1 kHz, de 1 kHz a 1 MHz, de 1 MHz a 10 GHz, o de 5 mHz a 1 GHz).

En algunos ejemplos, la membrana **102** puede vibrar constantemente dado que puede aprovechar la energía ambiente a frecuencias bajas y sin interferencias de ruido. A su vez, esta energía ambiente puede ser usada por el componente **106** y convertida en otras formas de energía, incluso eléctrica.

Mientras que los dispositivos de cosecha de energía vibracional **100** convencionales necesitan una fuerza impulsora externa macroscópica para cosechar la energía vibracional (por ejemplo, las vibraciones de un auto en movimiento), en algún ejemplo, los dispositivos de cosecha de energía **100** descritos en la presente pueden impulsarse a partir de condiciones ambientales. Por ejemplo, los dispositivos de cosecha de energía **100** descritos en la presente pueden cosechar energía en un ambiente tranquilo así como en un ambiente ruidoso.

En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía **100** se puede configurar de modo que cada una de la una o más ondulaciones puedan producir una potencia de 1 picoWatt (pW) o más (por ejemplo, 5 pW o más, 10 pW o más, 15 pW o

más, 20 pW o más, 25 pW o más, 30 pW o más, 35 pW o más, 40 pW o más, 45 pW o más, 50 pW o más, 55 pW o más, 60 pW o más, 65 pW o más, 70 pW o más, 75 pW o más, 80 pW o más, 85 pW o más, o 90 pW o más). En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía **100** se puede configurar de modo que cada una de la una o más ondulaciones puedan producir una potencia de 100 pW o menos (por ejemplo, 95 pW o menos, 9095 pW o menos, 8595 pW o menos, 8095 pW o menos, 7595 pW o menos, 7095 pW o menos, 6595 pW o menos, 6095 pW o menos, 5595 pW o menos, 5095 pW o menos, 4595 pW o menos, 4095 pW o menos, 3595 pW o menos, 3095 pW o menos, 2595 pW o menos, 2095 pW o menos, 1595 pW o menos, o 1095 pW o menos). La energía producida por cada una de la una o más ondulaciones puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, el dispositivo de cosecha de energía **100** se puede configurar de modo que cada una de la una o más ondulaciones puedan producir una potencia de 1 pW a 100 pW (por ejemplo, de 1 pW a 50 pW, de 50 pW a 100 pW, de 1 pW a 30 pW, de 20 pW a 40 pW, de 40 pW a 60 pW, de 60 pW a 80 pW, de 80 pW a 100 pW, de 10 pW a 90 pW, o de 20 pW a 80 pW).

En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía **100** puede tener una densidad de potencia de 1 Watt por metro cuadrado (W/m^2) o más (por ejemplo, 2 W/m^2 o más; 3 W/m^2 o más; 4 W/m^2 o más; 5 W/m^2 o más; 10 W/m^2 o más; 50 W/m^2 o más; 100 W/m^2 o más; 500 W/m^2 o más; 1.000 W/m^2 o más; 5.000 W/m^2 o más; 10.000 W/m^2 o más; o 50.000 W/m^2 o más). En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía **100** puede tener una densidad de potencia de 100.000 W/m^2 o menos (por ejemplo, 90.000 W/m^2 o menos; 80.000 W/m^2 o menos; 70.000 W/m^2 o menos; 60.000 W/m^2 o menos; 50.000 W/m^2 o menos; 10.000 W/m^2 o menos; 5.000 W/m^2 o menos; 1.000 W/m^2 o menos; 500 W/m^2 o menos; 100 W/m^2 o menos; 50 W/m^2 o menos; 10 W/m^2 o menos; o 5 W/m^2 o menos). La densidad de potencia del dispositivo de cosecha de energía **100** puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, el dispositivo de cosecha de energía **100** puede tener una densidad de potencia de 1 W/m^2 a 100.000 W/m^2 (por ejemplo, de 1 W/m^2 a 1.000 W/m^2 ; de 1.000 W/m^2 a 100.000 W/m^2 ; de 1 W/m^2 a 100 W/m^2 ; de 100 W/m^2 a 1.000 W/m^2 ; de 1.000 W/m^2 a 10.000 W/m^2 ; de 10.000 W/m^2 a 100.000 W/m^2 ; de 10 W/m^2 to 50.000 W/m^2 ; o de 100 W/m^2 a 10.000 W/m^2).

Con referencia a la Figura 3, en algunos ejemplos, la membrana **102** puede tener una carga eléctrica, y el componente **106** comprende un condensador **108** dispuesto

alrededor de, y acoplado eléctricamente a, la membrana **102**, en donde el condensador **108** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** cargada en una corriente eléctrica alterna, y así cosechar energía de la membrana **102**. Por ejemplo, el movimiento de la membrana **102** cargada (centro), induce una corriente en las placas del condensador cercanas (placas superior e inferior) **108**. Este sistema es un convertidor electrostático basado en electretos, sobre la base de un diseño de condensador con brecha variable. La carga fija en la membrana **102** actúa como fuente de voltaje fija, y a medida que la membrana **102** se mueve, la capacitancia cambia con el tiempo, dado que la distancia cambia con el tiempo. La potencia resultante es proporcional al voltaje al cuadrado por el cambio en capacitancia dividido por el cambio en el tiempo para un ciclo. Los electretos permiten una conversión de energía mecánica a eléctrica simple.

Con referencia a la Figura 4, en algunos ejemplos, el dispositivo **100** también puede comprender un circuito con puente de diodos **110** para convertir la corriente eléctrica alterna en una corriente eléctrica directa. El dispositivo **100** puede, por ejemplo, comprender también un condensador **112** acoplado eléctricamente al puente de diodos **110**, de modo que la corriente directa puede cargar el condensador **112**, y así almacenar la carga generada por la energía vibracional de la membrana **102** cargada. Una vez cargado, el condensador **112** puede, por ejemplo, usarse para alimentar un dispositivo electrónico, tal como para un ciclo único de una aplicación de sensor inalámbrica.

En algunos ejemplos, el dispositivo de cosecha de energía **100** puede comprender un dispositivo de inducción electromagnética. En referencia a la Figura 5, en algunos ejemplos, la membrana **102** puede además comprender una pluralidad de partículas magnéticas **114**. La pluralidad de partículas magnéticas **114** puede, por ejemplo, comprender hierro, cobalto, niobio, manganeso, níquel o una combinación de estos. En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede comprender óxido de hierro, óxido de cobalto o una combinación de estos.

La pluralidad de partículas magnéticas **114** puede tener un tamaño de partícula promedio. Las expresiones “tamaño de partícula promedio” y “media del tamaño de partícula” se usan de manera indistinta en la presente, y en general se refieren a la media estadística del tamaño de partícula de las partículas en una población de partículas. Por ejemplo, el tamaño de partícula promedio para una pluralidad de partículas con una forma sustancialmente esférica puede comprender el diámetro promedio de la pluralidad de partículas. Para una partícula anisotrópica, el tamaño de partícula promedio puede referirse, por ejemplo, a la dimensión máxima promedio de la

partícula (por ejemplo, la longitud de una partícula oblonga, la diagonal de una partícula cúbica, la bisectriz de una partícula triangular, etc.). La media del tamaño de partícula puede medirse usando métodos conocidos en el estado de la técnica, tales como evaluación por microscopía electrónica de barrido y/o microscopía electrónica de transmisión.

En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede ser sustancialmente monodispersa. “Monodispersa” y “distribución de tamaño homogénea”, como se usan en la presente, y en general, describen una población de partículas en donde todas las partículas tienen un tamaño igual o prácticamente igual. Como se usa en la presente, una distribución monodispersa hace referencia a distribuciones de partículas en donde 80 % de la distribución (por ejemplo, 85 % de la distribución, 90 % de la distribución, o 95 % de la distribución) se encuentra en el 25 % de la mediana del tamaño de partícula (por ejemplo, en el 20 % de la mediana del tamaño de partícula, en el 15 % de la mediana del tamaño de partícula, en el 10 % de la mediana del tamaño de partícula, o en el 5 % de la mediana del tamaño de partícula).

La pluralidad de partículas magnéticas puede comprender partículas de cualquier forma (por ejemplo, esféricas, oblongas, cuadrilaterales, elípticas, triangulares, poligonales, etc.). En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede tener una forma isotrópica. En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede tener una forma anisotrópica.

La pluralidad de partículas magnéticas **114** puede, por ejemplo, tener un tamaño de partícula promedio de 0,5 nm o más (por ejemplo, 0,6 nm o más, 0,7 nm o más, 0,8 nm o más, 0,9 nm o más, 1,0 nm o más, 1,1 nm o más, 1,2 nm o más, 1,3 nm o más, 1,4 nm o más, 1,5 nm o más, 1,6 nm o más, 1,7 nm o más, 1,8 nm o más, 1,9 nm o más, 2,0 nm o más, 2,5 nm o más, 3,0 nm o más, 3,5 nm o más, 4,0 nm o más, 4,5 nm o más, 5,0 nm o más, 5,5 nm o más, 6,0 nm o más, 6,5 nm o más, 7,0 nm o más, 7,5 nm o más, u 8,0 nm o más). En algunos ejemplos, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede tener un tamaño de partícula promedio de 10,0 nm o menos (por ejemplo, 9,5 nm o menos, 9,0 nm o menos, 8,5 nm o menos, 8,0 nm o menos, 7,5 nm o menos, 7,0 nm o menos, 6,5 nm o menos, 6,0 nm o menos, 5,5 nm o menos, 5,0 nm o menos, 4,5 nm o menos, 4,0 nm o menos, 3,5 nm o menos, 3,0 nm o menos, 2,5 nm o menos, 2,0 nm o menos, 1,9 nm o menos, 1,8 nm o menos, 1,7 nm o menos, 1,6 nm o menos, 1,5 nm o menos, 1,4 nm o menos, 1,3 nm o menos, 1,2 nm o menos, 1,1 nm o menos, o 1,0 nm o menos). El tamaño de partícula promedio de la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a

cualquiera de los valores máximos descritos. Por ejemplo, la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede tener un tamaño de partícula promedio de 0,5 nm a 10,0 nm (por ejemplo, de 0,5 nm a 9,0 nm, de 0,5 nm a 8,0 nm, de 0,5 nm a 7,0 nm, de 0,5 nm a 6,0 nm, de 0,5 nm a 5,0 nm, de 0,5 nm a 4,0 nm, de 0,5 nm a 3,0 nm, 0,5 nm de 2,5 nm, o de 1,0 nm a 2,0 nm). El tamaño de partícula promedio de la pluralidad de partículas magnéticas **114** puede, por ejemplo, determinarse mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución.

En algunos ejemplos, el componente **106** puede comprender un bucle de electrodos **116** acoplados magnéticamente a la membrana **102**, en donde el dispositivo **100** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en un campo magnético variable con el tiempo, que induce una corriente eléctrica en el bucle de electrodos **116** por medio de la ley de Faraday, y así convierte la energía vibracional de la membrana **102** en una corriente eléctrica y cosecha energía de la membrana **102**. El dispositivo **100** puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente al bucle de electrodos **116**, de modo que la energía cosechada por el dispositivo **100** se pueda almacenar en el condensador.

Con referencia a la Figura 6, en algunos ejemplos, el componente **106** puede comprender una ménsula piezoeléctrica **118**, y la membrana **102** tiene un borde que está acoplado mecánicamente a la ménsula piezoeléctrica **118**, en donde la ménsula piezoeléctrica **118** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en energía eléctrica, y así cosechar energía de la membrana **102**. El dispositivo **100** puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente a la ménsula piezoeléctrica **118**, de modo que la energía cosechada por el dispositivo **100** se pueda almacenar en el condensador. En algunos ejemplos, la ménsula piezoeléctrica **118** puede comprender un elemento de un dispositivo de cosecha de energía vibracional **100** convencional, de modo que los dispositivos de cosecha de energía **100** descritos en la presente pueden usarse para alimentar un dispositivo de cosecha de energía vibracional **100** convencional por medio de una ménsula piezoeléctrica **118** interconectada.

Con referencia a la Figura 7, en algunos ejemplos, la membrana **102** puede ser piezoeléctrica, y el componente **106** comprende una lectura de voltaje **120** acoplada mecánica y eléctricamente a la membrana **102**, en donde la membrana **102** piezoeléctrica se configura para convertir energía vibracional en energía eléctrica, que puede ser cosechada por la lectura de voltaje **120**. En ciertos ejemplos, la vibración de la membrana **102** piezoeléctrica puede producir un voltaje alterno cuando la membrana

102 pizoeléctrica vibra e invierte su curvatura. El dispositivo **100** puede, por ejemplo, comprender también un condensador acoplado eléctricamente a la lectura de voltaje **120**, de modo que la energía cosechada por el dispositivo **100** se pueda almacenar en el condensador.

Con referencia a la Figura 8A y Figura 8B, en algunos ejemplos, el componente **106** puede comprender una bomba tipo caja **122** acoplada mecánicamente a la membrana **102** y/o al sustrato **104**, en donde la bomba tipo caja **122** comprende una primera válvula de flujo de líquido de una vía **124** que controla una entrada de líquidos, y una segunda válvula de flujo de líquido de una vía **126** que controla una salida de líquidos, y en donde la bomba tipo caja **122** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en el flujo de un líquido por medio de la bomba tipo caja **122** a través de la primera válvula de flujo de líquido de una vía **124** y/o la segunda válvula de flujo de líquido de una vía **126**, y así convertir la energía vibracional de la membrana **102** en flujo de fluido, y cosechar energía de la membrana **102**.

En algunos ejemplos, la modificación mediante ingeniería de las geometrías de canal específicas en una membrana **102** en particular, junto con componentes tipo trinquete complementarios, puede crear motores de Lévy artificiales. En ciertos ejemplos, se puede controlar el movimiento de objetos a través de la membrana **102**. Con referencia a la Figura 9A, Figura 9B y Figura 9C, en algunos ejemplos, la membrana **102** puede también comprender un canal **128** que atraviesa la membrana **102**. El componente **106** puede, por ejemplo, comprender una transportadora tipo trinquete **130** acoplada mecánicamente a la membrana **102**, en donde la transportadora tipo trinquete **130** se configura para convertir la energía vibracional de la membrana **102** en traslación de la transportadora tipo trinquete **130**, de modo que la transportadora tipo trinquete **130** pueda transportarse desde un lado de la membrana **102** al otro a través del canal **128** mediante la vibración de la membrana **102**, y así convertir la energía vibracional de la membrana **102** en traslación de la transportadora tipo trinquete **130**, y cosechar energía de la membrana **102**. Por ejemplo, cuando la membrana **102** invierte su curvatura, los objetos con geometrías modificadas (por ejemplo, una transportadora tipo trinquete **130**) pueden pasarse a través de la membrana **102** y no permitir su regreso al otro lado. De este modo, este dispositivo **100** puede usarse para separar o purificar una muestra.

En la presente también se divulgan sensores **140**, en donde los sensores **140** también comprenden un componente **142** acoplado eléctrica, magnética y/o mecánicamente a la membrana **102** y/o al sustrato **104**, de modo que el componente **142** se configure para detectar una señal de la membrana **102**.

En algunos ejemplos, el sustrato **104** es térmicamente conductor y la membrana **102** está en contacto térmico con el sustrato **104**, en donde el sustrato **104** se configura para convertir la energía térmica en vibración de la membrana **102**, de modo que la membrana **102** tiene una energía vibracional, y el componente **142** se configura para detectar una señal producida por la energía vibracional de la membrana **102**. La energía térmica puede, por ejemplo, comprender energía térmica ambiente.

En algunos ejemplos, la membrana **102** tiene una energía vibracional y el componente **142** se configura para detectar una señal producida por la energía vibracional de la membrana **102**. La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender energía vibracional ambiente.

La energía vibracional puede, por ejemplo, comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 miliHertz o más (por ejemplo, 0,5 mHz o más, 1 mHz o más, 5 mHz o más, 10 mHz o más, 50 mHz o más, 100 mHz o más, 500 mHz o más, 1 Hz o más, 5 Hz o más, 10 Hz o más, 50 Hz o más, 100 Hz o más, 500 Hz o más, 1 kiloHertz (kHz) o más, 10 kHz o más, 50 kHz o más, 100 kHz o más, 500 kHz o más, 1 megaHertz (MHz) o más, 5 MHz o más, 10 MHz o más, 50 MHz o más, 100 MHz o más, 500 MHz o más, o 1 GigaHertz (GHz) o más). En algunos ejemplos, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 10 GigaHertz (GHz) o menos (por ejemplo, 5 GHz o menos, 1 GHz o menos, 500 MHz o menos, 100 MHz o menos, 50 MHz o menos, 10 MHz o menos, 5 MHz o menos, 1 MHz o menos, 500 kHz o menos, 100 kHz o menos, 50 kHz o menos, 10 kHz o menos, 5 kHz o menos, 1 kHz o menos, 500 Hz o menos, 100 Hz o menos, 50 Hz o menos, 10 Hz o menos, 5 Hz o menos, 1 Hz o menos, 500 mHz o menos, 100 mHz o menos, 50 mHz o menos, 10 mHz o menos, o 5 mHz o menos). La frecuencia de las vibraciones de la energía vibracional puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 mHz a 10 GHz (por ejemplo, de 0,1 mHz a 1 kHz, de 1 kHz a 10 GHz, de 0,1 mHz a 1 Hz, de 1 Hz a 1 kHz, de 1 kHz a 1 MHz, de 1 MHz a 10 GHz, o de 5 mHz a 1 GHz).

Por ejemplo, en algunas implementaciones del sensor **140**, un componente **142** puede estar conectado operativamente con la membrana **102**, en donde la membrana **102** tendrá una sensibilidad predeterminada que se puede usar para aprovechar vibraciones de frecuencia relativamente baja. En consecuencia, el componente **142** se puede configurar para detectar la frecuencia de pandeo de la membrana **102**, y cuando un cambio predeterminado en la frecuencia de la membrana **102** es detectado por el

componente **142**, por ejemplo, en función de la presencia de una masa agregada, se determinará y se transmitirá el resultado en cuanto a la detección de la masa, debido a la sensibilidad de la membrana **102** del dispositivo.

En referencia a la Figura 10, el componente **142** puede comprender un electrodo **144** acoplado eléctricamente a la membrana **102** y/o al sustrato **104**. El electrodo **144** puede, por ejemplo, estar ubicado adyacente a la membrana **102** y acoplado eléctricamente a la membrana **102** y/o al sustrato **104**. El electrodo **144** puede, por ejemplo, ser un solo electrodo y puede comprender un electrodo captor de metales. En algunos ejemplos, el sensor **140** puede alinearse de manera tal que el electrodo **144** se ubique debajo de la membrana **102**. Por ejemplo, el electrodo **144** puede configurarse para controlar de manera continua la frecuencia del captor de voltaje, de modo que el electrodo pueda detectar cualquier cambio en la frecuencia del captor de voltaje y/o la magnitud del captor de voltaje.

En algunos ejemplos, el electrodo se configura para detectar una frecuencia de la energía vibracional de la membrana **102**, de modo que el sensor se configura para detectar un cambio en la masa de la membrana **102** en función de un cambio en la frecuencia de vibración de la membrana **102**. Cuando se agrega masa adicional a la membrana **102**, esta altera la frecuencia natural de la membrana **102**. Los experimentos de calibración permitirán que el cambio en la masa se cuantifique en función del cambio en la frecuencia.

En algunos ejemplos, el electrodo se configura para detectar una magnitud de una señal de voltaje desde la membrana **102** de modo que el sensor se configure para detectar un cambio en la carga de la membrana **102** en función de un cambio en el cambio de magnitud de la señal de voltaje detectada.

Métodos de fabricación

En la presente también se divulgan métodos para fabricar los dispositivos y sensores de cosecha de energía descritos en la presente. Por ejemplo, los métodos para fabricar los dispositivos y/o sensores de cosecha de energía descritos en la presente pueden comprender: comprimir una lámina de material bidimensional para formar la membrana; disponer la membrana sobre el sustrato; y acoplar eléctrica, magnética y/o mecánicamente el componente a la membrana y/o al sustrato.

Comprimir la lámina de material bidimensional puede, por ejemplo, comprender aplicar una fuerza de compresión lateral sobre la lámina, como se muestra esquemáticamente en la Figura 11 y en la Figura 12. La fuerza de compresión lateral puede, por ejemplo, tener una magnitud de 1 nanoNewton (nN) o más (por ejemplo, 5

nN o más, 10 nN o más, 15 nN o más, 20 nN o más, 25 nN o más, 30 nN o más, 35 nN o más, 40 nN o más, 45 nN o más, 50 nN o más, 55 nN o más, 60 nN o más, 65 nN o más, 70 nN o más, 75 nN o más, 80 nN o más, 85 nN o más, o 90 nN o más). En algunos ejemplos, la fuerza de compresión lateral puede ser 100 nN o menos (por ejemplo, 95 nN o menos, 90 nN o menos, 85 nN o menos, 80 nN o menos, 75 nN o menos, 70 nN o menos, 65 nN o menos, 60 nN o menos, 55 nN o menos, 50 nN o menos, 45 nN o menos, 40 nN o menos, 35 nN o menos, 30 nN o menos, 25 nN o menos, 20 nN o menos, 15 nN o menos, o 10 nN o menos). La fuerza de compresión lateral puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la fuerza de compresión lateral puede ser de 1 nN a 100 nN (por ejemplo, de 1 nN a 50 nN, de 50 nN a 100 nN, de 1 nN a 20 nN, de 20 nN a 40 nN, de 40 nN a 60 nN, de 60 nN a 80 nN, de 80 nN a 100 nN, de 5 nN a 95 nN, de 10 nN a 90 nN, o de 20 nN a 80 nN).

En algunos ejemplos, la lámina de material bidimensional tiene una longitud original, y la lámina comprimida del material bidimensional tiene una longitud comprimida, por ejemplo, como se muestra esquemáticamente en la Figura 13, en donde la longitud comprimida es menor que la longitud original en una cantidad de 0,01 % a 1 %.

En algunos ejemplos, el rango de pandeo de la membrana puede ser 0,2 nm o más (por ejemplo, 0,3 nm o más, 0,4 nm o más, 0,5 nm o más, 0,6 nm o más, 0,7 nm o más, 0,8 nm o más, 0,9 nm o más, 1,0 nm o más, 1,5 nm o más, 2,0 nm o más, 2,5 nm o más, o 3,0 nm o más). En algunos ejemplos, el rango de pandeo de la membrana puede ser 4,0 nm o menos (por ejemplo, 3,5 nm o menos, 3,0 nm o menos, 2,5 nm o menos, 2,0 nm o menos, 1,5 nm o menos, 1,0 nm o menos, 0,9 nm o menos, 0,8 nm o menos, 0,7 nm o menos, 0,6 nm o menos, o 0,5 nm o menos). El rango de pandeo puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos más arriba a cualquiera de los valores máximos descritos más arriba. Por ejemplo, el rango de pandeo puede ser de 0,2 nm a 4,0 nm (por ejemplo, de 0,2 nm a 2,0 nm, de 2,0 nm a 4,0 nm, de 0,2 nm a 1,0 nm, de 1,0 nm a 2,0 nm, de 2,0 nm a 3,0 nm, de 3,0 nm a 4,0 nm, o de 0,5 nm a 3,5 nm). Generalmente, el rango de pandeo es igual a dos veces la altura promedio de la una o más ondulaciones. El pandeo mecánico es la inversión de la curvatura de una ondulación.

Formar la membrana en un estado previo al pandeo al comprimir la lámina bidimensional divulgada en la presente puede ralentizar el proceso de pandeo, de modo que la membrana es capaz de interactuar y aprovechar vibraciones de frecuencia más

baja, tales como las asociadas a condiciones ambiente. Si la membrana está dispuesta sobre el sustrato usando un método libre de deformación, la membrana puede comprimirse por sí sola y regresar a un estado previo al pandeo. Por ejemplo, con grafeno sobre cobre, el cobre se puede grabar por medio de una solución líquida de cloruro de hierro. El grafeno puede permanecer flotando sobre la superficie de la solución después de que el cobre se retira. A continuación, el grafeno se puede sacar de la solución y se puede disponer sobre un sustrato que comprende una rejilla. Comprimir o expandir la rejilla puede alterar el tamaño de las ondulaciones y alterar la frecuencia natural de la inversión espontánea de la curvatura.

Métodos de uso

En la presente también se divulgan métodos de uso de los dispositivos y/o sensores de cosecha de energía descritos en la presente. Por ejemplo, en la presente también se divulgan métodos para cosechar energía mediante el uso de los dispositivos de cosecha de energía descritos en la presente.

Los dispositivos de cosecha de energía descritos en la presente pueden, por ejemplo, incorporarse en una variedad de sistemas, dispositivos y métodos para extraer energía, lo que incluye sensores de descarga, sensores de fuerza y masa, y dispositivos autoalimentados. Los sistemas, dispositivos y métodos de acuerdo con algunas formas de realización de ejemplo que incorporan uno o más de los dispositivos de cosecha de energía descritos en la presente pueden usar la dinámica de fluctuaciones en escala atómica de una membrana bidimensional autoestable. La membrana puede incorporar movimiento aleatorio fuera del plano, que exhibe una dinámica anómala y distribuciones de equilibrio de cola larga de variables dinámicas características de las caminatas de Lévy. La membrana fluctuante se puede controlar, por ejemplo, con el uso de microscopía de efecto túnel (STM).

Cabe aclarar que cualquiera de los componentes o módulos mencionados en relación con los dispositivos de cosecha de energía, y sistemas y métodos asociados, de la tecnología divulgada, pueden estar integrados o separados. Asimismo, se pueden implementar funciones o estructuras redundantes de los componentes o módulos. Cualquiera de las herramientas descritas en la presente y sus componentes analizados en la presente puede adoptar todas las formas para cumplir con todas las demandas medioambientales y estructurales, y requisitos operativos. Además, las ubicaciones y alineaciones de los distintos componentes pueden variar según se desee o se requiera.

Lo que se describió anteriormente incluye ejemplos de una o más formas de realización. Por supuesto, no es posible describir cada combinación posible de

componentes o metodologías con el fin de describir las formas de realización antes mencionadas, pero una persona del oficio de nivel medio podrá reconocer que muchas otras combinaciones y modificaciones de distintas formas de realización serán posibles. En consecuencia, las formas de realización descritas pretenden abarcar todas esas alteraciones, modificaciones y variaciones clasificadas dentro del alcance y el espíritu de la divulgación y de las reivindicaciones adjuntas a la presente, y presentarse en solicitudes de patente no provisionales.

EJEMPLOS

Los siguientes ejemplos se indican a continuación para ilustrar los métodos y resultados de acuerdo con el objeto divulgado. Estos ejemplos no pretenden incluir todos los aspectos del objeto divulgado en la presente, sino ilustrar métodos y resultados representativos. Tales ejemplos no pretenden excluir equivalentes y variaciones de la presente invención que sean evidentes para las personas del oficio de nivel medio.

Se han realizado esfuerzos para mantener la precisión con respecto a los números (por ejemplo, cantidades, temperatura, etc.), pero podría haber errores y desviaciones. A menos que se indique lo contrario, las partes son partes en peso, la temperatura es en °C o está a temperatura ambiente, y la presión es atmosférica o cercana a esta. Existen numerosas variaciones y combinaciones de las condiciones de reacción, por ejemplo, concentraciones de componentes, temperaturas, presiones y otros rangos y condiciones de reacción que se pueden usar para optimizar la pureza y el rendimiento del producto obtenidos del proceso descrito. Se requerirá solo experimentación razonable y de rutina para optimizar tales condiciones del proceso.

Ejemplo 1

En la presente, se describen mediciones de subnanómetro con ancho de banda alto del movimiento fuera de plano (vertical) de átomos en grafeno autoestable mediante microscopía de efecto túnel. Al seguir la posición vertical durante un período largo, se logró un aumento de 1.000 veces en la capacidad de medir la dinámica espacio-tiempo de membranas atómicamente delgadas en comparación con la tecnología de imágenes del estado de la técnica actual. Se observó que el movimiento vertical de una membrana de grafeno exhibía excursiones de gran escala infrecuentes caracterizadas por desplazamiento cuadrático medio anómalo y distribución de salto según la ley potencial de Cauchy-Lorentz.

Los procesos estocásticos son de naturaleza ubicua. Los estudios de tales procesos estocásticos tienen una función esencial en el desarrollo de la física moderna y proporcionaron la primera prueba de la naturaleza atómica de la materia. Langevin

inició una teoría verdaderamente dinámica para el movimiento browniano al concebir una ecuación diferencial estocástica del movimiento para la partícula. Este modelo, a menudo denominado modelo de Ornstein-Uhlenbeck, predice el desplazamiento cuadrático medio, $MSD(\tau) \propto \tau$, una función de autocorrelación de la velocidad (VCAF) que disminuye exponencialmente en el tiempo, y una distribución de velocidad de equilibrio de Maxwell-Boltzmann (Li T et al. *Science* **2010**, 328, 1673). Los avances recientes en la precisión y resolución de las mediciones extendieron el marco del movimiento browniano a escalas espacio-tiempo sin precedentes y a una mayor variedad de sistemas, que incluyen la difusión atómica en redes ópticas y la difusión de espines en líquidos (Stapf S et al. *Phys. Rev. Lett.* **1995**, 75, 2855; Katori H et al. *Phys. Rev. Lett.* **1997**, 79, 2221). Los estudios de tales sistemas proporcionan conocimiento de los mecanismos e interacciones responsables de la estocasticidad. Por ejemplo, la partícula puede realizar el movimiento browniano clásico en un pequeño entorno, pero luego moverse repentinamente por una gran distancia a un nuevo entorno, en donde reanuda el movimiento clásico. Esta es la cruz de paseos de Lévy con velocidades limitadas y tiempos de espera limitados, en donde los segmentos de mayor velocidad y longitudes de salto del movimiento producen distribuciones de ley potencial de cola larga (Shlesinger MF et al. *Nature (London)* **1993**, 363, 31; Metzler R y Klafter J. *Phys. Rep.* **2000**, 339, 1). Se especula que los paseos de Lévy están presentes en un conjunto diverso de sistemas, que varían de economía, señales biomédicas, dinámica del clima, e incluso, forrajeo en animales. En la actualidad, se considera que un algoritmo optimizado, incluso dentro de la teoría del forrajeo, debería utilizar una distribución estable de Lévy con varianza infinita (Viswanathan GM et al. *Nature (London)* **1999**, 401, 911).

Las fluctuaciones de membrana, caracterizadas por movimiento perpendicular a la superficie de membrana, también están dentro del alcance del movimiento browniano. Las biomembranas, en las que las fluctuaciones térmicas contribuyen al transporte de sustancias químicas a través de los canales al interior de una célula (Kosztin I y Schulten K. *Phys. Rev. Lett.* **2004**, 93, 238102), se estudiaron mediante experimentos usando espectroscopía de resonancia magnética nuclear y microscopía óptica (Bocian DF y Chan SI. *Annu. Rev. Phys. Chem.* **1978**, 29, 307; Pecreaux J et al. *Eur. Phys. J. E* **2004**, 13, 277). Además, las teorías modernas de la estructura y dinámica de la membrana, que incluyen elasticidad así como también efectos estocásticos mediante la ecuación de Langevin, predicen una distribución Maxwell-Boltzmann para las fluctuaciones locales de la membrana (Naji A et al. *Phys. Rev. Lett.* **2009**, 102, 138102; Reister-

Gottfried E et al. *Phys. Rev. E* **2010**, 81, 031903).

El grafeno autoestable puede ser una membrana cristalizada que puede sondearse sin degradación en una escala atómica con microscopía de efecto túnel (STM) en un entorno ultravacío (UHV). Mediante este enfoque, se demostró que las ondulaciones en una membrana de grafeno se pueden describir usando un modelo de Ising mediante el mapeo de ondulaciones curvas ascendentes (descendentes) en estados ascendentes (descendentes) de un espín de Ising (Schoelz JK et al. *Phys. Rev. B* **2015**, 91, 045413). Un componente que falta en estos estudios es una medición de las fluctuaciones dinámicas. En la presente, se usó microscopía de efecto túnel para seguir el movimiento de una región de tamaño de átomo de carbono único de una membrana de grafeno fluctuante con resolución de subnanómetro. La membrana realiza el movimiento browniano con excursiones de gran altura infrecuentes que indican paseos de Lévy. Además, la velocidad de la membrana obedece a una distribución según la ley potencial de Cauchy-Lorentz de cola larga, en vez de a una distribución Maxwell-Boltzmann.

El grafeno monocapa, que en el comercio se cultiva en Ni (menos del 10 % es grafeno multicapa), se transfirió directamente a una rejilla de cobre ultrafina con una malla 2000, que tiene una red de agujeros cuadrados de 7,5 μm de ancho con soportes de barra de 5 μm de ancho. Las imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) muestran que el grafeno cubre 90 % de la rejilla de cobre (Figura 17). Se usó un microscopio de efecto túnel a baja temperatura (presión base de 10^{-10} mbar) con ultravacío Omicron, que se opera a temperatura ambiente, para las mediciones de altura. La película de grafeno se montó hacia el plato de muestra en separadores, de manera que la punta del microscopio de efecto túnel se acercó a través de los agujeros de la rejilla, a fin de proporcionar un soporte más estable. La cámara de microscopía de efecto túnel depende de un sistema activo de aislamiento de vibraciones, que cancela el ruido, y se alimenta mediante un banco de baterías enorme con un suelo aislado para lograr un ruido eléctrico excepcionalmente bajo.

Los datos se adquirieron usando puntas de microscopio de efecto túnel fabricadas de manera interna, en condiciones de túnel con corriente constante (por retroalimentación), y el barrido de topografía configurado en modo puntual (sin barrido x o y). El sistema se adaptó para permitir que datos de 16 bits se registraran de manera continua para la corriente túnel real y la altura de la punta a una velocidad de 800 Hz durante un intervalo de 10^4 s, lo que produjo 8×10^6 de puntos de datos por canal. La deriva de la muestra de la punta del microscopio de efecto túnel se controló de manera

independiente y los resultados indicaron que la deriva era no estocástica y menor de 1 nm/h. Los datos se recolectaron de múltiples membranas para condiciones de formación de imágenes fijas de distintos órdenes de magnitud en corriente túnel (0,01–10 nA) y tensión de polarización (0,01–10 V), siempre a temperatura ambiente. Cuando se forman imágenes de la superficie del grafeno con resolución atómica, se observó solo grafeno monocapa que estaba libre de defectos en una escala de micrómetros.

En la Figura 18, se muestra un esquema de una configuración experimental. Una punta de microscopio de efecto túnel sesgada, montada en el extremo de un escáner de tubos piezoeléctricos, se acerca desde abajo a la membrana de grafeno autoestable con toma a tierra. Una serie temporal común para $z(t)$ se muestra en la Figura 19 para el punto de referencia de la microscopía de efecto túnel ($I = 0,1$ nA, $V = 0,1$ V). El rango de movimiento de la membrana (~ 10 nm) es enorme para la microscopía de efecto túnel de modo puntual, y para comparar, se muestra también un trazo de la microscopía de efecto túnel adquirido de una muestra rígida. Estos grandes valores de $z(t)$ parecen razonables dado que la membrana de grafeno sin soportar forma una estructura de ondulaciones que cambia constantemente entre un gran número de configuraciones energéticamente equivalentes (Meyer JC et al. *Nature (London)* **2007**, 446, 60; Los JH et al. *Phys. Rev. B* **2009**, 80, 121405(R)). El recuadro de la Figura 19 muestra una representación aumentada de la altura de membrana (en unidades de $\delta_o = 0,022$ nm) como una función de tiempo (en unidades de $\tau_o = 1.250$ ms) con el tiempo común entre dos saltos sucesivos (es decir, un cambio en la altura) que se etiqueta como τ_k . La distribución de probabilidad de tiempo de espera para estos datos se calculó y sigue un exponencial simple, que muestra que es un proceso de Poisson. La corriente túnel medida en la Figura 20, que corresponde a los datos que se muestran en la Figura 19, se mantuvo por debajo del nivel de saturación y por encima de cero, incluso cuando la altura de la membrana cambió considerablemente. La contribución de la variación de distancia de la muestra de punta a la altura de la membrana $z(t)$ fue insignificante para todos los datos. Además, el coeficiente de correlación cruzada entre la altura medida y la corriente túnel es menor de 0,05.

A partir de la serie temporal $z(t)$, se computó el desplazamiento cuadrático medio de acuerdo con la siguiente ecuación: $MSD(\tau) \equiv \langle [z(t + \tau) - z(t)]^2 \rangle$, cuyo resultado se muestra en la Figura 21. Estos datos, que se extienden en aproximadamente 7 órdenes de magnitud en el tiempo, se caracterizan por una dependencia de la ley potencial a $MSD(\tau) \sim \tau_\alpha$ en donde $\alpha \neq 1$ es el exponente de difusión anómala. Para estos datos, el movimiento en tiempos cortos se caracteriza por $\alpha = 1,4$ (movimiento superdifusivo) y

luego un rango en donde $\alpha = 0,3$ (movimiento subdifusivo). Se observaron los mismos exponentes con otros conjuntos de datos adquiridos en diferentes puntos de referencia de efecto túnel. Una simulación de paseo aleatoria, que usa tiempos de espera exponenciales y longitudes de salto de Cauchy, produce un MSD con superdifusión para tiempos cortos y subdifusión para tiempos largos, como se muestra en el recuadro de la Figura 21. La prueba experimental para una distribución de Cauchy también proviene de la velocidad de la membrana.

La velocidad de la membrana instantánea, computada numéricamente de la serie temporal para $z(t)$, que se muestra en la Figura 19, muestra un comportamiento altamente irregular [recuadro de la Figura 22] con una memoria corta. La función de autocorrelación de la velocidad, $VACF(\tau) \equiv \langle v(t)v(t + \tau) \rangle$, que se muestra en la Figura 22, disminuye rápidamente, se vuelve negativa alrededor de 0,1 s, lo que indica un comportamiento tipo líquido, antes de disminuir a cero (dentro de 0,5 s de la medición larga de 10.000 s), lo que muestra que las fluctuaciones de la velocidad de la membrana se descorrelacionan rápidamente. Esta observación demuestra que es posible medir la distribución de la velocidad de equilibrio mediante microscopía de efecto túnel, cuyo respaldo deriva de otros estudios de difusión de átomo único mediante microscopía de efecto túnel (Swartzentruber BS. *Phys. Rev. Lett.* **1996**, 76, 459).

La Figura 23 muestra la función de distribución de probabilidad (PDF) de velocidad de la membrana computada de los datos que se muestran en la Figura 19. La curva sólida es la distribución de Cauchy-Lorentz de mejor ajuste con velocidad media cero, $v_o = 0$, y FWHM 2Γ :

$$\mathcal{L}(v; \Gamma) = \frac{1/\pi\Gamma}{1 + [(v - v_o)/\Gamma]^2}$$

La distribución de la velocidad alcanza el pico en cero y es simétrica alrededor de este, consistente con una igual probabilidad de que la membrana se mueva hacia arriba o hacia abajo (es decir, movimiento equilibrado en presencia de la punta del microscopio de efecto túnel), e indica que el sistema está dentro del límite elástico para los puntos de referencia del voltaje de polarización.

Si bien se observaron velocidades de membrana tan altas como 500 nm/s, 98 % de todas las velocidades se encuentran en el rango de -15 nm/s a 15 nm/s (Figura 23). La curva punteada en la Figura 23 es el mejor ajuste gaussiano. Los datos en la Figura 23 claramente siguen una distribución de Cauchy-Lorentz más que una distribución gaussiana, especialmente para velocidades mayores de 10 nm/s. Los tres puntos de datos (cuadrados) para los datos de muestra rígida que se muestran en la Figura 19 se

incluyen con fines comparativos en la Figura 23. La Figura 24 muestra los datos de la función de distribución de probabilidad de la velocidad de la membrana para corrientes túnel que se extienden en órdenes de magnitud a lo largo de las distribuciones de Cauchy-Lorentz de mejor ajuste. Estas distribuciones de velocidad se obtuvieron de datos de microscopía de efecto túnel tomados de una nueva ubicación de la muestra con una corriente túnel creciente. La conclusión más llamativa es que, en todos los casos, las velocidades de la membrana siguen una distribución de Cauchy-Lorentz (es decir, una distribución estable de Lévy con varianza infinita y un índice de estabilidad 1) mucho mejor que una gaussiana.

También se puede observar en la Figura 24 que la distribución de la velocidad se amplía con la corriente túnel creciente. La misma tendencia es evidente en la Figura 25, que muestra la variación de la FWHM de la función de distribución de probabilidad de la velocidad con el punto de referencia de la corriente túnel en el rango completo del presente estudio. La ampliación de la distribución es consistente con el calentamiento de Joule debido a que la corriente túnel por microscopía de efecto túnel que proporciona mayor energía cinética a la membrana (Neek-Amal M et al. *Nat. Commun.* **2014**, 5, 4962).

La teoría de la elasticidad predice los modos vibracionales de grafeno autoestable; sin embargo, no genera información sobre los procesos estocásticos que subyacen en una red desordenada de ondulaciones que se encuentran en las membranas 2D comprimidas. Las simulaciones atomísticas pueden proporcionar conocimiento del fenómeno observado. Para las simulaciones de dinámica molecular (MD) de la presente, se preparó una membrana cuadrada previamente pandeada de curva descendente ($15 \times 15 \text{ nm}^2$) que contiene 10.000 átomos de carbono con átomos contiguos fijos (sin punta de microscopio de efecto túnel). Las simulaciones al vacío se realizaron en el LAMMPS usando el potencial AIREBO. Se usó un termostato Nosé-Hoover para mantener una temperatura constante y se integraron las ecuaciones de movimientos usando un intervalo de tiempo de 1 fs. Primero se equilibró el sistema para 0,5 ns, partiendo de la configuración inicial, y para el análisis se usó la trayectoria posterior a partir de una corrida producción de 1 ns.

El movimiento del átomo central con 10^6 intervalos de tiempo (1 por cada fs) a bajas temperaturas (100 K) muestra fluctuaciones de 0,1 nm de altura a una altura total de 0,35 nm sobre los átomos contiguos fijos, como indica la Figura 26. A mayores temperaturas (3000 K) sucede algo considerablemente distinto. En la misma escala de tiempo, el movimiento aleatorio da como resultado un pandeo simétrico de toda la

membrana, desde por encima de los átomos contiguos fijos hasta por debajo de ellos. La Figura 28 y Figura 29 muestran dos instantáneas de la membrana para configuraciones opuestas etiquetadas como (c) y (d) en la Figura 26. La larga excursión desde la curva descendente hasta la curva ascendente es indicativa de paseos de Lévy. De hecho, si se promedian los datos de la Figura 26 sobre un intervalo corto de tiempo para facilitar las fluctuaciones rápidas [curva negra en la Figura 26], se obtiene una distribución de longitudes de salto de Cauchy, como muestra la Figura 27. Justamente lo que produciría la medición por microscopía de efecto túnel es el promedio del tiempo del movimiento de alta frecuencia de grafeno. También se obtienen distribuciones de Cauchy similares para un promedio espacial con respecto al átomo central, lo que podría ocurrir naturalmente con cualquier medición real cuya resolución sea mayor a 1 nm. En la Figura 30 se muestra una simulación adicional. En ella, el sistema parece oscilar espontáneamente durante la segunda mitad de la simulación.

Este movimiento a gran escala es una consecuencia de que el grafeno cambie su curvatura total localmente (por ejemplo, una transición de curva descendente a curva ascendente), mientras que los movimientos a pequeña escala son simples vibraciones de la membrana sin inversión de su curvatura. Esto puede observarse en la simulación a alta temperatura: por momentos los movimientos aleatorios ascendentes y descendentes se producen juntos en la misma dirección, lo que deriva en una larga excursión a otra configuración de equilibrio al otro lado de los átomos linderos fijos. Dado que dichos cuatro eventos suceden en 1 ns a 3000 K, podemos predecir que estos eventos sucederán varias veces en mediciones en microscopía de efecto túnel llevadas a cabo a temperatura ambiente (Sørensen MR y Voter AF. *J. Chem Phys.* **2000**, *112*, 9599). De este modo, los datos muestran que el pandeo simétrico espontáneo puede producirse sin un gradiente de temperatura.

Estas medidas revelan un dominio espacial y temporal no explorado en las fluctuaciones de la membrana con profundas consecuencias para el entendimiento fundamental y las aplicaciones tecnológicas de las membranas. Si se entienden adecuadamente, las fluctuaciones aleatorias de la membrana se pueden explotar de manera útil. Por ejemplo, la cosecha de energía del movimiento continuo de un sistema masivo es una aplicación importante de nanoresonadores estocásticos (Gammaitoni L et al. *Rev. Mod. Phys.* **1998**, *70*, 223).

Al ajustar la distribución de la velocidad (por ejemplo, al variar la corriente túnel), se pueden activar determinados procesos y desactivar otros. Asimismo, cuando la membrana se flexiona, modifica la corriente local, la reactividad química, y la distribución

de la carga, que permite que el sistema realice el trabajo. La modificación mediante ingeniería de las geometrías de canal específicas en la membrana, junto con componentes tipo trinquete complementarios, podría crear motores de Lévy artificiales pequeños (Haenggi P y Marchesoni F. *Rev. Mod. Phys.* **2009**, *81*, 387). Finalmente, los avances en el entendimiento de la dinámica de la membrana pueden ayudar a controlar el movimiento de los objetos sobre la membrana, que es esencial para la función de la proteína, así como para la autoorganización de los materiales artificiales.

En síntesis, la dinámica de las fluctuaciones a escala atómica de una membrana de grafeno autoestable se estudió usando microscopía de efecto túnel y simulaciones de la dinámica molecular. Las mediciones revelaron la riqueza del movimiento aleatorio fuera del plano de las membranas, que exhibe una dinámica anómala y distribuciones de equilibrio de cola larga de variables dinámicas características de las caminatas de Lévy. Asimismo, se demostró que las propiedades estocásticas de las membranas fluctuantes se pueden controlar mediante microscopía de efecto túnel. Esto, junto con la capacidad de observar el movimiento con una resolución a escala atómica, proporciona un sistema para estudiar nuevos regímenes de movimiento browniano y probar distintos modelos de transporte anómalo. En conclusión, se demostró tanto de manera experimental como teórica que los eventos de pandeo en materiales 2D producen membranas cristalinas artificiales con paseos de Lévy ajustables. En definitiva, este estudio proporciona métodos para predecir, controlar, e incluso minimizar la ocurrencia de cambios repentinos a gran escala en una amplia variedad de sistemas.

Ejemplo 2

También se puede usar un microscopio de efecto túnel para medir los cambios de altura del grafeno autoestable en el tiempo [Figura 14]. A partir de esta información, se puede calcular la velocidad en el tiempo para generar una función de distribución de probabilidad (PDF) de la velocidad. La PDF de la velocidad puede exhibir una forma no gaussiana y tener velocidades anormalmente grandes. Además, se pueden hallar patrones en la altura-tiempo al calcular la función de autocorrelación de los datos de altura-tiempo [Figura 15] y se puede hallar la frecuencia dominante al calcular la densidad espectral de la energía [Figura 16], que muestra que puede tener lugar una frecuencia ultrabaja.

Otras ventajas que son obvias e inherentes a la invención serán evidentes para una persona del oficio de nivel medio. Cabe destacar que determinadas características y subcombinaciones son de utilidad y se pueden usar sin referirse a otras características y subcombinaciones. Esto se contempla en y dentro del alcance de las reivindicaciones.

En vista de que se pueden realizar muchas formas de realización posibles de la invención sin alejarse del alcance de esta, cabe destacar que todo objeto que se indique en la presente o se muestre en los dibujos adjuntos se debe interpretar como ilustrativo y no limitativo.

El alcance de los métodos de las reivindicaciones adjuntas no está limitado por los métodos específicos descritos en la presente, que tienen como fin ilustrar algunos aspectos de las reivindicaciones, y cualquier método que sea funcionalmente equivalente se encuentra dentro del alcance de las reivindicaciones. Diversas modificaciones de los métodos, además de las que se muestran y se describen en la presente, se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Además, si bien solo algunas de las etapas de métodos representativas descritas en la presente se describen específicamente, otras combinaciones de las composiciones y las etapas de métodos también se encuentran dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas, incluso cuando no se indique específicamente. Por ende, una combinación de etapas, elementos, componentes o constituyentes se puede mencionar explícitamente en la presente o no; sin embargo, otras combinaciones de etapas, elementos, componentes y constituyentes se incluyen, aunque no se indique explícitamente.