

DISPOSITIVOS Y SENSORES DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA Y MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y USO DE ESTOS

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUDES RELACIONADAS

La presente solicitud reivindica la prioridad y el beneficio de la solicitud de patente provisional estadounidense N.º de serie 62/677.826, presentada el 30 de mayo de 2018, y la solicitud de patente provisional estadounidense N.º de serie 62/741.234, presentada el 4 de octubre de 2018, las cuales se incorporan por referencia como si se establecieran completamente en la presente.

DECLARACIÓN SOBRE INVESTIGACIÓN PATROCINADA A NIVEL FEDERAL

Ni las solicitudes de prioridad ni la presente solicitud utilizaron fondos del gobierno o se beneficiaron de la investigación patrocinada por el gobierno.

CAMPO

La tecnología divulgada se refiere en general a dispositivos y sensores de recolección de energía, y métodos de fabricación y uso de estos.

ANTECEDENTES

La recolección de energía de vibración es la práctica de capturar energía de vibración de fuentes de vibración externas (por ejemplo, vehículos, máquinas, edificios y movimientos humanos). Esta energía capturada luego se puede usar para diversas aplicaciones. En ciertos enfoques de recolección de energía de vibración, una placa se fija en un extremo y vibrará hacia arriba y hacia abajo entre dos extremos cuando se excite. Al flexionar y oscilar entre los dos extremos, la presión/tensión que se desarrolla en la superficie se puede usar para generar energía. Las vibraciones en la escala atómica son omnipresentes, incluso en un ambiente mecánicamente tranquilo. Esto se debe a que el material se mantiene a una temperatura superior a cero absoluto, y que se denomina vibraciones térmicas. Es por estas y otras consideraciones que se presentan las diversas formas de realización descritas a continuación.

SÍNTESIS

De acuerdo con los propósitos de los dispositivos y métodos divulgados, como se representan y describen ampliamente en la presente, el objeto divulgado se refiere a dispositivos y sensores de recolección de energía, y métodos de fabricación y uso de estos.

En una forma de realización, un sistema para recolectar energía vibracional

incluye una membrana independiente conectada a uno o más soportes, y que tiene una primera superficie que no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a la energía ambiental. La vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo en una región de ventana respectiva de una pluralidad de regiones de ventana de la membrana. Un microscopio de barrido de efecto túnel (STM) se conecta al sistema y tiene una punta y una fuente de tensión. La punta del STM se posiciona próxima a la membrana para definir una región capacitiva de cargas respectiva entre la punta del STM y las regiones de ventana de la membrana. Una distancia entre la punta del STM y cada región de ventana respectiva de las regiones de ventana de la membrana varía con picos y puntos mínimos respectivos. La región capacitiva entre la punta del STM y cada región de ventana de la membrana almacena y emite las cargas en ciclos de acuerdo con la distancia entre la punta y la región de ventana respectiva. Un condensador de almacenamiento fijo se conecta a la membrana y recibe cargas emitidas de la región capacitiva cuando la distancia entre la punta del STM y cada región de ventana aumenta durante los períodos de pico de las ondas. La fuente de tensión suministra cargas a la región capacitiva cuando la distancia entre la punta del STM y una región de ventana respectiva disminuye durante los períodos de puntos mínimos de las ondas.

En otra forma de realización, la divulgación proporciona un sistema para convertir energía vibracional en una salida de corriente con una membrana independiente conectada a uno o más soportes y que comprende una primera superficie que no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a la energía ambiental. La vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo en una región de ventana respectiva de una pluralidad de regiones de ventana de la membrana. Un microscopio de barrido de efecto túnel (STM) con una punta se posiciona próximo a la membrana, y el STM incluye una fuente de tensión que fija una corriente de punto de ajuste entre la punta y la membrana para definir una región capacitiva de cargas respectiva entre la punta y las regiones de ventana de la membrana. Una distancia entre la punta del microscopio y cada región de ventana de la membrana varía con picos y puntos mínimos respectivos, y la región capacitiva almacena y emite las cargas en ciclos en respuesta a la distancia entre la punta y las regiones de ventana, y de acuerdo con el efecto túnel de cargas adicionales a través de la región capacitiva. Un condensador de almacenamiento fijo se conecta a la

membrana y recibe cargas emitidas y cargas de efecto túnel adicionales de la región capacitiva cuando la distancia entre la punta del microscopio y una región de ventana respectiva aumenta durante los períodos de pico de las ondas en la región de ventana respectiva.

En aun otra forma de realización, un sistema para convertir energía vibracional en una salida de corriente incluye un circuito de recolección de corriente en un sustrato, en donde el circuito de recolección de corriente comprende un contacto de metal común conectado mediante el emparejamiento de los correspondientes diodos orientados a una fuente de tensión y un condensador de almacenamiento fijo. Una membrana independiente se extiende sobre al menos el contacto de metal común en el circuito de recolección de corriente, de modo que el contacto de metal común se separa de la membrana mediante un soporte separador y se orienta a una primera superficie de la membrana para definir una región capacitiva entre el contacto de metal común y la primera superficie de la membrana. La primera superficie de la membrana no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a energía ambiental, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, y en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo en relación con el contacto común. La región capacitiva entre el contacto común y la membrana acumula cargas entre el contacto común y la membrana, y el contacto común conmuta una salida de corriente de cargas acumuladas a través de los diodos respectivos para direccionar la salida de corriente a la fuente de tensión o al condensador de almacenamiento fijo en respuesta a las formaciones de ondas cíclicas en la membrana.

En otra forma de realización no limitativa de la presente divulgación, un método para ensamblar un circuito de recolección de energía incluye formar una región capacitiva en el circuito de recolección de energía al definir una primera placa de condensador que tiene una distancia de separación inicial con respecto a una primera superficie de una membrana independiente, en donde la primera superficie de la membrana independiente define una segunda placa de condensador, y luego conectar la primera placa de condensador a una fuente de tensión configurada para inducir la acumulación de cargas en la región capacitiva. A continuación, la membrana se posiciona con respecto a la primera placa de condensador de modo que la membrana no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a la energía ambiental, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, y en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un

punto mínimo con respecto a la primera placa de condensador para cambiar la distancia de separación inicial. El método incluye descargar la región capacitiva a través de un diodo respectivo para direccionar cargas acumuladas a la fuente de tensión o a una carga, en donde la descarga de la región capacitiva comprende direccionar las cargas a la fuente de tensión y direccionar las cargas a la carga durante un pico.

Otra forma de realización divulga un método para ensamblar un circuito de recolección de energía al impregnar una capa aislante de una membrana independiente con portadores de carga fija y formar una región capacitiva en el circuito de recolección de energía al definir una primera placa de condensador que tiene una distancia de separación inicial con respecto a una primera superficie de la membrana independiente. La primera superficie de la membrana independiente define una segunda placa de condensador que tiene los portadores de carga fija. El método permite además posicionar la membrana con respecto a la primera placa de condensador de modo que la membrana no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a la energía ambiental, y cambiar una capacitancia de la región capacitiva, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, y en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo con respecto a la primera placa de condensador para cambiar la distancia de separación inicial. Durante períodos de vibración, la carga acumulada se dirige desde la primera placa de condensador hacia la región capacitiva. La carga acumulada puede descargarse de la región capacitiva a través de al menos una carga resistiva y un condensador de almacenamiento fijo.

Las ventajas adicionales de los dispositivos y métodos divulgados se presentarán en parte en la descripción a continuación y en parte serán evidente a partir de la descripción. Las ventajas de los dispositivos divulgados se notarán y se lograrán mediante los elementos y las combinaciones particularmente señaladas en las reivindicaciones adjuntas. Se debe entender que tanto la descripción general anterior como la descripción detallada a continuación son solo a modo de ejemplo y explicación y no restringen los dispositivos y métodos divulgados, como se reivindican.

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

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

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

La Figura 1A es una vista en perspectiva de una membrana sometida a la formación de ondas como se divulga en la presente.

La Figura 1B es un esquema de un sistema de recolección de energía y detección de energía como se expone en la presente divulgación.

La Figura 2A es una vista superior de una membrana sometida a una fuerza de compresión que interactúa con la formación de ondas vibracionales de acuerdo con la presente divulgación.

La Figura 2B es una vista lateral de una membrana sometida a fuerzas de compresión laterales direccionadas de manera opuesta y fuerzas vibracionales direccionadas hacia arriba en puntos a lo largo de un borde de una parte de una membrana que muestra la formación de ondas vibracionales de acuerdo con la presente divulgación.

La Figura 2C es una vista lateral de una membrana sometida a fuerzas de compresión laterales direccionadas de manera opuesta y fuerzas vibracionales direccionadas de manera opuesta en puntos a lo largo de un borde de una membrana que muestra la formación de ondas vibracionales de acuerdo con la presente divulgación.

La Figura 2D es una vista lateral de una membrana tensa desplazada a una formación de onda mediante fuerzas compresivas y vibracionales como se describe en la presente.

La Figura 3A es una vista esquemática de un circuito de condensador variable que tiene una placa fija y una placa desplazable como se expone en la presente.

La Figura 3B es un gráfico de corriente en nanoamperios descargada desde un condensador de almacenamiento conectado al circuito de la Figura 3A.

La Figura 4A es un diagrama esquemático de capacitancia variable en una placa de condensador fija y una placa de condensador desplazable que se carga debido a una fuente de tensión como se expone en la presente.

La Figura 4B es un diagrama esquemático de capacitancia variable en una placa de condensador fija y una placa de condensador desplazable que se descarga en una carga de condensador de almacenamiento fijo y carga la fuente de tensión como se expone en la presente.

La Figura 4C es un diagrama esquemático de un condensador de

almacenamiento que se descarga en una carga resistiva con amperímetro como se establece en la presente.

La Figura 5 es un gráfico de carga acumulada en nanocoulombs en un condensador de almacenamiento luego de hacer funcionar el circuito de la Figura 4A y 4B durante el tiempo indicado y los puntos de ajuste de la corriente de efecto túnel para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 6 es un gráfico de energía en picojoules almacenada en un condensador de almacenamiento luego de hacer funcionar el circuito de la Figura 4A y 4B durante el tiempo indicado y las corrientes de punto de ajuste de la corriente de efecto túnel para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 7 es un gráfico de carga almacenada en nanocoulombs en el condensador de almacenamiento luego de un tiempo de recolección de energía de 50 segundos en corrientes de punto de ajuste para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 8 es un gráfico de carga almacenada en nanocoulombs en el condensador de almacenamiento luego de un tiempo de recolección de 100 segundos en corrientes de punto de ajuste para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 9 es un gráfico de carga almacenada en nanocoulombs en el condensador de almacenamiento luego de un tiempo de recolección de 200 segundos en corrientes de punto de ajuste para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 10 es un gráfico de carga almacenada en nanocoulombs en el condensador de almacenamiento luego de un tiempo de recolección de 500 segundos en corrientes de punto de ajuste para el microscopio como se divulga en la presente.

La Figura 11 es una vista esquemática que ilustra fuentes de corriente descargada y corriente de efecto túnel en un condensador variable que incorpora inherentemente una resistencia variable como se divulga en la presente.

La Figura 12A es una vista esquemática de un circuito de sensor que utiliza un amperímetro para medir la corriente emitida o la corriente de efecto túnel, o ambas, en una región de capacitancia variable como se describe en la presente.

La Figura 12B es un gráfico de corriente descargada a lo largo del tiempo de un condensador variable en un amperímetro cuando se usa grafeno independiente como se divulga en la presente.

La Figura 12C es un gráfico de corriente de efecto túnel a lo largo del tiempo de un condensador variable en un amperímetro cuando se usa grafeno rígido como se divulga en la presente.

La Figura 12D es un gráfico de valores de desviación estándar para la corriente descargada tanto para el grafeno independiente como para el grafeno rígido como una función de la corriente de efecto túnel de punto de ajuste para un microscopio de barrido de efecto túnel como se divulga en la presente.

La Figura 12E es una vista esquemática de un circuito de sensor con capacitancia parásita inherente mediante el uso de un amperímetro para medir corriente en una región de capacitancia variable como se describe en la presente.

La Figura 12F es un gráfico de corriente recolectada a lo largo del tiempo de un condensador variable en un amperímetro tanto para grafeno independiente como para grafeno rígido como se divulga en la presente.

La Figura 12G es un gráfico de valores de desviación estándar para la corriente descargada para la membrana de grafeno independiente y una muestra rígida de grafeno sobre carburo de silicio como una función de la corriente de punto de ajuste para un microscopio de barrido de efecto túnel como se divulga en la presente.

La Figura 12H es una vista esquemática de un circuito de sensor que utiliza un amperímetro para medir la corriente emitida o la corriente de efecto túnel, o ambas, en una región de capacitancia variable como se describe en la presente.

La Figura 12I es un gráfico de corriente recolectada sin corriente de efecto túnel a lo largo del tiempo de un condensador variable a través de un amperímetro para tres tensiones de polarización diferentes como se divulga en la presente.

La Figura 12J es un gráfico de corriente recolectada sin corriente de efecto túnel como una función de tensión de polarización de punto de ajuste para un microscopio de barrido de efecto túnel como se divulga en la presente.

La Figura 13 es un gráfico de carga máxima almacenada en nanocoulombs en un condensador de almacenamiento como se divulga en la presente durante diversos tiempos de recolección.

La Figura 14 es un gráfico de energía máxima en picojoules almacenada en un condensador fijo como se divulga en la presente durante diversos tiempos de recolección.

La Figura 15 es un gráfico de carga máxima almacenada en nanocoulombs en un condensador de almacenamiento fijo como se divulga en la presente durante diversos tiempos de recolección en diferentes corrientes de punto de ajuste de efecto túnel.

La Figura 16 es un gráfico de energía almacenada en un condensador de almacenamiento fijo como se divulga en la presente durante diversos tiempos de

recolección en diferentes corrientes de punto de ajuste.

La Figura 17A es una vista esquemática de una matriz de condensadores variables en un circuito de recolección de energía de acuerdo con la divulgación en la presente.

La Figura 17B es una vista en sección transversal de una matriz de condensadores variables en capas en un circuito de recolección de energía de acuerdo con la divulgación en la presente.

Figura 18. (a) Ilustración de ondas naturales en grafeno independiente. (b) Serie de datos de altura-tiempo de STM sin procesar adquiridos durante 10.000 s mostrados con una línea de tendencia obtenida de un algoritmo de filtro Wiener de paso bajo para aislar fluctuaciones de gran escala. (c) Corriente de efecto túnel medida asociada con los datos mostrados en (b). (d) Datos de altura-tiempo sustraídos de antecedentes que muestran solo las fluctuaciones en la altura de la membrana. Los datos mostrados en la altura cero son los datos de control adquiridos de una muestra de grafeno rígido. (e) Función de autocorrelación de altura (AAAAAA) calculada a partir de datos sustraídos de antecedentes mostrados en (d). (f) Densidad espectral de energía (PPPPPP) calculada a partir de los datos de STM mostrados en (d).

Figura 19. (a) Geometría de ondas convexas con dinámica molecular, (b) serie de altura-tiempo de salida de simulación, (c) función de autocorrelación de altura, y (d) densidad espectral de energía de serie de altura-tiempo.

Figura 20. (a) Datos de altura-tiempo de salida de simulación del modelo de membrana giratoria y configuraciones en tres momentos diferentes, (b) función de autocorrelación de altura ACF, y (c) densidad espectral de energía.

Las Figuras 21A-21R son ilustraciones iterativas de etapas para formar un circuito de recolección de energía de acuerdo con la presente divulgación mediante patrones de haz de electrones.

Las Figuras 22A-22R son ilustraciones iterativas de etapas para formar un circuito de recolección de energía de acuerdo con la presente divulgación mediante fotolitografía.

La Figura 23 es una vista en perspectiva superior de un transductor de energía formado en un sustrato de acuerdo con la presente divulgación.

La Figura 24 es una vista lateral de una sección transversal del transductor de la Figura 23.

La Figura 25 es una vista superior de una sección del lado izquierdo del transductor de la Figura 24.

La Figura 26 es una vista lateral de la sección transversal del transductor de la Figura 23.

La Figura 27 es una vista en perspectiva superior del transductor de energía de la Figura 23 con una figura añadida detallada que muestra una vista más detallada de una región de punta y pozo de acuerdo con la presente divulgación.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Los dispositivos y métodos descritos en la presente se pueden entender con mayor facilidad mediante la referencia a la siguiente descripción detallada de aspectos específicos del objeto divulgado y los Ejemplos incluidos en estos.

Antes de que se divulguen y describan los presentes dispositivos y métodos, se debe entender que los aspectos descritos a continuación no se limitan a los detalles de la construcción y la disposición de componentes establecidos en la siguiente descripción o ilustrados en los dibujos. La tecnología divulgada es capaz de otras formas de realización y de ponerse en práctica o llevarse a cabo de diversas maneras.

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

También se debe comprender que la terminología utilizada en la presente tiene como propósito describir aspectos particulares solamente, y no pretende ser limitativa. Al describir formas de realización de ejemplo, se recurrirá a la terminología a fines de mayor claridad. Se pretende que cada término contemple su significado más amplio como lo comprenden las personas del oficio de nivel medio e incluya todos los equivalentes técnicos que funcionan de manera similar para lograr un propósito similar. También se debe entender que la mención de una o más etapas de un método no excluye la presencia de etapas adicionales del método o etapas intermedias del método entre las etapas expresamente identificadas. Las etapas de un método se pueden realizar en un orden diferente al descrito en la presente sin apartarse del alcance de la tecnología divulgada. De manera similar, también se debe entender 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, a lo largo de esta memoria descriptiva, se hace referencia a diversas publicaciones. Se incorporan en esta solicitud las divulgaciones de estas publicaciones por referencia en su totalidad con el fin de describir más completamente el estado de la técnica a la que pertenece el objeto divulgado. Las referencias divulgadas también

se incorporan de manera individual y específica por referencia en la presente con respecto al material que contienen que es analizado en la oración en donde se hace referencia.

La memoria descriptiva hace referencias a numerosas cargas eléctricas de polaridad opuesta junto con una colección de ciertas cargas positivas y negativas en un hardware identificado. Nada en esta memoria descriptiva limita la divulgación a ninguna disposición de polaridad positiva o negativa en circunstancias donde una polaridad opuesta también puede estar dispuesta.

La memoria descriptiva además hace referencias a los picos y los puntos mínimos de una membrana independiente sometida a efectos ondulantes debido a fuerzas de energía externas, y si una determinada estructura de la membrana es un pico o un punto mínimo dependerá de la perspectiva así como la posición de la membrana con respecto a otra estructura. En consecuencia, nada en esta memoria descriptiva detallada requiere una orientación particular de estructura o *hardware*, y los términos “picos”, “puntos mínimos” y “ondas” no se limitan a ninguna orientación pero son solo con fines de descripción.

Definiciones

En esta memoria descriptiva y en las reivindicaciones que le siguen, se hará referencia a una cantidad de términos, los cuales se definirán con los siguientes significados:

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones de la presente memoria descriptiva, la palabra “comprender” y otras formas de la palabra, tales como “que comprende” y “comprende” significan que incluye, entre otros, y no pretenden excluir, por ejemplo, otros aditivos, componentes, números enteros o etapas.

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

Se entiende que a lo largo de esta memoria descriptiva los indicadores “primero” y “segundo” se usan únicamente para ayudar al lector a distinguir los diversos componentes, características o etapas del objeto divulgado. Los indicadores “primero” y “segundo” no pretenden implicar algún orden particular, cantidad, preferencia o importancia de los componentes o etapas modificadas por estos

términos.

La expresión “o combinaciones de estos”, como se usa en la presente, se refiere a todas las permutaciones y combinaciones de los ítems enumerados que preceden el término. Por ejemplo, “A, B, C o combinaciones de estos” pretende incluir al menos uno de: A, B, C, AB, AC, BC o ABC, y si el orden es importante en un contexto particular, también BA, CA, CB, CBA, BCA, ACB, BAC o CAB. Aún con respecto a este ejemplo, se incluyen expresamente las combinaciones que contienen repeticiones de uno o más ítems o términos, tales como BB, AAA, AB, BBC, AAABCCCC, CBBAAA, CABABB, y así sucesivamente. Las personas del oficio de nivel medio entenderán que en general no hay límites en cuanto a la cantidad de ítems o términos en cualquier combinación, a menos que sea evidente a partir del contexto.

Dispositivos y sensores de recolección de energía

Se describen en la presente dispositivos 100 y sensores 195 de recolección de energía. Los dispositivos y sensores de recolección de energía pueden comprender una membrana 265 dispuesta sobre un sustrato 258, en donde la membrana 225 comprende un material bidimensional (2D) y una o más ondas que tienen picos 286 y puntos mínimos 289 como se muestra en la Figura 1A. Como se ilustra adicionalmente en la Figura 1A, el sustrato puede ser una cuadrícula 258 que define celdas de cuadrícula en una extensión del sustrato para delinear regiones de ventana 269 de la membrana de superposición 265 dentro de cada celda como se analizó en la presente.

En una forma de realización de ejemplo, se divulga un dispositivo de recolección de energía 100 que tiene una fuente de energía 105, 118, 200 para la recolección de energía de vibración ambiental, que tiene una membrana atómica bidimensional 265 para pandearse a una frecuencia relativamente baja. La energía cinética vibracional anómala de estos materiales bidimensionales, si se utiliza como el componente activo de un dispositivo de recolección de energía 100, puede proporcionar una producción de energía superior cuando se compara con la tecnología existente. Por ejemplo, en la tecnología de recolección de energía de vibración microelectromecánica (MEM) de silicio actual, el componente activo puede ser una plataforma de silicio grabada. Esta plataforma no vibrará espontáneamente o no se pandeará mecánicamente porque es demasiado rígida. El “pandeo mecánico” se entiende en la presente divulgación como un fenómeno no lineal. Los enfoques anteriores de estructuras MEM de silicio son dispositivos de respuestas lineales. Por el contrario, la membrana 265 de los dispositivos de recolección de energía 100 descritos en la presente puede vibrar espontáneamente y pandearse mecánicamente.

El material bidimensional puede comprender, por ejemplo, grafeno, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ReS_2 , ReSe_2 , nitruro de boro (BN) o una combinación de estos. En ciertos ejemplos, el material bidimensional puede comprender grafeno. El grafeno puede incluir materiales monocapa, materiales bicapa, materiales tricapa y materiales multicapa. Aunque las formas de realización de ejemplo en la presente indican que un material no limitativo para la membrana independiente es el grafeno, cualquiera de los materiales analizados en la presente puede ser también una opción viable para la membrana independiente. Estas capas pueden estar apiladas entre sí en orientaciones cristalográficas arbitrarias o específicas, lo que puede mejorar las propiedades vibracionales.

La identidad del material bidimensional se puede seleccionar en función de una variedad de factores. Por ejemplo, la rigidez de la flexión varía entre los diferentes materiales bidimensionales y, por lo tanto, estarían disponibles diferentes frecuencias de vibración. Además, la conductividad eléctrica de los diversos materiales bidimensionales varía considerablemente, y puede controlar la eficacia de la recolección de energía mediante un enfoque electrostático. En consecuencia, la identidad del material bidimensional se puede seleccionar para controlar uno o más de estos parámetros.

En algunos ejemplos, la membrana 265 puede comprender grafeno independiente que tiene un componente de velocidad sustancialmente grande en la distribución de probabilidad de la velocidad. En algunos ejemplos, la membrana 265 puede exhibir un movimiento no lineal perpetuo a temperatura ambiente.

La membrana 265 puede tener, por ejemplo, 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 265 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 265 puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos

anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana 265 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 265 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 265 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 265 puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana 265 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 265 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 265 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 265 puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la membrana 265 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 a través de microscopía de fuerza atómica.

La una o más ondas pueden tener, por ejemplo, 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 ondas pueden 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 ondas puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la una o más ondas 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 ondas se puede medir, por ejemplo, mediante microscopía electrónica.

En algunos ejemplos, la una o más ondas 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 ondas 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 ondas puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, la una o más ondas pueden tener una altura promedio de 0,1 nm a 2,0 nm (por ejemplo, de 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 ondas se puede medir, por ejemplo, mediante microscopía electrónica.

La membrana 265 se puede fijar, por ejemplo, en uno o ambos extremos a un sustrato de membrana 258. En algunos ejemplos, la membrana 265 está configurada para vibrar a través de su parte central.

El sustrato de membrana 258 puede comprender, por ejemplo, cobre, silicio, carburo de silicio, zafiro o una combinación de estos. En algunos ejemplos, el sustrato de membrana 258 puede comprender una cuadrícula que comprende una o más aperturas 263. En ciertas descripciones, las aperturas 263 son áreas entre las paredes laterales de la cuadrícula que forman regiones de ventana 264 de la membrana 265.

El siguiente análisis divulga un ejemplo determinado donde la membrana 265 comprende grafeno y el sustrato 258 comprende una cuadrícula de cobre, pero los mismos conceptos pueden aplicarse a cualquiera de las membranas 265 y/o sustratos de membrana 258 descritos en la presente.

En ciertas formas de realización, la membrana 265 puede comprender un único plano atómico de carbono de grafito como su componente activo. Una lámina de grafeno se puede colocar en la parte superior de una cuadrícula de cobre que sirve como el sustrato de membrana 258 indicado anteriormente y define una o más aperturas 263 dentro de las secciones respectivas de la membrana. Cada apertura 263, cubierta con grafeno, puede formar una geometría de marco abierto con grafeno independiente intermedio. Cuando se dispone grafeno sobre la cuadrícula 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 las celdas de la cuadrícula de cobre 264 (Figura 1A). En función de la cantidad de grafeno en exceso, la longitud de contacto aumentará o disminuirá

naturalmente hasta que las fuerzas estén equilibradas. Este fenómeno se conoce como autotensionado. La tensión final puede ser de $\sim 0,1$ N/m y la geometría final del grafeno independiente puede estar compuesta de ondas (Figuras 1A, 2A-2C). Estas ondas pueden formarse naturalmente y pueden tener una distribución de tamaño típica de 20-24 nm en longitud y de 0,3 a 0,5 nm en altura. Para que se formen las ondas, el grafeno debe poder autocomprimirse libremente hasta el autotensionado final.

La deformación por compresión asociada con la geometría de ondas es el cambio en la altura dividido por la longitud original. La deformación por compresión puede ser, por ejemplo, de 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, 0,8% o más). En algunos ejemplos, la deformación por compresión puede ser de 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, 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 anteriormente. 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 ensamblaje de sustrato 265 y grafeno, y alterar la forma de las ondas, dado que el grafeno está estirado. Alterar la forma de las ondas altera la deformación por compresión y altera la velocidad a la que el grafeno invertirá espontáneamente su curvatura. De manera alternativa, al ajustar la carga externa pueden alterarse las frecuencias de vibración de la membrana 265.

Cuando se mantiene a temperatura ambiente (por ejemplo, 300 K), el grafeno independiente vibra espontáneamente debido a la energía térmica que fluye de manera continua desde los soportes de barra de la cuadrícula de cobre. A un nivel atómico, como se muestra en la Figura 1A, cuando la membrana de grafeno 265 se mantiene a temperatura ambiente, cada átomo de carbono tiene una energía cinética ($0,5 m v^2$, donde m es la masa del átomo de carbono y v es su velocidad) igual a $k_B T$ o de alrededor de 25 meV. Esta es una fuente abundante de energía ya que el grafeno tiene 4×10^{15} átomos/cm². Los cálculos de energía eléctrica predicen que cada onda puede producir 10 pW de energía, o de manera equivalente 25.0000 W/m², lo que la coloca en una categoría similar a la producción de energía eólica y solar. Como la

velocidad no es cero, los átomos dentro de la membrana 265 están en movimiento constante. Como los átomos 267 están conectados entre sí en una red, la membrana completa 265 forma ondas y, a veces, estas ondas invierten su curvatura entre picos 286 y puntos mínimos 289. Cada onda tiene miles de átomos y cuando la curvatura se invierte en sí misma, todos los átomos se mueven juntos de manera coherente, en fase, y esta energía puede ser recolectada. Este movimiento natural se puede utilizar como el componente activo de un dispositivo de recolección de energía 100, o este movimiento natural se puede utilizar para accionar el componente activo de un dispositivo de recolección de energía de vibración convencional 100.

En algunos ejemplos, la membrana 265 puede tener una onda. En algunos ejemplos, la membrana 265 puede comprender una pluralidad de ondas 271 que pueden formar una red de ondas que interactúan. Una membrana 265 que mide 10 micrómetros por 10 micrómetros puede tener, en algunos ejemplos, más de 100.000 ondas. El movimiento de una onda 271 puede afectar el movimiento de otras ondas cercanas, lo que proporciona un mecanismo de retroalimentación que mejora la capacidad de recolección de energía.

Los dispositivos de recolección de energía 100 comprenden además un componente de carga 175 acoplado de manera eléctrica, magnética y/o mecánica a la membrana 265 y/o el sustrato 258, de modo que, en ejemplos no limitativos, el componente 175 está configurado para recolectar o medir energía de la membrana 265.

En algunos ejemplos, el sustrato de membrana 258 es conductor térmico y la membrana 265 está en contacto térmico con el sustrato de membrana 258, en donde la energía térmica del sustrato de membrana 258 se puede convertir en una vibración de la membrana 265, de modo que la membrana 265 tiene energía vibracional, y un componente de carga 175, 199, 275 está configurado para convertir la energía vibracional de la membrana 265 en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y de este modo se recolecta energía de la membrana 265. En algunos ejemplos, la energía térmica puede comprender energía térmica del ambiente y/o energía cinética del ambiente.

En algunos ejemplos, la membrana 265 puede tener energía vibracional y el componente 275 está configurado para convertir la energía vibracional de la membrana 265 en energía eléctrica, magnética y/o mecánica, y de este modo se recolecta energía de la membrana 265. En algunos ejemplos, la energía vibracional comprende energía vibracional del ambiente.

La energía vibracional puede comprender, por ejemplo, vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 milihercios (mHz) 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 kilohercio (kHz) o más, 10 kHz o más, 50 kHz o más, 100 kHz o más, 500 kHz o más, 1 megahercio (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 gigahercio (GHz) o más). En algunos ejemplos, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 10 gigahercios (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).

En algunos ejemplos, la membrana 265 es capaz de vibrar de manera continua debido a que puede aprovechar la energía ambiental a frecuencias más bajas e independientemente de las restricciones de ruido. A su vez, esta energía ambiental puede ser aprovechada por el componente de carga 175, 275 y convertirse en otras formas de energía, que incluyen electricidad.

Mientras que los dispositivos de recolección de energía vibracional 100 convencionales requirieron una fuerza impulsora macroscópica externa para recolectar la energía vibracional (por ejemplo, las vibraciones en un automóvil en movimiento), en algunos ejemplos, los dispositivos de recolección de energía 100 descritos en la presente pueden ser impulsados en condiciones ambiente. Por ejemplo, los dispositivos de recolección de energía 100 descritos en la presente pueden recolectar energía en un ambiente tranquilo así como en un ambiente ruidoso.

En algunos ejemplos, el dispositivo de recolección de energía 100 puede estar configurado para que cada una de la una o más ondas pueda producir energía de 1 picovatio (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 recolección de energía 100 puede estar configurado para que cada una de la una o más ondas pueda producir energía 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 ondas puede variar de cualquiera de los valores mínimos descritos anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. Por ejemplo, el dispositivo de recolección de energía 100 puede estar configurado para que cada una de la una o más ondas pueda producir energía 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 recolección de energía 100 puede tener una densidad de energía de 1 vatio por metros cuadrados (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 recolección de energía 100 puede tener una densidad de energía 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 energía del dispositivo de recolección 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 recolección de energía 100 puede tener una densidad de energía 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 a 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 265 puede tener una carga eléctrica y un componente de carga 175 (mostrado explícitamente en

la Figura 4) es un condensador acoplado eléctricamente a la membrana 265, en donde el circuito que incluye la membrana 265 está configurado para convertir la energía vibracional de la membrana cargada 265 en corriente eléctrica alterna, y de este modo se recolecta energía de la membrana 265. Por ejemplo, el movimiento de la membrana cargada 265 induce corriente en un componente de carga cercano.

En algunos ejemplos, la membrana 265 tiene energía vibracional y el circuito está configurado para detectar una señal producida por la energía vibracional de la membrana 265. La energía vibracional puede comprender, por ejemplo, energía vibracional del ambiente.

La energía vibracional puede comprender, por ejemplo, vibraciones que tienen una frecuencia de 0,1 milihercios (mHz) 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 kilohercio (kHz) o más, 10 kHz o más, 50 kHz o más, 100 kHz o más, 500 kHz o más, 1 megahercio (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 gigahercio (GHz) o más). En algunos ejemplos, la energía vibracional puede comprender vibraciones que tienen una frecuencia de 10 gigahercios (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 ciertas implementaciones del aparato 100, un circuito puede estar conectado operativamente con la membrana 265, en donde la membrana 265 tendrá una sensibilidad predeterminada que se hace funcionar para aprovechar vibraciones de frecuencia relativamente baja. En consecuencia, el circuito puede estar configurado para detectar la frecuencia de pandeo de la membrana 265 y, cuando el circuito detecta un cambio predeterminado en la frecuencia de la membrana 265, por

ejemplo, por la presencia de una masa agregada, se determinará y transmitirá una salida para la detección de la masa, debido a la sensibilidad de la membrana 265 del dispositivo.

Métodos de fabricación

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

La compresión de la lámina del material bidimensional puede comprender, por ejemplo, aplicar una fuerza de compresión lateral 271 en toda la lámina, como se muestra esquemáticamente en las Figuras 2A-2C. La fuerza de compresión lateral puede tener, por ejemplo, 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 de 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 del 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 2C, en donde la longitud comprimida es más corta que la longitud original por una cantidad de 0,01% a 1%.

En algunos ejemplos, el rango de pandeo de la membrana 265 puede ser de 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 de 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 anteriormente a cualquiera de los valores máximos descritos anteriormente. 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). El rango de pandeo es en general igual a dos veces la altura promedio de la una o más ondas. El pandeo mecánico es la inversión de la curvatura de una onda.

La formación de la membrana en un estado de prepandeo, al comprimir la lámina bidimensional como se divulga en la presente y se ilustra mediante el ejemplo de las Figuras 2, puede ralentizar el proceso de pandeo para que la membrana 265 sea capaz de interactuar y aprovechar las vibraciones de frecuencia más baja, tales como las asociadas con condiciones ambientales. Si la membrana 265 está dispuesta en el sustrato de membrana 258 a través de un método libre de deformaciones, entonces la membrana puede autocomprimirse en un estado de prepandeo. Por ejemplo, con el grafeno sobre el cobre, el cobre se puede grabar mediante una solución líquida de cloruro de hierro. El grafeno puede permanecer flotando en la superficie de la solución después de que el cobre se elimina. A continuación, el grafeno puede retirarse de la solución y disponerse en un sustrato de membrana 258 que comprende una cuadrícula. La compresión o expansión de la cuadrícula puede alterar el tamaño de las ondas y alterar la frecuencia natural de la inversión de la curvatura espontánea.

En una forma de realización mostrada en la Figura 3A, la membrana 265 es una membrana independiente 265 que tiene una primera superficie 125A y una segunda superficie 125B. La primera membrana de superficie 265 se somete a desplazamiento debido a las ondas 261 que se forman en la membrana 265 y forman picos 286 y puntos mínimos 289 como se describió anteriormente.

La Figura 3A ilustra una forma de realización no limitativa de ciertos mecanismos fundamentales detrás de la recolección de energía de vibración a través del método electrostático de tensión constante. La Figura 3A muestra un condensador variable 120 en la parte superior, unido por condensadores a la batería 105 en la parte inferior [2]. El condensador variable 120 incluye una primera placa de condensador

135A y una segunda placa de condensador 135B. La segunda placa de condensador 135B se somete a desplazamiento debido a una fuerza F_{th} que actúa sobre la segunda placa de condensador 135B. Como se indicó anteriormente, la segunda placa de condensador 135B está formada de un material que recolecta carga y es suficientemente plegable para ser desplazado mediante fuerzas del ambiente, ya sean térmicas o cinéticas. La batería 105 coloca la carga inicialmente en el condensador 120, atrayendo energía de la batería. Como las dos placas 135A, 135B tienen, cada una, una carga opuesta, se atraen entre sí debido a la fuerza de Coulomb. Sin embargo, una estructura de soporte del condensador variable 120 las mantiene separadas. Luego, la segunda placa de condensador 135B (por ejemplo, el lado derecho de la Figura 3A) se mueve mediante una fuerza externa hacia la derecha. Debe notarse que esta fuerza debe superar la atracción electrostática que las dos placas 135A, 135B tienen entre sí. Esta fuerza opera en el sistema electromecánico. Con las placas 135A, 135B del condensador 120 aún más separadas, el condensador puede ahora almacenar menos carga que la que tiene actualmente en la primera y segunda placas de condensador 135A, 135B. La carga se somete a la ecuación, $C = Q/V$, donde C es la capacitancia de la región capacitiva 141 que bajó su valor con el incremento de separación entre las placas 135A, 135B (es decir, mientras una distancia (d) entre las placas 135A, 135B incrementa, la capacitancia disminuye y viceversa). V es la tensión de la batería 105 que es constante, y Q es la carga total en las placas y dentro de la región capacitiva 141. En consecuencia, mientras la distancia (d) incrementa, la corriente (indicada de acuerdo con la notación estándar de dirección positiva a negativa) se mueve desde la primera placa 135A (por ejemplo, la placa izquierda según se muestra), de vuelta hacia la batería 105 (recarga la batería), sale por el otro lado de la batería 105 y se dirige hacia la segunda placa 135B desplazable del condensador variable 120. El desplazamiento debido a la fuerza F_{th} ilustrada de la Figura 3A reduce la carga general en el condensador variable 120. La fuerza externa es responsable del trabajo o energía necesaria para mover la carga. La ilustración muestra el mecanismo físico básico, mediante el cual se puede utilizar una fuerza externa para mover las cargas eléctricas desde el condensador variable 120.

En una forma de realización y de acuerdo con la divulgación anterior, la segunda placa de condensador 135B (por ejemplo, la placa desplazable en el lado derecho del condensador variable 120 en la Figura 3) es grafeno independiente, y la fuerza externa que mueve el grafeno independiente viene del movimiento térmicamente inducido y/o cinético de átomos en el grafeno independiente. La Figura

3B ilustra un ejemplo de una respuesta de corriente para la forma de realización de un condensador variable de acuerdo con la Figura 3A. La Figura 3B es un gráfico de corriente de ejemplo a través de un componente de carga 175, 275 que ha recolectado energía como carga almacenada del circuito de ejemplo de la Figura 3A. Luego de recolectar la energía, se utiliza un circuito de testeo para medir la carga recolectada al conectar un condensador ($C = 0,9$ microfaradio) que funcionaba como el componente de carga 175, 275 a un circuito de medición accionado por el componente de carga 175, 275 a través de un resistor de 33 megaohm. A partir de las mediciones en la Figura, $I_{\text{máx}} = 30$ nA y la carga total almacenada es $Q_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}RC = 900$ nC. Además, la energía total recolectada es $U_{\text{máx}} = Q^2/2C = 450$ nJ. La fuente de alimentación promedio es $P = U_{\text{máx}}/T = Q^2/2CT$, donde T es el tiempo que tomó recolectar energía. En el ejemplo de la Figura 3B, el condensador variable 120 se cargó con una fuente de alimentación de 1V.

Nada en esta divulgación limita las formas de realización a ninguna configuración para el desplazamiento de la carga. Por ejemplo, en otra forma de realización, la membrana 265 es un material aislante que está impregnado con partículas cargadas que luego no son capaces de moverse a lo largo de la membrana. En este caso, la vibración de membrana inducirá una corriente para fluir sin necesidad de una fuente de tensión. Como se describe a continuación, esta forma de realización puede estar dominada por la corriente de efecto túnel desde un electrodo próximo o mediante capacitancia variable inducida por la carga fija en la membrana (es decir, una forma de realización polarizada internamente). Además, como en otras formas de realización a continuación, la corriente inducida puede cargar un condensador de almacenamiento fijo o alimentar una carga resistiva.

La Figura 4 ilustra el circuito electrónico que recolecta energía. El circuito se reproduce tres veces (Figura 4A, Figura 4B, Figura 4C) para mostrar sus tres funciones diferentes [3, 4]. El circuito tiene una fuente de tensión (por ejemplo, batería 105), un condensador variable 120 (que incluye una primera placa de condensador 135A y una segunda placa de condensador 135B), dos diodos 150A, 150B, un conmutador 153, un condensador de almacenamiento fijo 175 conectado como un primer componente cargado, y otro circuito de carga conmutado que incluye un resistor 199, y un amperímetro 195 conectado al suelo 118. La primera placa de condensador 135A puede estar en una posición fija, y la segunda placa de condensador 135B puede ser desplazable, tal como la membrana 265 descrita anteriormente. En la forma de realización que utiliza una membrana para una placa de

condensador 135B, una primera superficie 125A de la membrana se orienta hacia la primera placa de condensador 135A. Una segunda superficie 125B de la membrana está opuesta a la primera superficie 125A.

El diagrama de circuito superior de la Figura 4A ilustra el flujo de carga inicial hacia el condensador variable 120. La corriente solo fluye en la dirección de las agujas del reloj ilustrada que se muestra en la parte izquierda del circuito, desde la batería 105 hasta el condensador variable 120, a través del diodo 150A y de vuelta a la batería 105. La energía, U necesaria para cargar el condensador es $U = 0,5 C_{\text{máx}} V$, donde $C_{\text{máx}}$ es la capacitancia máxima del condensador variable 120 y V es la tensión en la fuente de alimentación 105. Esta energía proviene de la fuente de alimentación 105. Este circuito, que muestra la carga inicial (en la dirección de las agujas del reloj en la Figura 4A), establece una carga inicial a una primera distancia (d) entre las placas 135A, 135B del condensador variable 120. El lado izquierdo del circuito ilustrado con la corriente en dirección de las agujas del reloj de la Figura 4A también establece una capacitancia máxima $C_{\text{máx}}$ que la región capacitiva 141 puede alcanzar. Cuanto más cerca las placas de condensador 135A, 135B se ubican entre sí en un ciclo dado del desplazamiento de la placa de condensador 135B, mayor será la capacitancia que se alcanzará entre las placas.

En el circuito del medio ilustrado como la Figura 4B, una fuerza externa aleja una placa 135B del condensador variable 120 a partir del otro lado (es decir, la aleja de la primera placa de condensador 135A) y, por lo tanto, reduce la capacitancia general a C_{min} . Un condensador más pequeño mantiene una menor carga, por lo tanto el exceso debe fluir fuera del condensador variable 120 a través de la batería 105 en la dirección incorrecta (recargándola). Este exceso de carga debe salir de la batería 105 por el otro lado, luego fluir hacia el condensador de almacenamiento fijo 175 en el medio del circuito, a través del conmutador 153, a través del segundo diodo 150B y de vuelta hacia el condensador variable 120 para completar el circuito. Este flujo de carga almacena carga en el condensador de almacenamiento fijo 175. Cada vez que el ciclo se repite, se almacena carga adicional en el condensador de almacenamiento fijo 175.

Una vez que el condensador de almacenamiento fijo 175 se carga lo suficiente, luego se puede activar el conmutador 151 hacia la derecha y el condensador de almacenamiento fijo 175 se puede utilizar para alimentar el circuito en la derecha. En este caso, la corriente fluye a través del resistor 199 y luego a través de un amperímetro 195 para medir cuánta carga se recolectó mediante el circuito del condensador variable. Las siguientes fórmulas en las Tablas ilustradas pueden

utilizarse para ilustrar los cambios de corriente y carga presentes en el circuito de las Figuras 4A-4C.

Tabla 1

<u>Capacitancia variable</u>
$C(t) = \frac{\varepsilon_o A}{d(t)}$
$\Delta C(t) = \frac{\varepsilon_o A}{d_o^2} \Delta d(t)$
$\Delta Q(t) = \frac{\varepsilon_o A}{d_o^2} \Delta d(t) V_{stm}$
$I_{\Delta C}(t) = \frac{\varepsilon_o A}{d_o^2} \Delta d(t) V_{stm} f$

Tabla 2

<u>Efecto túnel variable</u>
$I_T(t) = I_{stm} e^{-k G_{stm} \Delta d(t)}$
$I_{\Delta T}(t) = I_{stm} - I_{stm} e^{-k G_{stm} \Delta d(t)}$
$I_{\Delta T}(t) = I_{stm} k G_{stm} \Delta d(t)$

Tabla 3

<u>Corrientes paralelas agregadas</u>	
$I_{ch}(t) = \frac{\epsilon_o A f \Delta d(t)}{d_o^2} V_{stm} + k G_{stm} \Delta d(t) I_{stm}$	
$\langle I_{ch} \rangle = \frac{\epsilon_o A f \langle \Delta d \rangle}{d_o^2} V_{stm} + k G_{stm} \langle \Delta d \rangle I_{stm}$	
$Q_{ch}(t) = \frac{\epsilon_o A f \langle \Delta d \rangle}{d_o^2} V_{stm} t + k G_{stm} \langle \Delta d \rangle I_{stm} t$	
$Q_{ch}^{m\acute{a}x}(I_{stm}) = \frac{\epsilon_o A f \langle d(t) \rangle}{d_o^2} V_{stm} T + k G_{stm} \langle d(t) \rangle T I_{stm}$	

Las Figuras 5-10 ilustran los datos que surgen del uso de la configuración de circuito que se muestra en las Figuras 4A-4C cuando la primera placa de condensador 135A es una punta 138A de un microscopio de barrido de efecto túnel (STM) como se muestra en la Figura 1B. Nada en esta divulgación se limita a ninguna placa de condensador variable que se construye en una punta de un STM, y la divulgación abarca el condensador variable 120 que tiene placas 135A, 135B de cualquier construcción de contacto de metal, que tienen cualquier forma funcional y/o son parte de otros aparatos conectados. En un ejemplo no limitativo, sin embargo, un microscopio de barrido de efecto túnel (STM) comprende una punta de metal 138A que está elaborada con un material conductivo y configurada para transmitir y/o recibir portadores de carga a una superficie receptora como se analiza en la presente. Como se muestra en el ejemplo de la Figura 1B, el STM posiciona la punta 138A sobre una muestra (en este ejemplo una membrana 265) a distancias cortas—meramente ángstroms en algunos casos. De hecho, las distancias son tan cercanas que un uso de un STM es para rastrear cambios de niveles atómicos en una topografía que puede estar mapeada al barrer la punta sobre la muestra en un proceso de trama. En un uso estándar de un STM, la distancia de la punta para la muestra puede ajustarse en el eje z mientras el barrido se lleva a cabo a través de la muestra en el plano x-y. Se aplica una tensión entre la punta 138A del STM y una muestra, donde la punta tiene una forma definida que, en ciertas formas de realización no limitativas, se estrecha a una punta de ancho atómico del metal conductivo como se muestra en la forma piramidal de la punta 138A en la Figura 1B. Además de los usos estándar de los microscopios

de barrido de efecto túnel (STM), el uso de un STM en el contexto de esta divulgación incluye, entre otros, un STM estacionario ubicado en un espacio fijo con relación a una membrana 265 como se describió anteriormente. El efecto túnel de electrones entre la punta 138A y una muestra, en este caso la membrana 265, produce una corriente que puede mantenerse en un bucle de retroalimentación que controla la fuente de alimentación 105. En una forma de realización no limitativa de usos para un microscopio de barrido de efecto túnel (STM), un STM también puede configurarse para ubicar la punta en proximidad a la muestra, es decir, la membrana 265, y medir cambios en la acumulación de carga en numerosas corrientes de punto de ajuste aplicadas al STM. Los cambios en la acumulación de carga en un condensador variable se usan luego para determinar los niveles de energía de estados cuánticos en la muestra (es decir, medir el nivel de energía y la disponibilidad de la carga de eventos de nivel atómico en una muestra). Las Figuras 5-10 ilustran que para los casos en los cuales la punta 138A del STM sirve como la primera placa de condensador 135A, se pueden utilizar diferentes puntos de ajuste para la corriente de punto de ajuste del STM para probar la capacidad de recolección de energía de una membrana vibratoria como se describió anteriormente. El condensador variable 120 en estos ejemplos incluye una primera placa de condensador 135A formada por la punta 138A del STM y una segunda placa de condensador 135B formada por la membrana 265 o una parte de esta, que en este ejemplo es grafeno. Más específicamente, y sin limitar la divulgación a ninguna forma de realización, la segunda placa de condensador 135B incluye una primera superficie 125A de la membrana 265 donde se recolecta la carga. En aun otra forma de realización no limitativa, la punta 138A del microscopio de barrido de efecto túnel (STM) escanea una superficie de la membrana y recolecta datos relacionados con la carga en el condensador variable y la energía debido a la carga en las regiones de ventana 264 de la membrana 265, en donde las regiones de ventana 264 que componen la superficie general de la membrana pueden tener dimensiones atómicas individualizadas y determinadas previamente. Dado que en ciertas formas de realización, la punta 138A del STM es estacionaria con respecto a la membrana 265, las regiones de ventana más próximas pueden analizarse como que tienen mayores dimensiones que las regiones de ventana en las partes de la membrana más alejadas de la punta 138A. En otras formas de realización, las regiones de ventana 264 que están alejadas de la punta pueden analizarse estadísticamente como que contribuyen con menos carga a la operación de recolección general. Las dimensiones de las regiones de ventana bajo consideración y

la recolección de carga de cada región de ventana se pueden planear previamente mediante el posicionamiento estratégico de la punta con respecto a la membrana 265. Un objetivo no limitativo de la configuración del STM y la membrana 265 es controlar la acumulación de carga en un condensador variable 120 que se forma entre la punta y la membrana y proporcionar componentes de carga para recolectar y/o utilizar esa acumulación de carga para energía.

La Figura 5 ilustra la carga almacenada en nanocoulombs en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno independiente como una función de tiempo de recolección en segundos. Cada trazado se adquiere en una corriente de punto de ajuste del STM diferente en nanoamperes y sigue la siguiente ecuación:

$$Q_{ch}(t) = \frac{\epsilon_o A f(\Delta d)}{d_o^2} V_{stm} t + k G_{stm}(\Delta d) I_{stm} t$$

La Figura 6 ilustra la energía almacenada en picojoules en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno independiente como una función de tiempo de recolección en segundos. Cada trazado se adquiere en una corriente de punto de ajuste del STM diferente en nanoamperes y sigue la ecuación:

$$\text{Energía} = Q^2/2C$$

La Figura 7 ilustra la carga almacenada en nanocoulombs en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno independiente como una función de la corriente de punto de ajuste del STM en nanoamperes y durante un tiempo de recolección de 50 segundos. La pendiente y la intersección son iguales a los términos en la expresión matemática.

La Figura 8 ilustra la carga almacenada en nanocoulombs en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno independiente como una función de la corriente de punto de ajuste del STM en nanoamperes y durante un tiempo de recolección de 100 segundos. La pendiente y la intersección son iguales a los términos en la expresión matemática.

La Figura 9 ilustra la carga almacenada en nanocoulombs en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno

independiente como una función de la corriente de punto de ajuste del STM en nanoamperes y durante un tiempo de recolección de 200 segundos. La pendiente y la intersección son iguales a los términos en la expresión matemática.

La Figura 10 ilustra la carga almacenada en nanocoulombs en el condensador variable 120 a partir de la energía cinética de la membrana 265 de grafeno independiente como una función de la corriente de punto de ajuste del STM en nanoamperes y durante un tiempo de recolección de 500 segundos. La pendiente y la intersección son iguales a los términos en la expresión matemática.

Las Figuras 7-10 se establecen de acuerdo con lo siguiente:

$$Q_{ch}^{m\acute{a}x.}(I_{stm}) = \frac{\epsilon_o A f \langle d(t) \rangle}{d_o^2} V_{stm} T + k G_{stm} \langle d(t) \rangle T I_{stm}$$

En general, las Figuras 4-10 de esta divulgación son ejemplos no limitativos de una disposición para recolectar energía para almacenar carga en un condensador de almacenamiento fijo 175. En otras formas de realización, cuando el circuito de la Figura 4 se utiliza en conjunto con un STM, el circuito también está configurado para medir la energía involucrada en un evento dinámico de escala atómica. La resolución de energía puede ser de al menos un femtojoule. El circuito de prueba explicado anteriormente con respecto a la Figura 3B ilustra un ejemplo de cómo un componente de carga puede unirse al condensador variable 120 de esta divulgación y medir la transferencia de carga de escala atómica para modelar un evento que cambia la respuesta cinética y termodinámica de una muestra sometida a fenómenos físicos ambientales.

La Figura 11 expande los conceptos ilustrados en el ejemplo no limitativo de circuito de las Figuras 4-10 para uso más amplio en múltiples aplicaciones debido a los nuevos métodos de modelado para el condensador variable 120 de esta divulgación. En la ilustración de la Figura 4, la sección del condensador variable 120 del aparato de circuito general 100 en la Figura 4 en realidad se encuentra dentro de una cámara del STM. Un lado del condensador variable 120 es la punta 138A del STM y el otro lado del condensador variable es la membrana 265 de grafeno independiente. La punta 138A del STM está conectada al lado positivo de la fuente de alimentación 105, que somete la punta a una corriente constante que se mantiene mediante un bucle de retroalimentación controlado por la fuente de alimentación 105. Mientras la membrana 265 de grafeno independiente vibra para establecer ondas 271, la distancia (Figura 3A, ref. "d") entre la membrana de grafeno 265 y un electrodo de metal cercano (la punta

138A del STM) naturalmente variará mientras las respectivas ondas cambian posiciones entre los picos 286 y valles 289. En la distancia más cercana entre la membrana 265 y el electrodo de metal 138A la capacitancia será la mayor de alrededor de 1 femtofaradio. A la mayor distancia entre las placas 135A, 135B de un condensador variable 120, la capacitancia será la menor de alrededor de 0,1 femtofaradios. Este cambio en la capacitancia es una fuente de recolección de energía cuando un componente cargado 175, 195, 199 está conectado al condensador variable en una configuración de circuito (es decir, con diodos de ejemplo), lo que permite que el condensador variable descargue en ciclos a través del componente de carga.

Como se menciona, el circuito de la Figura 4 está conectado al microscopio de barrido de efecto túnel (STM). El grafeno independiente es la muestra porque, por su naturaleza, el grafeno siempre está en movimiento [5], porque también al calentarlo produce pandeo mecánico [6], y porque cada onda invertirá espontáneamente su curvatura [7]. Además, se ha previsto independientemente que el movimiento térmico del grafeno nanoestructurado se puede recolectar para proporcionar 10 picovatios de energía continua para un 1 nm mediante una cinta de 17 nm [8].

Para los ejemplos de prueba, en las Figuras 11 y 12, esta divulgación muestra resultados del uso de un STM en un sistema Omicron® de baja temperatura y vacío ultra alto que fue modificado a medida [9]. En particular, la conexión eléctrica 225 a la muestra de membrana 265 de grafeno independiente se aísla del sistema y puede conectarse a un circuito electrónico de recolección de energía 100 fuera del vacío de la cámara 219 del STM. Esto también se ilustra en la Figura 3B que muestra ejemplos de *hardware*. Como se analizó anteriormente, las capacitancias mínimas y máximas del condensador variable 120 pueden computarse para una configuración de STM con la punta 138A del STM y una membrana 265 de grafeno que forma las placas 135A, 135B del condensador variable 120. Nótese que una corriente de punto de ajuste del STM está establecida a través de una fuente de alimentación de tensión 105 controlada por retroalimentación a la punta 138A del STM para cargar el condensador variable 120 a un primer nivel de capacitancia (C). Como se muestra a continuación, el cambio en distancia (Figura 3A, distancia "d") entre la membrana 265 de grafeno y la punta 138A causa cambios correspondientes a la capacitancia del condensador variable 120. Cuando la punta y la membrana están más cerca, la capacitancia entre las dos es $C_{\text{máx}}$, y cuando la punta y la membrana están lo más alejadas posible, el condensador variable 120 exhibe su capacitancia mínima. La capacitancia C base

puede determinarse experimentalmente para uso en aplicaciones particulares, como “C” es dependiente de la corriente de punto de ajuste seleccionada para el STM así como el rango de movimiento de la punta 138A del STM para posicionar en una ubicación fija con respecto a la membrana 265. La información a continuación explica las relaciones de los componentes de la Figura 11 que generan características particulares en el condensador variable 120.

Durante la fase de incremento de la capacitancia del condensador variable 120, cuando la membrana 265 y la punta 138A del STM están lo suficientemente cerca como durante el período de punto mínimo 289 de membrana, la membrana 265 de grafeno alimenta con carga Q hasta $Q_{\text{máx}}$. Este evento se describió anteriormente en relación con la Figura 4A en la cual se forzó la carga a través del diodo 150A, también mostrado por la flecha en la Figura 11 como corriente en la dirección de las agujas del reloj a través del diodo 150A. La fase de disminución de la capacitancia de la Figura 4A se produce durante la formación del pico 286 en la membrana 265 que separa las placas del condensador variable 135A, 135B, y la membrana 265 de grafeno pierde carga $Q_{\text{máx}}$ hasta $Q_{\text{mín}}$ al volver al STM. En el ejemplo de la Figura 4A, con el diodo 150A, la corriente de punto de ajuste del STM, y una fuente de tensión controlada por retroalimentación 105 que mantiene la corriente de punto de ajuste, la cantidad de carga disponible en el circuito se estabiliza a un valor constante $Q_{\text{máx}}$, y la carga en el circuito de la Figura 4A se transporta mediante el efecto cíclico de la membrana en lugar de depender de dinámicas eléctricas en la fuente de tensión como la única fuente de energía en el circuito. Después de todo, en el circuito de la Figura 4A, la fuente de tensión se reabastece y recarga de manera consistente en el mismo ciclo de picos 286 y puntos mínimos 289 a través de la membrana. La membrana lleva a cabo el trabajo en el circuito de la Figura 4A.

La Figura 11 explica con mayor detalle el fenómeno eléctrico en funcionamiento en el circuito de la Figura 4A. En el circuito de la Figura 11, el condensador variable 120 funciona en ciclos entre capacitancia alta y baja con el efecto cíclico sobre la membrana 265. Durante los períodos de punto mínimo, cuando la membrana y la punta del STM están en estrecha proximidad, el condensador variable está configurado para almacenar carga hasta $Q_{\text{máx}}$. Cuando el condensador variable 120 disminuye en capacitancia durante los períodos de pico de las ondas de membrana, la corriente direccionada de positivo a negativo es forzada fuera de la punta 138A del STM y de vuelta hacia la batería 105, y como también se muestra en la Figura 4A, el diodo 150A permite que la corriente fluya en solo una dirección. La

Figura 11 ilustra que se descubrió un nuevo mecanismo de recolección de energía al usar el circuito de recolección de energía junto a un STM. Cuando la membrana 265 de grafeno independiente está en movimiento y forma los picos 286 y puntos mínimos 289, el primer mecanismo de recolección de carga proviene de la capacitancia de la unión punta-muestra 138A, 265 que cambia con el tiempo, como se analizó anteriormente. Un segundo mecanismo de recolección de carga surge del efecto túnel mecánico-cuántico de electrones entre la punta 138A y la muestra, tal como, entre otras, la membrana de grafeno 120. La magnitud de la corriente de efecto túnel fluctúa cuando la separación de la punta-muestra fluctúa. Este segundo mecanismo surge de la teoría de efecto túnel [10]. Sin embargo, de manera similar a la capacitancia variable, cuando la fuerza térmica aleja la muestra 265 de la punta 138A, la fuerza térmica es la que realiza el trabajo de mover la carga. Esta es la fase de recolección de energía del movimiento. Utilizar la energía térmica existente y la vibración inducida por picos y puntos mínimos de la membrana proporciona una vía para agregar energía a los circuitos descritos en esta divulgación y, por lo tanto, mover la carga sin depender solamente de energía almacenada en una batería o proporcionada por otra fuente de tensión externa.

Mantener la distancia entre las placas del condensador variable lo suficientemente cercana para tener una alta probabilidad de efecto túnel de electrones mejora la señal de recolección de energía. En otras palabras, una ubicación inicial de la punta 138A dentro de un rango conocido del movimiento en el eje z de la punta con respecto al eje x-y a través de la muestra 265 se puede ajustar para asegurar el efecto túnel de carga en condiciones dadas.

Un condensador variable 120 que también produce fugas de corriente a lo largo de una trayectoria planeada a través de componentes de circuito puede modelarse como el circuito equivalente de la Figura 11, en el cual un resistor variable 133 y un condensador variable 120 están conectados entre sí en paralelo, como se muestra. Para el ejemplo de la Figura 11, tanto el condensador y el resistor son variables, y la tensión a través de cada uno es la misma.

Esta divulgación muestra que la corriente total I disponible para recolectar carga mediante el trabajo del efecto cíclico en la membrana 265 surge tanto del condensador variable 120 (I_C) y del resistor variable 133 (el efecto túnel — I_R). Fundamentalmente, esto es debido a que el modelo del condensador variable y el resistor variable están conectados entre sí en paralelo. En diversos límites, la electrostática del condensador variable o la corriente de efecto túnel dominan la

recolección de energía. En distancias muy cercanas, el efecto túnel predominará. Este es el caso para una configuración de STM típica pero no limitativa. Utilizar la energía térmica existente y picos 286 y puntos mínimos 289 de la membrana inducidos por vibración proporciona una vía para mover carga al condensador de almacenamiento fijo sin gastar la batería 105 como la única fuente de energía del sistema.

La Figura 12A ilustra la forma de realización de la Figura 11 pero con un amperímetro 195 como un dispositivo de carga que también está conectado en serie con un segundo diodo 250B que direcciona la corriente de vuelta a la segunda placa 135B (por ejemplo, la muestra o membrana 265) del condensador variable. En la forma de realización de la Figura 12A, el condensador variable 120 se forma nuevamente al usar la punta 138A del STM como la primera placa de condensador 135A y la membrana 265 de grafeno como la segunda placa de condensador 135B dentro de una cámara de vacío 219 del STM. La conexión eléctrica 225 a la membrana puede estar fuera de la cámara 219 para acceso al conectar los diodos 250A, 250B. El amperímetro 195 puede medir la corriente en tiempo real, que a su vez puede utilizarse para mostrar la acumulación de carga en el condensador variable 120, la capacidad de almacenamiento de carga en el condensador variable y la energía presente en el condensador variable 120. Estas medidas pueden tomarse durante un evento de nivel atómico bajo consideración en una muestra, que puede ser la membrana 265 analizada anteriormente. Es notable que la Figura 12A representa la primera figura en esta divulgación mediante la cual un dispositivo de carga, tal como el amperímetro 195, está conectado directamente en paralelo con el condensador variable 120 y el diodo cargado 250A sin un conmutador que separe un circuito de carga (Figuras 4A, 4B) y un circuito de descarga (Figura 4C). Las direcciones de la corriente positiva de la Figura 12A igualarán aquella de la Figura 4A durante los períodos de puntos mínimos de la muestra, o la membrana 265, es decir, al cargar el condensador variable, y luego igualar la Figura 4B durante los períodos de pico de la membrana al descargar el condensador variable. La carga y descarga del condensador variable 120 (un primer mecanismo para recolectar carga), junto con el efecto del resistor variable analizado en cuanto a la Figura 11 (el segundo mecanismo para recolectar carga), trabajan en conjunto para proporcionar carga a un componente cargado, que en la Figura 12A es un amperímetro 195. La configuración de circuito de la Figura 12A, por lo tanto, proporciona una trayectoria de corriente en una primera dirección a través de la batería 200 durante períodos capacitativos máximos (es decir, los puntos mínimos de la membrana la acercan a la punta) y luego una segunda

trayectoria de corriente a través del amperímetro 195 durante periodos de capacitancia mínimos (es decir, los picos de la membrana la alejan de la punta). De esta manera, la vibración de la membrana que conlleva al efecto cíclico descrito anteriormente permite al condensador variable 120 mover la carga hacia y desde las placas 135A, 135B del condensador variable 120 para cambiar la dirección de la corriente. El resultado es que el condensador variable que opera como un primer mecanismo para la recolección de energía proporciona una fuente de corriente alternativa.

La respuesta de la corriente del primer mecanismo para la recolección de energía—carga desde el condensador variable 120— se ilustra en la Figura 12B para la corriente a través del amperímetro 195 en un tiempo de recolección de 100 segundos. La corriente mostrada en la Figura 12B ilustra la corriente almacenada y emitida a través del condensador variable 120 durante el período de tiempo para una muestra de la membrana 265 de grafeno independiente. La Figura 12C ilustra el segundo mecanismo disponible para recolectar energía mediante una corriente adicional en el sistema proporcionada por el efecto túnel de carga a través del condensador variable 120 y, como se indicó anteriormente, este segundo mecanismo puede modelarse como corriente de efecto túnel entre la punta de un STM (o cualquier otro electrodo de metal analizado en la presente) y la membrana 265. El efecto túnel de carga a través del condensador variable 120 es proporcional, pero no idéntico, a la corriente de punto de ajuste que el STM de un ejemplo no limitativo está diseñado para rastrear en una operación de estado estable de la punta del microscopio. Las Figuras 12C y 12D muestran la diferencia cuando una membrana 265 de grafeno independiente sirve como muestra y segunda placa de condensador 135B. En otras palabras, las formas de realización de la presente divulgación ilustran que para diferentes aplicaciones y condiciones bajo consideración, se puede utilizar la punta 138A del STM como la primera placa de condensador 135A y utilizar una membrana sujeta de manera inherente a fuerzas térmicas y energía cinética inducida por vibración como una segunda placa de condensador 135B. Las fuerzas ambientales sobre el sistema que incluyen, entre otras, energía térmica y vibración inducida por las estructuras que lo rodean (tales como postes separadores 210 en configuraciones en capas, sustrato de membrana 258), pueden proporcionar la energía necesaria para mover cargas hacia o desde el sistema. La acumulación de carga recolectada general incluye cargas del condensador variable 120 y cargas adicionales disponibles para recolección mediante portadores de efecto túnel a través de las placas de condensador variable 135A, 135B, como se modela con el resistor variable 133 de la

Figura 11. En algunas formas de realización, las cargas de efecto túnel dominan la carga general promedio disponible para recolectar, y las cargas de efecto túnel son por lo general proporcionales a la corriente de punto de ajuste de la fuente de tensión del STM, como se ilustra en la Figura 12D.

El rango de la recolección de energía puede modularse al seleccionar puntos de ajuste del STM apropiados, posición de la punta del STM, rango del movimiento de la punta del STM con respecto a una placa de condensador opuesta, y la membrana 265. Como se muestra en la Figura 2, la membrana puede elegirse y/o diseñarse por ingeniería para obtener una formación de ondas deseada (por ejemplo, distancias entre picos y puntos mínimos) al seleccionar un sustrato de cuadrícula 258 particular para la membrana 260, apertura o tamaño de celda para la cuadrícula, y cualquier fuerza de compresión sobre la membrana. Estos factores están disponibles para configurar un sistema que proporciona recolección de corriente a través de un sistema que fluctúa alrededor de un valor de corriente de efecto túnel con formación de picos y puntos mínimos en la membrana. La Figura 12C ilustra un ejemplo de la corriente de efecto túnel a través del condensador para el mismo período de recolección de 100 segundos de la Figura 12B. Como se ilustra en la Figura 12D, una corriente de punto de ajuste del STM es un valor estable que el STM se esfuerza por mantener y la desviación estándar es cercana a cero para la corriente de punto de ajuste. La misma desviación cero se muestra para el mecanismo de corriente de efecto túnel que es el segundo componente descrito anteriormente de cualquier operación de recolección. También es notable que la corriente de carga emitida a partir del condensador variable 120, como se muestra en la Figura 12B, se centra mayormente alrededor de los valores de corriente de efecto túnel mostrados en la Figura 12C. Nuevamente, este valor de corriente de efecto túnel de la Figura 12C está directamente relacionado con la corriente de punto de ajuste del STM. Finalmente, el gráfico que se muestra en la Figura 12D ilustra que mientras la corriente de punto de ajuste del STM aumenta, la desviación estándar de los valores de corriente disponibles para la recolección desde la carga emitida a partir del condensador variable 120 es mucho mayor. Estas características se encuentran disponibles como puntos de datos para diseñar sistemas de recolección o sistemas de detección de energía con los circuitos descritos en la presente. Los resultados de las pruebas indican que, para el circuito de la Figura 12A, cuando la punta 138A está 2 nm o más cerca de la muestra (es decir, la membrana 265), la corriente de electrones de efecto túnel (modelada como resistor variable 133 en la Figura 11) domina. Cuando la punta se encuentra a 2 nm o más alejada de la

muestra, domina el término de capacitancia variable.

La disposición de componentes establecida en las Figuras 12A-12D ilustran además opciones en la polarización del circuito de carga de la Figura 4A con tanto componentes polarizados internamente como componentes polarizados externamente. En la Figura 12A, la fuente de tensión 200 está conectada como un dispositivo de polarización externo que no solo inserta carga al circuito sino que también desempeña una función en la dirección de la corriente a través de diodos 250A. 250B así como la energía general disponible para los portadores insertada en el condensador variable 120. En otras formas de realización, un producto de acuerdo con esta divulgación puede configurarse para ser operacional luego de que la fuente de tensión 200 se elimina del circuito y los componentes restantes se conectan a un electrodo de metal que sirve como la primera placa de condensador 138A. En este escenario, una fuente de tensión proporciona carga al circuito que permanece luego de que la fuente de tensión se elimina, lo que genera que el circuito se prepolarice con carga para uso con muestras en ausencia de una fuente de tensión directa conectada durante el uso.

Las Figuras 12E, 12F y 12G ilustran más detalles del fenómeno físico en funcionamiento cuando la corriente de efecto túnel domina un circuito como se describe en la presente. Estos gráficos muestran la corriente que fluye a través del diodo 250B, cuando el sistema es dominado por el efecto túnel. El descubrimiento importante es que la corriente fluctúa de manera considerable cuando la muestra es grafeno independiente. Cuando la muestra es rígida, esta fluctuación desaparece.

Una medida de estas fluctuaciones se proporciona mediante la desviación estándar (desv. estándar) El gráfico inferior muestra cómo la desviación estándar es mucho mayor para el grafeno independiente en comparación con el grafeno rígido, y que esto cambia de manera lineal junto a la corriente de punto de ajuste como se muestra en la teoría anterior. Mediante extrapolación, en esta corriente de efecto túnel de línea a cero, las fluctuaciones aún persisten y proporcionan un valor de alrededor de 10 pA. Este valor 10 pA de corriente puede ser utilizado como una fuente de alimentación. La corriente de efecto túnel domina el circuito de acuerdo con la fórmula que se muestra a continuación:

$$I_{IT}(t) = I_{STM} e^{-k \Delta d(t)}$$

Las Figuras 12H, 12I, 12J ilustran más detalles del fenómeno físico en funcionamiento cuando el condensador variable es la fuente dominante de energía en

el circuito. Estos gráficos muestran la corriente que fluye a través del diodo 250B, cuando el sistema es dominado por el condensador variable 120. No fluyen electrones de la punta 138A a la muestra 265, pero la fuerza de inducción electrostática genera la corriente. El descubrimiento más importante es que la corriente fluye a través del diodo 250B simplemente porque la membrana 265 de grafeno independiente se mueve de manera constante y tiene una fuente de tensión que la carga. El gráfico inferior muestra la corriente en comparación con la tensión. Y coincide con la teoría anterior. Toda esta corriente puede utilizarse como una fuente de alimentación. El condensador variable domina el circuito de acuerdo con la fórmula que se muestra a continuación:

$$I_{dc}(t) = \frac{\epsilon_0 A f \Delta d(t)}{d_0^2} V_{stm}$$

Las Figuras 13-16 muestran datos recolectados del sistema de las Figuras 4, 11 y 12A, que reconocen que la energía y la carga almacenada provienen de dos mecanismos descritos anteriormente—la descarga del condensador variable y la corriente de efecto túnel a través del condensador variable. La Figura 13 ilustra la energía correspondiente en picojoules acumulada en el condensador de almacenamiento desde el grafeno independiente como una función de recolección de energía en segundos. La Figura 14 mide la carga en nanocoulombs acumulada en el condensador de almacenamiento desde el grafeno independiente como una función de recolección de energía en segundos. Se muestran los diferentes puntos de ajuste de corriente de 0,1, 0,2, 0,4 y 1,0 nanoamperes del STM. La Figura 15 muestra la carga medida en nanocoulombs acumulada en el condensador de almacenamiento desde el grafeno independiente como una función de recolección de energía en segundos. Nuevamente, se muestran los diferentes puntos de ajuste de 0,1, 0,2, 0,4 y 1,0 nanoamperes del STM. La Figura 16 ilustra la energía medida en picojoules acumulada en el condensador de almacenamiento desde el grafeno independiente como una función de recolección de energía en segundos. Se muestran los diferentes puntos de ajuste de corriente de 0,1, 0,2, 0,4 y 1,0 nanoamperes del efecto túnel.

Las Figuras 17A y 17B son ilustraciones esquemáticas de un circuito integrado 400 a base de silicio con potencialmente millones de elementos de recolección de energía (225). Este diseño cuenta con solo una fuente de alimentación 200 y un condensador de almacenamiento 275. Una primera trayectoria (marcada con guiones “- - -”) se produce cuando la corriente agrega carga a la membrana de grafeno,

mientras que la segunda trayectoria (marcada con puntos “•••”) se produce cuando la corriente agrega carga al condensador de almacenamiento fijo 275. El silicio tiene una matriz de pares de diodos 250 con un contacto de metal 225 entre cada par de diodos. Los contactos de metal 225 sirven como los elementos de recolección de energía del sistema mencionados anteriormente. Sobre el contacto de metal 225 se ubica el grafeno independiente 265, el cual está en constante movimiento y forma picos 286 y puntos mínimos 289 como se describió anteriormente. Cada electrodo pequeño 225 se utilizará para transportar carga hacia el condensador de almacenamiento 275 mientras la membrana de grafeno oscila. Este es un método para recolectar energía en la nanoescala con millones de ondas de grafeno, donde cada una contribuye con carga eléctrica hacia el condensador.

A fines ilustrativos y sin limitar esta divulgación a ninguna configuración, la forma de realización de las Figuras 17A y 17B son notables ya que los contactos 225A-225I (o hasta 225n donde n tiene cualquier cantidad de contactos) sirven como el punto de dirección de tráfico para que un condensador variable 120 se cargue y descargue de acuerdo con las formas de realización descritas anteriormente. La membrana 265 de grafeno que cubre los componentes esenciales puede ser utilizada como una primera placa de condensador 335, y el contacto de metal 225 puede ser utilizado como la segunda placa de condensador 235 para formar un condensador variable 120. La membrana puede cubrir la totalidad del circuito como se muestra o al menos los contactos de metal 225 para formar el condensador variable. Este condensador variable 120 opera de la misma manera que las formas de realización anteriores con respecto a la ondulación de la membrana 265 que se produce debido a la energía térmica del ambiente y la energía cinética vibracional causada por la membrana 265 y, por lo tanto, una de las placas de condensador se desplaza y luego regresa (mientras emite y almacena carga en ciclos). Los ciclos causan un cambio correspondiente en la carga del contacto de metal 225 de modo que cuando región capacitiva entre la placa de metal 225 y la membrana 265 tiene un incremento de distancia entre las placas, la carga recolectada en el contacto de metal se desplaza hacia al condensador de almacenamiento para recolección. Cuando la región capacitiva entre las placas 235, 335 del condensador variable 120 está en su punto más pequeño (es decir, las placas están en su punto más cercano durante un pico mínimo de onda), la carga capacitiva está en $C_{m\acute{a}x}$ con carga recolectada sobre el contacto de metal 235. En el ejemplo mostrado para el circuito integrado 400, durante los tiempos de onda pico en una región de ventana de la membrana 265 de grafeno,

los portadores de carga positiva recolectados sobre el contacto de metal se dirigen hacia el condensador de almacenamiento para que la corriente fluya en la dirección de una flecha ascendente (es decir, carga el condensador de almacenamiento fijo 275). Durante los tiempos de onda de punto mínimo en una región de ventana de la membrana 265 de grafeno, los portadores de carga positiva se recolectan adicionalmente sobre el contacto de metal donde los portadores de carga negativa se dirigen hacia la membrana 265 de grafeno para que la corriente fluya en la dirección de una flecha descendente (es decir, carga la fuente de tensión 200).

La Figura 17B muestra una vista lateral de una sección transversal de un circuito integrado que se muestra en la Figura 17A. Un circuito integrado en capas 400 incluye la fuente de tensión o batería 200 descritas anteriormente, un condensador de almacenamiento fijo 275 y un circuito de recolección formado en un sustrato, tal como, entre otros, una pastilla de silicio 205. La membrana independiente 265 se forma sobre la estructura y, en este ejemplo no limitativo, la membrana está elaborada a partir de grafeno. Los diodos 250 se forman en el sustrato de pastilla de silicio 205. Los soportes separadores 210 aseguran una separación apropiada y son fuente de energía térmica así como energía cinética de ambiente. La membrana 265 de grafeno independiente tiene la misma primera superficie 125A y segunda superficie 125B descritas anteriormente, donde la primera superficie sirve como una placa de condensador 335. La pastilla de silicio incluye un contacto de metal 225 que es otra placa de condensador 235 como se analizó anteriormente. En ciertas formas de realización que no limitan esta divulgación, la membrana 265 de grafeno independiente puede incorporarse en una cuadrícula 258 que define regiones de ventana para el emparejamiento con los contactos de metal al formar el condensador variable divulgado en la presente.

Se pueden incorporar numerosos componentes computarizados en todas las formas de realización de esta divulgación, y, en particular, un STM incluirá procesadores, memoria e instrucciones computarizadas para llevar a cabo las funciones de barrido, como se describe y muestra en la Figura 1B como la computadora 180. Se pueden utilizar otras computadoras junto al STM, y esta divulgación incorpora todos los procesadores, *hardware*, dispositivos de memoria, interfaces programables y similares que sean necesarios para alcanzar las metas de las formas de realización establecidas en la presente.

Ejemplo

La teoría cinética de Einstein sobre el movimiento browniano hizo posible

cuantificar la vasta y renovable fuente de energía térmica de la Tierra [E1]. Esta energía se encuentra en el movimiento aleatorio y agitado de cada átomo y molécula de líquido y gas. Estas vibraciones ruidosas de escala atómica se han observado mediante microscopía de barrido de efecto túnel (STM) [E2, E3]. Estas se utilizaron para inducir un movimiento regular en una osciladora mecánica cuando está acoplada a través de resonancia estocástica [E2]. Además, también se logró un ciclo de Carnot con una única partícula browniana y mostró seguir el marco de las termodinámicas estocásticas [E4, E5]. Aun así, la recolección de energía de este movimiento ha sido elusiva [E6, E7]. Para recolectar la energía térmica, históricamente se utilizó el efecto termoeléctrico. En la presente, la cantidad de energía recolectada es proporcional a la diferencia de temperatura entre los extremos de un material conductor. Una extensión innovadora de esta idea fue realizada recientemente por Cottrill *et al.* [E8]. Mediante el uso de grafeno, espuma metálica y octadecano, una gran área de alta conductividad térmica se combinó con un material de cambio de fase. Esto demoró la transferencia de calor y creó un gradiente térmico perpetuo vinculado al ciclo diurno.

Feynman, en su ciclo de conferencias de 1964, descartó la posibilidad de obtener un funcionamiento útil del movimiento browniano. Casi treinta años más tarde, Magnasco confirmó que si bien Feynman estaba en lo correcto, su máquina estaba inmersa en un baño térmico ideal, en cuyo momento las correlaciones eran irrisorias. Magnasco mostró que si el baño térmico tiene correlaciones de largo tiempo, este puede funcionar [E7]. Desde entonces, la termodinámica en sistemas con correlaciones de largo tiempo se ha convertido en un área activa de investigación. Por ejemplo, se ha demostrado teóricamente que tales sistemas producen exceso de calor sin violar la segunda ley de termodinámica [E9]. En este manuscrito, las primeras tres figuras demuestran que las membranas de onda 2D tienen movimiento con correlaciones de largo tiempo y que esto se debe a un efecto de muchos cuerpos. La última figura muestra que este nuevo tipo de movimiento térmico es lo suficientemente grande para tener un funcionamiento útil.

Una nueva investigación descubrió que los materiales bidimensionales (2D) e independientes son muy prometedores en el acceso de fuentes organizadas de energía vibracional. Estas membranas cristalinas tienen estructuras reticuladas e interconectadas fuertemente unidas, que generan de manera natural el movimiento coherente de miles de átomos [E10]. Por ejemplo, el grafeno independiente sin estirar (uno de tal material 2D) exhibe morfología de onda, con regiones adyacentes que alternan entre curvatura cóncava y convexa [E11]. Las ondas de tamaño nanométrico

son el resultado del acoplamiento entre el estrechamiento sutil de los enlaces fuertes de carbono del grafeno mientras se dobla [E12] y el acoplamiento de electrón-fonón [E13]. Además, estas membranas atómicas cambian constantemente entre una gran cantidad de configuraciones morfológicas equivalentes de onda y de baja energía [E14], que son visualmente similares al movimiento de la superficie del océano. Se produce un proceso dinámico clave cuando la curvatura local de las ondas se invierte espontáneamente de cóncava a convexa: la deformación reticulada consiguiente comunica la nueva orientación de la onda con otras cercanas, lo que forma una red de retroalimentación estocástica [E15, 16]. Entender estas propiedades complejas y dinámicas es crucial para recolectar energía térmica a partir de grafeno independiente y otros materiales 2D.

En este estudio, los investigadores confirman que las membranas de grafeno independiente de ondas exhiben movimiento coherente, y demuestran la recolección de la energía cinética colectiva (ver Material complementario para materiales y métodos) [E17]. Un modelo cristalino simplificado de grafeno independiente que presenta múltiples ondas cóncavas y convexas se muestra en la Figura 18(a). Una punta polarizada del STM, montada sobre el extremo de un escáner de tubo piezoeléctrico, se acerca a la membrana desde abajo (no lo muestra el STM). Una serie de tiempo típica para la altura medida por STM tomada del centro del grafeno se muestra en la Figura 18(b). Nótese la magnitud del movimiento observado cuando se compara con corrugaciones atómicas típicas de 0,01 y con una medida de grafeno rígido que se muestra en la posición de altura cero en la Figura 18(b). Se calculó la distribución de probabilidad de tiempo de espera para este conjunto de datos. Se realiza de acuerdo con un exponencial simple ($r^2 > 0,995$), que lo identifica como un proceso de Poisson. La corriente de efecto túnel medida al mismo tiempo, que se muestra en la Figura 18(c), permaneció muy por encima de cero y muy por debajo de la saturación de amplificador, incluso cuando la altura de la membrana había cambiado significativamente. Por lo tanto, se demostró un seguimiento exitoso de su movimiento. Se descubrió que la contribución de las fluctuaciones de la corriente de efecto túnel a las variaciones en la distancia de punta-muestra es insignificante en comparación con la contribución de las fluctuaciones de la altura de membrana. Además, se determinó que el valor absoluto del coeficiente de correlación cruzada entre la altura medida y la corriente de efecto túnel fue menor de 0,01.

Un objetivo de este trabajo es demostrar que las fluctuaciones a gran escala ocurren en grafeno independiente en comparación con grafeno rígido. Para aislar

estas fluctuaciones de cualquier desviación general, el investigador proporcionó un filtro Wiener de paso bajo a los datos originales, lo que produjo la línea ajustada que se muestra en la Figura 18(b). El resultado luego de la sustracción de la desviación produjo una fluctuación de altura general que permaneció en ~ 5 nm. A fines de comparación, también se muestra un trazado típico de STM adquirido a partir de una muestra rígida (es decir, grafeno monocapa cultivado en SiC). En trabajos previos, los investigadores observaron dos autocorrelaciones de altura y tiempo en alrededor de 10% de los conjuntos de datos sin procesar de tiempo-altura del STM [E14]. En la presente, los investigadores muestran que las correlaciones de tiempo están a menudo escondidas dentro de cambios de altura a gran escala, y que precisan de sustracción de fondo para ser evidentes. A partir de la serie de altura-tiempo $z(t)$ que se muestra en la Figura 18(d), los investigadores computan su función de autocorrelación de altura ACF (ver Material complementario para materiales y métodos), que se muestra en la Figura 18(e). Los grandes cambios de altura y el ACF oscilatorio son evidencia de un movimiento significativo, coherente y colectivo de átomos en la membrana. De hecho, no es físicamente posible para un átomo de carbono monocatenario moverse tan lejos sin átomos vecinos que se muevan junto a este. La densidad espectral de energía PSD de $z(t)$ se muestra en la Figura 18(f). Tiene un pico dominante de alrededor de 5-10 mHz, que está muy por debajo del modo de vibración fundamental del grafeno independiente en el rango GHz [E18]. En la siguiente sección se analiza qué es lo que causa esta frecuencia sorprendentemente baja que domina el gran movimiento coherente del grafeno.

La teoría de la elasticidad proporciona una frecuencia de flexión de ~ 10 GHz para una onda típica que mide 10 nm por 10 nm, o doce órdenes de magnitud mayores que el resultado experimental (ver Material complementario para teoría de elasticidad para grafeno independiente doblado) [E17]. La diferencia surge debido al largo tiempo de escape necesario para superar la barrera de energía entre las orientaciones de onda cóncavas y convexas [E18]. Para confirmar el movimiento organizado de las ondas, los investigadores realizaron simulaciones de dinámica molecular (MD) en una membrana de grafeno cuadrada doblada previamente (15×15 nm²) en vacío. La muestra contenía 10 000 átomos de carbono con un límite fijo y sin punta del STM (ver Material complementario para simulaciones de dinámica molecular) [E17]. Una instantánea de la membrana en una geometría convexa se muestra en la Figura 19(a). El movimiento del átomo central con 3×10^6 etapas de tiempo (1 por fs) a una alta temperatura (3000 K) muestra la altura que fluctúa por

encima y por debajo del límite fijo en la Figura 19(b). Se utilizaron las temperaturas altas para acelerar las simulaciones mediante el uso de dinámicas aceleradas por temperatura [19]. En la presente 1 ns corresponde a alrededor de 1 ms. Mientras que la escala de tiempo para las simulaciones MD no es la misma que para los experimentos STM, los investigadores descubren que todos los casos de curvatura de onda contienen dinámicas de inversión similares, independientemente de la escala de tiempo. El movimiento aleatorio genera numerosas inversiones de curvaturas desde la parte superior del límite fijo hacia la parte inferior. La serie de altura-tiempo $z(t)$, que se muestra en la Figura 19(b), se utilizó para computar su función de autocorrelación ACF, que se muestra en la Figura 19(c). Muestra una disminución de las oscilaciones similares a aquellas observadas en el experimento. La densidad espectral de energía PSD de $z(t)$ se muestra en la Figura 19(d). Se pueden observar unos pocos picos de frecuencia baja dominantes. Por lo tanto, las dinámicas internas complejas de la membrana de grafeno, conllevan naturalmente a un movimiento de baja coherencia con autocorrelaciones de altura de dos tiempos similares a los datos de STM.

La simulación de MD muestra que las dinámicas de onda se adaptan al movimiento en un potencial de doble pozo con un tiempo de escape largo. La membrana completa se mueve de manera coherente de convexa a cóncava. Nótese que, en la simulación, los átomos del límite están fijos y la muestra se pretensa mientras que el límite real de una onda es otra onda que influye la dinámica interna a través de la deformación reticulada. Sin embargo, se ha demostrado que el grafeno independiente sin estresar forma ondas de manera espontánea [E12]. Además, el acoplamiento de electrón-fonón genera tensiones que producen pandeo y ondas [E20]. Para confirmar adicionalmente los resultados experimentales y obtener mayor conocimiento sobre las dinámicas complejas de estas transiciones, los investigadores también modelaron el grafeno como una membrana elástica de masas de punto. Estas representan ondas en una cuadrícula hexagonal, cada una de las cuales está sujeta a una fuerza ascendente o descendente aleatoria. Esta última surge del acoplamiento entre las ondas mediante giros de dos estados que interactúan de manera antiferromagnética. Mientras que las masas de tamaño de punto satisfacen la segunda ley de Newton, los giros de dos estados intercambian energía en un baño térmico y se activan de acuerdo con la actualización de Glauber similar a Monte Carlo [E15, E16]. En la presente, los giros modelan las interacciones internas que promueven la configuración no plana: acoplamiento de electrón-fonón así como el efecto de la multiplicidad de unión química [E12, E13, E20]. Ver Material complementario para

modelo de membrana giratoria 2D antiferromagnética [E17].

Por lo tanto, los datos de STM, junto con la simulación MD y el modelo de membrana elástica giratoria antiferromagnética, confirman que las membranas de grafeno independiente de ondas exhiben movimientos colectivos coherentes. En esta sección, los investigadores demuestran que este movimiento puede explotarse para generar una corriente eléctrica. Existen cuatro métodos conocidos para recolectar energía eléctrica de fuentes vibratorias: método electromagnético, piezoeléctrico, magnetostrictivo y electrostático. Los investigadores utilizan la electrostática, a través del efecto de capacitancia variable, al incorporar la unión de punta-muestra del STM en un circuito electrónico. Hasta donde se conoce, este tipo de circuito nunca antes se ha unido a un STM. Para lograr esto, el sistema primero se personalizó para aislar de manera eléctrica la muestra del STM del resto de la cámara y del suelo [E21]. Un alimentador eléctrico de vacío permitió el acceso a la muestra desde fuera de la cámara. Este circuito inusual [E22, E23] se desarrolló en principio como una máquina de diferentes capacitancias y eficacia ultraalta para generar energía eléctrica cuando se alimenta por fuentes eólicas o humanas. Mediante el uso de diodos, el circuito separa el trabajo realizado cuando se agrega carga al condensador variable del trabajo realizado cuando se elimina carga del condensador variable [E22, E24]. La unión de punta-muestra del STM es el condensador variable para el circuito.

Para mayor claridad de la exposición del circuito eléctrico, los investigadores ignoran el efecto túnel de electrones entre la punta y la muestra (ver Material complementario para recolección de energía de vibración durante efecto túnel) [E17]. Además, los investigadores limitan el análisis a un ciclo de vibración, donde la primera muestra se aleja de la punta estacionaria del STM y luego regresa a su posición original. Mientras la distancia de punta-muestra $d(t)$ aumenta, la capacitancia de la unión disminuye. Para una tensión de polarización constante, la carga estática total almacenada en la unión de punta-muestra debe disminuir con capacitancia decreciente. Por lo tanto, mientras la distancia de la punta-muestra aumenta, el exceso de carga positiva fluye desde la punta y se mueve hacia atrás a través del circuito hacia la fuente de alimentación, a través del amperímetro que lo registra, a través del diodo 2, y hacia la muestra. Si la fuente de alimentación es una batería recargable, entonces se recarga durante este ciclo [24]. Es esencial reconocer que la cantidad de trabajo realizado durante esta parte del ciclo no es impulsada por la batería, sino por la fuerza que separa la muestra de la punta, al superar la atracción electrostática (por ejemplo, eólica, humana o, en este caso, térmica). Nótese, la corriente que fluye a

través del diodo 2 (D2C) se utilizó para cargar un condensador (no mostrado), lo que permite el almacenamiento de la corriente recolectada.

Durante la otra mitad de este ciclo, mientras la distancia entre la punta-muestra disminuye y la capacitancia incrementa, la carga total almacenada en la unión de punta-muestra incrementará. La carga ahora fluye a través del diodo 1, y no a través del amperímetro. La energía gastada en esta mitad del ciclo por la fuente de alimentación se volvió a alimentar durante la otra mitad del ciclo (analizado anteriormente). Para este circuito, la fuente de alimentación no desempeña ninguna función en el intercambio neto de energía con el sistema [E23].

Es posible que el circuito de retroalimentación del STM alimente energía al sistema al alejar la punta del STM de la muestra, lo que genera un D2C. Los investigadores evitaron esto al recolectar datos sin control de retroalimentación. A estos fines, los investigadores retiraron gradualmente la punta del STM de la muestra mediante una etapa de movimiento brusco hasta que la distancia fue demasiado grande para que los electrones realizaran un efecto túnel a través de la barrera de vacío. En esta posición, para asegurar que la retroalimentación del STM no mueva la punta del STM, los investigadores incrementaron la corriente de punto de ajuste (SPC) al máximo (5 o 50 nA). Luego, los investigadores aumentaron la tensión de polarización y observaron sistemáticamente una corriente de flujo dependiente del tiempo con picos que fluye a través del diodo 2. Se presentan tres resultados diferentes de tensión de polarización, lo que muestra que la corriente aumenta con la tensión de polarización. La dependencia es más clara donde se muestra la corriente promedio para una gran cantidad de conjuntos de datos. Estos resultados son consistentes con las expectativas que una tensión de polarización creciente alimenta carga a una unión de punta-muestra y condensador, lo que aumenta la corriente inducida de manera electrostática. Los investigadores repitieron este experimento con numerosas puntas del STM, en diferentes ubicaciones de la muestra y con diferentes muestras. Además, los investigadores descubrieron que cuando se utiliza una muestra de grafeno rígido, se obtienen tanto corriente inducida por cero o la corriente de punto de ajuste para todas las tensiones. El conjunto de datos de grafeno rígido también confirma la ausencia de emisión de campo de electrones, lo cual es razonable dada las temperaturas y tensiones relativamente bajas utilizadas en los experimentos.

Hay diversos aspectos notables de la demostración de recolección de energía. La energía cinética colectiva del pando, que se convierte en carga eléctrica almacenada, es igual a la temperatura local. Todos los otros métodos de recolección

de energía térmica, tal como el efecto termoeléctrico, derivan su energía de una diferencia de temperatura. Además, el método elimina el circuito de retroalimentación del STM de la medición, que ajustaría continuamente la posición de la punta del STM para mantener la distancia punta-muestra deseada y minimizar eficazmente el movimiento de la muestra. Con la retroalimentación del STM incapaz de mover la punta del STM, el rol del grafeno independiente móvil es aislado y cuantificado. En consecuencia, en la configuración, la punta del STM funcionó solo como un electrodo de metal estacionario cercano. Esto sugiere que un circuito integrado podría reemplazar la circuitería de punta-diodo del STM lo que genera potencial para adaptabilidad. Finalmente, la configuración prueba que las propiedades dinámicas del grafeno independiente persisten incluso bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado de manera externa. Y, con mayor importancia, el movimiento térmico organizado del grafeno y el acoplamiento electrostático son lo suficientemente grandes para hacer posible la recolección de energía [E25]. Con mayor especificación, cuando la onda de grafeno se aleja de la punta del STM, el trabajo realizado para superar la atracción electrostática entre la punta y la muestra deriva de la fuerza térmica detrás de este movimiento. El circuito de diodo recolecta solo esta energía.

En esta configuración, la membrana de grafeno cargada es similar a una membrana de micrófono cargada. Mediante el uso del circuito descrito anteriormente, los investigadores convierten la energía cinética colectiva de las cargas móviles en una fuente de corriente DC. Con grafeno, la energía cinética es su energía térmica kBT , en vez de presión de sonido. El poder mecánico total de una onda térmica se ha estimado en 1 pW/nm^2 [E18], o alrededor de 400 pW/onda [E26]. Este valor es consistente con el descubrimiento de 30 pA de corriente inducida a 10 V , si los investigadores asumen un área efectiva de 50 nm por 50 nm . Finalmente, la transferencia de energía se alimenta mediante acoplamiento entre las cargas en el grafeno independiente y las cargas dentro de la punta del STM (es decir, un coeficiente de atenuación eléctrica) [E27, E28]. Este fenómeno es similar a un frenado regenerativo. La atenuación elimina la energía cinética del grafeno independiente, lo que es equivalente a disminuir la temperatura local. Incluso a una temperatura reducida, sin embargo, la onda continuará moviéndose ya que sus modos de energía baja están disponibles en un rango de temperaturas muy amplio. Por ejemplo, las mediciones de movilidad de electrones muestran que los fonones de flexión son el mecanismo de dispersión dominante, incluso en temperaturas tan bajas como 10 Kelvin [E29]. Por supuesto, la temperatura de onda individual no descenderá tanto. El

grafeno tiene una conductividad térmica extraordinaria, al menos diez veces mayor que la del cobre [E30]. La muestra está conectada de manera térmica a un ambiente externo a través de un soporte mecánico, para el que calor fluya. Esta configuración no está en equilibrio térmico, sino que es un sistema abierto de estado estable.

Mientras que la energía recolectada por la configuración es baja, su densidad de potencia es cuantiosa, dado que excede la eólica ($\sim 1 \text{ W/m}^2$) y la solar ($\sim 10 \text{ W/m}^2$). Además, esta nueva fuente térmica puede recolectarse de manera continua. Un beneficio adicional de los generadores electrostáticos es su tamaño (ver Material complementario para diseño de pastilla). En comparación con los generadores electromagnéticos, los generadores electrostáticos mucho menos comúnmente utilizados son al menos 100 veces más pequeños. Esto ofrece una ventaja significativa en la alimentación de pequeños dispositivos, tales como aquellos necesarios para el Internet de las Cosas [31]. Los nodos de sensores inalámbricos con diseños de circuitos modernos, por ejemplo, operan a un ciclo de trabajo muy bajo, al consumir solo 35 pW de energía en el modo de espera y 226 nW de energía en el modo activo [32].

En resumen, la dinámica correlacionada de las fluctuaciones de escala atómica de una membrana de grafeno independiente se estudió mediante microscopía de barrido de efecto túnel en modo punto. Mediante el uso de simulaciones MD y el modelo de membrana elástica giratoria antiferromagnética, los investigadores mostraron que las ondas invierten su curvatura de manera natural, en cuyo momento miles de átomos se mueven de manera coherente. Las medidas revelan que el movimiento fuera del plano de la membrana es extremadamente grande. Su movimiento, movimiento browniano organizado, tiene origen en la energía térmica y las interacciones entre las ondas, que forma naturalmente una red estocástica de retroalimentación. Los investigadores han convertido exitosamente esta energía cinética significativa en una corriente eléctrica para almacenamiento. La recolección de energía de vibración es una fuente nueva y emocionante de energía renovable derivada de temperaturas ambiente.

Materiales y métodos

Para este estudio, grafeno monocapa (una muestra en la que menos de 10% es grafeno multicapa) se cultivó comercialmente en Ni. Luego, se transfirió directamente a una cuadrícula ultrafina de cobre de malla 2000 que presentaba una red de agujeros cuadrados (cada uno de $7,5 \text{ }\mu\text{m}$ de ancho) y soportes de barra (cada uno de $5 \text{ }\mu\text{m}$ de ancho). Las imágenes de microscopio electrónico de barrido

confirmaron 90% de cobertura de la cuadrícula. Se utilizó una aspiradora ultraalta Omicron (UHV), STM a baja temperatura (presión de base 10–10 mbar) que se hizo funcionar a temperatura ambiente para las mediciones de altura-tiempo. La película de grafeno se montó hacia la placa de muestra en separadores, lo que permitió que la punta de STM se acercara a través de los agujeros de la cuadrícula. Esto proporcionó un soporte estable para el grafeno mientras se encontraba bajo la influencia atractiva electrostática de la tensión de polarización. Para encontrar el centro de la membrana, los investigadores movieron la punta del STM lateralmente hasta que encontraron el borde de la cuadrícula de cobre, luego movieron la punta hasta el centro. La totalidad de la cámara de STM reposa sobre un sistema de aislamiento vibracional activo y supresor de ruidos. Se alimenta mediante el uso de un banco de batería masivo con una conexión a tierra aislada para lograr ruido mecánico y eléctrico excepcionalmente bajo.

Los datos para este estudio se adquirieron mediante el uso de puntas de STM elaboradas de manera interna, mediante el uso condiciones de efecto túnel de corriente constante (retroalimentación activada), con el escáner de topografía ajustado en modo punto a punto (sin barrido x o y). Los investigadores hicieron funcionar el STM en el modo de barrido, pero el movimiento del grafeno independiente es tan rápido que las imágenes resultantes son muy borrosas ara ser útiles. Por esta razón, el grupo fue el primero en adquirir datos en modo punto a punto. Estos conjuntos de datos muestran las fluctuaciones de altura en el tiempo para una única ubicación. Luego, los investigadores analizaron los conjuntos de datos como eventos de caminata aleatoria de una dimensión, y descubrieron que el movimiento de la membrana es extremadamente ruidoso. Incluso si se aplican 50 voltios entre el grafeno y la punta del STM, el grafeno continúa moviéndose. Los investigadores adaptaron el sistema para permitir el registro continuo de datos de 16 bit para la corriente de efecto túnel real y la altura de la punta a una velocidad de 800 Hz durante un período de tiempo de 104 s, que proporcionó 8×10^6 puntos de datos por canal. Los investigadores monitorearon independientemente la desviación de la punta-muestra de STM y descubrieron que es no estocástica, con una velocidad menor de 1 nm/h. Las investigadores recolectaron datos de múltiples membranas con condiciones de imágenes fijas que abarcaban varias órdenes de magnitud en corriente de efecto túnel (0,01–10 nA) y tensión de polarización (0,01–10 V), todas a temperatura ambiente. Al tomar las imágenes de la superficie del grafeno con resolución atómica, los investigadores observaron solo grafeno monocapa que estaba libre de defectos en

una escala de micrómetros.

Para calcular la ACF de altura, los investigadores comenzaron con $z(t)$ mostrado en la Figura 1(d) como una matriz de valores de altura indexados de 1 a N y computaron: en donde t se indexa a partir de 0. Esta expresión se denomina función de autocovarianza, ya que $ACF(0)$ es la varianza de la primera mitad del conjunto de datos. Para calcular la densidad espectral de potencia, los investigadores utilizaron el teorema de Wiener-Khinchin y computaron la transformada de Fourier de $ACF(t)$.

Teoría de elasticidad para grafeno independiente doblado

Para modelar las oscilaciones a baja frecuencia, los investigadores utilizaron primero la teoría de la elasticidad, que proporciona la frecuencia de flexión más baja, donde D , ρh , k son rigidez de flexión, densidad de masa de área, y vector de onda permitido, respectivamente. Para una onda de grafeno de 10 nm por 10 nm, $f_0=10\text{GHz}$, que es doce órdenes de magnitud más alta que la frecuencia observada. La física ausente en este modelo es la morfología de onda conocida de la membrana. Para incorporar esto, los investigadores imaginaron primero comprimir el grafeno, lo que permitiría que se formen ondas debido a los enlaces carbono fuertes y esencialmente no comprimibles. Con fines ilustrativos, en la Figura 5(a) se muestra una sección transversal estrecha de una onda de grafeno después de la compresión en el plano. El grafeno comprimido se curvará hacia arriba o hacia abajo porque sus enlaces carbono son altamente flexibles. A partir de la forma geométrica de una onda de 20 nm de ancho típica, la relación entre la deformación por compresión y la altura se muestra en la Figura 5(b). Una onda tiene dos configuraciones de baja energía equivalentes, una cóncava y una convexa, que forman de manera natural un perfil de energía potencial de doble pozo, como se muestra en la Figura 5(c). La barrera de energía es proporcionada por $\alpha \varepsilon^2$, donde α es una constante de energía, calculada como $\alpha \varepsilon^2=1,2 \text{ eV}$ para una resistencia de 0,1%, y $\varepsilon=(L_0-L)/L_0$ es la deformación compresiva [E18]. La onda invierte su curvatura al cruzar la barrera al índice de Kramer: . A partir de la geometría de una onda típica, los investigadores descubrieron que $\alpha \varepsilon^2=0,7\text{eV}$, lo que reduce la frecuencia de flexión en un factor de 10^{12} . En general, la formación de ondas reduce exponencialmente la frecuencia de flexión esperada a partir de la teoría de la elasticidad. La velocidad de transición de inversión de la curvatura en comparación con la altura de la onda se muestra en la Figura 5(d). Debe notarse que la velocidad abarca más de quince décadas a medida que la altura de la onda varía por solo un angstrom.

Simulaciones de dinámica molecular

Para confirmar el movimiento organizado de las ondas, los investigadores realizaron simulaciones de dinámica molecular (MD) en una membrana de grafeno cuadrada doblada previamente ($15 \times 15 \text{ nm}^2$) que contenía 104 átomos de carbono con átomos del límite fijados y sin punta de STM. Las simulaciones se realizaron al vacío y se llevaron a cabo en LAMMPS mediante el uso de potencial AIREBO. Se usó un termostato Nosé-Hoover para mantener una temperatura constante y las ecuaciones de movimientos se integraron mediante el uso de una etapa de tiempo de 1 fs. El sistema se equilibró primero durante 3,0 ns, comenzando con la configuración inicial. En el análisis se usó la trayectoria posterior, desde una ejecución de producción de 15,0 ns. Las temperaturas altas aceleran las simulaciones mediante el uso de dinámicas aceleradas por temperatura [19].

Modelo de membrana giratoria 2D antiferromagnética

Este modelo proporcionó confirmación adicional del movimiento organizado de las ondas. Los investigadores consideraron las masas de punto ubicadas en los nodos de una cuadrícula hexagonal que interactúan a través de resortes harmónicos. En cada sitio, la masa se acopla linealmente a un giro de Ising de dos estados. Los giros se acoplan de manera antiferromagnética. El Hamiltoniano es: donde σ_{ij} representa los valores de los giros, altura y momento, respectivamente, para masa m ubicada en el sitio $iiii$ de la cuadrícula hexagonal mostrada en la Figura 6. La dinámica del sistema consiste en ecuaciones de Hamilton de movimiento para (u_{ij}, p_{ij}) , y dinámica estocástica a temperatura TT para σ_{ij} , ver [E15,E16] para más detalles.

Como se mencionó en el texto principal, la dinámica del giro imita el efecto del acoplamiento de electrón-fonón y la multiplicidad de uniones químicas para el carbono [E12,E13,E20]. Las ecuaciones de movimiento para las posiciones de las masas se integran mediante el algoritmo de Verlet, que incluye una fuerza externa $f_{f\sigma\sigma iii}$ que actúa sobre la masa en el sitio $iiii$ (ver Hamiltoniano). En cada etapa de tiempo, un sitio de cuadrícula se selecciona aleatoriamente; su giro da vueltas de acuerdo a la versión de Glauber de la simulación de Monte Carlo, con velocidad de probabilidad [E16]: donde δ es un parámetro que establece la escala de tiempo característica para las vueltas de giro y T es la temperatura del baño medida en unidades de energía [E16]. En simulaciones numéricas, la etapa de tiempo es $1/(\delta N)$, donde N es la cantidad de nodos de cuadrícula. Los resultados mostrados en la Figura 3 del texto principal se produjeron mediante el uso de la altura de una masa de punto en la posición central del sistema, de manera análoga a los experimentos de STM.

Recolección de energía de vibración durante el efecto túnel

En contraste con los resultados presentados en el texto principal, en la presente los investigadores consideraron el efecto túnel de los electrones entre la punta de STM y la muestra en el circuito electrónico mostrado en la Figura S3(a). La unión de punta-muestra forma un condensador permeable, ya que la carga puede pasar a través de la barrera de vacío. En consecuencia, la corriente que fluye a través del diodo 2 tiene dos orígenes posibles. Uno es debido a la capacitancia variable de la unión de punta-muestra (como se analiza en el texto principal), mientras que la otra se debe a fluctuaciones en la corriente de efecto túnel. Estos dos términos se suman para proporcionar la siguiente expresión:

Donde ϵ_0 es la permitividad de espacio libre, A es el área eficaz de la unión capacitiva de punta-muestra, f es la frecuencia de la oscilación de onda, $\Delta d(t)$ es el cambio en la distancia entre la punta y la muestra, d_0 es la distancia de punto de ajuste de efecto túnel, V_{stm} es la tensión de polarización aplicada a la punta de STM, I_{stm} es la corriente de punto de ajuste de efecto túnel (SPC), y k es el número de onda de efecto túnel. Cuando la distancia punta-muestra es 2 nm o menor, domina el término de efecto túnel; para distancias más largas, domina el término de capacitancia variable.

Cuando el STM tiene un efecto túnel, este arreglo se puede usar para cuantificar la energética de actividades dinámicas a escala atómica. Al hacer esto, es importante destacar que la corriente que fluye a través del diodo 2 depende del SPC. Esto se muestra en la ecuación anterior, así como en los datos en la Figura S3(b). Parte del D2C es un resultado del circuito de retroalimentación que trabaja para mantener una corriente de efecto túnel constante. Las fluctuaciones en la corriente de efecto túnel hacen que el circuito de retroalimentación mueva la punta en un esfuerzo por mantenerla en d_0 . Estas fluctuaciones ocurren a una frecuencia alta donde el tiempo de respuesta del circuito es un factor limitante debido a la capacitancia parásita. Como resultado, cuando la corriente deja de fluir a través del diodo 2, este se descarga con una constante de tiempo larga. Antes de que el D2C tenga tiempo para disminuir considerablemente, la corriente de efecto túnel variable ya alcanza el diodo 2 nuevamente. El resultado mostrado en la Figura S3(b) es independiente de la tensión de polarización aplicadas y la configuración de ganancia de retroalimentación. Los investigadores también probaron el circuito con diodos Ge y diodos Schottky, que se desempeñan mejor a frecuencias más altas. Sin embargo, sufren de corriente de fuga inversa, que reduce la carga recolectada total.

Cuando se compara el grafeno independiente con grafeno rígido, el valor

promedio del D2C es el mismo, mientras que la desviación estándar difiere considerablemente, como se muestra en la Figura S3(c). Cuando el SPC es 100 pA, el D2C fluctúa en alrededor de 10 pA para el grafeno independiente, pero solo en alrededor de 0,1 pA para el grafeno rígido. A medida que aumenta el SPC, la desviación estándar aumenta para ambos debido al calentamiento de la muestra. Sin embargo, el tamaño de las fluctuaciones se mantiene aproximadamente 100 veces más grande para la muestra independiente. En promedio, la retroalimentación es exitosa para registrar el movimiento del grafeno independiente, pero no es exitosa instantáneamente. Se puede extrapolar la fluctuación de corriente de grafeno independiente a corriente de efecto túnel cero y predecir que las fluctuaciones aun contribuirán alrededor de 20 pA.

Diseño de pastilla

[0042] No es práctico usar un STM para las aplicaciones. Por lo tanto, en la presente se presenta un diseño a base de pastilla. En la vista superior de la Figura 17A, la secuencia de cuadrados pequeños 235 representa contactos metálicos en lugar de la punta de STM. Los diodos 250 se forman en cada lado para regular el flujo de carga. El grafeno 265 se coloca sobre la parte superior de esta estructura mediante el uso de separadores, que se pueden observar más claramente en la vista lateral. Este diseño utiliza dos condensadores (200, 275). Un primer condensador (265, 335) carga el grafeno y permite que la carga sea trasladada de ida y vuelta, mientras que el segundo condensador (275) almacena la carga recolectada. Los diseños de pastilla descritos en las Figuras ilustran ejemplos que no son limitativos de la divulgación. Por ejemplo, los sustratos pueden incluir no solo silicio, sino también dióxido de silicio, carburo de silicio, arseniuro de galio, sustratos flexibles, circuitos impresos flexibles, sustratos orgánicos, electrónicos orgánicos, o cualquier sustrato capaz de tener diodos formados dentro del sustrato.

Las Figuras 21A-21R ilustran procedimientos de ejemplo, que no son limitativos de la divulgación, para formar un dispositivo de acuerdo con la presente divulgación con las siguientes etapas de fabricación de haz de electrones:

Figura 21A. Comenzar el proceso de fabricación con una pastilla de silicio de 4" <100> de 500 micrómetros de espesor;

Figura 21B. Oxidar la pastilla para establecer un espesor de capa de SiO₂ especificado (por ejemplo, 300 nm);

Figura 21C. Centrifugar (*spin-coat*) el lado posterior de la capa protectora de la pastilla y hornear suavemente; girar EL-6 MMA a 5000 rpm, hornear 4 min;

pastilla/pieza soportada sobre los lados durante el horneo del lado posterior para prevenir contaminación del lado frontal;

Figura 21D. *Spin coat* la capa protectora en el lado frontal de la pastilla y hornear/endurecer; CSAR 62 diluido 1:1 en anisol, girar a 5000 rpm, hornear 4 min;

Figura 21E. Alinear la máscara positiva 1 con el lado frontal de la pastilla y exponer el recubrimiento de la capa protectora a haz de electrones; 300 uC/cm² a 50 keV;

Figura 21F. Desarrollar capa protectora positiva en ambos lados de la pastilla, inspeccionar y hornear capa protectora; 20 seg de n-amil acetato, 15 seg de MIBK:IPA 1:3, enjuagar con IPA; seguido de desencolado de plasma por O₂ (30 s a 75 W, es necesario verificar otras características en grabador de plasma O₂ Nano); espesor de capa protectora: 100 nm (CSAR 62); ancho de patrón: 4 µm;

Figura 21G. Grabado húmedo isotrópico estampado de la capa de SiO₂ con BOE; BOE 5:1, 3 min 30 seg; inspección posgrabación; espesor capa protectora/óxido: >4.000 Å; mantener tableta húmeda al colocarla en BOE;

Figura 21H. Eliminar las cenizas de la capa protectora restante (nota de HC: Se considera que esto haría crecer nuevamente algunos nm de óxido y puede inhibir el grabado en la siguiente etapa. Se podría eliminar la capa protectora en eliminador PG y acetona, seguido de enjuague con IPA); especificaciones: Limpieza/eliminación con plasma O₂ de la fotoprotección; 256 W; 0,3 Torr; flujo de O₂: 220 sccm; 15 min; Inspección posterior a limpieza; espesor de óxido: > 3.000 Å; perfilómetro Dektak 3030

Figura 21I. Grabado anisotrópico en húmedo por etapas el silicio hasta profundidad especificada. La profundidad del grabado es como un parámetro crítico de diseño/fabricación para establecer el espacio grafeno/punta deseado; especificaciones: (todas estas se deben volver a escalar para trabar con 50 mL de agua para haz de electrones); Mezclar la mezcla de tensioactivo/agua, 550mg de Triton X-100 en 5,5 litros de agua; Mezclar la mezcla de KOH/agua jabonosa, 2000 gramos de pélets de KOH en 5,5 litros de agua; calentar el manto de solución hasta 50°C; grabar la pastilla durante ~15 (TBD) min (~2.000 Å/min), enjuagar por descarga, y SRD; inspeccionar después del grabado para una profundidad de > 14.000 Å; repetir cuantas veces sea necesario para lograr la profundidad;

Figura 21J. Perfilar la pastilla para inspeccionar características; medir el espesor del grabado de silicio: Perfilómetro Dektak 303; nativo con respecto a la zanja: >6.000 Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto a la punta: > 0

Figura 21K. Oxidar térmicamente la pastilla para formar una capa aisladora de SiO₂, es probable que el espesor de la capa de SiO₂ sea un parámetro crítico para establecer el espacio grafeno/punta deseado. Especificaciones: Insertar la pastilla en el horno a 800°C en atmósfera de N₂ durante 30 min; atmósfera de O₂ a 1.100°C durante 332 (TBD) min; atmósfera de N₂ a 1.100°C durante 5 min; atmósfera de N₂ a 900° durante 45 min; medir el espesor del óxido, elipsómetro Gaertner, 1.000 – 1.600 (TBD) Å; 3.000 Å toma 5 horas 31 min 23 seg; consume 1.320 Å de silicio, por lo tanto el crecimiento es un aumento de 1.680 Å; 4.482 Å en óxido inicial; consume 1.972,4 Å de silicio por lo tanto 2.510,2 Å crece en la parte superior; la diferencia es 830 Å;

Figura 21L. Perfilar la pastilla antes de la deposición de metal; especificaciones: profilómetro Dektak 303; nativo con respecto a la zanja: >4.400 Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto a la punta: > 1.400 Å (óxido con respecto a punta de silicio oxidada no grabada);

Figura 21M. *Spin coat* la capa protectora a haz positivo de electrones en el lado frontal de la pastilla; especificaciones: CSAR 62 diluido 1:1 en anisol, potencialmente centrifugado y horneado múltiples veces para obtener el espesor deseado;

Figura 21N. Alinear el patrón de máscara positiva 2 con respecto al lado frontal de la pastilla y las marcas de referencia de alineamiento establecidas por la máscara positiva 1, exponer la capa protectora; especificaciones: 300 µC/cm², 50 keV;

Figura 21O. Desarrollar capa protectora positiva y eliminar material no desarrollado; especificaciones: 20 s de n-amil acetona, 15 seg de MIBK:IPA 1:1, enjuague con IPA;

Figura 21P. Depósito de vapor de cromo/oro. El espesor del metal puede ser un parámetro crítico en el establecimiento del espacio grafeno/punta deseado; bombear la cámara hacia abajo dos horas (laboratorio Churchill): 1x10⁻⁶ torr 50 Å de Cr, 500 Å de Au;

Figura 21Q. Eliminar capa protectora por haz de electrones; remojar en 50:50 de removedor PG: acetona dos horas, baño ultrasónico con acetona, enjuagar con IPA;

Figura 21R. Inspección final de la pastilla fabricada; especificaciones: Medir perfil con punta piramidal de silicio oxidado: Perfilómetro Dektak 3030; nativo con respecto al metal en la zanja: >3.900 Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto al metal en la punta: >900 Å (óxido con respecto a punta de silicio oxidada no grabada).

Las Figuras 22A-22R ilustran procedimientos de ejemplo, que no son limitativos de la divulgación, para formar un dispositivo de acuerdo con la presente divulgación con las siguientes etapas de fabricación de fotolitografía:

Figura 22A. Comenzar el proceso de fabricación con una pastilla de silicio de 4" <100> de 500 micrómetros de espesor;

Figura 22B. Oxidar la pastilla para establecer un espesor de capa de SiO₂ especificado (por ejemplo, 300 nm);

Figura 22C. *Spin coat* el lado posterior de la capa protectora de la pastilla y hornear suavemente; AZ-MiR 703, espesor de 1,08 micrómetros, 5.000 rpms; hornear suavemente, placa caliente EMS, 90°C, 60 seg;

Figura 22D. *Spin coat* la capa protectora en el lado frontal de la pastilla y hornear/endurecer; AZ-MiR 703, 1,08 micrómetros, 5.000 rpms; detalles de proceso del Manual 2; hornear, horno Blue M, 90°C, 10 min.;

Figura 22E. Alinear la máscara positiva 1 con el lado frontal de la pastilla y exponer el recubrimiento de fotoprotección; especificaciones: Tiempo de exposición: 65,0 seg (130 mJ/cm² a 2 mW/cm²), exposición en línea i; hornear postexposición a 110°C durante 10 min.;

Figura 22F. Desarrollar capa protectora positiva en ambos lados de la pastilla, inspeccionar, y hornear capa protectora; AZ300MIF 3:1, 60 seg; realizar inspección previa al grabado; espesor de capa protectora >2.000 Angstroms; ancho de patrón de zanja, 2 micrómetros; horneado posterior al desarrollo, 120°C durante 20 min;

Figura 22G. Grabado húmedo isotrópico estampado de la capa de SiO₂ con BOE; BOE 5:1, 3 min 30 seg; inspección posgrabación; espesor capa protectora/óxido: >5.000 A; mantener tableta húmeda al colocarla en BOE;

Figura 22H. Eliminar las cenizas de la fotoprotección restante; especificaciones: Limpieza/eliminación con plasma O₂ de la fotoprotección; 256 W; 0,3 Torr; flujo de O₂: 220 sccm; 15 min; Inspección posterior a limpieza; espesor de óxido: > 3.000 A; perfilómetro Dektak 3030

Figura 22I. Grabado anisotrópico en húmedo por etapas el silicio hasta profundidad especificada. La profundidad del grabado es como un parámetro crítico de diseño/fabricación para establecer el espacio grafeno/punta deseado; especificaciones: (todas estas se deben volver a escalar para trabar con 50 mL de agua para haz de electrones); Mezclar la mezcla de tensioactivo/agua, 550mg de Triton X-100 en 5,5 litros de agua; Mezcla la mezcla de KOH/agua jabonosa, 2000

gramos de pélets de KOH en 5,5 litros de agua; calentar el manto de solución hasta 50°C; grabar la pastilla durante ~15 (TBD) min (~2.000 A/min), enjuagar por descarga, y SRD; inspeccionar después del grabado para una profundidad de > 14.000 (TBD) Å; repetir cuantas veces sea necesario para lograr la profundidad.

Figura 22J. Perfilar la pastilla para inspeccionar características; medir el espesor del grabado de silicio: Perfilómetro Dektak 303; nativo con respecto a la zanja: >6.000 Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto a la punta: > 0;

Figura 22K. Oxidar térmicamente la pastilla para formar una capa aisladora de SiO₂, es probable que el espesor de la capa de SiO₂ sea un parámetro crítico para establecer el espacio grafeno/punta deseado. Especificaciones: Insertar la pastilla en el horno a 800°C en atmósfera de N₂ durante 30 min; atmósfera de O₂ a 1.100°C durante 332 (TBD) min; atmósfera de N₂ a 1.100°C durante 5 min; atmósfera de N₂ a 900° durante 45 min; medir el espesor del óxido, elipsómetro Gaertner, 1.000 – 1.600 (TBD) Å; 3.000 Å toma 5 horas 31 min 23 seg; consume 1.320 Å de silicio, por lo tanto el crecimiento es un aumento de 1.680 Å; 4.482 Å en óxido inicial; consume 1.972,4 Å de silicio por lo tanto 2.510,2 crece en la parte superior; la diferencia es 830 Å;

Figura 22L. Perfilar la pastilla antes de la deposición de metal; especificaciones: Perfilómetro Dektak 303; nativo con respecto a la zanja: >4.400 (TBD) Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto a la punta: > 1.400 (TBD) Å (óxido con respecto a punta de silicio oxidada no grabada);

Figura 22M. *Spin coat* la fotoprotección negativa en el lado frontal de la pastilla; especificaciones: Deshidratar por horneado la pastilla, 30 min a 160°C; hornear HMDS, 15 min; *Spin coat*, Futurexx NR9-3000PY a 3000 rpm; detalles del proceso en Manual 3; hornear suavemente 1 min a 150°C, recubridor 143,4 Eaton

Figura 22N. Alinear el patrón de máscara negativa 2 con respecto al lado frontal de la pastilla y las marcas de referencia de alineamiento establecidas por la máscara positiva 1, exponer la fotoprotección; especificaciones: Alinear la máscara negativa 2 con respecto a la pastilla; exponer: SUSS MA150; P-4: 300 mJ/cm²; 38,0 seg (7,9 W/cm²); horneado posterior a exposición en placa caliente EMS; 100 °C durante 1 min; 98,3°C;

Figura 22O. Desarrollar capa protectora negativa y eliminar material no desarrollado; especificaciones: desarrollar positivamente 16 seg; horneado posterior a 120°C durante 20 min; preparar baño de inmersión en tensioactivo, 1 gota de Triton X-100 en 4,5L de agua DI; baño de inmersión 100:1 de BOE, 30 seg para eliminar óxido

en ventanas de contacto;

Figura 22P. Depósito de vapor de oro. El espesor del metal puede ser un parámetro crítico en el establecimiento del espacio grafeno/punta deseado; bombear la cámara hacia abajo durante la noche: 1×10^{-6} torr; 500 Å de capa;

Figura 22Q. Eliminar fotoprotección; ultrasonicar ambos con acetona

Figura 22R. Inspección final de la pastilla fabricada; especificaciones: Medir perfil con punta piramidal de silicio oxidado: Perfilómetro Dektak 3030; nativo con respecto al metal en la zanja: >3.900 Å (profundidad de óxido y grabado de silicio); nativo con respecto al metal en la punta: >900 Å (óxido con respecto a punta de silicio oxidada no grabada).

A partir de la Figura 23, se muestran determinados ensamblajes de transductores, particularmente ensamblajes en los que se fabrican componentes significativos dentro de un sustrato de manera que se elimina el uso descrito anteriormente de un microscopio de barrido de efecto túnel (STM). En una forma de realización no limitativa, los conceptos de la presente divulgación se pueden incorporar en un transductor, ya que este convierte el movimiento físico (es decir, la vibración de una membrana) en una señal eléctrica. Además, en términos fundamentales, es la flexibilidad extrema de los materiales ultradelgados bidimensionales para las membranas lo que les permite moverse grandes distancias cuando experimentan una fuerza externa. Cuanto mayor sea el movimiento, mayor será la señal eléctrica inducida. Los materiales 2-D identificados son 10.000 veces más flexibles que la tecnología del estado de la técnica de nitruro de silicio actual.

Si se considera la presente divulgación en términos de un transductor, una forma de realización incorpora un sistema para recolectar energía que tiene un sustrato que tiene un espesor inicial entre una primera cara del sustrato y una cara opuesta del sustrato. Una segunda cara del sustrato une una región de pozo abierto que se extiende desde la primera cara del sustrato hacia la segunda cara del sustrato. Una membrana independiente puede estar ubicada sobre la región de pozo y estar soportada por la primera cara del sustrato, en donde la membrana independiente es libre para vibrar en respuesta a la energía del ambiente. La vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie de la membrana, en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo sobre la región de pozo. En lugar del uso definido anteriormente de un microscopio de barrido de efecto túnel (STM), el transductor de energía de esta forma de realización utiliza una estructura de punta formada como parte de o unida al sustrato y que se

extiende desde la segunda cara del sustrato. Dado que un tipo de dispositivo transductor descrito en la presente convierte la energía mecánica de la vibración en energía eléctrica a través de flujo de corriente, el transductor incorpora un primer contacto conectado a la primera cara del sustrato y un segundo contacto conectado a la estructura de punta para la extracción y/o inyección del portador, en función de la polaridad. En una forma de realización no limitativa, una fuente de tensión puede estar conectada al segundo contacto para inducir una región capacitiva de cargas entre la punta y la membrana. Como se describió anteriormente, una distancia entre la punta y la membrana varía con los picos y puntos mínimos respectivos debido a que la vibración cíclica del material de la membrana es llevada a cabo por fuerzas ambiente o energía ambiental (calor, flujo de aire, fuerzas compresivas, fuerzas expansivas, etc.). La región capacitiva entre la punta y la membrana almacena y emite las cargas en ciclos de acuerdo con la distancia entre la punta y la membrana. En una forma de realización, la fuente de tensión también puede ser un receptor de carga y dispositivo de almacenamiento, como una batería. Por lo tanto, un condensador de almacenamiento puede estar conectado a la membrana y recibir las cargas emitidas de la región capacitiva cuando la distancia entre la punta y la membrana aumenta durante los períodos de pico de las ondas. En un ciclo alterno de flujo de energía, la fuente de tensión administra cargas a la región capacitiva cuando la distancia entre la punta y la membrana disminuye durante los períodos de puntos mínimos de las ondas. Un sistema informático puede estar en comunicación electrónica con al menos uno del primer contacto y el segundo contacto y, como en la mayoría de los sistemas computarizados, una computadora utilizada con este transductor de energía puede tener al menos un procesador y una memoria, en donde la memoria almacena instrucciones que, cuando se ejecutan por el al menos un procesador, controlan el almacenamiento de carga y la transmisión de carga desde la membrana.

Un sustrato en el cual un transductor se forma para esta divulgación puede incorporar una pluralidad de ensamblajes transductores individuales en un único sustrato. Para acomodar múltiples ensamblajes transductores, un sustrato puede incluir un estampado de zanjas a través de la primera cara del sustrato, en donde cada zanja aísla una punta o un primer contacto, o ambos, de porciones adyacentes del sustrato. Por lo tanto, un ensamblaje en el sustrato conecta un circuito eléctrico que tiene, en parte, la fuente de tensión, el condensador de almacenamiento, una punta, y la membrana que dirige la energía a un retorno común. Antes de la puesta a tierra, el circuito incluye un primer diodo conectado a cualquiera o a ambas de la membrana o

la punta, el retorno común en paralelo con el primer receptor de energía, por ejemplo, el condensador de almacenamiento, y un segundo diodo conectado a la membrana o la punta con el condensador de almacenamiento. Por lo tanto, el condensador de almacenamiento es un conducto opcional hacia, y puede estar conectado a, el retorno común. Un transductor de acuerdo con la presente divulgación, se puede beneficiar de economías de escala al usar una matriz de primeros diodos y segundos diodos respectivos que conectan las regiones respectivas de la membrana o la punta a la fuente de tensión, el condensador de almacenamiento fijo, y el retorno común. Se pueden formar tantos componentes como sea posible, en particular los diodos, dentro del sustrato a través de técnicas de dopado para diversos materiales de sustrato. De otra manera, un sistema de acuerdo con la presente divulgación puede incluir un circuito que incluye componentes conectados, seleccionados de la fuente de tensión, el condensador de almacenamiento fijo, la punta y la membrana, con alguno o todos los componentes conectados entre sí a través de un tablero de circuito que está separado del sustrato.

Muchos ejemplos analizados en la presente enumeran que la membrana independiente es una membrana de grafeno independiente, pero que los ejemplos no limitan los tipos de materiales que pueden usarse para implementar un transductor de energía para esta aplicación. Para ejemplos no limitativos que describen el uso de una membrana de grafeno, la membrana independiente es una de una bicapa de grafeno, una tricapa de grafeno, y una multicapa de grafeno. Otros materiales que se pueden usar de acuerdo con la divulgación de la membrana vibratoria, además de grafeno, incluyen disulfuro de molibdeno (MoS_2), diselenuro de molibdeno (MoSe_2), disulfuro de tungsteno (WS_2), diselenuro de tungsteno (WSe_2), disulfuro de renio (ReS_2), diselenuro de renio (ReSe_2), nitruro de boro (BN), y otras combinaciones de un metal de transición y otro elemento ("MX₂"), o una combinación de estos.

El condensador de almacenamiento es un depósito para el potencial eléctrico generado por el movimiento mecánico de la membrana independiente que está una relación capacitiva con la punta debido a las cargas eléctricas en la punta y/o la membrana. En una forma de realización, que no es limitativa de la divulgación, la región capacitiva ha mostrado un ciclo de capacitancia desde una capacitancia mínima de alrededor de 0,001 femtofaradio a una capacitancia máxima de alrededor de 1000 femtofaradio. La capacitancia mínima corresponde a períodos de tiempo en los que la distancia entre la punta y la membrana se maximiza durante períodos pico de las ondas. La capacitancia máxima corresponde a períodos de tiempo en los que la

distancia entre la punta y la membrana se minimiza durante períodos de punto mínimo de las ondas. La región capacitiva se somete a corriente de efecto túnel cuando la distancia entre la punta y la membrana se minimiza durante los períodos de punto mínimo de las ondas, proporcionando de ese modo corriente al condensador de almacenamiento. En una forma de realización de prueba, un amperímetro conectado a través de un conmutador para funcionar en paralelo al condensador de almacenamiento, en donde el amperímetro mide la carga en el condensador de almacenamiento para el registro por un usuario.

La membrana se describe como una membrana independiente en cuanto a que la sección de la membrana próxima a la punta del circuito (usualmente dentro del sustrato) está libre y se le permite vibrar u ondular en un efecto cíclico a través de al menos una porción de la membrana. Con respecto a esto, se puede considerar que la membrana tiene una primera superficie cercana o incluso enfrentada directamente a la formación de punta del sustrato y una segunda cara opuesta a la primera superficie, con las superficies conectadas en puntos lejanos de una región de ventana que vibra cercana a la punta. La energía mecánica del sistema hace vibrar la membrana y puede ser energía ambiental en la forma de energía térmica o energía cinética de átomos en la membrana independiente. En algunas formas de realización no limitativas, la membrana tiene un espesor promedio de 0,3 nm a 3,0 nm, de 0,3 nm a 2,0 nm, de 0,3 nm a 1,0 nm, o de 0,3 nm a 0,6 nm.

El sistema para convertir energía vibracional a una salida de corriente, como se divulga en la presente, puede utilizar un ensamblaje de transductor 300 formado dentro de o conectado a un sustrato 325 que tiene un espesor inicial entre una primera cara 330 del sustrato y una cara opuesta 340 del sustrato. Una segunda cara 350 del sustrato une una región de pozo abierto 355 que se extiende desde la primera cara 330 del sustrato hacia la segunda cara 350 del sustrato 325. Una membrana independiente 425 conectada a la primera cara 330 del sustrato 325 incluye una primera superficie 430 que no está obstruida y es libre para vibrar en respuesta a energía ambiental, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas 271 a lo largo de la primera superficie 430 y en donde cada formación de onda alterna entre un pico 286 y un punto mínimo 289 en una región de ventana 464 de una pluralidad de regiones de ventana la membrana 425. Un punta 360 está formada dentro del sustrato 325 o al menos posicionada en la segunda cara 350 del sustrato cercana a la membrana 425. Una fuente de tensión 200 es una comunicación eléctrica con la punta o la membrana, pero las formas de realización en

la presente reconocen un potencial de magnificación de tensión aplicado inicialmente por la fuente de tensión debido a que la carga en exceso que se permite conducir a través del ensamblaje transductor 300 se puede almacenar en el condensador de almacenamiento 275 como resultado de la transducción de energía mecánica – eléctrica. Por lo tanto, la fuente de tensión se puede describir, en una forma de realización no limitativa, como el fijar una corriente de punto de ajuste entre la punta 360 y la membrana 425 para definir una región capacitiva respectiva de cargas entre la punta y la membrana. La conducción adicional hacia y desde la punta 360 y la membrana 425 multiplica la conducción de corriente en el sistema como se describe anteriormente. Una distancia entre la punta y la membrana varía con picos y puntos mínimos respectivos, y la región capacitiva almacena y emite las cargas en ciclos en respuesta a la distancia entre la punta y la membrana. Un condensador de almacenamiento fijo 275 se conecta a la membrana o la punta y recibe cargas emitidas y cargas de efecto túnel adicionales de la región capacitiva cuando la distancia entre la punta y la membrana se maximiza durante los períodos de pico de las ondas en la región de ventana respectiva. De manera similar a otras formas de realización descritas anteriormente, la cantidad de cargas de efecto túnel adicionales es proporcional a la corriente de punto de ajuste de la punta. La corriente de punto de ajuste de la punta es una corriente fija, y el rango de la distancia entre la punta y la membrana está controlado entre una distancia mínima y una distancia máxima, en donde la distancia máxima está configurada para acomodar las cargas de efecto túnel adicionales que cruzan la región capacitiva.

La punta 360, formada en el sustrato, sirve como una placa capacitiva comparable mientras que la membrana 425 sirve como la otra placa capacitiva de una interacción capacitiva entre la punta y la membrana. Un sistema que utiliza esta interacción para convertir energía vibracional en una salida de corriente puede incluir un circuito de recolección de corriente 500 en un sustrato, en donde el circuito de recolección de corriente comprende una matriz de contactos de punta conectada, mediante el emparejamiento de los diodos 235 respectivos, a una fuente de tensión 200 y a un condensador de almacenamiento fijo 275. Una membrana independiente se extiende sobre al menos el contacto de punta en el circuito de recolección de corriente, de modo que los contactos de punta están separados de la membrana y están enfrentados a una primera superficie de la membrana para definir una región capacitiva entre un contacto común que conecta los contactos de punta respectivos y la primera superficie de la membrana. Como se describió en otras formas de

realización, la primera superficie de la membrana no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a energía ambiental, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, y en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo en relación con el contacto común. Las regiones capacitivas correspondientes entre los contactos de punta y la membrana acumulan cargas entre los contactos de punta y la membrana, en donde el contacto de punta conmuta una salida de corriente de cargas acumuladas en uno de los diodos respectivos para direccionar la salida de corriente a la fuente de tensión o al condensador de almacenamiento fijo en respuesta a las formaciones de ondas cíclicas en la membrana. En algunas versiones de la presente tecnología, el circuito de recolección 500 está formado dentro del sustrato mediante la definición de regiones de zanja y pozo respectivas, como se muestra en las Figuras 21-27 en la presente. En una forma de realización no limitativa, la punta 360 está formada como un componente del sustrato 325 dentro de una zanja respectiva 510 cercana a la sección de pozo 520, también formada en el sustrato. El circuito de recolección 500 incorpora un contacto superior 530 y un contacto inferior 540 para la extracción de carga. En una forma de realización distinta, el circuito de recolección 500 comprende la punta 360 en el sustrato y otros componentes en una placa de circuito adyacente (no se muestra).

Por supuesto, la presente divulgación no está limitada a ninguno de los aparatos o transductores para beneficiarse de un método para ensamblar un circuito de recolección de energía. Por ejemplo, la divulgación muestra formar una región capacitiva en el circuito de recolección de energía al definir una primera placa de condensador que tiene una distancia de separación inicial con respecto a una primera superficie de una membrana independiente, en donde la primera superficie de la membrana independiente define una segunda placa de condensador. Al conectar la primera placa de condensador (o posiblemente la segunda placa de condensador en una instalación de polaridad opuesta) a una fuente de tensión, el método está configurado para inducir acumulación de carga en la región capacitiva entre la punta en el sustrato y la primera superficie de la membrana. El método continúa al posicionar la membrana con respecto a la primera placa de condensador de modo que la membrana no está obstruida y puede vibrar libremente en respuesta a la energía ambiental, en donde la vibración de la membrana define formaciones de ondas cíclicas a lo largo de la primera superficie, y en donde cada formación de onda alterna entre un pico y un punto mínimo con respecto a la primera placa de condensador para cambiar

la distancia de separación inicial. Descargar la región capacitiva a través de un diodo respectivo dirige las cargas acumuladas a la fuente de tensión o a una carga, en donde descargar la región capacitiva comprende dirigir las cargas a la fuente de tensión durante un punto mínimo y dirigir las cargas a la carga durante un pico. En una forma de realización, la carga es un condensador que almacena carga que se mencionó anteriormente como un condensador de almacenamiento fijo. El condensador de almacenamiento fijo es distinto a la interacción capacitiva entre la membrana que vibra y la punta del sustrato (que es más similar a un condensador variable).

Método de uso

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

Los dispositivos de recolección de energía descritos en la presente, por ejemplo, se pueden incorporar en una variedad de sistemas, dispositivos y métodos para extraer energía, que incluyen sensores de descarga, sensores de masa y fuerza, y dispositivos autoalimentados. Los sistemas, dispositivos y métodos de acuerdo con determinadas formas de realización de ejemplo que incorporan uno o más dispositivos de recolección de energía como se describen en la presente pueden utilizar dinámicas de fluctuaciones a escala atómica de una membrana bidimensional independiente. La membrana puede incorporar movimiento aleatorio fuera de plano que exhibe dinámicas anormales y distribuciones de equilibrio de largo plazo de variables dinámicas sintomáticas de modelo de tipo caminata de Lévy. La membrana que fluctúa puede ser controlada, por ejemplo, mediante microscopía de barrido de efecto túnel (STM).

Un factor no limitativo a tener en cuenta con respecto a esta tecnología se relaciona a las descripciones en la presente que utilizan el enfoque electrostático/capacitivo para la recolección de energía de vibración que son ejemplos de muchas formas de realización. Si la membrana se magnetizó, entonces utilizaría el enfoque electromagnético para la recolección de energía de vibración. Para este enfoque, no se necesita una fuente de tensión pero la “punta” necesitaría ser un bucle de alambre. De manera similar, si la membrana era piezoeléctrica o magnetostrictiva, entonces utilizaría el fenómeno piezoeléctrico o magnetostrictivo para la recolección de energía cuando vibra. Nuevamente, no se necesitaría una fuente de tensión. El

dispositivo piezoeléctrico flexible induciría la tensión y generaría un direccionamiento de corriente. El dispositivo magnetostrictivo flexible necesitaría un bucle de alambre. En estos otros casos, se utilizaría un puente rectificador para recolectar la corriente.

Cuando se usa una membrana eléctricamente aislante como nitruro de boro (BN) (en comparación con una membrana eléctricamente conductora, como grafeno), el BN se rociaría primero con cargas eléctricas que luego se mantendría en el lugar debido a que es aislante. Con las cargas pegadas a la membrana, la fuente de tensión no es necesaria en el circuito descrito anteriormente. Esto se denomina polarizado interno en comparación con polarizado externo, y estos son términos utilizados comúnmente para describir dos tipos de micrófonos. No necesitar una fuente de tensión es una forma de realización importante. Se puede considerar agregar la fórmula general MX_2 (término del campo) para un metal de transición y otro elemento.

Cabe destacar que cualquiera de los componentes o módulos mencionados con respecto a dispositivos de recolección de energía, y sistemas y métodos asociados, de la tecnología divulgada, pueden estar formados íntegramente o de manera separada entre sí. Además, se pueden implementar funciones o estructuras redundantes de los componentes. Cualquiera de las características descritas en la presente y sus componentes analizados en la presente pueden tener todas las formas para proporcionar y satisfacer los requisitos medioambientales, demandas estructurales, y requisitos operacionales. Además, las ubicaciones y los alineamientos de los diversos componentes pueden variar según se desee o requiera.

Lo que se describió anteriormente incluye ejemplos de una o más formas de realización. Por supuesto, no es posible describir todas las combinaciones posibles de componentes o metodologías para los fines de describir las formas de realización mencionadas anteriormente, pero una persona del oficio de nivel medio puede reconocer que son posibles muchas combinaciones y transformaciones adicionales de las diversas formas de realización. En consecuencia, las formas de realización descritas pretenden abarcar todas estas alteraciones, modificaciones y variaciones que están dentro del espíritu y el alcance de la divulgación y las reivindicaciones adjuntas en la presente y a ser presentadas en solicitudes de patente no provisionales.

Se han realizado esfuerzos para garantizar la precisión con respecto a los números (por ejemplo, cantidades, temperatura, etc.), pero deben justificarse algunos errores y desviaciones. A menos que se indique lo contrario, las partes son partes en peso, la temperatura es en °C o temperatura ambiente, y la presión es a o cerca de la presión atmosférica. Existen numerosas variaciones y combinaciones de 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 del producto y el rendimiento obtenidos a partir del proceso descrito. Solo serán necesarias experimentación razonable y de rutina para optimizar dichas condiciones de proceso.

Otras ventajas que son obvias y que son inherentes a la invención serán evidentes para una persona del oficio de nivel medio. Se entenderá que determinadas características y subcombinaciones son de utilidad y se pueden emplear sin referencia a otras características y subcombinaciones. Esto está contemplado y está dentro del alcance de las reivindicaciones. Ya que son posibles muchas formas de realización de la invención sin alejarse del alcance de esta, se debe entender que todo el material establecido o mostrado en la presente en los dibujos adjuntos se debe interpretar como ilustrativo y no en un sentido limitativo.

Los métodos de las reivindicaciones adjuntas no se limitan en el alcance mediante los métodos específicos descritos en la presente, que son ilustraciones de algunos aspectos de las reivindicaciones y se pretende que cualquiera de los métodos que son funcionalmente equivalentes se encuentren dentro del alcance de las reivindicaciones. Se pretende que varias modificaciones de los métodos además de los mostrados y descritos en la presente estén dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Además, mientras que solo se describen específicamente algunas etapas del método representativo divulgado en la presente, también se pretende que otras combinaciones de etapas del método estén dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas, incluso si no se mencionan específicamente. Por lo tanto, se puede mencionar en la presente una combinación de etapas, elementos, componentes o constituyentes, sin embargo, están incluidas otras combinaciones de etapas, elementos, componentes y constituyentes, aun cuando no estén mencionados específicamente.

Referencias principales citadas:

- [1] N. Mounet, M. Gibertini, P. Schwaller, D. Campi, A. Merkys, A. Marrazzo, T. Sohler, I.E. Castelli, A. Cepellotti, G. Pizzi, N. Marzari, Two-dimensional materials from high-throughput computational exfoliation of experimentally known compounds, *Nature Nanotechnology*, 13 (2018) 246-+.
- [2] N.R. Greene, Energy Flow for a Variable-Gap Capacitor, *The Physics Teacher*, 43 (2005) 340.
- [3] S.F. Philp, VACUUM-INSULATED, VARYING-CAPACITANCE MACHINE, *IEEE*

Transactions on Electrical Insulation, 12 (1977) 130-136.

[4] R. O'Donnell, N. Schofield, A.C. Smith, J. Cullen, Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators, IEEE Transactions on Industry Applications, 45 (2009) 1778-1784.

[5] P. Xu, M. Neek-Amal, S.D. Barber, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Unusual ultra-low-frequency fluctuations in freestanding graphene, Nat. Comm., 5 (2014) 3720.

[6] M. Neek-Amal, P. Xu, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, S.D. Barber, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Thermal mirror buckling in freestanding graphene locally controlled by scanning tunneling microscopy, Nat. Comm., 5 (2014) 4962.

[7] M.L. Ackerman, P. Kumar, M. Neek-Amal, P.M. Thibado, F.M. Peeters, S. Singh, Anomalous Dynamical Behavior of Freestanding Graphene Membranes, Physical Review Letters, 117 (2016).

[8] M. Lopez-Suarez, R. Rurali, L. Gammaitoni, G. Abadal, Nanostructured graphene for energy harvesting, Physical Review B, 84 (2011) 161401(R).

[9] J.F. Xu, P.M. Thibado, Z. Ding, 4 K, ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope having two orthogonal tips with tunnel junctions as close as a few nanometers, Rev. Sci. Instrum., 77 (2006) 093703.

[10] J. Tersoff, D.R. Hamann, THEORY OF THE SCANNING TUNNELING MICROSCOPE, Physical Review B, 31 (1985) 805-813.

Referencias de ejemplo citadas

[E1] A. Einstein, Investigations on the theory of the Brownian movement, Annalen der Physik, 17 (1905) 549-560.

[E2] C. Lotze, M. Corso, K.J. Franke, F. von Oppen, J.I. Pascual, Driving a Macroscopic Oscillator with the Stochastic Motion of a Hydrogen Molecule, Science, 338 (2012) 779-782. [E3] L. Gammaitoni, P. Hanggi, P. Jung, F. Marchesoni, Stochastic resonance, Rev. Mod. Phys., 70 (1998) 223-287.

[E4] I.A. Martinez, E. Roldan, L. Dinis, D. Petrov, J.M.R. Parrondo, R.A. Rica, Brownian Carnot engine, Nature Physics, 12 (2016) 67-70. [E5] U. Seifert, Stochastic thermodynamics, fluctuation theorems and molecular machines, Reports on Progress in Physics, 75 (2012) 126001.

[E6] R.D. Astumian, Thermodynamics and kinetics of a Brownian motor, Science, 276 (1997) 917-922.

[E7] M.O. Magnasco, FORCED THERMAL RATCHETS, Physical Review Letters, 71 (1993) 1477-1481.

- [E8] A.L. Cottrill, A.T. Liu, Y. Kunai, V.B. Koman, A. Kaplan, S.G. Mahajan, P.W. Liu, A.R. Toland, M.S. Strano, Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting, *Nature Communications*, 9 (2018) 664.
- [E9] H.H. Hasegawa, C.B. Li, Y. Ohtaki, Thermodynamics of a system with long-time correlations, *International Journal of Quantum Chemistry*, 98 (2004) 138-144.
- [E10] M.L. Ackerman, P. Kumar, M. Neek-Amal, P.M. Thibado, F.M. Peeters, S. Singh, Anomalous Dynamical Behavior of Freestanding Graphene Membranes, *Physical Review Letters*, 117 (2016) 126801.
- [E11] J.C. Meyer, A.K. Geim, M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, T.J. Booth, S. Roth, The structure of suspended graphene sheets, *Nature*, 446 (2007) 60-63.
- [E12] A. Fasolino, J.H. Los, M.I. Katsnelson, Intrinsic ripples in graphene, *Nature Materials*, 6 (2007) 858-861.
- [E13] P. San-Jose, J. Gonzalez, F. Guinea, Electron-Induced Rippling in Graphene, *Physical Review Letters*, 106 (2011) 045502.
- [E14] P. Xu, M. Neek-Amal, S.D. Barber, J.K. Schoelz, M.L. Ackerman, P.M. Thibado, A. Sadeghi, F.M. Peeters, Unusual ultra-low-frequency fluctuations in freestanding graphene, *Nat. Comm.*, 5 (2014) 3720.
- [E15] M. Ruiz-Garcia, L.L. Bonilla, A. Prados, Ripples in hexagonal lattices of atoms coupled to Glauber spins, *Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment*, (2015) P05015.
- [E16] M. Ruiz-Garcia, L.L. Bonilla, A. Prados, STM-driven transition from rippled to buckled graphene in a spin-membrane model, *Physical Review B*, 94 (2016) 205404.
- [E17] Ver Material Complementario en [URL será proporcionada por el editor] para detalles adicionales sobre experimentos y cálculos.
- [E18] M. Lopez-Suarez, R. Rurali, L. Gammaitoni, G. Abadal, Nanostructured graphene for energy harvesting, *Physical Review B*, 84 (2011) 161401(R).
- [E19] M.R. Sorensen, A.F. Voter, Temperature-accelerated dynamics for simulation of infrequent events, *Journal of Chemical Physics*, 112 (2000) 9599-9606.
- [E20] L.L. Bonilla, M. Ruiz-Garcia, Critical radius and temperature for buckling in graphene, *Physical Review B*, 93 (2016) 115407.
- [E21] J.F. Xu, P.M. Thibado, Z. Ding, 4 K, ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope having two orthogonal tips with tunnel junctions as close as a few nanometers, *Rev. Sci. Instrum.*, 77 (2006) 093703.
- [E22] S.F. Philp, Vacuum-Insulated, Varying-Capacitance Machine, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 12 (1977) 130-136.

- [E23] R. O'Donnell, N. Schofield, A.C. Smith, J. Cullen, Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45 (2009) 1778-1784.
- [E24] N.R. Greene, Energy Flow for a Variable-Gap Capacitor, *The Physics Teacher*, 43 (2005) 340.
- [E25] J.-S. Rattinacannou, A promising new energy source: The Brownian motion of nanoresonator arrays *European Physical Journal*, 79 (2014) 01006.
- [E26] M.B. Lundberg, J.A. Folk, Rippled Graphene in an In-Plane Magnetic Field: Effects of a Random Vector Potential, *Physical Review Letters*, 105 (2010) 146804.
- [E27] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems, *Transducers*, (1995) 369.
- [E28] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer Communications*, 26 (2003) 1131-1144.
- [E29] E.V. Castro, H. Ochoa, M.I. Katsnelson, R.V. Gorbachev, D.C. Elias, K.S. Novoselov, A.K. Geim, F. Guinea, Limits on Charge Carrier Mobility in Suspended Graphene due to Flexural Phonons, *Physical Review Letters*, 105 (2010) 266601.
- [E30] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C.N. Lau, Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano Lett.*, 8 (2008) 902-907.
- [E31] J. Macaulay, M. Kuckelhaus, Internet of things in logistics, *Matthais Heutger* (2015).
- [E32] S. Hanson, M. Seok, Y.S. Lin, Z. Foo, D. Kim, Y. Lee, N. Liu, D. Sylvester, D. Blaauw, A Low-Voltage Processor for Sensing Applications With Picowatt Standby Mode, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 44 (2009) 1145-1155.