



## OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

**ESPAÑA** 



11) Número de publicación: 2 394 501

(51) Int. CI.:

H01L 41/09 (2006.01) F04B 35/00 (2006.01) F04B 35/04 (2006.01) F04B 43/04 (2006.01) H01L 41/193 (2006.01) H01L 41/047 (2006.01) H01L 41/26 H02N 2/02 (2006.01) H04R 19/02 (2006.01) H04R 23/00 (2006.01)

(12)

# TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- (96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: 20.07.2000 E 07015635 (1) (97) Fecha y número de publicación de la solicitud europea: 24.10.2007 EP 1848046
- (54) Título: Traductores de polímeros electroactivos
- (30) Prioridad:

20.07.1999 US 144556 P 10.09.1999 US 153329 P 25.10.1999 US 161325 P 09.02.2000 US 181404 P 08.03.2000 US 187809 P 27.03.2000 US 192237 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente: 01.02.2013

(73) Titular/es:

SRI INTERNATIONAL (100.0%) 333 RAVENSWOOD AVENUE MENLO PARK **CALIFORNIA 94025-3493, US** 

(72) Inventor/es:

PELRINE, RONALD, E.; KORNBLUH, ROY, D.; PEI. QIBING: OH, SEAJIN y JOSEPH, JOSE, P.

(74) Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

### **DESCRIPCIÓN**

Transductores de polímeros electroactivos

### Antecedentes de la invención

5

20

25

30

35

La presente invención se refiere, en general, a polímeros electroactivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica. Más particularmente, la presente invención se refiere a polímeros previamente deformados y a su uso en accionadores y aplicaciones varias. La presente invención se refiere, también, a electrodos adaptables usados para la comunicación eléctrica con polímeros electroactivos y a procedimientos de fabricación de polímeros previamente deformados.

En muchas aplicaciones, es deseable convertir de energía eléctrica en energía mecánica. Las aplicaciones a modo de ejemplo que requieren la conversión de energía mecánica a eléctrica incluyen robótica, bombas, altavoces, automatización general, unidades de disco y dispositivos protésicos. Estas aplicaciones incluyen uno o más accionadores que convierten energía eléctrica en trabajo mecánico – a un nivel macroscópico o microscópico. Las tecnologías de accionadores eléctricos comunes, tal como solenoides y motores electromagnéticos, no son adecuadas para muchas de estas aplicaciones, por ejemplo, cuando el tamaño de dispositivo requerido es pequeño (por ejemplo, máquinas a escala microscópica o intermedia). Estas tecnologías tampoco son ideales cuando un gran número de dispositivos ha de integrarse en una única estructura o bajo varias condiciones de rendimiento, tal como cuando una salida de densidad de potencia alta se requiere a unas frecuencias relativamente bajas.

Varios 'materiales inteligentes' se han usado para convertir entre energía eléctrica y mecánica con un éxito limitado. Estos materiales inteligentes incluyen las cerámicas piezoeléctricas, las aleaciones con memoria de forma y los materiales magnetoestrictivos. No obstante, cada material inteligente tiene un número de limitaciones que evitan su uso extendido. Ciertas cerámicas piezoeléctricas, tal como el titanato de plomo-zirconio (PZT), se han usado para convertir la energía de eléctrica en mecánica. A pesar de que tienen una eficiencia adecuada para unas pocas aplicaciones, estas cerámicas piezoeléctricas se limitan típicamente a una deformación inferior a aproximadamente un 1,6 por ciento y, a menudo, no son adecuadas para las aplicaciones que requieran unas deformaciones más grandes que esta. Además, la alta densidad de estos materiales a menudo las excluye de aplicaciones que requieran un peso bajo. El poli(difluoruro de vinilideno) irradiado (PVDF) es un polímero electroactivo que, según se notifica, tiene una deformación de hasta un 4 por ciento cuando se convierte la energía de mecánica en eléctrica. De forma similar a las cerámicas piezoeléctricas, a menudo el PVDF no es adecuado para las aplicaciones que requieran unas deformaciones más grandes que un 4 por ciento. Las aleaciones con memoria de forma, tal como nitinol, son capaces de unas deformaciones y salidas de fuerza grandes. El uso amplio de estas aleaciones con memoria de forma ha estado limitado por una eficiencia energética inaceptable, un pobre tiempo de respuesta y un coste prohibitivo.

Además de las limitaciones de rendimiento de las cerámicas piezoeléctricas y el PVDF irradiado, su fabricación a menudo presenta una barrera para la aceptabilidad. Las cerámicas piezoeléctricas de cristal único han de hacerse crecer a unas temperaturas altas junto con un procedimiento de enfriamiento muy lento. El PVDF irradiado ha de exponerse a un haz de electrones para su procesamiento. Ambos de estos procedimientos son costosos y complejos y pueden limitar la aceptabilidad de estos materiales.

A la vista de lo anterior, serían deseables unos dispositivos alternativos que convierten la energía de mecánica en eléctrica.

40 Los dispositivos de polímero electroactivo de acuerdo con el estado de la técnica se dan a conocer por Ronald E. Pelrine y col., "Electrostriction of polimer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation", Sensors and Actuators A, vol. 64, págs 77-85, (1998).

## Sumario de la invención

En un aspecto, la presente invención tal como se define por las reivindicaciones 1 y 26 se refiere a polímeros que se deforman previamente para mejorar la conversión entre energía eléctrica y mecánica. Cuando un voltaje se aplica a unos electrodos en contacto con un polímero previamente deformado, el polímero se flexa. Esta deflexión puede usarse para realizar un trabajo mecánico. La deformación previa mejora la respuesta mecánica de un polímero electroactivo en relación con un polímero no deformado. La deformación previa puede variar en diferentes direcciones de un polímero para variar la respuesta del polímero para el voltaje aplicado.

50 En otro aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento de fabricación de un transductor que incluye un polímero previamente deformado. El procedimiento comprende deformar previamente un polímero electroactivo para formar el polímero previamente deformado. El procedimiento también comprende fijar una porción del polímero previamente deformado a un miembro sólido. El procedimiento comprende adicionalmente formar uno o más electrodos sobre el polímero previamente deformado.

55 Estas y otras características y ventajas de la presente invención se describirán en la siguiente descripción de la invención y las figuras asociadas.

## Breve descripción de los dibujos

5

10

15

25

30

35

45

Las figuras 1A y 1B ilustran una vista en perspectiva desde arriba de un transductor antes y después de la aplicación de un voltaje.

La figura 1C ilustra una superficie con textura para un polímero electroactivo que tiene un perfil de tipo onda.

La figura 1D ilustra un polímero electroactivo que incluye una superficie con textura que tiene una textura aleatoria.

La figura 1E ilustra una vista lateral en sección transversal de un accionador de diafragma que incluye un polímero electroactivo antes de la aplicación de un voltaje.

La figura 1F ilustra una vista en sección transversal del diafragma de polímero electroactivo de la figura 1E después de la aplicación de un voltaje.

Las figuras 2A y 2B ilustran un accionador de arco antes y después del accionamiento.

La figura 2C ilustra un accionador de arco que incluye unos componentes adicionales para mejorar la deflexión.

La figura 2D y 2E ilustran un accionador de movimiento lineal antes y después del accionamiento.

La figura 2F ilustra una vista lateral en sección transversal de un accionador que incluye múltiples capas de polímero.

La figura 2G ilustra un accionador de múltiples capas apiladas como un ejemplo de un músculo artificial.

La figura 2H ilustra un accionador lineal que comprende un diafragma de polímero electroactivo.

La figura 2I ilustra un accionador de tipo oruga que incluye un polímero electroactivo enrollado.

La figura 2J ilustra un accionador de película estirada para proporcionar una deflexión en una dirección.

20 La figura 2K ilustra un accionador de barra de flexión.

La figura 2L ilustra el accionador de barra de flexión de la figura 2K con un ángulo de flexión de 90 grados.

La figura 2M ilustra un accionador de barra de flexión que incluye dos capas de polímero.

La figura 3 ilustra un electrodo con estructura que proporciona una adaptabilidad unidireccional.

La figura 4 ilustra un polímero previamente deformado que comprende un electrodo con estructura que no es direccionalmente adaptable.

La figura 5 ilustra unos electrodos con textura de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 6 ilustra un sistema de bombeo en dos etapas en cascada que incluye dos bombas de accionador de diafragma.

La figura 7A ilustra un flujo de procedimiento para la fabricación de un dispositivo electromecánico que tiene por lo menos un polímero previamente deformado.

Las figuras 7B-F ilustran un procedimiento para la fabricación de un dispositivo electromecánico que tiene múltiples capas de polímero.

### Descripción detallada de las realizaciones preferentes

La presente invención se describirá a continuación en detalle con referencia a unas pocas realizaciones preferentes de la misma, tal como se ilustra en los dibujos adjuntos. En la siguiente descripción, numerosos detalles específicos se exponen con el fin de proporcionar una comprensión exhaustiva de la presente invención. Será evidente, no obstante, para un experto en la técnica, que la presente invención puede practicarse sin parte o la totalidad de estos detalles específicos. En otros casos, las estructuras y/o etapas de procedimiento bien conocidas no se han descrito en detalle con el fin de no hacer más confusa de forma innecesaria la presente invención.

40 1. Visión de conjunto

Los polímeros electroactivos se flexan cuando se accionan por energía eléctrica. En una realización, un polímero electroactivo hace referencia a un polímero que actúa como un dieléctrico aislante entre dos electrodos y puede flexarse con la aplicación de una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. En un aspecto, la presente invención se refiere a polímeros que se deforman previamente para mejorar la conversión entre energía eléctrica y mecánica. La deformación previa mejora la respuesta mecánica de un polímero electroactivo en relación con un polímero

electroactivo no deformado. La respuesta mecánica mejorada posibilita un trabajo mecánico mayor para un polímero electroactivo, por ejemplo, unas mayores deflexiones y presiones de accionamiento. Por ejemplo, unas deformaciones lineales de por lo menos aproximadamente un 200 por ciento y unas deformaciones de área de por lo menos aproximadamente un 300 por ciento son posibles con los polímeros previamente deformados de la presente invención. La deformación previa puede variar en diferentes direcciones de un polímero. Combinando la variabilidad direccional de la deformación previa, diferentes formas de restringir un polímero, la capacidad de conversión a escala de los polímeros electroactivos a los niveles tanto micro como macroscópicos y unas orientaciones de polímero diferentes (por ejemplo, enrollando o apilando capas de polímero individuales) permite una amplia gama de accionadores que convierten energía eléctrica en trabajo mecánico. Estos accionadores pueden usarse en una amplia gama de aplicaciones.

Debido a que los polímeros electroactivos en los transductores de la presente invención pueden flexarse a unas deformaciones lineales de por lo menos aproximadamente un 200 por ciento, los electrodos acoplados a los polímeros deberían también flexarse sin comprometer el rendimiento eléctrico o mecánico. De forma correspondiente, se describen unos electrodos adaptables que se adaptan a la forma de un polímero electroactivo al que estos se acoplan. Los electrodos son capaces de mantener una comunicación eléctrica incluso a las altas deflexiones que se encuentran con los polímeros previamente deformados de la presente invención. A modo de ejemplo, unas deformaciones de por lo menos aproximadamente un 50 por ciento son comunes con los electrodos de la presente invención. La adaptabilidad que se proporciona por los electrodos puede variar con la dirección.

Debido a que los polímeros previamente deformados son adecuados para su uso tanto en la escala microscópica como en la macroscópica, en una amplia variedad de accionadores y en una amplia gama de aplicaciones, los procedimientos de fabricación que se usan con la presente invención varían en gran medida. En otro aspecto, la presente invención proporciona procedimientos para la fabricación de unos dispositivos electromecánicos que incluyen uno o más polímeros previamente deformados. La deformación previa puede lograrse mediante un número de técnicas, tal como estirar mecánicamente un polímero electroactivo y fijar el polímero a uno o más miembros sólidos mientras que este se estira.

## 2. Estructura general de los dispositivos

10

15

20

25

30

45

50

55

Las figuras 1A y 1B ilustran una vista en perspectiva desde arriba de un transductor 100. El transductor 100 incluye un polímero 102 para la conversión entre energía eléctrica y energía mecánica. Los electrodos 104 y 106 de arriba y de debajo se acoplan al polímero electroactivo 102 sobre sus superficies de arriba y de debajo respectivamente para proporcionar una diferencia de voltaje a lo largo de una porción del polímero 102. El polímero 102 se flexa con un cambio en el campo eléctrico que se proporciona por los electrodos 104 y 106 de arriba y de debajo. Se hace referencia a la deflexión del transductor 100 en respuesta a un cambio en el campo eléctrico que se proporciona por los electrodos 104 y 106 como accionamiento. Debido a que el polímero 102 cambia de tamaño, la deflexión puede usarse para producir un trabajo mecánico.

La figura 1B ilustra una vista en perspectiva desde arriba del transductor 100 incluyendo la deflexión en respuesta a un cambio en el campo eléctrico. Hablando en términos generales, la deflexión hace referencia a cualquier desplazamiento, expansión, contracción, torsión, deformación lineal o de área, o cualquier otra deformación de una porción del polímero 102. El cambio en el campo eléctrico que se corresponde con la diferencia de voltaje que se produce por los electrodos 104 y 106 produce una presión mecánica dentro del polímero previamente deformado 102. En el presente caso, las cargas eléctricas no diferentes que se producen por los electrodos 104 y 106 se atraen una a otra y proporcionan una fuerza de compresión entre los electrodos 104 y 106 y una fuerza de expansión sobre el polímero 102 en unas direcciones planas 108 y 110, lo que da lugar a que el polímero 102 se comprima entre los electrodos 104 y 106 y se estire en las direcciones planas 108 y 110.

En algunos casos, los electrodos 104 y 106 cubren una porción limitada del polímero 102 en relación con el área total del polímero. Esto puede hacerse para evitar la rotura eléctrica alrededor del borde del polímero 102 o para lograr unas deflexiones a medida en ciertas porciones del polímero. Tal como se usa la expresión en el presente documento, una región activa se define como una porción del material de polímero 102 que tiene suficiente fuerza electrostática para posibilitar la deflexión de la porción. Tal como se describirá a continuación, un polímero en un transductor de la presente invención puede tener múltiples regiones activas. El material de polímero 102 fuera de un área activa puede actuar como una fuerza de resorte externa sobre el área activa durante la deflexión. De forma más específica, el material fuera del área activa puede resistir la deflexión de área activa mediante su contracción o expansión. La eliminación de la diferencia de voltaje y la carga inducida da lugar a los efectos inversos.

Los electrodos 104 y 106 son adaptables y cambian de forma con el polímero 102. La configuración del polímero 102 y los electrodos 104 y 106 proporciona una respuesta creciente del polímero 102 con la deflexión. De forma más específica, a medida que el transductor 100 se flexa, la compresión del polímero 102 lleva las cargas opuestas de los electrodos 104 y 106 más cerca y el estiramiento del polímero 102 separa las cargas similares en cada electrodo. En un ejemplo, uno de los electrodos 104 y 106 es tierra.

Hablando en términos generales, el transductor 100 continúa flexándose hasta que las fuerzas mecánicas equilibran las fuerzas electrostáticas que accionan la deflexión. Las fuerzas mecánicas incluyen las fuerzas de recuperación

elástica del material de polímero 102, la adaptabilidad de los electrodos 104 y 106, y cualquier resistencia externa que se proporciona por un dispositivo y/o una carga acoplada al transductor 100. La deflexión resultante del transductor 100 como resultado del voltaje aplicado puede depender también de un número de otros factores tal como la constante dieléctrica del polímero 102 y el tamaño del polímero 102.

Los polímeros electroactivos son capaces de deflexión en cualquier dirección. Después de la aplicación del voltaje entre los electrodos 104 y 106, el polímero electroactivo 102 aumenta de tamaño en ambas direcciones planas 108 y 110. En algunos casos, el polímero electroactivo 102 es incompresible, por ejemplo tiene un volumen sustancialmente constante bajo tensión. En el presente caso, el polímero 102 disminuye en cuanto a su espesor como resultado de la expansión en las direcciones planas 108 y 110. Debería observarse que la presente invención no se limita a los polímeros incompresibles y que la deflexión del polímero 102 puede no adaptarse a una relación simple de este tipo.

El polímero electroactivo 102 se deforma previamente. La deformación previa mejora la conversión entre energía eléctrica y mecánica. En una realización, la deformación previa mejora la resistencia dieléctrica del polímero. Para el transductor 100, la deformación previa permite que el polímero electroactivo 102 se flexe más y que proporcione un trabajo mecánico mayor. La deformación previa de un polímero puede describirse en una o más direcciones como el cambio en cuanto a la dimensión en esa dirección después de la deformación previa en relación con la dimensión en esa dirección antes de la deformación previa. La deformación previa puede comprender una deformación elástica del polímero 102 y formarse, por ejemplo, mediante el estiramiento del polímero en tensión y la fijación de uno o más de los bordes mientras que se estira. En una realización, la deformación previa es elástica. Después del accionamiento, un polímero previamente deformado de forma elástica podría estar, en principio, no fijo y volver a su estado original. La deformación previa puede imponerse en los límites usando un armazón rígido o puede implementarse de forma local para una porción del polímero.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

En un ejemplo, la deformación previa se aplica de manera uniforme por encima de una porción del polímero 102 para producir un polímero previamente deformado isótropo. A modo de ejemplo, un polímero elastomérico acrílico puede estirarse en un 200 - 400 por ciento en ambas direcciones planas. En otra realización, la deformación previa se aplica de forma desigual en diferentes direcciones para una porción del polímero 102 para producir un polímero previamente deformado anisótropo. En el presente caso, el polímero 102 puede flexarse en mayor medida en una dirección que en otra cuando se acciona. A pesar de que no se desea estar limitado por la teoría, se cree que la deformación previa de un polímero en una dirección puede aumentar la rigidez del polímero en la dirección de deformación previa. De forma correspondiente, el polímero es relativamente más rígido en la dirección de alta deformación previa y más adaptable en la dirección de baja deformación previa y, con el accionamiento, la mayoría de la deflexión tiene lugar en la dirección de baja deformación previa. En una realización, el transductor 100 potencia la deflexión en la dirección 108 aprovechando una gran deformación previa en la dirección perpendicular 110. A modo de ejemplo, un polímero elastomérico acrílico que se usa como el transductor 100 puede estirarse en un 100 por ciento en la dirección 108 y en un 500 por ciento en la dirección perpendicular 110. La construcción del transductor 100 y las restricciones de borde geométrico pueden afectar también a la deflexión direccional tal como se describirá a continuación con respecto a los accionadores.

La cantidad de la deformación previa para un polímero puede estar basada en el polímero electroactivo y el rendimiento deseado del polímero en un accionador o aplicación. Para algunos polímeros de la presente invención, la deformación previa en una o más direcciones puede variar de un - 100 por ciento a un 600 por ciento. A modo de ejemplo, para un polímero de elastómero acrílico de VHB que tiene una deformación previa isótropa, unas deformaciones previas de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento y, preferentemente, de entre aproximadamente un 200-400 por ciento, pueden usarse en cada dirección. En una realización, el polímero se deforma previamente de manera elástica con un factor en el intervalo de aproximadamente 1,5 veces a 50 veces el área original. Para un material acrílico anisótropo que se deforma previamente para potenciar el accionamiento en una dirección adaptable, unas deformaciones previas de entre aproximadamente un 400-500 por ciento puede usarse en la dirección reforzada y unas deformaciones previas de entre aproximadamente 20-200 por ciento pueden usarse en la dirección adaptable. En algunos casos, la deformación previa puede añadirse en una dirección de tal modo que una deformación previa negativa tiene lugar en otra dirección, por ejemplo un 600 por ciento en una dirección acoplada con un - 100 por ciento en una dirección ortogonal. En estos casos, el cambio neto en cuanto al área debido a la deformación previa es típicamente positivo.

La deformación previa puede afectar a otras propiedades del polímero 102. Unas grandes deformaciones previas pueden cambiar las propiedades elásticas del polímero y llevan este a un régimen más rígido con unas pérdidas viscoelásticas menores. Para algunos polímeros, la deformación previa aumenta la resistencia a la rotura eléctrica del polímero 102, lo que permite que unos campos eléctricos más altos se usen dentro del polímero, permitiendo unas presiones de accionamiento mayores y unas deflexiones más altas.

La deformación lineal y la deformación de área pueden usarse para describir la deflexión de un polímero previamente deformado. Tal como se usa la expresión en el presente documento, la deformación lineal de un polímero previamente deformado hace referencia a la deflexión por unidad de longitud a lo largo de una línea de deflexión en relación con el estado no accionado. Unas deformaciones lineales máximas (de tracción o de compresión) de por lo menos aproximadamente un 50 por ciento son comunes para los polímeros previamente

deformados de la presente invención. Por supuesto, un polímero puede flexarse con una deformación menor que el máximo, y la deformación puede ajustarse ajustando el voltaje aplicado. Para algunos polímeros previamente deformados, unas deformaciones lineales máximas de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento son comunes. Para polímeros tales como VHB 4910, tal como lo produce 3M Corporation de St. Paul, MN, unas deformaciones lineales máximas en el intervalo de un 40 a un 215 por ciento son comunes. La deformación de área de un polímero electroactivo hace referencia al cambio en cuanto al área plana, por ejemplo el cambio en el plano que se define mediante las direcciones 108 y 110 en las figuras 1A y 1B, por unidad de área del polímero con el accionamiento en relación con el estado no accionado. Unas deformaciones de área máximas de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento son posibles para los polímeros previamente deformados de la presente invención. Para algunos polímeros previamente deformados, unas deformaciones de área máximas en el intervalo de un 70 a un 330 por ciento son comunes.

10

15

20

25

30

35

40

55

60

En general, después del polímero se deforme previamente, éste puede fijarse a uno o más objetos. Cada objeto puede ser adecuadamente rígido para mantener el nivel de deformación previa que se desea en el polímero. El polímero puede fijarse al uno o más objetos de acuerdo con cualquier procedimiento convencional conocido en la técnica tal como un adhesivo químico, un material, acoplamiento mecánico, etc.

Los transductores y polímeros previamente deformados de la presente invención no se limitan a cualquier geometría o deflexión lineal particular. Por ejemplo, el polímero y los electrodos pueden conformarse para dar cualquier geometría o forma que incluya tubos y rollos, polímeros estirados acoplados entre múltiples estructuras rígidas, polímeros estirados acoplados a lo largo de un armazón de cualquier geometría - incluyendo geometrías curvadas o complejas, a lo largo de un armazón que tiene una o más uniones, etc. La deflexión de un transductor de acuerdo con la presente invención incluye la expansión y compresión lineal en una o más direcciones, la flexión, la deflexión axial cuando el polímero se enrolla, la deflexión fuera de un orificio previsto en un sustrato, etc. La deflexión de un transductor puede verse afectada por cómo el polímero se restringe mediante un armazón o unas estructuras rígidas acopladas al polímero. En una realización, un material flexible que es más rígido en cuanto a su elongación que el polímero se acopla a un lado de un transductor induce la flexión cuando el polímero se acciona. En otra realización, se hace referencia a un transductor que se flexa en sentido radial fuera del plano como un diafragma. Un accionador de diafragma se describirá con más detalle con respecto a las figuras 1E y 1F.

Los polímeros electroactivos de acuerdo con una realización de la presente invención incluyen una superficie con textura. La figura 1C ilustra una superficie con textura 150 para un polímero electroactivo 152 que tiene un perfil de tipo onda. La superficie con textura 150 permite que el polímero 152 se flexe usando la flexión de las ondas de superficie 154. La flexión de las ondas de superficie 154 proporciona una adaptabilidad direccional en una dirección 155 con menos resistencia que el estiramiento en volumen para un electrodo rígido acoplado al polímero 152 en la dirección 155. La superficie con textura 150 puede caracterizarse por canales y crestas, por ejemplo, aproximadamente de 0,1 micrómetros a 40 micrómetros de anchura y aproximadamente de 0,1 micrómetros a 20 micrómetros de profundidad. En el presente caso, la anchura y la profundidad de la onda es sustancialmente menor que el espesor del polímero. En un ejemplo específico, los canales y crestas son de aproximadamente 10 micrómetros de anchura y seis micrómetros de profundidad sobre una capa de polímero con un espesor de 200 micrómetros.

En una realización, una capa delgada de un material rígido 156, tal como un electrodo, se acopla al polímero 152 para proporcionar el perfil de tipo onda. Durante la fabricación, el polímero electroactivo se estira más de lo que éste puede estirarse cuando se acciona, y la capa delgada de un material rígido 156 se acopla a la superficie del polímero estirado 152. Posteriormente, el polímero 152 se relaja y la estructura se pandea para proporcionar la superficie con textura.

En general, una superficie con textura puede comprender cualquier topografía superficial no uniforme o no suave que permite que un polímero se flexe usando la deformación en la superficie del polímero. A modo de ejemplo, la figura 1D ilustra un polímero electroactivo 160 que incluye una superficie rugosa 161 que tiene una textura aleatoria. La superficie rugosa 160 permite una deflexión plana que no es direccionalmente adaptable. De forma ventajosa, la deformación en cuanto a la topografía superficial puede permitir la deflexión de un electrodo rígido con menos resistencia que compresión o estiramiento en volumen. Debería observarse que la deflexión de un polímero previamente deformado que tiene una superficie con textura puede comprender una combinación de deformación superficial y estiramiento en volumen del polímero.

Las superficies con textura o no uniformes para el polímero pueden permitir también el uso de una capa de barrera y/o electrodos que se basan en la deformación de las superficies con textura. Los electrodos pueden incluir metales que se doblan de acuerdo con la geometría de la superficie del polímero. La capa de barrera puede usarse para bloquear la carga en el caso de rotura eléctrica local en el material de polímero previamente deformado.

Los materiales adecuados para su uso como un polímero previamente deformado con la presente invención puede incluir cualquier polímero o caucho sustancialmente aislante que se deforme en respuesta a una fuerza electrostática o cuya deformación da como resultado un cambio en el campo eléctrico. Un material adecuado es NuSil CF19-2186 tal como lo proporciona NuSil Technology de Carpenteria, CA. Otros materiales a modo de ejemplo adecuados para su uso como un polímero previamente deformado incluyen, cualquier polímero

elastomérico dieléctrico, cauchos de silicona, fluoroelastómeros, siliconas tales como Dow Corning HS3 tal como la proporciona Dow Corning de Wilmington, Delaware, fluorosiliconas tales como Dow Corning 730 tal como la proporciona Dow Corning de Wilmington, Delaware, etc., y polímeros acrílicos tales como cualquier material acrílico en la serie acrílica 4900 VHB tal como lo proporciona 3M Corp. de St. Paul, MN.

- 5 En muchos casos, los materiales que se usan en los dispositivos y procedimientos de acuerdo con la presente invención son unos polímeros comercialmente disponibles. Los polímeros comercialmente disponibles pueden incluir, por ejemplo, cualquier elastómero de silicona, poliuretano, copolímero de PVDF y elastómero adhesivo comercialmente disponible. El uso de los materiales comercialmente disponibles proporciona unas alternativas rentables para los transductores y dispositivos asociados de la presente invención. El uso de los materiales comercialmente disponibles puede simplificar la fabricación. En un ejemplo, el polímero comercialmente disponible es un polímero de elastómero acrílico comercialmente disponible que comprende mezclas de acrilato alifático que se fotocuran durante la fabricación. La elasticidad del elastómero acrílico resulta de una combinación de los grupos alifáticos ramificados y la reticulación entre las cadenas de polímero acrílico.
- Los materiales que se usan como un polímero previamente deformado pueden seleccionarse en base a una o más propiedades de material tal como una alta resistencia a la rotura de dieléctrico, un bajo módulo de elasticidad para deformaciones grandes o pequeñas, una alta constante dieléctrica, etc. En una realización, el polímero se selecciona de tal modo que éste tiene un módulo de elasticidad de, como máximo, aproximadamente 100 MPa. En otra realización, el polímero se selecciona de tal modo que éste tiene una máxima presión de accionamiento de entre aproximadamente 0,05 MPa y aproximadamente 10 MPa y, preferentemente, de entre aproximadamente 0,3 MPa y aproximadamente 3 MPa. En otra realización más, el polímero se selecciona de tal modo que éste tiene una constante dieléctrica de entre aproximadamente 2 y aproximadamente 20 y, preferentemente, de entre aproximadamente 2,5 y aproximadamente 12. Para algunas aplicaciones, un polímero electroactivo se selecciona en base a una o más demandas de aplicación tales como un amplio intervalo de temperatura y/o humedad, repetibilidad, precisión, baja fluencia, fiabilidad y resistencia.
- Los voltajes de accionamiento adecuados para los polímeros previamente deformados de la presente invención pueden variar en base al material de polímero electroactivo y sus propiedades (por ejemplo, la constante dieléctrica) así como las dimensiones del polímero (por ejemplo, el espesor entre los electrodos). A modo de ejemplo, los campos eléctricos de accionamiento para el polímero 102 en la figura 1A pueden variar en magnitud de aproximadamente 0 V/m a 440 megavoltios/metro. Los voltajes de accionamiento en el presente intervalo pueden producir una presión en el intervalo de aproximadamente 0 Pa a aproximadamente 10 MPa. Para lograr un transductor capaz de unas fuerzas más altas, el espesor del polímero puede aumentarse. Como alternativa, múltiples capas de polímero pueden implementarse. Los voltajes de accionamiento para un polímero particular pueden reducirse aumentando la constante dieléctrica, disminuyendo el espesor de polímero y disminuyendo el módulo de elasticidad, por ejemplo.
- Los polímeros previamente deformados de la presente invención pueden cubrir un amplio intervalo de espesores. En una realización, el espesor de polímero puede variar entre aproximadamente 1 micrómetro y 2 milímetros. Los espesores típicos antes de la deformación previa incluyen 50 225 micrómetros para HS3, 25 75 micrómetros para NuSil CF 19-2186 y 100 1.000 micrómetros para cualquiera de los polímeros acrílicos de la serie VHB 4900 de 3M. El espesor de polímero puede reducirse mediante el estiramiento de la película en una o ambas direcciones planas.
  En muchos casos, los polímeros previamente deformados de la presente invención pueden fabricarse e implementarse como películas delgadas. Unos espesores adecuados para estas películas delgadas pueden ser inferiores a 50 micrómetros.

## 3. Accionadores

45

- La deflexión de un polímero previamente deformado puede usarse en una variedad de formas de producir energía mecánica. Hablando en términos generales, los polímeros electroactivos pueden implementarse con una variedad de accionadores incluyendo accionadores convencionales retroadaptados con un polímero previamente deformado y unos accionadores a medida diseñados en especial para uno o más polímeros previamente deformados. Los accionadores convencionales incluyen extensores, barras de flexión, pilas, diafragmas, etc. Varios accionadores a medida a modo de ejemplo diferentes de acuerdo con la presente invención se analizarán a continuación.
- La figura 1E ilustra una vista lateral en sección transversal de un accionador de diafragma 130 que incluye un polímero previamente deformado 131 antes del accionamiento. El polímero previamente deformado 131 se acopla a un armazón 132. El armazón 132 incluye un orificio circular 133 que permite la deflexión del polímero 131 en perpendicular al área del orificio circular 133. El accionador de diafragma 130 incluye unos electrodos circulares 134 y 136 sobre cualquiera de los lados del polímero 131 para proporcionar una diferencia de voltaje a lo largo de una porción del polímero 131.

En la configuración sin voltaje de la figura 1E, el polímero 131 se estira y se fija al armazón 132 con tensión para lograr una deformación previa. Con la aplicación de un voltaje adecuado a los electrodos 134 y 136, la película de polímero 131 se expande lejos del plano del armazón 132 tal como se ilustra en la figura 1F. Los electrodos 134 y 136 son adaptables y cambian de forma con el polímero previamente deformado 131 a medida que éste se flexa.

El accionador de diafragma 130 es capaz de expansión en ambas direcciones lejos del plano. En un ejemplo, el lado de debajo 141 del polímero 131 incluye una presión de desviación que influye sobre la expansión de la película de polímero 131 para un accionamiento continuo hacia arriba en la dirección de las flechas 143 (la figura 1F). En otro ejemplo, un agente de hinchamiento tal como una pequeña cantidad de aceite de silicona se aplica al lado de debajo 141 para influir sobre la expansión del polímero 131 en la dirección de las flechas 143. El agente de hinchamiento da lugar a una deflexión permanente ligera en una dirección tal como se determina durante la fabricación, por ejemplo suministrando una ligera presión sobre el lado de debajo 141 cuando el agente de hinchamiento se aplica. El agente de hinchamiento permite un accionamiento continuo del diafragma en una dirección deseada sin usar una presión de desviación.

La cantidad de expansión para el accionador de diafragma 130 variará en base a un número de factores incluyendo el material del polímero 131, el voltaje aplicado, la cantidad de la deformación previa, cualquier presión de desviación, la adaptabilidad de los electrodos 134 y 136, etc. En un ejemplo, el polímero 131 es capaz de unas deflexiones hasta una altura 137 de por lo menos aproximadamente un 50 por ciento del diámetro de orificio 139 y puede adoptar una forma semiesférica a unas deflexiones grandes. En el presente caso, un ángulo 147 formado entre el polímero 131 y el armazón 132 puede ser menor de 90 grados.

Tal como se menciona anteriormente, la expansión en una dirección de un polímero electroactivo puede inducir unos esfuerzos de compresión en una segunda dirección, tal como debido al efecto Poisson. Esto puede reducir la salida mecánica para un transductor que proporciona una salida mecánica en la segunda dirección. De forma correspondiente, los accionadores pueden diseñarse para restringir un polímero en la dirección de no salida. En algunos casos, los accionadores pueden diseñarse para mejorar la salida mecánica usando la deflexión en la dirección de no salida.

20

25

30

35

40

45

60

Un accionador que usa la deflexión en una dirección plana para mejorar la salida mecánica en la otra dirección plana es un accionador de arco. Las figuras 2A y 2B ilustran un accionador de arco 200 antes y después del accionamiento. El accionador de arco 200 es un mecanismo plano que comprende un armazón flexible 202 que proporciona una asistencia mecánica para mejorar la salida mecánica para un polímero 206 acoplado al armazón 202. El armazón 202 incluye seis miembros rígidos 204 conectados en las uniones 205. Los miembros 204 y las uniones 205 proporcionan una asistencia mecánica acoplando la deflexión de polímero en una dirección plana 208 en una salida mecánica en una dirección plana perpendicular 210. De forma más específica, el armazón 202 se dispone de tal modo que una deflexión pequeña del polímero 206 en la dirección 208 mejora el desplazamiento en la dirección plana perpendicular 210. Acoplados a superficies opuestas (de arriba y de debajo) del polímero 206 se encuentran unos electrodos 207 (el electrodo de debajo sobre el lado de debajo del polímero 206 que no se muestra) para proporcionar una diferencia de voltaje a lo largo de una porción del polímero 206.

El polímero 206 se configura con unos niveles diferentes de deformación previa en sus direcciones ortogonales. De forma más específica, el polímero electroactivo 206 incluye una alta deformación previa en la dirección plana 208, y poca o ninguna deformación previa en la dirección plana perpendicular 210. Esta deformación previa anisótropa se dispone en relación con la geometría del armazón 202. De forma más específica, con el accionamiento a lo largo de los electrodos 207 y 209, el polímero se contrae en la dirección de alta deformación previa 208. Con el movimiento restringido del armazón 202 y el brazo de palanca que se proporciona por los miembros 204, esta contracción ayuda a accionar la deflexión en la dirección plana perpendicular 210. Por lo tanto, incluso para una deflexión corta del polímero 206 en la dirección de alta deformación previa 208, el armazón 202 se arquea hacia fuera en la dirección 210. De esta forma, una pequeña contracción en la dirección de alta deformación previa 210 se vuelve una expansión más grande en la dirección de deformación previa relativamente baja 208.

Usando la deformación previa anisótropa y la restricción que se proporciona por el armazón 202, el accionador de arco 200 permite la contracción en una dirección para potenciar la deflexión mecánica y la conversión de eléctrica a mecánica en otra. En otras palabras, una carga 211 (la figura 2B) acoplada al accionador de arco 200 se acopla a la deflexión del polímero 206 en dos direcciones - la dirección 208 y 210. Por lo tanto, como resultado de la deformación previa diferencial del polímero 206 y la geometría del armazón 202, el accionador de arco 200 es capaz de proporcionar un desplazamiento mecánico más grande que un polímero electroactivo solo para una entrada eléctrica común.

El accionador de arco 200 puede configurarse en base al polímero 206. A modo de ejemplo, la geometría del armazón 202 y las dimensiones del polímero 206 pueden adaptarse en base al material de polímero 206. En una realización específica que usa silicona HS3 como el polímero 206, el polímero 206 tiene preferentemente una relación en las direcciones 208 y 210 de 9:2 con unas deformaciones previas de aproximadamente un 270 por ciento y un - 25 por ciento en las direcciones 208 y 210, respectivamente. Usando la presente disposición, son posibles unas deformaciones lineales de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento en la dirección 210.

La deformación previa en el polímero 206 y la restricción que se proporciona por el armazón 202 pueden permitir también que el accionador de arco 200 utilice unos voltajes de accionamiento inferiores para el polímero previamente deformado 206 para una deflexión dada. Debido a que el accionador de arco 200 tiene un módulo efectivo inferior de elasticidad en la dirección de baja deformación previa 210, la restricción mecánica que se proporciona por el armazón 202 permite que el accionador de arco 200 se accione en la dirección 210 para una

mayor deflexión con un voltaje inferior. Además, la alta deformación previa en la dirección 208 aumenta la resistencia a la rotura del polímero 206, permitiendo unos voltajes más altos y unas deflexiones más altas para el accionador de arco 200.

Tal como se menciona anteriormente con respecto a la figura 1A, cuando un polímero se expande como resultado de las fuerzas electrostáticas, este continúa expandiéndose hasta que las fuerzas mecánicas equilibran la presión electrostática que acciona la expansión. Cuando la carga 211 se acopla al accionador de arco 200, los efectos mecánicos que se proporcionan por la carga 211 influirán sobre el equilibrio de fuerza y la deflexión del polímero 206. Por ejemplo, si la carga 211 resiste la expansión del accionador de arco 200, entonces el polímero 206 puede no expandirse tanto como si no hubiera una carga.

5

25

30

35

40

45

50

55

60

10 En un ejemplo, el accionador de arco 200 puede incluir unos componentes adicionales para proporcionar una asistencia mecánica y para potenciar la salida mecánica. A modo de ejemplo, unos resortes 220, tal como se muestra en la figura 2C, pueden acoplarse al accionador de arco 200 para potenciar la deflexión en la dirección 210. Los resortes cargan el accionador de arco 200 de tal modo que la fuerza de resorte que ejercen los resortes se opone a una resistencia que se proporciona por una carga externa. En algunos casos, los resortes 220 proporcionan 15 una asistencia creciente para la deflexión del accionador de arco 200. En un ejemplo, unos elementos de resorte pueden integrarse en las uniones 205 en lugar de los resortes externos 220 para potenciar la deflexión del accionador de arco 200. Además, la deformación previa puede aumentarse para potenciar la deflexión. La carga puede también estar acoplada a los miembros rígidos 204 encima y debajo del armazón 202 en lugar de sobre los miembros rígidos del lado del armazón 202 (tal como se muestra en la figura 2B). Debido a que los miembros rígidos 20 204 de arriba y de debajo se contraen uno hacia otro cuando se aplica un voltaje tal como se muestra en la figura 2B, el accionador de arco 200 proporciona un dispositivo a modo de ejemplo se contrae en el plano con la aplicación de un voltaje en lugar de expandirse.

A pesar de que el accionador de arco 200 de las figuras 2A - 2C ilustra un ejemplo específico de un accionador a medida que incluye un armazón flexible y un polímero electroactivo, cualquier geometría de armazón o asistencia mecánica para mejorar el desplazamiento de un polímero electroactivo es adecuada para su uso con la presente invención.

La forma y la restricción del polímero pueden afectar a la deflexión. Una relación de aspecto para un polímero electroactivo se define como la relación de su longitud con respecto a su anchura. Si la relación de aspecto es alta (por ejemplo, una relación de aspecto de por lo menos aproximadamente 4:1) y el polímero se restringe a lo largo de su longitud mediante unos miembros rígidos, entonces la combinación puede dar como resultado una deflexión sustancialmente unidimensional en la dirección de la anchura.

Las figuras 2D y 2E ilustran un accionador de movimiento lineal 230 antes y después del accionamiento. El accionador de movimiento lineal 230 es un mecanismo plano que proporciona una salida mecánica en una dirección. El accionador de movimiento lineal 230 comprende un polímero 231 que tiene una longitud 233 sustancialmente más grande que su anchura 234 (por ejemplo, una relación de aspecto de por lo menos aproximadamente 4:1). El polímero 231 se acopla sobre lados opuestos a los miembros rígidos 232 de un armazón a lo largo de su longitud 233. Los miembros rígidos 232 tienen una rigidez más grande que el polímero 231. La restricción de borde geométrico que se proporciona por los miembros rígidos 232 evita sustancialmente el desplazamiento en una dirección 236 a lo largo de la longitud 233 del polímero y facilita una deflexión casi exclusivamente en una dirección 235. Cuando el accionador de movimiento lineal 230 se implementa con un polímero 231 que tiene una deformación previa anisótropa, tal como una deformación previa más alta en la dirección 236 que en la dirección 235, entonces el polímero 231 es más rígido en la dirección 236 que en la dirección 235 y pueden resultar unas deflexiones grandes en la dirección 235. A modo de ejemplo, una disposición de este tipo puede producir unas deformaciones lineales de por lo menos aproximadamente un 200 por ciento para materiales acrílicos que tienen una deformación previa anisótropa.

Una colección de polímeros electroactivos o accionadores puede unirse mecánicamente para formar un accionador más grande con una salida común, por ejemplo fuerza y/o desplazamiento. Usando un polímero electroactivo pequeño como una unidad base en una colección, la conversión de energía eléctrica en energía mecánica puede convertirse a escala de acuerdo con una aplicación. A modo de ejemplo, múltiples accionadores de movimiento lineal 230 pueden combinarse en serie en la dirección 235 para formar un accionador que tiene una deflexión acumulativa de la totalidad de los accionadores de movimiento lineal en la serie. Cuando se convierte energía eléctrica en energía mecánica, puede hacerse referencia a los polímeros electroactivos – o bien de forma individual o bien unidos mecánicamente en una colección - como 'músculo artificial'. Para los fines en el presente documento, el músculo artificial se define como uno o más transductores y/o accionadores que tienen un único desplazamiento y/o fuerza de salida. El músculo artificial puede implementarse a un nivel macro o microscópico y puede comprender uno o más cualesquiera de los accionadores que se describen en el presente documento.

La figura 2F ilustra una vista lateral en sección transversal de un accionador de múltiples capas 240 como un ejemplo de un músculo artificial. El accionador de múltiples capas 240 incluye cuatro polímeros previamente deformados 241 dispuestos en paralelo y cada uno acoplado a un armazón rígido 242 de tal modo que éstos tienen la misma deflexión. Los electrodos 243 y 244 se depositan sobre superficies opuestas de cada polímero 241 y

# ES 2 394 501 T3

proporcionan un accionamiento electrostático simultáneo para los cuatro polímeros previamente deformados 241. El accionador de múltiples capas 240 proporciona una salida de fuerza acumulativa de las capas de polímero individuales 241.

En otro ejemplo, múltiples capas de polímero electroactivo pueden usarse en lugar de un polímero para aumentar la salida de presión o fuerza de un accionador. Por ejemplo, diez polímeros electroactivos pueden disponerse en capas para aumentar la salida de presión del accionador de diafragma de la figura 1E. La figura 2G ilustra un accionador 245 de diafragma de múltiples capas apiladas de este tipo como otro ejemplo de músculo artificial. El accionador de múltiples capas apiladas 245 incluye tres capas de polímero 246 en capas una sobre otra y puede acoplarse mediante unas capas adhesivas 247. Dentro de las capas adhesivas 247 se encuentran los electrodos 248 y 249 que proporcionan el accionamiento para las capas de polímero 246. Una placa relativamente rígida 250 se acopla a la capa de polímero más exterior y se modela para incluir unos orificios 251 que permiten la deflexión para el accionador 245 de diafragma de múltiples capas apiladas. Combinando las capas de polímero 246, el accionador de múltiples capas apiladas 245 proporciona una salida de fuerza acumulativa de las capas de polímero individuales 246.

Además del accionador de movimiento lineal 230 de las figuras 2D y 2E, los polímeros electroactivos pueden estar incluidos en una variedad de accionadores que proporcionan un desplazamiento lineal. La figura 2H ilustra un accionador lineal 255 que comprende un diafragma de polímero electroactivo 256. En el presente caso, un eje de salida 257 se acopla a una porción central del diafragma 256 que se flexa en un orificio 258 de un armazón 261. Con el accionamiento y la eliminación de energía electrostática, el eje de salida 257 se traslada tal como se indica mediante la flecha 259. El accionador lineal 255 puede incluir también un elemento de resorte adaptable 260 que ayuda a colocar el eje de salida 257.

En otro ejemplo, los polímeros previamente deformados pueden enrollarse o plegarse para dar unos accionadores y transductores lineales que se flexan en sentido axial con el accionamiento. Debido a que la fabricación de los polímeros electroactivos es a menudo la más simple con un número menor de capas, los accionadores enrollados proporcionan una forma eficiente de apretar las capas grandes del polímero hasta dar una forma compacta. Los accionadores y transductores enrollados o plegados pueden incluir una o más capas del polímero enrolladas o plegadas para proporcionar numerosas capas del polímero adyacentes una a otra. Los accionadores enrollados o plegados son aplicables siempre que se usen accionadores lineales, tales como patas y dedos robóticos, abrazaderas de fuerza elevada y accionadores lineales de propósito general.

30 La figura 21 ilustra un accionador de tipo oruga 262. El accionador de tipo oruga 262 incluye dos o más capas de polímero enrolladas previamente estiradas con los electrodos 263 que se flexan en sentido axial a lo largo de su eje cilíndrico. El accionador de tipo oruga 262 también incluye unas abrazaderas electrostáticas 264 y 265 para el acoplamiento a y desacoplamiento de una superficie de metal 268. Las abrazaderas electrostáticas 264 y 265 permiten que la carrera total para el accionador de tipo oruga 262 se aumente en comparación con un accionador 35 sin sujeción. Debido a que la fuerza de sujeción por unidad de peso para las abrazaderas electrostáticas 264 y 265 es alta, las ventajas de fuerza por unidad de peso de los polímeros previamente deformados de la presente invención se conservan con el accionador de tipo oruga 262. Las abrazaderas electrostáticas 264 y 265 se acoplan al accionador de tipo oruga en las regiones de conexión 267. Un cuerpo 266 del accionador de tipo oruga incluye las regiones de conexión 267 y el polímero 263 y tiene un grado de libertad a lo largo de la dirección axial del polímero 40 enrollado 263 entre las regiones de conexión 267. En un ejemplo, las abrazaderas electrostáticas 264 y 265 incluyen un adhesivo 269 aislante que evita el cortocircuito eléctrico desde las abrazaderas electrostáticas conductoras 264 y 265 hasta la superficie de metal 268.

El accionador de tipo oruga 262 se mueve hacia arriba en un procedimiento en seis etapas. En la etapa uno, el accionador de tipo oruga 262 se inmoviliza en sus extremos respectivos cuando ambas abrazaderas electrostáticas 264 y 265 se accionan y el polímero 263 se relaja. Una abrazadera electrostática se acciona mediante la aplicación de una diferencia de voltaje entre la abrazadera y la superficie de metal 268. En la etapa dos, la abrazadera 265 se libera. La liberación de una de las abrazaderas 264 y 265 permite que su extremo respectivo del accionador de tipo oruga 262 se mueva con libertad. En la etapa tres, el polímero electroactivo 263 se acciona y extiende el accionador de tipo oruga 262 hacia arriba. En la etapa cuatro, la abrazadera 265 se acciona y el accionador de tipo oruga 262 se inmoviliza. En la etapa cinco, la abrazadera 264 se libera. En la etapa seis, el polímero 263 se relaja y el accionador de tipo oruga 262 se contrae. Repitiendo de forma cíclica las etapas uno a seis, el accionador de tipo oruga 262 se mueve en la dirección hacia arriba. Conmutando las abrazaderas 264 y 265 en el procedimiento en seis etapas anterior, el accionador de tipo oruga 262 se mueve en el sentido inverso.

A pesar de que el accionador de tipo oruga 262 se ha descrito en términos del accionamiento usando un único polímero electroactivo y dos abrazaderas, pueden implementarse unos accionadores de tipo oruga de múltiples segmentos que usan múltiples polímeros electroactivos. Los accionadores de tipo oruga de múltiples segmentos permiten que un accionador de tipo oruga aumente en cuanto a su longitud sin volverse más grueso. Un accionador de tipo oruga de dos segmentos usaría dos polímeros enrollados en lugar de uno y tres abrazaderas en lugar de dos. En general, un accionador de tipo oruga de n segmentos comprende n accionadores entre n+1 abrazaderas.

45

50

55

5

10

La figura 2J ilustra un accionador de película estirada 270 para proporcionar una deflexión lineal. El accionador de película estirada 270 incluye un armazón rígido 271 que tiene un orificio 272. Un polímero previamente deformado 273 se acopla en tensión al armazón 271 y abarca el orificio 272. Una barra rígida 274 se acopla al centro del polímero 273 y proporciona un desplazamiento externo que se corresponde con la deflexión del polímero 273. Los pares de electrodos adaptables 275 y 276 se modelan sobre ambas superficies de arriba y de debajo del polímero 273 sobre los lados izquierdo y derecho, respectivamente, de la barra rígida 274. Cuando el par de electrodos 275 se acciona, una porción del polímero 273 entre y en las proximidades del par de electrodos 275 de arriba y de debajo se expande en relación con el resto del polímero 273 y la tensión existente en el resto del polímero 273 tira de la barra rígida 274 para moverse hacia la derecha. A la inversa, cuando el par de electrodos 276 se acciona, una segunda porción del polímero 273 afectada por el par de electrodos 276 se expande en relación con el resto del polímero 273 y permite que la barra rígida 274 se mueva hacia la izquierda. Alternar el accionamiento de los electrodos 275 y 276 proporciona una carrera 279 total efectivamente más larga para la barra rígida 274. Una variación de este accionador incluye añadir una deformación previa anisótropa al polímero de tal modo que el polímero tiene una alta deformación previa (y rigidez) en la dirección perpendicular al desplazamiento de la barra rígida. Otra variación es eliminar uno de los pares de electrodos. Para el beneficio de simplificar el diseño, la presente variación reduce la carrera 279 para el accionador de película estirada 270. En el presente caso, la porción del polímero que ya no se usa por el electrodo retirado responde ahora de forma pasiva como un resorte de recuperación.

10

15

20

25

30

35

40

55

60

La figura 2K ilustra un accionador de barra de flexión 280. El accionador de barra de flexión 280 incluye un polímero 281 fijado en un extremo por un soporte rígido 282 y acoplado a un material delgado flexible 283 tal como polimida o mylar usando una capa adhesiva, por ejemplo. El material delgado flexible 283 tiene un módulo de elasticidad más grande que el polímero 281. La diferencia en cuanto al módulo de elasticidad para los lados 286 y 287 de arriba y de debajo del accionador de barra de flexión 280 da lugar a que el accionador de barra de flexión 280 se doble con el accionamiento. Los electrodos 284 y 285 se acoplan a los lados opuestos del polímero 281 para proporcionar energía eléctrica. El accionador de barra de flexión 280 incluye un extremo libre 288 que tiene un único grado de libertad a flexión. La deflexión del extremo libre 288 puede medirse mediante la diferencia en cuanto al ángulo entre el extremo libre 288 y el extremo fijo mediante el soporte rígido 282. La figura 2L ilustra el accionador de barra de flexión 280 con un ángulo de flexión de 90 grados.

El máximo ángulo de flexión para el accionador de barra de flexión 280 variará con un número de factores incluyendo el material de polímero, la longitud de accionador, la rigidez de flexión de los electrodos 284 y 285 y el material delgado flexible 283, etc. Para un accionador de barra de flexión 280 que comprende silicona HS3 de Dow Corning, electrodos de oro y un área activa de 3,5 mm de longitud, pueden conseguirse unos ángulos de flexión de más de 225 grados. Para el accionador de barra de flexión 280, debido a que la longitud del área activa aumenta, pueden conseguirse unos ángulos de flexión aumentados. De forma correspondiente, extendiendo la longitud activa del accionador de barra de flexión que se menciona anteriormente a 5 mm permite un ángulo de flexión que se aproxima a 360 grados.

En un ejemplo, uno de los electrodos puede actuar como el material delgado flexible 283. Cualquier metal delgado, tal como oro, que tiene una baja rigidez de flexión y una alta rigidez de tracción puede ser adecuado para un electrodo que actúa como el material delgado flexible 283. En otro ejemplo, una capa de barrera se acopla entre uno de los electrodos 284 y 285 y el polímero 281 para minimizar el efecto de cualquier rotura localizada en el polímero. La rotura puede definirse como el punto en el que el polímero no puede soportar el voltaje aplicado. La capa de barrera es típicamente más delgada que el polímero 281 y tiene una constante dieléctrica más alta que el polímero 281 de tal modo que la caída de voltaje tiene lugar principalmente a lo largo del polímero 281. A menudo, se prefiere que la capa de barrera tenga una alta resistencia a la rotura de dieléctrico.

La figura 2M ilustra un accionador de barra de flexión 290. El accionador de barra de flexión 290 incluye unos polímeros previamente deformados de arriba y de debajo 291 y 292 fijados en un extremo por un soporte rígido 296. Cada uno de los polímeros 291 y 292 puede accionarse de forma independiente. El accionamiento independiente se consigue mediante un control eléctrico separado de los electrodos 293 y 294 de arriba y de debajo acoplados a los polímeros electroactivos 291 y 292 de arriba y de debajo, respectivamente. Un electrodo común 295 se sitúa entre los polímeros electroactivos 291 y 292 de arriba y de debajo y se acopla a ambos. El electrodo común 295 puede ser de rigidez suficiente para mantener la deformación previa sobre las capas de polímero 291 y 292 mientras que sigue permitiendo la extensión y la flexión.

El accionamiento del polímero electroactivo de arriba 291 usando el par de arriba de electrodos 293 y 295 da lugar a que el accionador de barra de flexión 290 se doble hacia debajo. El accionamiento del polímero de debajo 292 usando el par de debajo de electrodos 294 y 295 da lugar a que el accionador de barra de flexión 290 se doble hacia arriba. Por lo tanto, el uso independiente de los polímeros electroactivos 291 y 292 de arriba y de debajo permite que el accionador de barra de flexión 290 se controle a lo largo de una dirección radial 297. Cuando ambos polímeros de arriba y de debajo 291 y 292 se accionan de forma simultánea - y son de un tamaño y un material sustancialmente similar - el accionador de barra de flexión 290 se extiende en longitud a lo largo de la dirección lineal 298. Combinando la capacidad de controlar el movimiento en la dirección radial 297 y la dirección lineal 298, el accionador de barra de flexión 290 se vuelve un accionador de dos grados de libertad. De forma correspondiente, el accionamiento y control independiente de los polímeros de arriba y de debajo 291 y 292 permite que un extremo

libre 299 del accionador de barra de flexión 290 ejecute unos movimientos complejos, tal como trayectorias circulares o elípticas.

#### 4. Rendimiento

20

25

30

35

50

Un transductor de acuerdo con la presente invención realiza la conversión entre energía eléctrica y energía mecánica. El rendimiento de transductor puede caracterizarse en términos del transductor por sí mismo, el rendimiento del transductor en un accionador, o el rendimiento del transductor en una aplicación específica (por ejemplo, un número de transductores que se implementan en un motor). La deformación previa de los polímeros electroactivos de acuerdo con la presente invención proporciona unas mejoras sustanciales en el rendimiento de transductor.

La caracterización del rendimiento de un transductor por sí mismo típicamente se refiere a las propiedades de material del polímero y los electrodos. El rendimiento de un polímero electroactivo puede describirse con independencia del tamaño de polímero por parámetros tales como la deformación, la densidad de energía, la presión de accionamiento, la densidad y la eficiencia de la presión de accionamiento. Debería observarse que la caracterización de rendimiento de los polímeros previamente deformados y sus transductores respectivos que se describen a continuación pueden variar para diferentes polímeros electroactivos y electrodos.

Los polímeros previamente deformados en un transductor de la presente invención puede tener un módulo efectivo en el intervalo de aproximadamente 0,1 a aproximadamente 100 MPa. La presión de accionamiento se define como el cambio en cuanto a la fuerza dentro de un polímero previamente deformado por unidad de área en sección transversal entre los estados accionados y no accionados. En algunos casos, los polímeros previamente deformados en un transductor de la presente invención pueden tener una presión de accionamiento en el intervalo de aproximadamente 0 a aproximadamente 100 MPa, y más preferentemente en el intervalo 0,1 a 10 MPa. La densidad de energía elástica específica - que se define como la energía de deformación de una unidad de masa del material en la transición entre los estados accionados y no accionados - puede usarse también para describir un polímero electroactivo en el que el peso es importante. Los polímeros previamente deformados que pueden usarse en un transductor de la presente invención pueden tener una densidad de energía elástica específica de más de 3 J/g.

El rendimiento de un polímero previamente deformado puede describirse también, con independencia del tamaño de polímero, por la eficiencia. La eficiencia electromecánica se define como la relación de la energía de salida mecánica con respecto a la energía de entrada eléctrica. Una eficiencia electromecánica más grande que un 80 por ciento puede conseguirse con algunos polímeros previamente deformados. Se hace referencia al tiempo para que un polímero previamente deformado se eleve (o caiga) hasta su máxima (o mínima) presión de accionamiento como su tiempo de respuesta. Los polímeros previamente deformados pueden dar cabida a un amplio intervalo de tiempos de respuesta. Dependiendo del tamaño y la configuración del polímero, los tiempos de respuesta pueden variar de aproximadamente 0,01 milisegundos a 1 segundo, por ejemplo. Un polímero previamente deformado excitado a una tasa alta puede caracterizarse también por una frecuencia operativa. En un ejemplo, las máximas frecuencias operativas adecuadas para su uso con la presente invención pueden encontrarse en el intervalo de aproximadamente 100 Hz a 100 kHz. Las frecuencias operativas en el presente intervalo permiten que los polímeros previamente deformados de la presente invención se usen en varias aplicaciones acústicas (por ejemplo, altavoces). En algunos ejemplos, los polímeros previamente deformados pueden accionarse a una frecuencia resonante para mejorar la salida mecánica.

El rendimiento de un accionador puede describirse por un parámetro de rendimiento específico del accionador. A modo de ejemplo, el rendimiento de un accionador de un cierto tamaño y peso puede cuantificarse por parámetros tales como la carrera o el desplazamiento, la fuerza, el tiempo de respuesta de accionador. La caracterización del rendimiento de un transductor en una aplicación se refiere a cómo de bien el transductor está incorporado en una aplicación particular (por ejemplo, en robótica). El rendimiento de un transductor en una aplicación puede describirse por un parámetro de rendimiento específico de la aplicación (por ejemplo, fuerza/unidad de peso en las aplicaciones robóticas). Los parámetros específicos de la aplicación incluyen la carrera o el desplazamiento, la fuerza, el tiempo de respuesta de accionador, la respuesta en frecuencia, la eficiencia, etc. Estos parámetros pueden depender del tamaño, la masa y/o el diseño del transductor y la aplicación particular.

Debería observarse que las propiedades de material deseables para un polímero electroactivo pueden variar con un accionador o aplicación. Para producir una gran presión de accionamiento y una gran deformación para una aplicación, un polímero previamente deformado puede implementarse con una de una alta resistencia dieléctrica, una alta constante dieléctrica y un bajo módulo de elasticidad. Adicionalmente, un polímero puede incluir una de una resistividad de alto volumen y una baja amortiguación mecánica para maximizar la eficiencia energética para una aplicación.

### 55 5. Electrodos

Los transductores de la presente invención incluyen por lo menos dos electrodos para el accionamiento de un polímero electroactivo. Hablando en términos generales, los electrodos adecuados para su uso con la presente invención pueden ser de cualquier forma y material a condición de que éstos sean capaces de suministrar o de

# ES 2 394 501 T3

recibir un voltaje adecuado, o bien constante o bien variable con el tiempo, a o desde un polímero electroactivo. En una realización, los electrodos se adhieren a una superficie del polímero. Los electrodos que se adhieren al polímero son preferentemente adaptables y se adaptan a la forma cambiante del polímero. Los electrodos pueden aplicarse sólo a una porción de un polímero electroactivo y definen un área activa de acuerdo con su geometría.

Los electrodos adaptables son capaces de deflexión en una o más direcciones. La deformación lineal puede usarse para describir la deflexión de un electrodo adaptable en una de estas direcciones. Tal como se usa la expresión en el presente documento, la deformación lineal de un electrodo adaptable hace referencia a la deflexión por unidad de longitud a lo largo de una línea de deflexión. Unas deformaciones lineales máximas (de tracción o de compresión) de por lo menos aproximadamente un 50 por ciento son posibles para los electrodos adaptables de la presente invención. Para algunos electrodos adaptables, unas deformaciones lineales máximas de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento son comunes. Por supuesto, un electrodo puede flexarse con una deformación menor que el máximo. En un ejemplo, el electrodo adaptable es un 'electrodo con estructura' que comprende una o más regiones de alta conductividad y una o más regiones de baja conductividad.

La figura 3 ilustra una vista superficial desde arriba de un electrodo con estructura 501 que proporciona una adaptabilidad unidireccional. El electrodo con estructura 501 incluye unas pistas de metal 502 modeladas en líneas paralelas a lo largo de una capa de distribución de carga 503- ambas de las cuales cubren un área activa de un polímero (que no se muestra). Las pistas de metal 502 y la capa de distribución de carga 503 se aplican a superficies opuestas del polímero. Por lo tanto, la sección transversal, de la parte de arriba a la de debajo, de un transductor que incluye unos electrodos con estructura 501 sobre superficies opuestas es: pistas de metal de arriba, capa de distribución de carga de arriba, polímero, capa de distribución de carga de debajo, pistas de metal de debajo. Las pistas de metal 502 sobre cualquiera de las superficies del polímero actúan como electrodos para el material de polímero electroactivo entre las mismas. En otro ejemplo, el electrodo de debajo puede ser un electrodo uniforme y adaptable. La capa de distribución de carga 503 facilita la distribución de la carga entre las pistas de metal 502. De forma conjunta, las pistas de metal 502 de alta conductividad conducen rápidamente la carga a lo largo del área activa hasta la capa de distribución de carga 503 de baja conductividad la cual distribuye la carga de manera uniforme a lo largo de la superficie del polímero entre las pistas 502. La capa de distribución de carga 503 es adaptable. Como resultado, el electrodo con estructura 501 permite la deflexión en una dirección adaptable 506 en perpendicular a las pistas de metal paralelas 502.

El accionamiento para la totalidad del polímero puede lograrse extendiendo la longitud de las pistas de metal paralelas 502 a lo largo de la longitud del polímero e implementando un número adecuado de pistas 502 a lo largo de la anchura del polímero. En un ejemplo, las pistas de metal 502 se separan a unos intervalos del orden de 400 micrómetros y tienen un espesor de aproximadamente 20 a 100 nanómetros. La anchura de las pistas es típicamente mucho menor que la separación. Para aumentar la velocidad global de la respuesta para el electrodo con estructura 501, la distancia entre las pistas de metal 502 puede reducirse. Las pistas de metal 502 pueden comprender oro, plata, aluminio y muchos otros metales y materiales conductores relativamente rígidos. En un ejemplo, las pistas de metal sobre superficies opuestas de un polímero electroactivo están desplazadas una con respecto a otra para mejorar la distribución de carga a través de la capa de polímero y para evitar las roturas eléctricas de metal a metal.

La deflexión de las pistas de metal paralelas 502 a lo largo de su eje más grande que la holgura elástica del material de las pistas de metal puede conducir a un daño de las pistas de metal 502. Para evitar un daño de esta forma, el polímero puede restringirse mediante una estructura rígida que evita la deflexión del polímero y las pistas de metal 502 a lo largo de su eje. Los miembros rígidos 232 del accionador de movimiento lineal de la figura 2D y 2E son adecuados a este respecto. En otro ejemplo, las pistas de metal 502 pueden ondularse ligeramente sobre la superficie del polímero 500. Estas ondulaciones añaden adaptabilidad a las pistas 502 a lo largo de su eje y permiten la deflexión en esta dirección.

En general, la capa de distribución de carga 503 tiene una conductancia más grande que el polímero electroactivo pero menor que las pistas de metal. Los requisitos de conductividad no estrictos de la capa de distribución de carga 503 permiten que se use una amplia variedad de materiales. A modo de ejemplo, la capa de distribución de carga puede comprender negro de carbón, fluoroelastómero con plata coloidal, una emulsión de caucho de látex a base de agua con un pequeño porcentaje en carga de masa de yoduro de sodio, y poliuretano con complejo de transferencia de carga de tetratiafulvaleno/ tetracianoquinodimetano (TTF/TCNQ). Estos materiales son capaces de formar unas capas uniformes delgadas con una cobertura uniforme y tienen una conductividad superficial suficiente para conducir la carga entre las pistas de metal 502 antes de que una carga sustancial se filtre a los alrededores. En un ejemplo, el material para la capa de distribución de carga 503 se selecciona en base a la constante de tiempo RC del polímero. A modo de ejemplo, la resistividad de superficie para la capa de distribución de carga 503 adecuada para la presente invención puede encontrarse en el intervalo de 10<sup>6</sup> - 1.0<sup>11</sup> ohmios. Debería observarse también que, en algunos ejemplos, una capa de distribución de carga no se usa y las pistas de metal 502 se modelan directamente sobre el polímero. En el presente caso, aire u otra especie química sobre la superficie del polímero puede ser suficiente para portar la carga entre las pistas. El presente efecto puede potenciarse aumentando la conductividad superficial a través de tratamientos superficiales, tal como grabado por plasma o implantación de iones.

En otro ejemplo, múltiples electrodos de metal se sitúan sobre el mismo lado de un polímero y se extienden por la anchura del polímero. Los electrodos proporcionan adaptabilidad en la dirección perpendicular a la anchura. Dos electrodos de metal adyacentes actúan como electrodos para el material de polímero entre los mismos. Los múltiples electrodos de metal se alternan de esta forma y los electrodos alternos pueden encontrarse en comunicación eléctrica para proporcionar una activación síncrona del polímero.

5

10

15

20

40

45

50

La figura 4 ilustra un polímero previamente deformado 510 subyacente a un electrodo con estructura que no es direccionalmente adaptable. El electrodo con estructura incluye unas pistas de metal 512 modeladas directamente sobre una superficie del polímero electroactivo 510 en unas líneas paralelas separadas de manera uniforme que forman un patrón en 'zig-zag'. Dos pistas de metal 512 sobre superficies opuestas del polímero actúan como electrodos para el material del polímero electroactivo 510 entre los mismos. El patrón en 'zig-zag' de las pistas de metal 512 permite la expansión y la contracción del polímero y el electrodo con estructura en múltiples direcciones 514 y 516.

El uso de una disposición ordenada de pistas de metal tal como se describe con respecto a las figuras 3 y 4 permite el uso de capas de distribución de carga que tienen una conductancia inferior. De forma más específica, a medida que la separación entre las pistas de metal disminuye, la conductancia requerida del material entre las pistas puede disminuir. De esta forma, es posible usar unos materiales que no se consideran normalmente conductores para usarse como una capa de distribución de carga. A modo de ejemplo, los polímeros que tienen una resistividad de superficie de 1.0<sup>10</sup> ohmios pueden usarse como una capa de distribución de carga de esta forma. En un ejemplo específico, se usó caucho como una capa de distribución de carga como parte de un electrodo con estructura sobre una capa de polímero que tiene un espesor de 25 micrómetros y una separación entre pistas de metal paralelas de aproximadamente 500 micrómetros. Además de reducir la conductancia requerida para una capa de distribución de carga, unas pistas de metal muy próximas también aumentan la velocidad de accionamiento debido a que la necesidad de carga sólo se desplaza a través de la capa de distribución de carga a lo largo de una corta distancia entre las pistas de metal muy próximas.

25 A pesar de que los electrodos con estructura se han descrito en términos de dos configuraciones de pistas de metal específicas; los electrodos con estructura pueden modelarse de cualquier forma adecuada. Como apreciará un experto en la técnica, varios patrones de pistas metálicas distribuidos de manera uniforme pueden proporcionar la carga sobre la superficie de un polímero mientras que proporcionan adaptabilidad en una o más direcciones. En algunos casos, un electrodo con estructura puede acoplarse a la superficie del polímero de una manera no uniforme. Debido a que el accionamiento del polímero puede estar limitada a una región activa dentro de una proximidad 30 adecuada de un par de pistas de metal modeladas, las regiones activas y no activas especializadas para un polímero electroactivo pueden definirse mediante el modelado a medida de las pistas de metal. Estas regiones activas y no activas pueden estar formadas para unas geometrías a medida y altas resoluciones de acuerdo con las técnicas de deposición de pistas de metal convencionales. Extendiendo esta práctica a lo largo de la totalidad de la 35 superficie de un polímero electroactivo, unos patrones a medida para unos electrodos con estructura que comprenden numerosas regiones activas de geometría a medida pueden dar como resultado un accionamiento especializado y no uniforme del polímero electroactivo de acuerdo con el patrón de los electrodos con estructura.

A pesar de que la presente invención se ha analizado principalmente en términos de electrodos planos, pueden usarse unos 'electrodos con textura' que comprenden la variación fuera de las dimensiones del plano para proporcionar un electrodo adaptable. La figura 5 ilustra unos electrodos con textura 520 y 521 a modo de ejemplo de acuerdo con una realización de la presente invención. Los electrodos con textura 520 y 521 se acoplan a superficies opuestas de un polímero electroactivo 522 de tal modo que la deflexión del polímero 522 da como resultado una deformación plana y no plana de los electrodos con textura 520 y 521. La adaptabilidad plana y no plana de los electrodos 520 y 521 se proporciona por un patrón ondulante que, con una deflexión plana y/o en el sentido del espesor del polímero 522, proporciona una adaptabilidad direccional en una dirección 526. Para proporcionar una adaptabilidad sustancialmente uniforme a los electrodos con textura 520 y 521, el patrón ondulante se implementa a lo largo de la totalidad de la superficie del polímero electroactivo en la dirección 526. En una realización, los electrodos con textura 520 y 521 están compuestos de metal que tiene un espesor que permite la flexión sin fractura del metal para proporcionar adaptabilidad. Típicamente, el electrodo con textura 520 se configura de tal modo que la deflexión no plana de los electrodos 520 y 521 es mucho menor que el espesor del polímero 522 con el fin de proporcionar un campo eléctrico sustancialmente constante al polímero 522. Los electrodos con textura pueden proporcionar adaptabilidad en más de una dirección. En una realización específica, un electrodo con textura rugosa proporciona adaptabilidad en direcciones planas ortogonales. El electrodo con textura rugosa puede tener una topografía similar a la superficie rugosa de la figura 1D.

En un ejemplo, los electrodos adaptables comprenden una grasa conductora tal como grasa de carbono o grasa de plata. La grasa conductora proporciona adaptabilidad en múltiples direcciones. Pueden añadirse partículas para aumentar la conductividad del polímero. A modo de ejemplo, pueden combinarse partículas de carbono con un aglutinante de polímero tal como silicona para producir una grasa de carbono que tiene una baja elasticidad y una alta conductividad. Otros materiales pueden combinarse en la grasa conductora para alterar una o más propiedades de material. Las grasas conductoras de acuerdo con la presente invención son adecuadas para unas deflexiones de por lo menos aproximadamente un 100 por ciento de deformación.

Los electrodos adaptables pueden incluir también suspensiones coloidales. Las suspensiones coloidales contienen partículas de dimensiones submicrométricas, tal como grafito, plata y oro, en un vehículo líquido. Hablando en términos generales, cualquier suspensión coloidal que tenga una carga suficiente de partículas conductoras puede usarse como un electrodo de acuerdo con la presente invención. En un ejemplo específico, una grasa conductora que incluye partículas conductoras de tamaño coloidal se mezcla con una silicona conductora que incluye partículas conductoras de tamaño coloidal en un aglutinante de silicona para producir una suspensión coloidal que se cura para formar un semisólido conductor. Una ventaja de las suspensiones coloidales es que éstas pueden modelarse sobre la superficie de un polímero mediante pulverización, recubrimiento por inmersión y otras técnicas que permiten un recubrimiento uniforme delgado de un líquido. Para facilitar la adhesión entre el polímero y un electrodo, un aglutinante puede añadirse al electrodo. A modo de ejemplo, puede añadirse silicona o un caucho de látex a base de aqua como un aglutinante a una suspensión coloidal que incluye grafito.

En otro ejemplo, los electrodos adaptables se consiguen usando un material conductor de alta relación de aspecto tal como fibrillas de carbono y nanotubos de carbono. Estos materiales de carbono de alta relación de aspecto pueden formar unas conductividades de superficie altas en capas delgadas. Los materiales de carbono de alta relación de aspecto pueden impartir una alta conductividad a la superficie del polímero a unos espesores de electrodo relativamente bajos debido a la alta interconectividad de los materiales de carbono de alta relación de aspecto. A modo de ejemplo, unos espesores para electrodos fabricados con formas comunes de carbono que no tienen una alta relación de aspecto puede encontrarse en el intervalo de 5 - 50 micrómetros mientras que los espesores para electrodos fabricados con electrodos de fibrillas de carbono o de nanotubos de carbono pueden ser menores de 2 - 4 micrómetros. Las expansiones de área de bastante más de un 100 por ciento en múltiples direcciones son adecuadas con electrodos de fibrillas de carbono y de nanotubos de carbono sobre un material acrílico y otros polímeros. Los materiales de carbono de alta relación de aspecto pueden incluir el uso de un aglutinante de polímero para aumentar la adhesión con la capa de polímero electroactivo. De forma ventajosa, el uso de un aglutinante de polímero permite que un aglutinante específico se seleccione en base a la adhesión con una capa particular de polímero electroactivo y en base a las propiedades elásticas y mecánicas del polímero.

En un ejemplo, unos electrodos de carbono de alta relación de aspecto pueden fabricarse lo bastante delgados de tal modo que puede hacerse que la opacidad de los electrodos varíe de acuerdo con la deflexión de polímero. A modo de ejemplo, los electrodos pueden fabricarse lo bastante delgados de tal modo que el electrodo cambia de opaco a semitransparente con una expansión plana. La presente capacidad de manipular la opacidad del electrodo puede permitir que los transductores de la presente invención se apliquen a un número de varias aplicaciones ópticas tal como se describirá a continuación.

En otros ejemplos, pueden usarse mezclas de materiales iónicamente conductores para los electrodos adaptables. Esto puede incluir, por ejemplo, materiales de polímero a base de agua tal como glicerol o sal en gelatina, cauchos naturales dopados con yodo y emulsiones a base de agua a las que se añaden sales orgánicas tales como yoduro de potasio. Para polímeros hidrófobos electroactivos que pueden no adherirse bien a un electrodo a base de agua, la superficie del polímero puede tratarse previamente mediante grabado por plasma o con un polvo fino tal como grafito o negro de carbón para aumentar la adherencia.

Los materiales que se usan para los electrodos en un transductor de la presente invención pueden variar en gran medida. Los materiales adecuados que se usan en un electrodo pueden incluir grafito, negro de carbón, suspensiones coloidales, metales delgados que incluyen plata y oro, geles y polímeros con carga de plata y con carga de carbono, polímeros iónica o electrónicamente conductores. En una realización específica, un electrodo adecuado para su uso con la presente invención comprende un 80 por ciento de grasa de carbono y un 20 por ciento de negro de carbón en un aglutinante de caucho de silicona tal como Stockwell RTV60-CON tal como lo produce Stockwell Rubber Co. Inc. de Filadelfia, PA. La grasa de carbono es del tipo tal como Circuit Works 7200 tal como la proporciona ChemTronics Inc. de Kennesaw, GA. La grasa conductora puede mezclarse también con un elastómero, tal como RTV 118 de elastómero de silicio tal como lo produce General Electric de Waterford, NY, para proporcionar una grasa conductora de tipo gel.

Se entiende que ciertos materiales de electrodo pueden funcionar bien con polímeros particulares y pueden no funcionar tan bien para otros. A modo de ejemplo, las fibrillas de carbono funcionan bien con polímeros de elastómero acrílico a pesar de que no funcionan tan bien con polímeros de silicona. Para la mayor parte de los transductores, las propiedades deseables para el electrodo adaptable pueden incluir una cualquiera de un bajo módulo de elasticidad, una baja amortiguación mecánica, una baja resistividad de superficie, resistividad uniforme, estabilidad química y ambiental, compatibilidad química con el polímero electroactivo, buena adherencia al polímero electroactivo, y una capacidad de formar unas superficies suaves. En algunos casos, puede ser deseable que el material de electrodo sea adecuado para un modelado preciso durante la fabricación. A modo de ejemplo, el electrodo adaptable puede aplicarse por recubrimiento por pulverización sobre el polímero. En el presente caso, serían deseables unas propiedades de material que beneficien el recubrimiento por pulverización. En algunos casos, un transductor de la presente invención puede implementar dos tipos diferentes de electrodos. A modo de ejemplo, un accionador de diafragma de la presente invención puede tener un electrodo con estructura acoplado a su superficie de arriba y un material de carbono de alta relación de aspecto depositado sobre el lado de debajo.

Unos excitadores electrónicos están conectados a los electrodos. El voltaje que se proporciona al polímero electroactivo dependerá de los detalles específicos de una aplicación. En una realización, un transductor de la presente invención se acciona eléctricamente modulando un voltaje aplicado alrededor de un voltaje de polarización de CC. La modulación alrededor de un voltaje de polarización permite una linealidad y sensibilidad mejorada del transductor para el voltaje aplicado. A modo de ejemplo, un transductor usado en una aplicación de audio puede accionarse mediante una señal de hasta 200 a 1.000 voltios de pico a pico sobre un voltaje de polarización que varía de aproximadamente 750 a 2.000 voltios de CC.

### 6. Aplicaciones

10

30

35

40

45

50

55

60

Debido a que la presente invención incluye unos transductores que pueden implementarse tanto en la escala microscópica como en la macroscópica, y con una amplia variedad de diseños de accionador, la presente invención puede usarse en una amplia gama de aplicaciones en las que energía eléctrica se convierte en energía mecánica. A continuación se proporcionan varias aplicaciones a modo de ejemplo para alguno de los accionadores que se describen anteriormente. Hablando en un sentido amplio, los transductores de la presente invención pueden usarse en cualquier aplicación que requiera la conversión de energía eléctrica en mecánica.

15 Tal como se menciona anteriormente, puede hacerse referencia a los polímeros electroactivos, o bien de forma individual o bien unidos mecánicamente en una colección, como músculo artificial. La expresión músculo artificial en sí misma implica que estos accionadores son muy adecuados para su aplicación a robots o aplicaciones biomédicas biológicamente inspiradas en las que se desea la duplicación de un músculo, de mamífero u otro. A modo de ejemplo, aplicaciones tales como extremidades protésicas, exoesqueletos y corazones artificiales pueden 20 beneficiarse de los transductores de polímeros previamente deformados de la presente invención. La capacidad de conversión a escala en tamaño de los polímeros electroactivos y la capacidad de usar cualquier número de transductores o accionadores de polímero en una colección permiten que el músculo artificial de acuerdo con la presente invención se use en una gama en aplicaciones más grande que sus contrapartidas biológicas. Debido a que los transductores de la presente invención tienen un intervalo de rendimiento bastante fuera del de sus 25 contrapartidas biológicas, la presente invención no se limita a un músculo artificial que tiene un rendimiento que se corresponde con el músculo real, y puede incluir de hecho aplicaciones que requieran un rendimiento fuera del de un músculo real.

En un ejemplo de un músculo artificial, una colección de accionadores de movimiento lineal comprende dos o más capas de polímero previamente deformado intercaladas de forma conjunta y acopladas a dos placas rígidas en bordes opuestos de cada polímero. Los electrodos se sellan en el centro entre cada una de las capas de polímero. La totalidad de los accionadores de movimiento lineal en la colección puede tomar ventaja de las restricciones geométricas que se proporcionan por las placas rígidas y una deformación previa anisótropa para restringir la deformación del polímero en la dirección accionada. Una ventaja de la construcción en capas es que pueden estar apiladas en paralelo tantas capas de polímero electroactivo como se requiera con el fin de producir la fuerza deseada. Además, la carrera de la presente configuración de accionadores de movimiento lineal puede aumentarse añadiendo unos accionadores de movimiento lineal similares en serie.

En el dominio microscópico, los polímeros previamente deformados pueden variar en cuanto a su espesor desde varios micrómetros hasta varios milímetros y, preferentemente, desde varios micrómetros hasta cientos de micrómetros. Los polímeros previamente deformados microscópicos son muy adecuados para aplicaciones tales como inyección de tinta, válvulas accionadas, microbombas, accionadores de tipo oruga, espejos apuntadores, generadores de sonido, microabrazaderas y aplicaciones microrrobóticas. Las aplicaciones microrrobóticas pueden incluir patas microrrobóticas, abrazaderas, accionadores de puntero para cámaras CCD, alimentadores de hilo para microsoldadura y reparación, accionadores de fijación para sostener posiciones rígidas y accionadores ultrasónicos para transmitir datos a lo largo de unas distancias medidas. En otra aplicación, un accionador de diafragma puede implementarse en una disposición ordenada de diafragmas de polímero electroactivo similares en una configuración plana sobre una única superficie. A modo de ejemplo, una disposición ordenada puede incluir sesenta y dos diafragmas, cada uno con un diámetro de 150 micrómetros, dispuestos en una configuración plana. En un ejemplo, la disposición ordenada de accionadores de diafragma puede estar formada sobre una oblea de silicio. Las disposiciones ordenadas de accionadores de diafragma que se producen de esta forma pueden incluir, por ejemplo, de 5 a 10.000 o más diafragmas, teniendo cada uno un diámetro en el intervalo de 60 a 150 micrómetros. La disposición ordenada puede colocarse sobre unas placas de rejilla que tienen unos orificios separados de forma adecuada para cada diafragma.

En el dominio macroscópico, cada uno de los accionadores que se describen anteriormente puede ser muy adecuado para su propio conjunto de aplicaciones. Por ejemplo, el accionador de tipo oruga de la figura 21 es adecuado para su uso con robots pequeños capaces de navegar a través de tuberías de menos de 2 cm de diámetro. Otros accionadores son muy adecuados, por ejemplo, con aplicaciones tales como robótica, solenoides, generadores de sonido, accionadores lineales, accionadores aerospaciales y automatización general.

En otro ejemplo, un transductor de la presente invención se usa como un dispositivo de modulación óptica o un conmutador óptico. El transductor incluye un electrodo cuya opacidad varía con la deflexión. Un polímero previamente deformado transparente o sustancialmente traslúcido se acopla al electrodo de opacidad variable y la

deflexión del polímero se usa para modular la opacidad de dispositivo. En el caso de un conmutador óptico, el transductor de opacidad variable interrumpe una fuente de luz que se comunica con un sensor de luz. Por lo tanto, la deflexión del polímero transparente da lugar a que el electrodo de opacidad variable se flexe y afecte al sensor de luz. En un ejemplo específico, el electrodo de opacidad variable incluye fibrillas de carbono o nanotubos de carbono que se vuelven menos opacos a medida que el área de electrodo aumenta y la densidad superficial de fibrillas disminuye. En otro ejemplo específico, un dispositivo de modulación óptica compuesto por un polímero electroactivo y un electrodo de opacidad variable puede diseñarse para modular con precisión la cantidad de luz que se transmite a través del dispositivo.

Los accionadores de diafragma pueden usarse como bombas, válvulas, etc. En un ejemplo, un accionador de diafragma que tiene un polímero previamente deformado es adecuado para su uso como una bomba. La acción de bombeo se crea accionando de forma repetida el polímero. Las bombas de polímero electroactivo que comprenden un transductor de acuerdo con la presente invención pueden implementarse tanto en la escala microscópica como en la macroscópica. A modo de ejemplo, el diafragma puede usarse como una bomba que tiene un diámetro en el intervalo de aproximadamente 150 micrómetros a aproximadamente 2 centímetros. Estas bombas pueden incluir unas deformaciones de polímero de más de un 100 por ciento y puede producir unas presiones de 20 kPa o más.

10

15

20

25

30

35

55

60

La figura 6 ilustra un sistema de bombeo en dos etapas en cascada que incluye las bombas de diafragma 540 y 542. Las bombas de diafragma 540 y 542 incluyen los polímeros previamente deformados 544 y 546 acoplados a unos armazones 545 y 547. Los polímeros 544 y 546 se flexan dentro de los orificios 548 y 550 en los armazones 545 y 547 respectivamente en una dirección perpendicular al plano de los orificios 548 y 550. Los armazones 545 y 547 junto con los polímeros 544 y 546 definen unas cavidades 551 y 552. La bomba 540 incluye un émbolo 553 que tiene un resorte 560 para proporcionar una desviación para el diafragma 544 hacia la cavidad 551.

Una válvula unidireccional 555 permite la entrada de un fluido o gas al interior de la cavidad 551. Una válvula unidireccional 556 permite la salida del fluido o gas al exterior de la cavidad 551 al interior de la cavidad 552. Además, una válvula unidireccional 558 permite la salida del fluido o gas a partir de la cavidad 552. Con el accionamiento de los polímeros 544 y 546, los polímeros se flexan a su vez para cambiar la presión dentro de las cavidades 551 y 552 respectivamente, moviendo de este modo el fluido o gas desde la válvula unidireccional 555 hasta la cavidad 551, al exterior de la válvula 556, al interior de la cavidad 552 y al exterior de la válvula 558.

En el sistema de bombeo en dos etapas en cascada de la figura 6, la bomba de diafragma 542 no incluye una desviación debido a que la salida presurizada a partir de la bomba de diafragma 540 flexa la bomba 542. En un ejemplo, sólo la primera bomba en una serie en cascada de bombas de diafragma usa una presión de desviación - o cualquier otro mecanismo para autocebado. En algunos ejemplos, unas bombas de diafragma que se prevén en una disposición ordenada pueden incluir unos voltajes previstos por un sincronismo electrónico para aumentar la eficiencia de bombeo. En el ejemplo que se muestra en la figura 6, los polímeros 544 y 546 se accionan de forma simultánea para el mejor rendimiento. Para otros ejemplos que pueden implicar más bombas de diafragma en la cascada, el sincronismo electrónico para los diferentes accionadores se ajusta idealmente de tal modo que una bomba se contrae en cuanto al volumen de la cavidad mientras que la siguiente bomba en la serie (tal como se determina por las válvulas unidireccionales) se expande. En un ejemplo específico, la bomba de diafragma 540 suministra gas a una velocidad de 40 ml/min y una presión aproximadamente 1 kPa mientras que la bomba de diafragma 542 suministra gas a sustancialmente el mismo caudal, pero aumenta la presión a 2,5 kPa.

Los accionadores de barra de flexión, tal como los que se describen con respecto a las figuras 2K-2M, pueden usarse en una variedad de dispositivos y aplicaciones comerciales y aeroespaciales tales como ventiladores, relés y conmutadores eléctricos, y detectores de luz - en el nivel micro y macroscópico. Para los accionadores de barra de flexión que se usan como detectores de luz, una superficie reflectante tal como mylar aluminizado puede unirse al extremo libre de un accionador de barra de flexión. De forma más específica, la luz se refleja cuando la barra de flexión se acciona y la luz pasa cuando la barra de flexión se encuentra en la posición de descanso. El reflector puede usarse a continuación para reflejar la luz entrante y formar un haz explorado para formar un arco o línea de acuerdo con la deflexión del accionador. Unas disposiciones ordenadas de accionadores de barra de flexión pueden usarse también para visualizadores de panel plano, para controlar el flujo de aire por encima de una superficie, para altavoces de perfil bajo y supresores de la vibración, como "pieles inteligentes" para controlar la trasferencia de calor y/o la absorción de luz sobre una superficie, y pueden actuar como cilios de una manera coordinada para manipular obietos

Los polímeros y las películas de polímero que se enrollan para dar un accionador de cilindro de múltiples capas o tubular pueden implementarse como un pistón que se expande en sentido axial con el accionamiento. Un accionador de este tipo es análogo a un pistón hidráulico o neumático, y puede implementarse en cualquier dispositivo o aplicación que use estas formas tradicionales de deflexión lineal.

Un accionador de polímero electroactivo puede funcionar también a unas velocidades altas para una variedad de aplicaciones incluyendo generadores de sonido y altavoces acústicos, impresoras de inyección de tinta, conmutadores MEMS rápidos etc. En una realización específica, un diafragma de polímero electroactivo se usa como un detector de luz. De forma más específica, un espejo puede colocarse sobre una flexura que empuja hacia debajo sobre un diafragma de polímero electroactivo de 5 mm de diámetro para proporcionar una flexura con espejo.

Una buena exploración de imágenes con un ángulo de exploración de aproximadamente 10 a 30 grados puede lograrse con unos voltajes en el intervalo de aproximadamente 190 a 300 voltios y unas frecuencias en el intervalo de aproximadamente 30 a 300 Hz. Puede darse cabida también a unos ángulos de exploración mucho más grandes, de por ejemplo hasta 90 grados, usando unos voltajes en el intervalo de 400 a 500 V. Además, unas frecuencias más altas pueden usarse con una flexura con espejo más rígido.

#### 7. Fabricación

10

15

20

25

30

35

40

Debido a que los polímeros previamente deformados pueden implementarse tanto en la escala microscópica como en la macroscópica, en una amplia variedad de diseños de accionador, con una amplia gama de materiales y en una amplia gama de aplicaciones, los procedimientos de fabricación que se usan con la presente invención pueden variar en gran medida. La presente invención proporciona procedimientos para la fabricación de unos dispositivos electromecánicos incluyendo uno o más polímeros previamente deformados tal como se define por la reivindicación 26

La figura 7A ilustra un flujo de procedimiento 600 para la fabricación de un dispositivo electromecánico que tiene por lo menos una capa de polímero electroactivo. Los procedimientos de acuerdo con la presente invención pueden incluir hasta varias etapas adicionales que no se describen o se ilustran en el presente caso con el fin de no hacer más confusa la presente invención. En algunos casos, los procedimientos de fabricación de la presente invención pueden incluir materiales y técnicas convencionales, tal como polímeros comercialmente disponibles y técnicas usadas en la fabricación de las tecnologías de microelectrónica y electrónica. Por ejemplo, los microaccionadores de diafragma pueden producirse *in situ* sobre silicio, usando técnicas convencionales para formar los orificios y aplicar el polímero y los electrodos.

El flujo de procedimiento 600 se inicia recibiendo o fabricando un polímero (602). El polímero puede recibirse o fabricarse de acuerdo con varios procedimientos. En una realización, el polímero es un producto comercialmente disponible tal como una película de polímero de elastómero acrílico comercialmente disponible. En otro ejemplo, el polímero es una película producida por uno de colada, inmersión, recubrimiento por rotación o pulverización. En un ejemplo, el polímero se produce a la vez que se minimizan las variaciones en cuanto a su espesor o cualquier otro defecto que pudiera comprometer el campo eléctrico máximo que puede aplicarse a lo largo del polímero y, por lo tanto, comprometer el rendimiento.

El recubrimiento por rotación típicamente implica aplicar una mezcla de polímeros sobre un sustrato rígido y hacer que gire hasta un espesor deseado. La mezcla de polímeros puede incluir el polímero, un agente de curado y un disolvente o dispersante volátil. La cantidad de dispersante, la volatilidad del dispersante y la velocidad de rotación puede alterarse para producir un polímero deseado. A modo de ejemplo, las películas de poliuretano pueden aplicarse por recubrimiento por rotación en una disolución de poliuretano y tetrahidrofurano (THF) o ciclohexanona. En el caso de los sustratos de silicio, el polímero puede aplicarse por recubrimiento por rotación sobre un carburo de silicio o un plástico aluminizado. El carburo de silicio y el aluminio forman una capa sacrificial que se elimina posteriormente mediante un agente de grabado adecuado. Las películas en el intervalo de un micrómetro de espesor pueden producirse de esta forma por recubrimiento por rotación. El recubrimiento por rotación de películas de polímero, tal como silicona, puede hacerse sobre un sustrato de plástico no pegajoso suave, tal como poli(metacrilato de metilo) o teflón. La película de polímero puede liberarse a continuación por despegado mecánico o con la asistencia de alcohol u otro agente de liberación adecuado. El recubrimiento por rotación es también adecuado para producir unos polímeros más gruesos en el intervalo de 10 a 750 micrómetros. En algunos casos, la mezcla de polímeros puede centrifugarse antes del recubrimiento por rotación para eliminar los materiales no deseados tales como cargas, materiales particulados, impurezas y pigmentos usados en los polímeros comerciales. Para aumentar la eficacia de la centrífuga o para mejorar la consistencia del espesor, un polímero puede diluirse en un disolvente para reducir su viscosidad; por ejemplo, puede diluirse silicona en nafta.

El polímero puede deformarse previamente a continuación en una o más direcciones (604). En una realización, la deformación previa se consigue estirando mecánicamente un polímero en o más direcciones y fijando éste a uno o más miembros sólidos (por ejemplo, placas rígidas) mientras que se deforma. Otra técnica para mantener la deformación previa incluye el uso de uno o más refuerzos. Los refuerzos son unas estructuras rígidas largas colocadas sobre un polímero mientras que éste se encuentra en un estado previamente estirado, por ejemplo mientras que este se estira. Los refuerzos mantienen la deformación previa a lo largo de su eje. Los refuerzos pueden estar dispuestos en paralelo o en otras configuraciones para lograr una adaptabilidad direccional del transductor. Debería observarse que la rigidez aumentada a lo largo del eje del refuerzo comprende la rigidez aumentada que se proporciona por el material de refuerzo así como la rigidez aumentada del polímero en la dirección de deformación previa.

De acuerdo con la presente invención, las superficies sobre el polímero previamente deformado tienen textura. De una forma para proporcionar una textura, un polímero se estira más de lo que éste puede estirarse cuando se acciona, y una capa delgada de un material rígido se deposita sobre la superficie del polímero estirado. Por ejemplo, el material rígido puede ser un polímero que se cura mientras que el polímero electroactivo se estira. Después del curado, el polímero electroactivo se relaja y la estructura se pandea para proporcionar la superficie con textura. El espesor del material rígido puede alterarse para proporcionar una textura en cualquier escala, incluyendo niveles

submicrométricos. En otro ejemplo, las superficies con textura se producen por grabado por iones reactivos (RIE). A modo de ejemplo, el RIE puede realizarse sobre un polímero previamente deformado que comprende silicio con un gas de RIE que comprende un 90 por ciento de tetrafluoruro de carbono y un 10 por ciento de oxígeno para formar una superficie con canales y crestas de onda de 4 a 5 micrómetros de profundidad.

Uno o más electrodos se forman a continuación sobre el polímero (606). Para el polímero de silicona alterado por el RIE que se menciona anteriormente, una capa delgada de oro puede depositarse mediante metalizado por bombardeo atómico sobre la superficie con textura de RIE para proporcionar un electrodo con textura. En otro ejemplo, uno o más electrodos de grafito pueden modelarse y depositarse usando una plantilla. Los electrodos que comprenden grasas conductoras mezcladas con una silicona conductora pueden fabricarse disolviendo la grasa conductora y la silicona conductora sin curar en un disolvente. La disolución puede pulverizarse a continuación sobre el material de polímero electroactivo y puede incluir una máscara o plantilla para lograr un patrón particular.

Las pistas de metal de los electrodos con estructura de las figuras 3 y 4 pueden modelarse de forma fotolitográfica sobre la capa de distribución de carga o el polímero. A modo de ejemplo, una capa de oro se deposita mediante metalizado por bombardeo atómico antes de la deposición de una capa fotorresistente por encima del oro. La capa fotorresistente y el oro pueden modelarse de acuerdo con las técnicas fotolitográficas convencionales, por ejemplo usando una máscara seguido de uno o más enjuagues para eliminar la capa fotorresistente. Una capa de distribución de carga añadida entre el polímero y las pistas de metal pueden depositarse por recubrimiento por rotación, por ejemplo.

15

30

40

45

50

55

En un ejemplo específico, un electrodo con estructura se forma sobre un polímero depositando mediante metalizado por bombardeo atómico oro durante aproximadamente de 2 a 3 minutos (de acuerdo con un espesor deseado) a aproximadamente 15 nm por minuto. Una capa fotorresistente HPR 506 tal como la proporciona Arch Chemicals, de Norwalk, Connecticut se aplica a continuación por recubrimiento por rotación sobre el oro a aproximadamente 500 a 1.500 rpm durante aproximadamente 20 a 30 segundos y a continuación se hornea a aproximadamente 90 grados Celsius. Una máscara se aplica a continuación antes de la exposición de la capa fotorresistente a luz UV y revelado para eliminar las porciones sin máscara de la capa fotorresistente. El oro se elimina a continuación por ataque químico y la película se enjuaga. La capa fotorresistente restante se elimina por exposición a luz UV, revelado y enjuague. Las pistas de oro pueden estirarse a continuación para potenciar la tolerancia a la deformación.

Los electrodos con textura pueden también modelarse de forma fotolitográfica. En el presente caso, una capa fotorresistente se deposita sobre un polímero previamente deformado y se modela usando una máscara. El grabado por plasma puede eliminar las porciones del polímero electroactivo no protegidas por la máscara en un patrón deseado. La máscara puede eliminarse posteriormente mediante un grabado en húmedo adecuado. Las superficies activas del polímero pueden cubrirse a continuación con la capa delgada de oro depositada mediante metalizado por bombardeo atómico, por ejemplo.

El transductor, que comprende las una o más capas de polímero y electrodos, se empaqueta a continuación de acuerdo con una aplicación (608). El empaquetado puede incluir también el montaje de múltiples transductores unidos mecánicamente o apilados como múltiples capas. Además, las conexiones mecánicas y eléctricas a los transductores pueden estar formadas de acuerdo con una aplicación.

Procedimientos alternativos para la fabricación de unos dispositivos electromecánicos que incluyen múltiples capas de polímero previamente deformado son tal como sigue. En un ejemplo, un procedimiento para la fabricación de unos dispositivos electromecánicos se inicia obteniendo o fabricando una capa de polímero. El polímero se estira a continuación hasta la deformación previa deseada y se acopla a un primer armazón rígido. Los siguientes electrodos se depositan sobre ambos lados del polímero con el fin de definir unas áreas activas y establecer conexiones eléctricas. Los electrodos pueden modelarse mediante una variedad de técnicas bien conocidas tal como recubrimiento por pulverización a través de una máscara. Si se desea, una segunda capa de polímero se estira a continuación sobre un segundo armazón. Los electrodos se modelan a continuación sobre esta segunda capa de polímero. La segunda capa de polímero se acopla a continuación a la primera capa apilando sus armazones respectivos. Unas capas de adhesivos adaptables adecuados pueden usarse para unir las dos capas y los electrodos, si fuera necesario. El tamaño de los armazones se elige con el fin de no interferir con que las capas de polímero hagan un contacto íntimo. Si hay interferencia presente, puede ser deseable entonces eliminar el segundo armazón, por ejemplo, eliminando por corte la capa de polímero alrededor de la periferia del primer armazón. Si se desea, una tercera capa de polímero con electrodos puede añadirse de una forma similar a cómo se añadió la segunda capa a la primera. El presente procedimiento puede continuarse hasta que se alcanza un número deseado de capas.

Unos armazones rígidos, miembros rígidos u otros conectores eléctricos y mecánicos se acoplan a continuación a las capas de polímero, por ejemplo, por encolado. Si se desea, el polímero puede eliminarse a continuación del primer armazón. En algunos casos, el primer armazón puede servir como una parte estructural del accionador o los accionadores finales. Por ejemplo, el primer armazón puede ser una disposición ordenada de orificios para producir una disposición ordenada de accionadores de diafragma.

Las figuras 7B-F ilustran un segundo procedimiento para la fabricación de un dispositivo electromecánico 640 que tiene múltiples capas de polímero electroactivo. Los procedimientos de acuerdo con la presente invención pueden incluir hasta varias etapas adicionales que no se describen o se ilustran en el presente caso con el fin de no hacer más confusa la presente invención. El procedimiento se inicia produciendo un polímero previamente deformado 622 sobre un sustrato rígido 624 adecuado, por ejemplo por recubrimiento por rotación de un polímero sobre un disco de polímetacrilato de metilo) (PMMA), estirando el polímero (la figura 7B) y a continuación acoplando este al sustrato rígido 624. Después de que se cure el polímero 622, los electrodos 625 se modelan sobre el lado expuesto 626 del polímero 622. Un miembro sólido 627 tal como una película flexible incluyendo una de película de acetato, mylar o poliimida se deposita a continuación sobre el polímero electroactivo 622 (la figura 7C) con un adhesivo 628 adecuado.

El sustrato rígido 624 se libera a continuación del polímero electroactivo 622 (la figura 7D). Un agente de liberación tal como alcohol isopropílico puede usarse para facilitar la liberación. Los electrodos 629 se modelan a continuación sobre el lado previamente no expuesto del polímero 622. El conjunto se une a continuación a otra capa de polímero electroactivo 630 acoplada a un sustrato rígido 631 (la figura 7E). Las capas de polímero 622 y 630 pueden unirse mediante una capa adhesiva 632 que comprende, por ejemplo, silicona GE RTV 118. El sustrato rígido 631 se libera a continuación del polímero 630 y los electrodos 633 se modelan sobre el lado disponible 634 del polímero 630. Si se desean capas de polímero adicionales, las etapas de añadir una capa de polímero, eliminar el sustrato rígido y añadir los electrodos pueden repetirse para producir tantas capas de polímero como se desee. La capa de polímero 635 se ha añadido de esta forma. Para facilitar la comunicación eléctrica con los electrodos en las capas interiores del dispositivo 640, un perno de metal puede empujarse a través de la estructura para hacer contacto con los electrodos en cada capa.

El miembro sólido 627 puede modelarse o eliminarse entonces según sea necesario para proporcionar el armazón o las conexiones mecánicas requeridas por el tipo de accionador específico. En una realización, unos accionadores de diafragma pueden conformarse mediante el modelado del miembro sólido 627 para formar unos orificios 636 que proporcionan regiones activas para el dispositivo electromecánico 640 usando una técnica de ataque químico o máscara adecuada (la figura 7F). En otra realización, si el área activa no es grande y los electrodos pueden añadirse a las regiones activas de los polímeros sin daño, el miembro sólido 627 puede modelarse con los orificios 636 antes de su acoplamiento al polímero 622.

Para el procedimiento de las figuras 7B-F, el sustrato rígido 624 se libera típicamente con respecto al polímero electroactivo 622 despegando el polímero electroactivo flexible. El despegado es muy adecuado para la fabricación de dispositivos que comprenden polímeros electroactivos con un perfil sustancialmente plano. En otro ejemplo, unas capas sacrificiales pueden usarse entre el polímero o los electrodos y el sustrato rígido para facilitar la liberación. Las capas sacrificiales permiten que el polímero, los electrodos y el conjunto acoplado se liberen de un sustrato rígido eliminando por ataque químico la capa sacrificial. Los metales que comprenden aluminio y plata son adecuados para su uso como las capas sacrificiales, por ejemplo. El uso de metales permite que las capas sacrificiales se eliminen por ataque químico por líquidos que no afectan a las capas de polímero. Unas capas sacrificiales de metal pueden también modelarse con facilidad con varias técnicas de enmascarado para proporcionar armazones, conectores para otros componentes estructurales para el dispositivo electromecánico 640. Las capas sacrificiales pueden usarse también para fabricar dispositivos que comprenden unos transductores con unos perfiles no planos, usando por ejemplo unos sustratos rígidos conformados como tubos. Para los transductores geométricamente complejos, unas capas sacrificiales pueden usarse en combinación con un recubrimiento por inmersión para proporcionar la geometría compleja.

A pesar de que la fabricación de los polímeros previamente deformados se ha descrito brevemente con respecto a unos pocos ejemplos específicos, las técnicas y procedimientos de fabricación pueden variar en consecuencia para cualquiera de los accionadores o aplicaciones que se describen anteriormente. Por ejemplo, el procedimiento para la fabricación de un accionador de diafragma puede incluir el recubrimiento por rotación de un polímero sobre un sustrato antes de que se fabrique sobre el polímero un electrodo con estructura. El polímero se estira a continuación y unos armazones rígidos que incluyen uno o más orificios dimensionados para el área activa de cada accionador de diafragma se unen al polímero previamente deformado, incluyendo cualquier porción superpuesta del electrodo con estructura. En otro ejemplo, unos orificios se graban por ataque químico en el sustrato en lugar de usar un armazón rígido separado, por ejemplo cuando el sustrato está compuesto por silicio. El sustrato se libera a continuación del polímero y un electrodo se acopla al lado de debajo del polímero.

### 8. Conclusión

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

A pesar de que la presente invención se ha descrito en términos de varias realizaciones preferentes, existen alteraciones, permutaciones y equivalentes que caen dentro del alcance de la presente invención tal como se define por las reivindicaciones, que tienen se han omitido con fines de brevedad.

### REIVINDICACIONES

- 1. Un transductor para la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, comprendiendo el transductor:
  - por lo menos dos electrodos;

5

35

40

- un polímero previamente deformado dispuesto de forma que de lugar a que una porción del polímero se flexe con respecto a una primera posición, con una primera área superficial, hasta una segunda posición, con una segunda área superficial, en respuesta a un cambio en el campo eléctrico; un miembro rígido acoplado al polímero, caracterizado porque el polímero comprende una superficie no
  - un miembro rígido acoplado al polímero, **caracterizado porque** el polímero comprende una superficie no uniforme, en el que la superficie no uniforme es texturada.
- 2. Transductor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el miembro rígido es adecuadamente rígido para mantener el nivel de deformación previa en el polímero.
  - 3. Transductor de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que el miembro rígido está incluido en un armazón.
  - 4. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la porción del polímero se acopla al miembro rígido en la primera posición.
- 5. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero se deforma previamente de manera isótropa.
  - 6. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que el polímero se deforma previamente de manera anisótropa, de tal modo que el polímero es relativamente más rígido en una dirección de alta deformación previa, y más adaptable en una dirección de baja deformación previa.
- 7. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-5, en el que el polímero se deforma previamente de manera elástica con un factor en el intervalo de aproximadamente 1,5 veces a 50 veces el área original.
  - 8. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1-5, en el que la cantidad de deformación previa elástica para el polímero varía de menos 100 a más 600 %.
- 9. Transductor de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el polímero es un elastómero acrílico, que se deforma previamente de manera elástica en por lo menos aproximadamente un 100 % y, preferentemente, se deforma previamente entre aproximadamente un 200 y un 400 %.
  - 10. Transductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el polímero es un polímero elastomérico acrílico, que se deforma previamente de manera elástica mediante el estiramiento en un 100 % en una dirección y en un 500 % en una dirección perpendicular.
- 30 11. Transductor de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el polímero es un polímero elastomérico acrílico, que se deforma previamente de manera elástica mediante el estiramiento en un 200-400 % en ambas direcciones planas.
  - 12. Transductor de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el polímero previamente deformado de forma anisótropa se deforma previamente de manera elástica entre aproximadamente un 400-500 % en una dirección y entre aproximadamente un 20-200 % en una dirección perpendicular.
  - 13. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el miembro de soporte rígido, fija la porción del polímero en la primera posición, en el que la deformación previa elástica de la porción del polímero se lleva a cabo mediante el estiramiento desde un área superficial inicial hasta la primera área superficial para mejorar la respuesta mecánica del transductor cuando éste se flexa con respecto a la primera posición hacia la segunda posición, y en el que el miembro rígido suministra una fuerza a la porción estirada del polímero que evita que la porción estirada del polímero vuelva desde la primera área superficial hasta aproximadamente su área superficial inicial, y en el que la relación de la primera área superficial con respecto al área superficial inicial se encuentra en el intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente 50 en una primera dirección y en el intervalo desde menos de aproximadamente 1 en una dirección de área superficial ortogonal a la primera dirección.
- 45 14. El transductor de la reivindicación 13, en el que la relación de la primera área superficial con respecto al área superficial inicial en la dirección ortogonal se encuentra en el intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente
  - 15. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el transductor tiene una deformación lineal máxima de por lo menos aproximadamente un 50 %, en respuesta al cambio en el campo eléctrico.
  - 16. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que tiene una deformación lineal máxima de por lo menos aproximadamente un 100 %.

## ES 2 394 501 T3

- 17. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero tiene una deformación lineal máxima en el intervalo de un 40 215 %.
- 18. Transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero tiene una deformación de área en el intervalo de un 70-330 % y, preferentemente, de por lo menos aproximadamente un 100 %.

- 19. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que tiene una eficiencia electromecánica mayor de aproximadamente un 80 por ciento.
- 20. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero tiene un módulo de elasticidad de, como máximo, aproximadamente 100 MPa.
- 21. El transductor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la superficie con textura comprende unos canales que tienen una anchura y una profundidad sustancialmente menores que el espesor del polímero.
  - 22. El transductor de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 21, en el que la superficie con textura comprende unas crestas que tienen una anchura y una altura sustancialmente menores que el espesor del polímero.
- 23. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1, 21-22, en el que la superficie no uniforme comprende una superficie convertida en rugosa.
  - 24. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero tiene una máxima presión de accionamiento de entre aproximadamente 0,05 MPa y aproximadamente 10 MPa, preferentemente de entre aproximadamente 0,3 MPa y aproximadamente 3 MPa.
- 25. El transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el polímero tiene una constante dieléctrica de entre aproximadamente 2 y aproximadamente 20 y, preferentemente, de entre aproximadamente 2,5 y aproximadamente 12.
  - 26. Procedimiento de fabricación de un transductor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas de:
- a. deformar previamente de manera elástica una primera porción de un polímero para formar el polímero previamente deformado, y fijar una segunda porción del polímero previamente deformado a un miembro sólido y formar uno o más electrodos sobre el polímero previamente deformado.

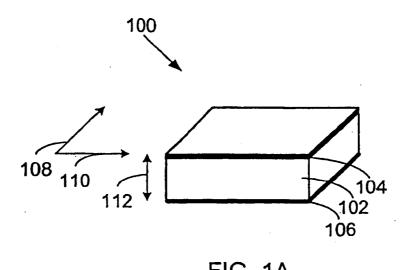


FIG. 1A

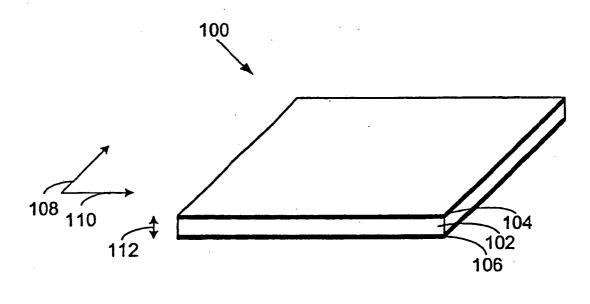


FIG. 1B

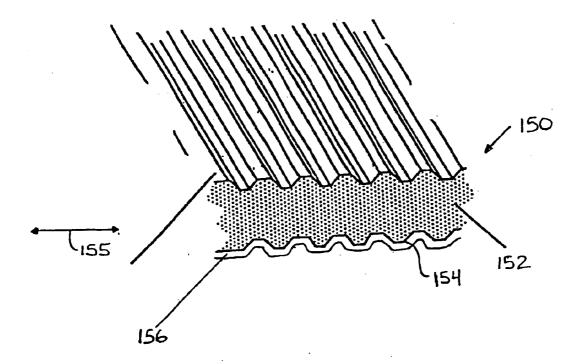


FIG. 1C

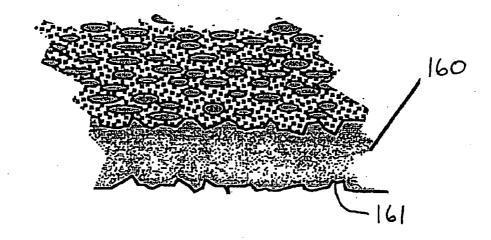


Fig. 1D

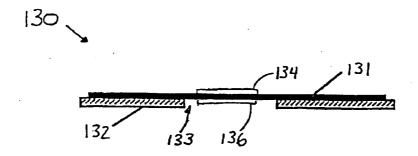


FIG. 1E

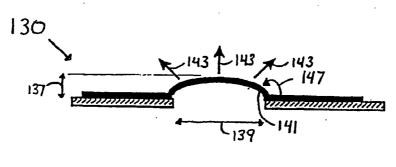


FIG. 1F

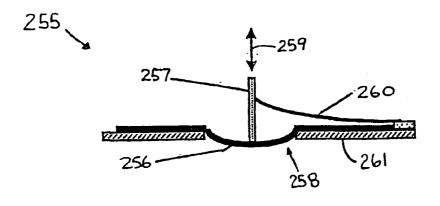
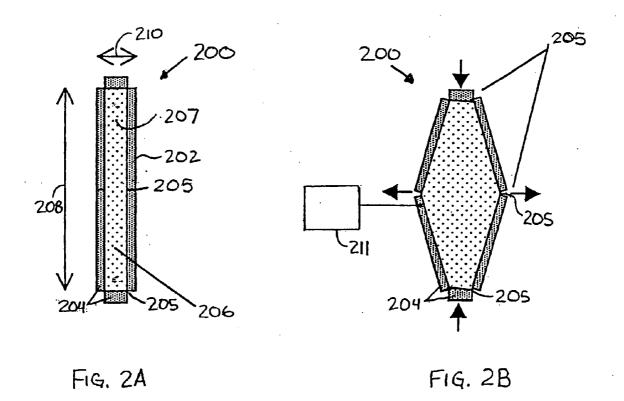
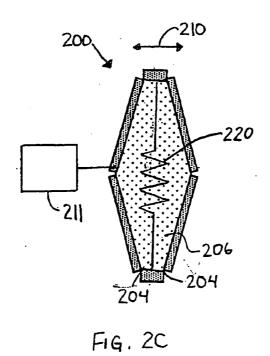
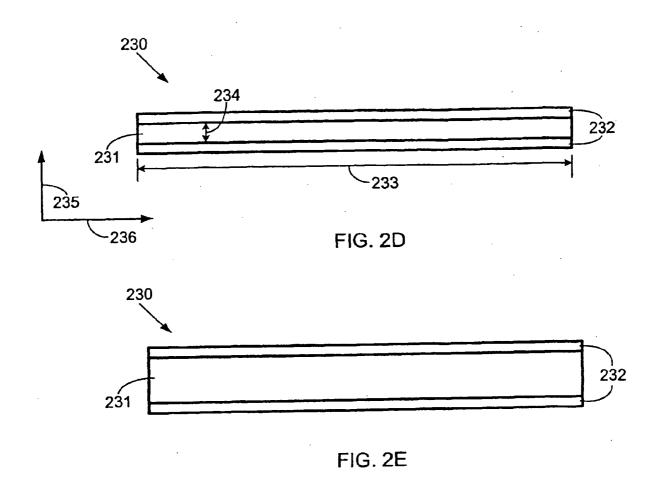
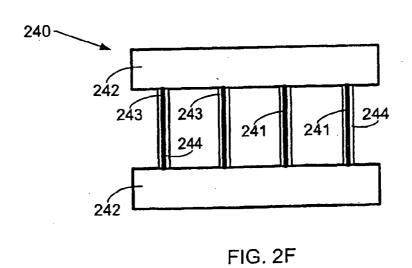


FIG. 2H









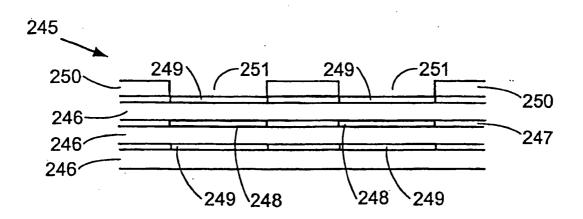


FIG. 2G

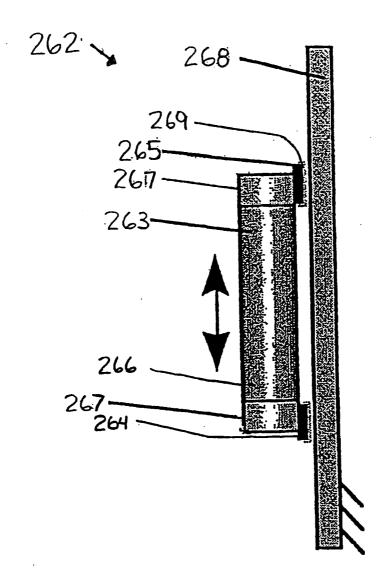


Fig. 2I

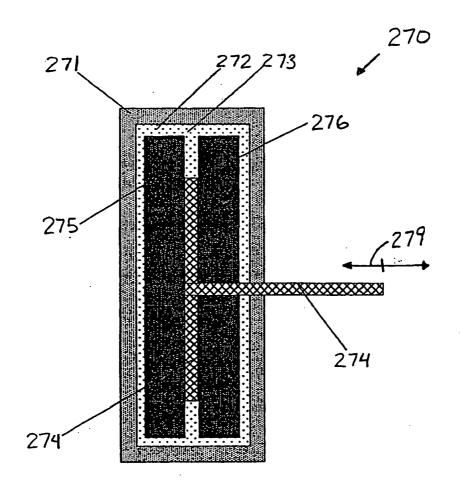


Fig 2J

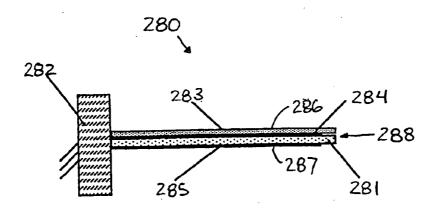


FIG. 2K

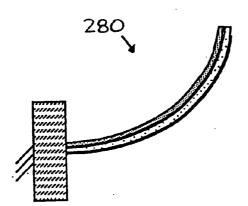


Fig. 2L

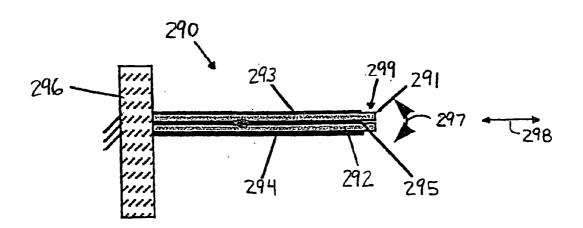


FIG. 2M

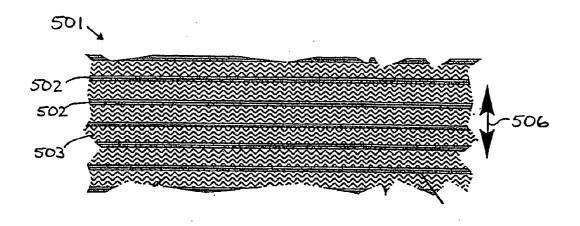


Fig. 3

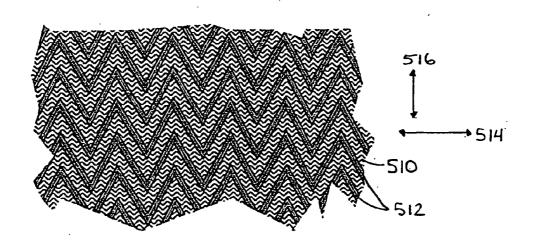


FIG. 4

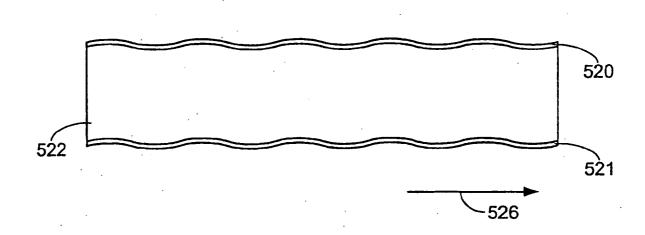
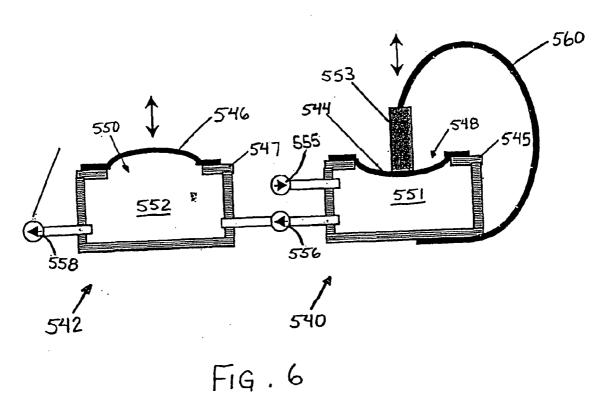


FIG. 5



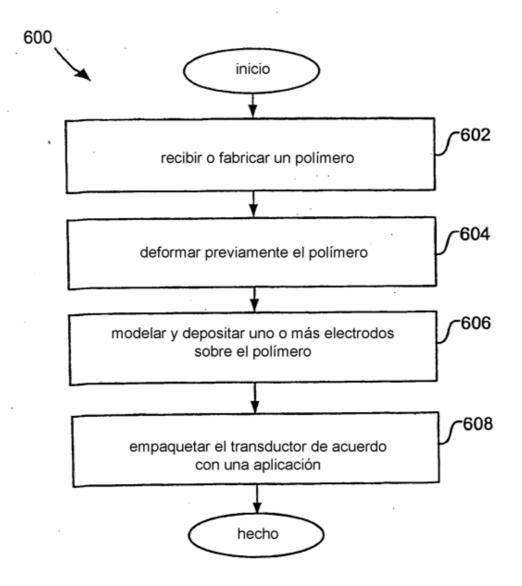


FIG. 7A

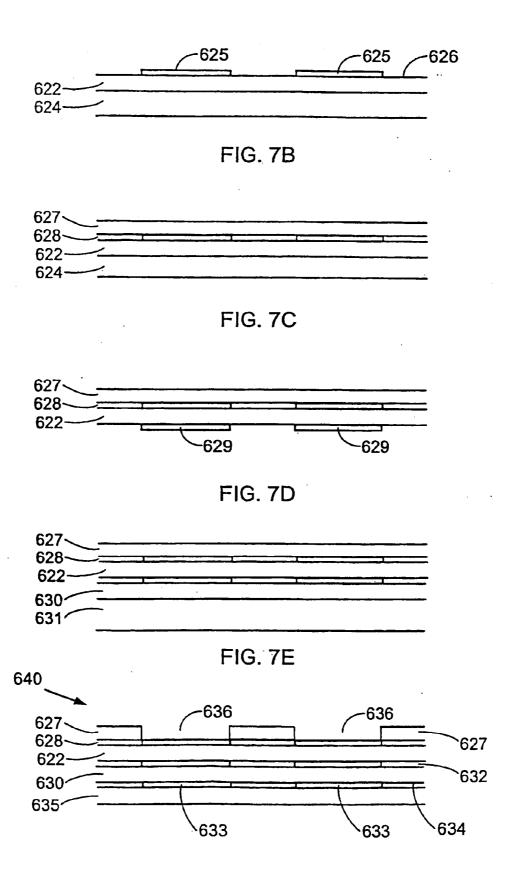


FIG. 7F