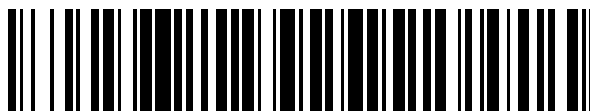


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 394 160**

51 Int. Cl.:

**H01L 41/09** (2006.01)  
**H01L 41/047** (2006.01)  
**H01L 41/193** (2006.01)  
**H01L 41/26** (2006.01)  
**H01L 41/113** (2006.01)  
**F04B 35/00** (2006.01)  
**F04B 35/04** (2006.01)  
**F04B 43/04** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.07.2000 E 10009300 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **22.12.2010 EP 2264801**

54 Título: **Polímeros electroactivos**

30 Prioridad:

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

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**22.01.2013**

73 Titular/es:

**SRI INTERNATIONAL (100.0%)**  
**333 Ravenswood Avenue Menlo Park**  
**California 94025-3493 , US**

72 Inventor/es:

**PELRINE, RONALD;**  
**KORNBLUH, ROY;**  
**PEI, QIBING;**  
**OH, SEAJIN y**  
**JOSEPH, JOSE**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 394 160 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Polímeros electroactivos

**Antecedentes de la invención**

La presente invención versa, en general, acerca de polímeros electroactivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica. Más en particular, la presente invención versa acerca de polímeros predeformados y su uso en accionadores y diversas aplicaciones.

En muchas aplicaciones, es deseable convertir energía eléctrica en energía mecánica. Las aplicaciones ejemplares que requieren una conversión de energía eléctrica a mecánica 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 —en un nivel macroscópico o microscópico—. Las tecnologías comunes de accionadores eléctricos, tales como solenoides y motores electromagnéticos, no son adecuadas para muchas de estas aplicaciones, por ejemplo, cuando el tamaño requerido del dispositivo es pequeño (por ejemplo, micromáquinas o máquinas de mesoescala). Estas tecnologías tampoco son ideales cuando se debe integrar un gran número de dispositivos en una única estructura o bajo diversas condiciones de rendimiento tal como cuando se requiere una salida de densidad de potencia elevada a frecuencias relativamente bajas.

Se han utilizado varios “materiales inteligentes” para convertir entre energía eléctrica y mecánica con un éxito limitado. Estos materiales inteligentes incluyen cerámica piezoeléctrica, aleaciones con memoria de forma y materiales magnetostrictivos. Sin embargo, cada material inteligente tiene un número de limitaciones que evitan su uso extendido. Se han utilizado ciertas cerámicas piezoeléctricas, tales como circonato titanato de plomo (PZT), para convertir energía eléctrica en mecánica. Aunque tienen una eficacia adecuada para algunas aplicaciones, estas cerámicas piezoeléctricas están limitadas normalmente a una deformación inferior a aproximadamente un 1,6 por ciento y a menudo no son adecuadas para aplicaciones que requieren mayores deformaciones que esto. Además, la densidad elevada de estos materiales a menudo los excluye de aplicaciones que requieren un peso reducido. El difluoruro de polivinilideno irradiado (PVDF) es un polímero electroactivo que está documentado que tiene una deformación de hasta un 4 por ciento cuando se convierte de energía eléctrica a mecánica. De forma similar a la cerámica piezoeléctrica, el PVDF a menudo no es adecuado para aplicaciones que requieren deformaciones mayores que un 4 por ciento. Las aleaciones con memoria de forma, tal como nitinol, tienen capacidad de grandes deformaciones y de salidas de fuerza. Se ha limitado el uso generalizado de estas aleaciones con memoria de forma por una eficacia inaceptable de energía, un tiempo de respuesta deficiente y un coste prohibitivo.

Además de las limitaciones de rendimiento de cerámicas piezoeléctricas y PVDF irradiado, su fabricación presenta a menudo una barrera a la aceptabilidad. Se deben desarrollar cerámicas piezoeléctricas de un único cristal a temperaturas elevadas junto con un procedimiento muy lento de enfriamiento. Se debe exponer al PVDF irradiado a un haz de electrones para ser procesado. Estos dos procedimientos son caros y complejos y pueden limitar la aceptabilidad de estos materiales.

En vista de lo anterior, serían deseables dispositivos alternativos que conviertan energía eléctrica en mecánica.

**Resumen de la invención**

La presente invención versa acerca de un accionador para convertir energía eléctrica en energía mecánica. El accionador comprende un miembro flexible que tiene un extremo fijo y un extremo libre, comprendiendo el miembro flexible al menos dos electrodos y un polímero predeformado con un módulo de elasticidad de al menos aproximadamente 100 MPa dispuesto de forma que provoca que una porción del polímero se flexione en respuesta a un cambio en el campo eléctrico proporcionado por los al menos dos electrodos.

Los dispositivos conocidos se describen en los documentos US 4 342 936; EP 0 475 564 A1; Ronald E. Pelrine et al., “Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation”, Sensors and Actuators A, vol. 64, p. 77-85, (1998); Roy Kornbluh et al., “Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators”, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Bélgica, mayo de 1998, p. 2147-2154, (1998); US 5 356 500.

Se describirán estas y otras características y ventajas de la presente invención en la siguiente descripción de la invención y en las figuras asociadas.

**Breve descripción de los dibujos**

Las FIGURAS 1A y 1B ilustran una vista en planta en perspectiva de un transductor antes y después de la aplicación de una tensión.

La FIG. 1C ilustra una superficie texturada para un polímero electroactivo que tiene un perfil con forma de onda.

La FIG. 1D ilustra un polímero electroactivo que incluye una superficie texturada que tiene una texturización aleatoria.

La FIG. 1E ilustra una vista lateral en corte transversal de un accionador de diafragma que incluye un polímero electroactivo antes de la aplicación de una tensión.

5 La FIG. 1F ilustra una vista en corte transversal del diafragma de polímero electroactivo de la FIG. 1E después de la aplicación de una tensión.

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

La FIG. 2C ilustra un accionador de arco que incluye componentes adicionales para mejorar la flexión.

Las FIGURAS 2D y 2E ilustran un accionador de movimiento lineal antes y después del accionamiento.

10 La FIG. 2F ilustra una vista lateral en corte transversal de un accionador que incluye múltiples capas de polímero.

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

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

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

15 La FIG. 2J ilustra un accionador de película estirada para proporcionar flexión en una dirección.

La FIG. 2K ilustra un accionador de varilla flexible según una realización de la presente invención.

La FIG. 2L ilustra el accionador de varilla flexible de la FIG. 2K con un ángulo de flexión de 90 grados.

La FIG. 2M ilustra un accionador de varilla flexible que incluye dos capas de polímero según otra realización de la presente invención.

20 La FIG. 3 ilustra un electrodo estructurado que proporciona una capacidad expansiva unidireccional.

La FIG. 4 ilustra un polímero predeformado que comprende un electrodo estructurado que no tiene capacidad expansiva direccional.

La FIG. 5 ilustra electrodos texturados.

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

La FIG. 7A ilustra un flujo de un procedimiento para fabricar un dispositivo electromecánico que tiene al menos un polímero predeformado.

Las FIGURAS 7B-F ilustran un procedimiento para fabricar un dispositivo electromecánico que tiene múltiples capas de polímero.

### 30 **Descripción detallada de las realizaciones preferentes**

Se describirá con detalle ahora la presente invención con referencia a algunas realizaciones preferentes de la misma como se ilustra en algunos de los dibujos adjuntos. En la siguiente descripción, se definen numerosos detalles específicos para proporcionar una comprensión profunda de la presente invención. Sin embargo, será evidente para un experto en la técnica, que se pueden poner en práctica la presente invención sin algunos de estos detalles específicos, o todos ellos. En otros casos, no se han descrito con detalle etapas del procedimiento y estructuras bien conocidas para no complicar innecesariamente la presente invención.

#### **1. Revisión general**

Los polímeros electroactivos se flexionan cuando son accionados por energía eléctrica. En un ejemplo, un polímero electroactivo hace referencia a un polímero que actúa como un material dieléctrico aislante entre dos electrodos y que puede flexionarse tras la aplicación de una diferencia de tensión entre los dos electrodos. En un aspecto, la presente invención versa acerca de polímeros que están predeformados para mejorar la conversión entre energía eléctrica y mecánica. La predeformación mejora la respuesta mecánica de un polímero electroactivo con respecto a un polímero electroactivo no deformado. La respuesta mecánica mejorada permite un mayor trabajo mecánico para un polímero electroactivo, por ejemplo, mayores flexiones y presiones de accionamiento. Por ejemplo, son posibles deformaciones lineales de al menos aproximadamente un 200 por ciento y deformaciones de área de al menos aproximadamente un 300 por ciento con polímeros predeformados utilizados en la presente invención. La

predeformación puede variar en distintas direcciones de un polímero. La combinación de una variabilidad direccional de la predeformación, de distintas formas de limitar un polímero, de la capacidad de cambio de escala de polímeros electroactivos tanto a niveles micro como macro, y distintas orientaciones del polímero (por ejemplo, enrollando o apilando capas individuales del polímero) permite una amplia gama de accionadores que convierten energía eléctrica en trabajo mecánico. Estos accionadores encuentran uso en una amplia gama de aplicaciones.

Dado que los polímeros electroactivos utilizados en la presente invención pueden flexionarse con deformaciones lineales de al menos aproximadamente un 200 por ciento, los electrodos fijados a los polímeros también deberían flexionarse sin comprometer el rendimiento mecánico o eléctrico. En consecuencia, se describen los electrodos con capacidad expansiva que se adaptan a la forma de un polímero electroactivo al que están fijados. Los electrodos son capaces de mantener una comunicación eléctrica incluso con las elevadas flexiones encontradas con los polímeros predeformados de la presente invención. A modo de ejemplo, las deformaciones de al menos aproximadamente un 50 por ciento son comunes con tales electrodos. En algunos ejemplos, la capacidad expansiva proporcionada por los electrodos puede variar con la dirección.

Dado que los polímeros predeformados son adecuados para ser utilizados tanto en escalas micro como macro, en una amplia variedad de accionadores y en una amplia gama de aplicaciones, los procedimientos de fabricación utilizados con la presente invención varían mucho. En otro aspecto, se proporcionan procedimientos para fabricar dispositivos electromecánicos que incluyen uno o más polímeros predeformados. Se puede conseguir una predeformación por medio de un número de técnicas tales como estirar mecánicamente un polímero electroactivo y fijar el polímero a uno o más miembros macizos mientras está siendo estirado.

## 2. Estructura general de los dispositivos

Las FIGURAS 1A y 1B ilustran una vista en planta en perspectiva de un transductor 100. El transductor 100 incluye un polímero 102 para convertir entre energía eléctrica y energía mecánica. Hay fijados unos electrodos superior e inferior 104 y 106 al polímero electroactivo 102 en sus superficies superior e inferior, respectivamente, para proporcionar una diferencia de tensión a través de una porción del polímero 102. El polímero 102 se flexiona con un cambio en el campo eléctrico proporcionado por los electrodos superior e inferior 104 y 106. La flexión del transductor 100 en respuesta a un cambio en el campo eléctrico proporcionado por los electrodos 104 y 106 es denominada accionamiento. Dado que el polímero 102 cambia de tamaño, se puede utilizar la flexión para producir trabajo mecánico.

La FIG. 1B ilustra una vista en planta en perspectiva del transductor 100 que incluye flexión en respuesta a un cambio en el campo eléctrico. En general, flexión 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 correspondiente a la diferencia de tensión producida por los electrodos 104 y 106 produce una presión mecánica en el polímero predeformado 102. En este caso, las cargas eléctricas distintas producidas por los electrodos 104 y 106 tienen atracción mutua y proporcionan una fuerza compresiva entre los electrodos 104 y 106 y una fuerza de expansión sobre el polímero 102 en las direcciones planares 108 y 110, provocando que el polímero 102 se comprima entre los electrodos 104 y 106 y se estire en las direcciones planares 108 y 110.

En algunos casos, los electrodos 104 y 106 cubren una porción limitada del polímero 102 con respecto al área total del polímero. Esto puede hacerse para evitar una ruptura eléctrica en torno al borde del polímero 102 o para conseguir flexiones modificadas a medida en ciertas porciones del polímero. Según se utiliza la expresión en el presente documento, una región activa está definida como una porción del material polimérico 102 que tiene una fuerza electrostática suficiente para permitir la flexión de la porción. Como se describirá a continuación, un polímero puede tener múltiples regiones activas. El material polimérico 102 fuera de un área activa puede actuar como una fuerza externa de resorte sobre el área activa durante la flexión. Más específicamente, el material fuera del área activa puede resistir una flexión del área activa por medio de su contracción o expansión. La eliminación de la diferencia de tensión y de la carga inducida provoca los efectos inversos.

Los electrodos 104 y 106 tienen capacidad expansiva y cambian su forma con el polímero 102. La configuración del polímero 102 y de los electrodos 104 y 106 permite una mayor respuesta del polímero 102 con la flexión. Más específicamente, según se flexiona el transductor 100, la compresión del polímero 102 acerca las cargas opuestas de los electrodos 104 y 106 y un estiramiento del polímero 102 separa las cargas similares en cada electrodo. En un ejemplo, uno de los electrodos 104 y 106 es tierra.

En general, el transductor 100 continúa flexionándose hasta que las fuerzas mecánicas equilibran las fuerzas electrostáticas que impulsan la flexión. Las fuerzas mecánicas incluyen fuerzas elásticas de equilibrio del material polimérico 102, la capacidad expansiva de los electrodos 104 y 106, y cualquier resistencia externa proporcionada por un dispositivo y/o una carga acoplados al transductor 100. La flexión resultante del transductor 100 como resultado de la tensión aplicada también puede depender de un número de otros factores, tales como la constante dieléctrica del polímero 102 y el tamaño del polímero 102.

Según son descritos, los polímeros electroactivos tienen capacidad de flexión en cualquier dirección. Después de la aplicación de la tensión entre los electrodos 104 y 106, el polímero electroactivo 102 aumenta de tamaño en ambas direcciones planares 108 y 110. En algunos casos, el polímero electroactivo 102 es incompresible, por ejemplo, tiene un volumen sustancialmente constante bajo esfuerzo. En este caso, se reduce el grosor del polímero 102 como resultado de la expansión en las direcciones planares 108 y 110. Se debería hacer notar que el uso de polímeros en la presente invención no está limitado a polímeros incompresibles y la flexión del polímero 102 puede no adaptarse a tal relación sencilla.

El polímero electroactivo 102 está predeformado. La predeformación mejora la conversión entre energía eléctrica y mecánica. En una realización, la predeformación mejora la resistencia dieléctrica del polímero. Para el transductor 100, la predeformación permite que el polímero electroactivo 102 se flexione más y proporcione más trabajo mecánico. La predeformación de un polímero puede ser descrita en una o más direcciones como el cambio en la dimensión en esa dirección después de una predeformación con respecto a la dimensión en esa dirección antes de la predeformación. La predeformación puede comprender una deformación elástica del polímero 102 y puede estar formado, por ejemplo, mediante el estiramiento del polímero en tensión y la fijación de uno o más de los bordes mientras está estirado. En un ejemplo, la predeformación es elástica. Después del accionamiento, un polímero predeformado elásticamente podría, en principio, ser soltado y volver a su estado original. La predeformación puede ser impuesta en los límites utilizando un bastidor rígido o puede ser implementada localmente para una porción del polímero.

En un ejemplo, se aplica la predeformación uniformemente en una porción del polímero 102 para producir un polímero predeformado isótropo. A modo de ejemplo, se puede estirar un polímero elastomérico acrílico entre 200 – 400 por ciento en ambas direcciones planares. En otro ejemplo, se aplica la predeformación de forma desigual en distintas direcciones para una porción del polímero 102 para producir un polímero predeformado anisótropo. En este caso, el polímero 102 puede flexionarse más en una dirección que en otra cuando es accionado. Aunque no se desea estar limitados por la teoría, se cree que la predeformación de un polímero en una dirección puede aumentar la rigidez del polímero en la dirección de predeformación. En consecuencia, el polímero es relativamente más rígido en la dirección de predeformación elevada y tiene mayor capacidad expansiva en la dirección de predeformación baja y, tras el accionamiento, la mayor parte de la flexión se produce en la dirección de predeformación baja. En una realización, el transductor 100 aumenta la flexión en la dirección 108 al aprovecharse de una gran predeformación en la dirección perpendicular 110. A modo de ejemplo, se puede estirar un 100 por ciento un polímero elastomérico acrílico utilizado como el transductor 100 en la dirección 108 y un 500 por ciento en la dirección perpendicular 110. La construcción del transductor 100 y las limitaciones de bordes geométricos también pueden afectar a la flexión direccional como se describirá a continuación con respecto a los accionadores.

La cantidad de predeformación de un polímero puede estar basada en el polímero electroactivo y en el rendimiento deseado del polímero en un accionador o aplicación. Para algunos polímeros utilizados en la presente invención, la predeformación en una o más direcciones puede variar entre -100 por ciento y 600 por ciento. A modo de ejemplo, para un elastómero acrílico VHB que tiene una predeformación isótropa, se pueden utilizar predeformaciones de al menos aproximadamente un 100 por ciento, y preferentemente entre aproximadamente 200-400 por ciento, en cada dirección. En un ejemplo, el polímero es predeformado por un factor en el intervalo de aproximadamente 1,5 veces hasta 50 veces el área original. Para que un acrílico anisótropo predeformado mejore el accionamiento en una dirección con capacidad expansiva, se pueden utilizar predeformaciones entre aproximadamente 400-500 por ciento en la dirección reforzada y se pueden utilizar predeformaciones entre aproximadamente 20-200 por ciento en la dirección con capacidad expansiva. En algunos casos, se puede añadir predeformación en una dirección, de forma que se produzca una predeformación negativa en otra dirección, por ejemplo 600 por ciento en una dirección junto con -100 por ciento en una dirección ortogonal. En estos casos, el cambio neto en área debido a la predeformación es normalmente positivo.

La predeformación puede afectar a otras propiedades del polímero 102. Las grandes predeformaciones pueden cambiar las propiedades elásticas del polímero e introducirlo en un régimen más rígido con menores pérdidas viscoelásticas. Para algunos polímeros, la predeformación aumenta la resistencia a una ruptura eléctrica del polímero 102, que permite que se utilicen campos eléctricos mayores en el polímero —lo que permite mayores presiones de accionamiento y mayores flexiones—.

Se puede utilizar una deformación lineal y una deformación de área para describir la flexión de un polímero predeformado. Según se utiliza la expresión en el presente documento, deformación lineal de un polímero predeformado hace referencia a la flexión por longitud unitaria a lo largo de una línea de flexión con respecto al estado no accionado. Son habituales deformaciones lineales máximas (por tracción o por compresión) de al menos aproximadamente un 50 por ciento para polímeros predeformados de la presente invención. Por supuesto, un polímero puede flexionarse con una deformación menor que la máxima, y se puede ajustar la deformación al ajustar la tensión aplicada. Para algunos polímeros predeformados, son habituales deformaciones lineales máximas de al menos aproximadamente un 100 por ciento. Para polímeros tales como VHB 4910 producido por 3M Corporation de St. Paul, Minnesota, EE. UU. son habituales deformaciones lineales máximas en el intervalo de 40 a 215 por ciento. Deformación de área de un polímero electroactivo hace referencia al cambio en el área planar, por ejemplo, el cambio en el plano definido por las direcciones 108 y 110 en las FIGURAS 1A y 1B, por área unitaria del polímero

tras el accionamiento con respecto al estado no accionado. Son posibles deformaciones máximas de área de al menos aproximadamente un 100 por ciento son posibles para polímeros predeformados de la presente invención. Para algunos polímeros predeformados, son habituales deformaciones máximas de área en el intervalo de 70 a 330 por ciento.

- 5 En general, después de que se predeforma el polímero, puede ser fijado a uno o más objetos. Cada objeto puede ser adecuadamente rígido para mantener el nivel deseado de predeformación en el polímero. El polímero puede ser fijado a uno o más objetos según cualquier procedimiento convencional conocido en la técnica tal como un adhesivo químico, un material o una capa adhesivos, una fijación mecánica, etc.

- 10 Los transductores y los polímeros predeformados no están limitados a ninguna geometría ni flexión lineal en particular. Por ejemplo, el polímero y los electrodos pueden estar formados con cualquier geometría o forma, incluyendo tubos y rollos, polímeros estirados fijados entre múltiples estructuras rígidas, polímeros estirados fijados en un bastidor de cualquier geometría —incluyendo geometrías curvadas o complejas—, en un bastidor que tiene una o más uniones, etc. La flexión de un transductor incluye una expansión y una compresión lineales en una o más direcciones, un pliegue, una flexión axial cuando el polímero es enrollado, una flexión fuera de un agujero proporcionado en el sustrato, etc. La flexión de un transductor puede ser afectada por cómo está limitado el polímero por un bastidor o estructuras rígidas fijadas al polímero. En una realización, un material flexible que es más rígido en alargamiento que el polímero está fijado a un lado de un transductor induce un pliegue cuando se acciona el polímero. En otro ejemplo, se denomina diafragma a un transductor que se flexiona radialmente fuera del plano. Se describirá un accionador de diafragma con más detalle con respecto a las FIGURAS 1E y 1F.

- 20 Los polímeros electroactivos en un accionador de la presente invención pueden incluir una superficie texturada. La FIG. 1C ilustra una superficie texturada 150 para un polímero electroactivo 152 que tiene un perfil similar a ondas. La superficie texturada 150 permite que el polímero 152 se flexione utilizando el pliegue de ondas superficiales 154. El pliegue de las ondas superficiales 154 proporciona una capacidad expansiva direccional en una dirección 155 con menos resistencia que un estiramiento volumétrico para un electrodo rígido fijado al polímero 152 en la dirección 155. La superficie texturada 150 puede estar caracterizada por valles y crestas, por ejemplo, con una anchura de aproximadamente 0,1 micrómetros a 40 micrómetros y una profundidad de aproximadamente 0,1 micrómetros a 20 micrómetros. En este caso, la anchura y la profundidad de la onda son sustancialmente menores que el grosor del polímero. En un ejemplo, los valles y las crestas tienen una anchura de aproximadamente 10 micrómetros y una profundidad de seis micrómetros en una capa polimérica con un grosor de 200 micrómetros.

- 30 En un ejemplo, hay fijada una capa delgada de material rígido 156, tal como un electrodo, al polímero 152 para proporcionar el perfil similar a ondas. Durante la fabricación, el polímero electroactivo es estirado más de lo que puede ser estirado cuando es accionado, y la capa delgada de material rígido 156 está fijada a la superficie del polímero estirado 152. Subsiguientemente, se relaja el polímero 152 y la estructura se deforma para proporcionar la superficie texturada.

- 35 En general, una superficie texturada puede comprender cualquier topografía de superficie no uniforme o no lisa que permita que un polímero se flexione utilizando la reformación en la superficie del polímero. A modo de ejemplo, la FIG. 1D ilustra un polímero electroactivo 160 que incluye una superficie áspera 161 que tiene una texturización aleatoria. La superficie áspera 160 permite una flexión planar que no tiene capacidad expansiva direccional. De forma ventajosa, la deformación en la topografía de la superficie puede permitir la flexión de un electrodo rígido con menos resistencia que el estiramiento o la compresión volumétricos. Se debería hacer notar que la flexión de un polímero predeformado que tiene una superficie texturada puede comprender una combinación de deformación de la superficie y de estiramiento volumétrico del polímero.

- 45 Las superficies texturadas o no uniformes para el polímero también pueden permitir el uso de una capa barrera y/o electrodos que dependen de la deformación de las superficies texturadas. Los electrodos pueden incluir metales que se doblan según la geometría de la superficie del polímero. La capa barrera puede ser utilizada para bloquear la carga en el caso de una ruptura eléctrica local en el material polimérico predeformado.

- Los materiales adecuados para ser utilizados como polímero predeformado con la presente invención pueden incluir cualquier polímero o caucho sustancialmente aislante que se deforma en respuesta a una fuerza electrostática o cuya deformación tiene como resultado un cambio en el campo eléctrico. Un material adecuado es NuSil CF19-2186 proporcionado por NuSil Technology de Carpintería, California, EE. UU. Otros materiales ejemplares adecuados para ser utilizados como polímero predeformado incluyen, cualquier polímero elastomérico dieléctrico, cauchos de silicona, fluoroelastómeros, siliconas tales como Dow Corning HS3 proporcionada por Dow Corning de Wilmington, Delaware, EE. UU., fluorosiliconas tales como Dow Corning 730 proporcionada por Dow Corning de Wilmington, Delaware, EE. UU., etc., y polímeros acrílicos tales como cualquier acrílico en la serie acrílica 4900 VHB proporcionada por 3M Corp. de St. Paul, Minnesota, EE. UU.

En muchos casos, los materiales utilizados en la presente invención son polímeros disponibles comercialmente. Los polímeros disponibles comercialmente pueden incluir, por ejemplo, cualquier elastómero de silicona, poliuretano, copolímero de PVDF y elastómero adhesivo disponible comercialmente. El uso de materiales disponibles comercialmente proporciona alternativas rentables para transductores y dispositivos asociados de la presente

invención. El uso de materiales disponibles comercialmente puede simplificar la fabricación. En un ejemplo, el polímero disponible comercialmente es un elastómero acrílico disponible comercialmente que comprende mezclas de acrilato alifático que son fotoendurecidas durante la fabricación. La elasticidad del elastómero acrílico es el resultado de una combinación de los grupos alifáticos ramificados y de la ramificación entre las cadenas poliméricas acrílicas.

Los materiales utilizados como polímero predeformado pueden estar seleccionados con base en una o más propiedades del material, tal como una resistencia elevada a la ruptura eléctrica, un módulo reducido de elasticidad —para deformaciones grandes o pequeñas—, una constante dieléctrica elevada, etc. En la presente invención, el polímero está seleccionado de forma que tenga un módulo de elasticidad máximo de aproximadamente 100 MPa. En otro ejemplo, el polímero está seleccionado de forma que tenga una presión máxima de accionamiento entre aproximadamente 0,05 MPa y aproximadamente 10 MPa, y preferentemente entre aproximadamente 0,3 MPa y aproximadamente 3 MPa. En otro ejemplo más, el polímero está seleccionado de forma que tenga una constante dieléctrica entre aproximadamente 2 y aproximadamente 20, y preferentemente entre aproximadamente 2,5 y aproximadamente 12. Para algunas aplicaciones, se selecciona un polímero electroactivo con base en una o más exigencias de aplicación tales como un amplio intervalo de temperatura y/o de humedad, repetibilidad, precisión, baja deformación permanente por fatiga, fiabilidad y resistencia a la fatiga.

Las tensiones de accionamiento adecuadas para polímeros predeformados en la presente invención pueden variar con base en el material polimérico electroactivo y sus propiedades (por ejemplo, la constante dieléctrica) al igual que las dimensiones del polímero (por ejemplo, el grosor entre los electrodos). A modo de ejemplo, los campos eléctricos de accionamiento para el polímero 102 en la Figura 1A pueden variar en magnitud desde aproximadamente 0V/m hasta 440 megavoltios/metro. Las tensiones de accionamiento en este intervalo pueden producir una presión en el intervalo desde aproximadamente 0 Pa hasta aproximadamente 10 MPa. Para conseguir un transductor con capacidad de mayores fuerzas, se puede aumentar el grosor del polímero. De forma alternativa, se pueden implementar múltiples capas de polímero. Se pueden reducir las tensiones de accionamiento para un polímero particular al aumentar la constante dieléctrica, reducir el grosor del polímero y reducir el módulo de elasticidad, por ejemplo.

Los polímeros predeformados en la presente invención pueden abarcar un amplio intervalo de grosores. En una realización, el grosor del polímero puede variar entre aproximadamente 1 micrómetro y 2 milímetros. Los grosores normales antes de la predeformación incluyen entre 50 – 225 micrómetros para HS3, entre 25 – 75 micrómetros para NuSil CF 19-2186, y entre 100 – 1000 micrómetros para cualquiera de los polímeros acrílicos de la serie 3M VHB 4900. Se puede reducir el grosor del polímero al estirar la película en una o ambas direcciones planares. En muchos casos, los polímeros predeformados de la presente invención pueden estar fabricados e implementados como películas delgadas. Los grosores adecuados para estas películas delgadas pueden ser inferiores a 50 micrómetros.

### 3. Accionadores

Se puede utilizar la flexión de un polímero predeformado de una variedad de formas para producir energía mecánica. En general, los polímeros electroactivos pueden ser implementados con una variedad de accionadores —incluyendo accionadores convencionales modernizados con un polímero predeformado y accionadores modificados a medida diseñados especialmente para uno o más polímeros predeformados—. Los accionadores convencionales incluyen alargadores, varillas flexibles, apilamientos, diafragmas, etc. Se expondrán ahora varios accionadores a medida ejemplares distintos según la presente invención, junto con los accionadores ejemplares ajenos a la presente invención.

La FIG. 1E ilustra una vista lateral en corte transversal de un accionador 130 de diafragma que incluye un polímero predeformado 131 antes del accionamiento según un ejemplo. El polímero predeformado 131 está fijado a un bastidor 132. El bastidor 132 incluye un agujero circular 133 que permite la flexión del polímero 131 perpendicular al área del agujero circular 133. El accionador 130 de diafragma incluye electrodos circulares 134 y 136 a ambos lados del polímero 131 para proporcionar una diferencia de tensión a través de una porción del polímero 131.

En la configuración sin tensión de la FIG. 1E, el polímero 131 es estirado y fijado al bastidor 132 con tensión para conseguir una predeformación. Tras la aplicación de una tensión adecuada a los electrodos 134 y 136, la película polimérica 131 se expande alejándose del plano del bastidor 132 como se ilustra en la FIG. 1F. Los electrodos 134 y 136 tienen capacidad expansiva y cambian de forma con el polímero predeformado 131 según se flexiona.

El accionador 130 de diafragma tiene capacidad de expansión en ambas direcciones alejándose del plano. En un ejemplo, el lado inferior 141 del polímero 131 incluye una presión de empuje que influye en la expansión de la película polimérica 131 para accionar continuamente hacia arriba en la dirección de las flechas 143 (FIG. 1F). En otro ejemplo, se aplica un agente entumecedor tal como una pequeña cantidad de aceite de silicona al lado inferior 141 para influir en la expansión del polímero 131 en la dirección de las flechas 143. El agente entumecedor provoca una ligera flexión permanente en una dirección según se determina durante la fabricación, por ejemplo al suministrar

una ligera presión sobre el lado inferior 141 cuando se aplica el agente entumecedor. El agente entumecedor permite que el diafragma se accione continuamente en una dirección deseada sin utilizar una presión de empuje.

La cantidad de expansión del accionador 130 de diafragma variará con base en un número de factores que incluyen el material polimérico 131, la tensión aplicada, la cantidad de predeformación, cualquier presión de empuje, la capacidad expansiva de los electrodos 134 y 136, etc. En un ejemplo, el polímero 131 tiene capacidad de flexión hasta una altura 137 de al menos aproximadamente un 50 por ciento del diámetro 139 del agujero y puede adoptar una forma hemisférica con grandes flexiones. En este caso, un ángulo 147 formado entre el polímero 131 y el bastidor 132 puede ser menor de 90 grados.

Como se ha mencionado anteriormente, la expansión en una dirección de un polímero electroactivo puede inducir esfuerzos de contracción en una segunda dirección tal como debido a efectos de Poisson. Esto puede reducir la salida mecánica de un transductor que proporciona una salida mecánica en la segunda dirección. En consecuencia, los accionadores pueden estar diseñados para limitar un polímero en la dirección no de salida. En algunos casos, los accionadores pueden estar diseñados para mejorar la salida mecánica utilizando una flexión en la dirección no de salida.

Un accionador que utiliza flexión en una dirección planar para mejorar la salida mecánica en la otra dirección planar es un accionador de arco. Las FIGURAS 2A y 2B ilustran un accionador 200 de arco antes y después de su accionamiento. El accionador 200 de arco es un mecanismo planar que comprende un bastidor flexible 202 que proporciona una ayuda mecánica para mejorar la salida mecánica para un polímero 206 fijado al bastidor 202. El bastidor 202 incluye seis miembros rígidos 204 conectados en uniones 205. Los miembros 204 y las uniones 205 proporcionan una ayuda mecánica al acoplar la flexión del polímero en una dirección planar 208 en una salida mecánica en una dirección planar perpendicular 210. Más específicamente, el bastidor 202 está dispuesto de forma que una pequeña flexión del polímero 206 en la dirección 208 mejora el desplazamiento en la dirección planar perpendicular 210. Hay electrodos 207 (electrodo inferior en el lado inferior del polímero 206 no mostrado) fijados a superficies opuestas (superior e inferior) del polímero 206 para proporcionar una diferencia de tensión a través de una porción del polímero 206.

El polímero 206 está configurado con distintos niveles de predeformación en sus direcciones ortogonales. Más específicamente, el polímero electroactivo 206 incluye una predeformación elevada en la dirección planar 208, y poca o ninguna predeformación en la dirección planar perpendicular 210. Esta predeformación anisótropa está dispuesta con respecto a la geometría del bastidor 202. Más específicamente, tras el accionamiento entre los electrodos 207 y 209, el polímero se contrae en la dirección 208 de predeformación elevada. Con el movimiento restringido del bastidor 202 y del brazo de palanca proporcionado por los miembros 204, esta contracción ayuda a guiar la flexión en la dirección planar perpendicular 210. Por lo tanto, incluso para una flexión corta del polímero 206 en la dirección 208 de predeformación elevada, el bastidor 202 se arquea hacia fuera en la dirección 210. De esta forma, una pequeña contracción en la dirección 210 de predeformación elevada se vuelve una mayor expansión en la dirección 208 de predeformación relativamente baja.

Utilizando la predeformación anisótropa y la limitación proporcionadas por el bastidor 202, el accionador 200 de arco permite la contracción en una dirección para mejorar la flexión mecánica y la conversión eléctrica a mecánica en otra. En otras palabras, la carga 211 (FIG. 2B) fijada al accionador 200 de arco está acoplada a la flexión del polímero 206 en dos direcciones —dirección 208 y 210—. Por lo tanto, como resultado de la predeformación diferencial del polímero 206 y de la geometría del bastidor 202, el accionador 200 de arco es capaz de proporcionar un mayor desplazamiento mecánico que un polímero electroactivo por sí solo para una entrada eléctrica común.

El accionador 200 de arco puede estar configurado con base en el polímero 206. A modo de ejemplo, se pueden adaptar la geometría del bastidor 202 y las dimensiones del polímero 206 con base en el material polimérico 206. En un ejemplo que utiliza silicón HS3 como el polímero 206, el polímero 206 tiene, preferentemente, una relación en las direcciones 208 y 210 de 9:2 con predeformaciones de aproximadamente un 270 por ciento y -25 por ciento en las direcciones 208 y 210, respectivamente. Utilizando esta disposición, son posibles deformaciones lineales de al menos aproximadamente un 100 por ciento en la dirección 210.

La predeformación en el polímero 206 y la limitación proporcionadas por el bastidor 202 también pueden permitir que el accionador 200 de arco utilice tensiones menores de accionamiento para el polímero predeformado 206 para una flexión dada. Dado que el accionador 200 de arco tiene un módulo eficaz de elasticidad menor en la dirección 210 de predeformación baja, la limitación mecánica proporcionada por el bastidor 202 permite que el accionador 200 de arco sea accionado en la dirección 210 hasta una mayor flexión con una tensión menor. Además, la predeformación elevada en la dirección 208 aumenta la resistencia a la ruptura del polímero 206, permitiendo tensiones mayores y flexiones mayores del accionador 200 de arco.

Como se ha mencionado anteriormente con respecto a la FIG. 1A, cuando un polímero se expande como resultado de fuerzas electrostáticas, continúa expandiéndose hasta que las fuerzas mecánicas equilibran la presión electrostática que impulsa la expansión. Cuando la carga 211 está fijada al accionador 200 de arco, los efectos mecánicos proporcionados por la carga 211 influirán sobre el equilibrio de fuerzas y la flexión del polímero 206. Por

ejemplo, si la carga 211 resiste la expansión del accionador 200 de arco, entonces el polímero 206 puede no expandirse tanto como si no hubiese ninguna carga.

En un ejemplo, el accionador 200 de arco puede incluir componentes adicionales para proporcionar una asistencia mecánica y mejorar la salida mecánica. A modo de ejemplo, se pueden fijar resortes 220, como los mostrados en la FIG. 2C, al accionador 200 de arco para aumentar la flexión en la dirección 210. Los resortes cargan el accionador 200 de arco de forma que la fuerza de resorte ejercida por los resortes se opone a la resistencia proporcionada por una carga externa. En algunos casos, los resortes 220 proporcionan una asistencia creciente para una flexión del accionador 200 de arco. En un ejemplo, los elementos de resorte pueden estar incorporados en las uniones 205 en vez de los resortes externos 220 para aumentar la flexión del accionador 200 de arco. Además, se puede aumentar la predeformación para aumentar la flexión. La carga también puede estar acoplada a los miembros rígidos 204 en la parte superior e inferior del bastidor 202 en vez de en los miembros rígidos del lado del bastidor 202 (como se muestra en la Figura 2B). Dado que los miembros rígidos superior e inferior 204 se contraen entre sí cuando se aplica tensión, como se muestra en la Figura 2B, el accionador 200 de arco proporciona un dispositivo ejemplar que se contrae en el plano tras la aplicación de una tensión, en vez de expandirse.

Aunque el accionador 200 de arco de las FIGURAS 2A - 2C ilustra un ejemplo específico de un accionador a medida que incluye un bastidor flexible y un polímero electroactivo, cualquier geometría de bastidor o asistencia mecánica para mejorar el desplazamiento de un polímero electroactivo es adecuada para ser utilizada con estos ejemplos.

La forma y la limitación del polímero pueden afectar a la flexión. Una relación entre dimensiones de un polímero electroactivo está definida como la relación de su longitud con respecto a su anchura. Si la relación entre dimensiones es elevada (por ejemplo, una relación entre dimensiones de al menos aproximadamente 4:1) y el polímero está limitado en toda su longitud por miembros rígidos, entonces la combinación puede tener como resultado una flexión sustancialmente unidimensional en la dirección a lo ancho.

Las FIGURAS 2D y 2E ilustran un accionador 230 de movimiento lineal antes y después de su accionamiento. El accionador 230 de movimiento lineal es un mecanismo planar que proporciona una salida mecánica en una dirección. El accionador 230 de movimiento lineal comprende un polímero 231 que tiene una longitud 233 sustancialmente mayor que su anchura 234 (por ejemplo, una relación entre dimensiones de al menos aproximadamente 4:1). El polímero 231 está fijado en lados opuestos a miembros rígidos 232 de un bastidor a lo largo de su longitud 233. Los miembros rígidos 232 tienen una mayor rigidez que el polímero 231. La limitación del borde geométrico proporcionado por los miembros rígidos 232 evita sustancialmente el desplazamiento en una dirección 236 a lo largo de la longitud 233 del polímero y facilita la flexión casi exclusivamente en una dirección 235. Cuando se implementa el accionador 230 de movimiento lineal con un polímero 231 que tiene una predeformación anisótropa, tal como una mayor predeformación 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 puede haber como resultado mayores flexiones en la dirección 235. A modo de ejemplo, tal disposición puede producir deformaciones lineales de al menos aproximadamente un 200 por ciento para acrílicos que tienen una predeformación anisótropa.

Una colección de polímeros electroactivos o accionadores puede estar unida mecánicamente para formar un accionador mayor con una salida común, por ejemplo, fuerza y/o desplazamiento. Al utilizar un polímero electroactivo pequeño como unidad base en una colección, se puede cambiar de escala la conversión de energía eléctrica a energía mecánica según una aplicación. A modo de ejemplo, se pueden combinar en serie múltiples accionadores 230 de movimiento lineal en la dirección 235 para formar un accionador que tiene una flexión acumulada de todos los accionadores de movimiento lineal en la serie. Cuando se convierte energía eléctrica en energía mecánica, se puede hacer referencia a los polímeros electroactivos —bien de forma individual o bien enlazados mecánicamente en una colección— como “músculo artificial”. Para los fines del presente documento, se define músculo artificial como uno o más transductores y/o accionadores que tienen una única fuerza de salida y/o desplazamiento. El músculo artificial puede ser implementado en un nivel micro o macro y puede comprender uno cualquiera o más de los accionadores descritos en el presente documento.

La FIG. 2F ilustra una vista lateral en corte transversal de un accionador 240 de múltiples capas como ejemplo de músculo artificial. El accionador 240 de múltiples capas incluye cuatro polímeros predeformados 241 dispuestos en paralelo y fijados cada uno a un bastidor rígido 242, de forma que tengan la misma flexión. Los electrodos 243 y 244 están depositados sobre superficies opuestas de cada polímero 241 y proporcionan un accionamiento electrostático simultáneo a los cuatro polímeros predeformados 241. El accionador 240 de múltiples capas proporciona una salida de fuerza acumulada de las capas poliméricas individuales 241.

En otro ejemplo, se pueden utilizar múltiples capas poliméricas electroactivas en lugar de un polímero para aumentar la salida de fuerza o de presión de un accionador. Por ejemplo, se pueden colocar en capas diez polímeros electroactivos para aumentar la salida de presión del accionador de diafragma de la FIG. 1E. La FIG. 2G ilustra tal accionador 245 de diafragma de múltiples capas apiladas como otro ejemplo de músculo artificial. El accionador 245 de múltiples capas apiladas incluye tres capas poliméricas 246 colocadas una sobre la otra y pueden estar fijadas por medio de capas adhesivas 247. Hay electrodos 248 y 249 en las capas adhesivas 247 hay electrodos que proporcionan el accionamiento a las capas poliméricas 246. Hay fijada una placa relativamente rígida 250 a la capa

polimérica más externa y dotada de un patrón para incluir agujeros 251 que permiten la flexión para el accionador 245 de diafragma de múltiples capas apiladas. Al combinar las capas poliméricas 246, el accionador 245 de múltiples capas apiladas proporciona una salida de fuerza acumulada de las capas poliméricas individuales 246.

Además del accionador 230 de movimiento lineal de las FIGURAS 2D y 2E, se pueden incluir polímeros electroactivos en una variedad de accionadores que proporcionan un desplazamiento lineal. La FIG. 2H ilustra un accionador lineal 255 que comprende un diafragma polimérico electroactivo 256. En este caso, hay fijado un eje 257 de salida a una porción central del diafragma 256 que se flexiona en un agujero 258 de un bastidor 261. Tras el accionamiento y la eliminación de la energía electrostática, el eje 257 de salida se traslada como se indica por medio de la flecha 259. El accionador lineal 255 también puede incluir un elemento 260 de resorte con capacidad expansiva que ayuda a colocar el eje 257 de salida.

En otro ejemplo, se pueden enrollar o plegar polímeros predeformados en transductores y accionadores lineales que se flexionan de forma axial tras ser accionados. Dado que la fabricación de los polímeros electroactivos es habitualmente más sencilla con menor número de capas, los accionadores enrollados proporcionan una forma eficaz de apretar grandes capas de polímero en una forma compacta. Los transductores y accionadores enrollados o plegados pueden incluir una o más capas de polímero enrolladas o plegadas para proporcionar numerosas capas de polímero adyacentes entre sí. Los accionadores enrollados o plegados son aplicables dondequiera que se utilicen accionadores lineales, tales como piernas y dedos robóticos, dispositivos de agarre de fuerza elevada, y accionadores lineales de uso general.

La FIG. 2I ilustra un accionador 262 de tipo oruga. El accionador 262 de tipo oruga incluye dos o más capas poliméricas predeformadas enrolladas con electrodos 263 que se flexionan de forma axial a lo largo de su eje cilíndrico. El accionador 262 de tipo oruga también incluye fijaciones electrostáticas 264 y 265 para fijarse y separarse de una superficie metálica 268. Las fijaciones electrostáticas 264 y 265 permiten que aumente la carrera total del accionador 262 de tipo oruga en comparación con un accionador sin apriete. Dado que la fuerza de apriete por peso unitario de las fijaciones electrostáticas 264 y 265 es elevada, se mantienen las ventajas de la fuerza por peso unitario de los polímeros predeformados con el accionador 262 de tipo oruga. Las fijaciones electrostáticas 264 y 265 están fijadas al accionador de tipo oruga en regiones 267 de conexión. Un cuerpo 266 del accionador de tipo oruga incluye las regiones 267 de conexión y el polímero 263 y tiene un grado de libertad a lo largo de la dirección axial del polímero enrollado 263 entre las regiones 267 de conexión. En un ejemplo, las fijaciones electrostáticas 264 y 265 incluyen un adhesivo aislante 269 que evita el cortocircuito eléctrico desde las fijaciones electrostáticas conductoras 264 y 265 a la superficie metálica 268.

El accionador 262 de tipo oruga se mueve hacia arriba en un procedimiento de seis etapas. En la primera etapa, se inmoviliza el accionador 262 de tipo oruga en sus extremos respectivos cuando se accionan ambas fijaciones electrostáticas 264 y 265 y se relaja el polímero 263. Se acciona la fijación electrostática al aplicar una diferencia de tensión entre la fijación y la superficie metálica 268. En la segunda etapa, se libera la fijación 265. La liberación de una de las fijaciones 264 y 265 permite que su extremo respectivo del accionador 262 de tipo oruga se mueva libremente. En la tercera etapa, se acciona el polímero electroactivo 263 y se extiende el accionador 262 de tipo oruga hacia arriba. En la cuarta etapa, se acciona la fijación 265 y se inmoviliza el accionador 262 de tipo oruga. En la quinta etapa, se libera la fijación 264. En la sexta etapa, se relaja el polímero 263 y se contrae el accionador 262 de tipo oruga. Al repetir de forma cíclica las etapas primera a sexta, el accionador 262 de tipo oruga se mueve en la dirección ascendente. Al intercambiar las fijaciones 264 y 265 en el anterior procedimiento de la sexta etapa, el accionador 262 de tipo oruga se mueve en una dirección inversa.

Aunque se ha descrito el accionador 262 de tipo oruga en términos de accionamiento utilizando un único polímero electroactivo y dos fijaciones, se pueden implementar accionadores de tipo oruga de múltiples segmentos utilizando múltiples polímeros electroactivos. Los accionadores de tipo oruga de múltiples segmentos permiten que un accionador de tipo oruga aumente su longitud sin que se vuelva más grueso. Un accionador de tipo oruga de dos segmentos utilizaría dos polímeros enrollados en vez de uno y tres fijaciones en vez de dos. En general, un accionador de tipo oruga de  $n$  segmentos comprende  $n$  accionadores entre  $n+1$  fijaciones.

La FIG. 2J ilustra un accionador 270 de película estirada para proporcionar una flexión lineal. El accionador 270 de película estirada incluye un bastidor rígido 271 que tiene un agujero 272. Hay fijado un polímero predeformado 273 en tensión al bastidor 271 y se extiende sobre el agujero 272. Hay fijada una barra rígida 274 al centro del polímero 273 y proporciona un desplazamiento externo correspondiente a la flexión del polímero 273. Los pares 275 y 276 de electrodos con capacidad expansiva están dotados de un patrón tanto en las superficies superior e inferior del polímero 273 como en los lados izquierdo y derecho, respectivamente, de la barra rígida 274. Cuando se acciona el par 275 de electrodos, una porción del polímero 273 entre el par superior e inferior 275 de electrodos, y en el entorno del mismo, se expande con respecto al resto del polímero 273 y la tensión existente en el resto del polímero 273 tracciona la barra rígida 274 para que se mueva hacia la derecha. En cambio, cuando se acciona el par 276 de electrodos, una segunda porción del polímero 273 afectada por el par 276 de electrodos se expande con respecto al resto del polímero 273 y permite que la barra rígida 274 se mueva hacia la izquierda. El accionamiento alterno de los electrodos 275 y 276 proporciona una carrera total efectivamente mayor 279 para la barra rígida 274. Una variación de este accionador incluye añadir una predeformación anisótropa al polímero, de forma que el polímero tenga una

predeformación (y una rigidez) elevada en la dirección perpendicular al desplazamiento de la barra rígida. Otra variación es eliminar uno de los pares de electrodos. En aras de la simplificación del diseño, esta variación reduce la carrera 279 del accionador 270 de película estirada. En este caso, la porción del polímero no utilizada ya por el electrodo retirado responde ahora pasivamente como un resorte de reposición.

- 5 La FIG. 2K ilustra un accionador 280 de varilla flexible según una realización de la presente invención. El accionador 280 de varilla flexible incluye un polímero 281 fijado en un extremo por un soporte rígido 282 y fijado a un material delgado flexible 283, tal como poliimida o mylar utilizando una capa adhesiva, por ejemplo. El material delgado flexible 283 tiene un módulo de elasticidad mayor que el polímero 281. La diferencia en módulo de elasticidad para los lados superior e inferior 286 y 287 del accionador 280 de varilla flexible provoca que el accionador 280 de varilla flexible se doble tras su accionamiento. Los electrodos 284 y 285 están fijados en lados opuestos del polímero 281 para proporcionar energía eléctrica. El accionador 280 de varilla flexible incluye un extremo libre 288 que tiene un único grado de libertad de pliegue. La flexión del extremo libre 288 puede ser medida por la diferencia en el ángulo entre el extremo libre 288 y el extremo fijado por medio del soporte rígido 282. La FIG. 2L ilustra el accionador 280 de varilla flexible con un ángulo de pliegue de 90 grados.
- 10 El ángulo máximo de pliegue del accionador 280 de varilla flexible variará con un número de factores incluyendo el material polimérico, la longitud del accionador, la rigidez a la flexión de los electrodos 284 y 285 y material delgado flexible 283, etc. Para un accionador 280 de varilla flexible comprende silicona Dow Corning HS3, electrodos de oro y un área activa con una longitud de 3,5 mm, se pueden obtener ángulos de pliegue de más de 225 grados. Para el accionador 280 de varilla flexible, según aumenta la longitud del área activa, se pueden obtener mayores ángulos de pliegue. En consecuencia, al extender la longitud activa del accionador de varilla flexible mencionado anteriormente hasta 5 mm permite un ángulo de pliegue que se aproxima a los 360 grados.

- 15 En una realización, uno de los electrodos puede actuar como el material delgado flexible 283. Cualquier metal delgado, tal como oro, que tenga una rigidez reducida a la flexión y una rigidez elevada a la tracción puede ser adecuado para un electrodo que actúa como el material delgado flexible 283. En otra realización, se fija una capa barrera entre uno de los electrodos 284 y 285 y el polímero 281 para minimizar el efecto de cualquier ruptura localizada en el polímero. La ruptura puede ser definida como el punto en el que el polímero no puede soportar la tensión aplicada. Típicamente, la capa barrera es más delgada que el polímero 281 y tiene una constante dieléctrica mayor que el polímero 281, de forma que la caída de tensión se produce principalmente a través del polímero 281. A menudo es preferente que la capa barrera tenga una elevada resistencia a la ruptura dieléctrica.

- 20 La FIG. 2M ilustra un accionador 290 de varilla flexible según otra realización de la presente invención. El accionador 290 de varilla flexible incluye polímeros predeformados superior e inferior 291 y 292 fijados en un extremo por medio de un soporte rígido 296. Cada uno de los polímeros 291 y 292 puede ser accionado independientemente. Se consigue el accionamiento independiente por medio de un control eléctrico separado de los electrodos superior e inferior 293 y 294 fijados a los polímeros electroactivos superior e inferior 291 y 292, respectivamente. Hay situado un electrodo común 295 entre los polímeros electroactivos superior e inferior 291 y 292 y está fijado a ambos. El electrodo común 295 puede tener suficiente rigidez para mantener la predeformación en las capas poliméricas 291 y 292 mientras que sigue permitiendo una extensión y un pliegue.

- 25 El accionamiento del polímero electroactivo superior 291 utilizando el par superior de electrodos 293 y 295 provoca que el accionador 290 de varilla flexible se doble hacia abajo. el accionamiento del polímero inferior 292 utilizando el par inferior de electrodos 294 y 295 provoca que el accionador 290 de varilla flexible se doble hacia arriba. Por lo tanto, el uso independiente de los polímeros electroactivos superior e inferior 291 y 292 permite que el accionador 290 de varilla flexible sea controlado a lo largo de una dirección radial 297. Cuando se accionan simultáneamente ambos polímeros superior e inferior 291 y 292 —y tienen un tamaño y material sustancialmente similar— el accionador 290 de varilla flexible se extiende en longitud a lo largo de la dirección lineal 298. La combinación de la capacidad para controlar el movimiento en la dirección radial 297 y la dirección lineal 298 hace que el accionador 290 de varilla flexible se convierta en un accionador con dos grados de libertad. En consecuencia, el accionamiento independiente y el control de los polímeros superior e inferior 291 y 292 permiten un extremo libre 299 del accionador 290 de varilla flexible para ejecutar movimientos complejos tales como trayectorias circulares o elípticas.

#### 4. Rendimiento

- 30 Un transductor según la presente invención convierte entre energía eléctrica y energía mecánica. El rendimiento del transductor puede ser caracterizado 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 implementados en un motor). La predeformación de polímeros electroactivos según la presente invención proporciona mejoras sustanciales en el rendimiento del transductor.
- 35 La caracterización del rendimiento de un transductor por sí mismo normalmente está relacionada con las propiedades del material del polímero y de los electrodos. Se puede describir el rendimiento de un polímero electroactivo con independencia del tamaño del polímero por medio de parámetros tales como la deformación, la densidad de energía, la presión de accionamiento, la densidad y eficacia de la presión de accionamiento. Se debería

hacer notar que la caracterización del rendimiento de polímeros predeformados y sus transductores respectivos descritos a continuación puede variar para distintos polímeros electroactivos y electrodos.

Los polímeros predeformados utilizados en la presente invención tienen un módulo eficaz de, como mucho, aproximadamente 100 MPa y, por ejemplo, superior a aproximadamente 0,1 MPa. La presión de accionamiento está definida como el cambio en la fuerza en un polímero predeformado por área unitaria en corte transversal entre los estados accionado y no accionado. En algunos casos, los polímeros predeformados de la presente invención pueden tener una presión de accionamiento en el intervalo desde aproximadamente 0 hasta aproximadamente 100 MPa, y más preferentemente en el intervalo desde 0,1 hasta 10 MPa. También se puede utilizar la densidad específica de energía elástica —definida como la energía de deformación de una masa unitaria del material en la transición entre estados accionado y no accionado— para describir un polímero electroactivo en el que el peso es importante. Los polímeros predeformados utilizados en la presente invención pueden tener una densidad específica de energía elástica superior a 3 J/g.

También se puede describir el rendimiento de un polímero predeformado, con independencia del tamaño del polímero, por medio de la eficacia. La eficacia electromecánica está definida como la relación de energía mecánica de salida con respecto a la energía eléctrica de entrada. Se puede conseguir una eficacia electromecánica superior al 80 por ciento con algunos polímeros predeformados de la presente invención. El tiempo para que un polímero predeformado aumente (o caiga) hasta su máxima (o mínima) presión de accionamiento es denominado su tiempo de respuesta. Los polímeros predeformados utilizados en la presente invención pueden acomodar un amplio intervalo de tiempos de respuesta. Dependiendo del tamaño y de la configuración del polímero, los tiempos de respuesta pueden variar entre aproximadamente 0,01 milisegundos y 1 segundo, por ejemplo. También se puede caracterizar un polímero predeformado excitado a una tasa elevada por medio de una frecuencia operativa. En un ejemplo, las máximas frecuencias operativas adecuadas para ser utilizadas con la presente invención pueden encontrarse en el intervalo desde aproximadamente 100 Hz hasta 100 kHz. Las frecuencias operativas en este intervalo permiten que los polímeros predeformados utilizados en la presente invención sean utilizados en diversas aplicaciones acústicas (por ejemplo, altavoces). En algunos ejemplos, los polímeros predeformados de la presente invención pueden ser operados a una frecuencia resonante para mejorar la salida mecánica.

Se puede describir el rendimiento de un accionador por medio de un parámetro de rendimiento específico al accionador. A modo de ejemplo, se puede cuantificar el rendimiento de un accionador de un cierto tamaño y peso por medio de parámetros tales como carrera o desplazamiento, fuerza, tiempo de respuesta del accionador. La caracterización del rendimiento de un transductor en una aplicación está relacionada con lo bien que esté implementado el transductor en una aplicación particular (por ejemplo, en robótica). Se puede describir el rendimiento de un transductor en una aplicación por medio de un parámetro de rendimiento específico de la aplicación (por ejemplo, fuerza/peso unitario en aplicaciones de robótica). Los parámetros específicos de la aplicación incluyen la carrera o el desplazamiento, fuerza, tiempo de respuesta del accionador, respuesta de frecuencia, eficacia, etc. Estos parámetros pueden depender del tamaño, de la masa y/o del diseño del transductor y de la aplicación particular.

Se debería hacer notar que las propiedades deseadas del material 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, se puede implementar un polímero predeformado con uno de una resistencia dieléctrica elevada, una constante dieléctrica elevada, y un módulo reducido de elasticidad. Además, un polímero puede incluir una de una resistividad de gran volumen y una baja amortiguación mecánica para maximizar el rendimiento energético para una aplicación.

## 5. Electrodos

Como se ha mencionado anteriormente, los transductores de la presente invención incluyen preferentemente uno o más electrodos para accionar un polímero electroactivo. En general, los electrodos adecuados para ser utilizados con la presente invención pueden tener cualquier forma y material siempre que puedan suministrar o recibir una tensión adecuada, bien de forma constante o bien variable con el paso del tiempo, hacia o desde un polímero electroactivo. En un ejemplo, los electrodos se adhieren a una superficie del polímero. Los electrodos que se adhieren al polímero tienen, preferentemente capacidad expansiva y se adaptan a la forma cambiante del polímero. Los electrodos solo pueden aplicados a una porción de un polímero electroactivo y definen un área activa según su geometría.

Los electrodos con capacidad expansiva tienen capacidad de flexión en una o más direcciones. Se puede utilizar la deformación lineal para describir la flexión de un electrodo con capacidad expansiva en una de estas direcciones. Según se utiliza la expresión en el presente documento, deformación lineal de un electrodo con capacidad expansiva hace referencia a la flexión por longitud unitaria a lo largo de una línea de flexión. Son posibles deformaciones (por tracción o por compresión) lineales máximas de al menos aproximadamente un 50 por ciento para electrodos con capacidad expansiva de la presente invención. Para algunos electrodos con capacidad expansiva, son habituales deformaciones lineales máximas de al menos aproximadamente un 100 por ciento. Por supuesto, un electrodo puede flexionarse con una deformación menor que la máxima. En un ejemplo, el electrodo con capacidad expansiva

es un "electrodo estructurado" que comprende una o más regiones de conductividad elevada y una o más regiones de conductividad reducida.

La FIG. 3 ilustra una vista superficial en planta de un electrodo estructurado 501 que proporciona una capacidad expansiva unidireccional. El electrodo estructurado 501 incluye trazas metálicas 502 dotadas de un patrón en líneas paralelas sobre una capa 503 de distribución de carga —cubriendo ambas un área activa de un polímero (no mostrado)—. Las trazas metálicas 502 y la capa 503 de distribución de carga son aplicados a las superficies opuestas del polímero. Por lo tanto, el corte transversal, desde la parte superior hasta la parte superior, de un transductor que incluye electrodos estructurados 501 en superficies opuestas es: trazas metálicas superiores, capa superior de distribución de carga, polímero, capa inferior de distribución de carga, trazas metálicas inferiores. Las trazas metálicas 502 en cualquiera de las dos superficies del polímero actúan como electrodos para el material polimérico electroactivo entre las mismas. En otro ejemplo, el electrodo inferior puede ser un electrodo uniforme con capacidad expansiva. La capa 503 de distribución de carga facilita la distribución de carga entre las trazas metálicas 502. Juntas, las trazas metálicas 502 de conductividad elevada conducen rápidamente la carga a través del área activa hasta la capa 503 de distribución de carga de conductividad reducida que distribuye la carga uniformemente a través de la superficie del polímero entre las trazas 502. La capa 503 de distribución de carga tiene capacidad expansiva. Como resultado, el electrodo estructurado 501 permite la flexión en una dirección perpendicular 506 con capacidad expansiva a las trazas metálicas paralelas 502.

Se puede conseguir el accionamiento de todo el polímero al extender la longitud de las trazas metálicas paralelas 502 a través de la longitud del polímero y al implementar un número adecuado de trazas 502 a través de la anchura del polímero. En un ejemplo, las trazas metálicas 502 están separadas a intervalos del orden de 400 micrómetros y tienen un grosor desde aproximadamente 20 hasta 100 nanómetros. La anchura de las trazas es normalmente menor que la separación. Para aumentar la velocidad total de respuesta del electrodo estructurado 501, se puede reducir la distancia entre las trazas metálicas 502. Las trazas metálicas 502 pueden comprender oro, plata, aluminio y muchos otros metales y materiales conductores relativamente rígidos. En un ejemplo, las trazas metálicas en superficies opuestas de un polímero electroactivo están desplazadas entre sí para mejorar la distribución de carga a través de la capa polimérica y evitar rupturas eléctricas directas de metal a metal.

La flexión de las trazas metálicas paralelas 502 a lo largo de su eje, mayor que la tolerancia elástica del material de la traza metálica, puede dar lugar a daños de las trazas metálicas 502. Para evitar daños de esta forma, el polímero puede estar limitado por una estructura rígida que evita la flexión del polímero y de las trazas metálicas 502 a lo largo de su eje. Los miembros rígidos 232 del accionador de movimiento lineal de las FIGURAS 2D y 2E son adecuados en este sentido. En otro ejemplo, las trazas metálicas 502 pueden ser onduladas ligeramente sobre la superficie del polímero 500. Estas ondulaciones añaden capacidad expansiva a las trazas 502 a lo largo de su eje y permiten la flexión en esta dirección.

En general, la capa 503 de distribución de carga tiene una conductancia mayor que el polímero electroactivo pero menor que las trazas metálicas. Los requerimientos no estrictos de conductividad de la capa 503 de distribución de carga permiten que se utilice una amplia variedad de materiales. A modo de ejemplo, la capa de distribución de carga puede comprender negro de humo, fluoroelastómero con plata coloidal, una emulsión de caucho de látex de base acuosa con un pequeño porcentaje en carga másica de yoduro de sodio, y poliuretano con complejo de transferencia de carga de tetratíafulvaleno/tetracianoquinodimetano (TIF/TCNQ). Estos materiales tienen capacidad para formar capas uniformes delgadas con una cobertura uniforme y tienen una conductividad superficial suficiente para conducir la carga entre trazas metálicas 502 antes de que una carga sustancial se fugue al entorno. En un ejemplo, el material de la capa 503 de distribución de carga está seleccionado con base en la constante de tiempo RC del polímero. A modo de ejemplo, la resistividad superficial de la capa 503 de distribución de carga adecuada para la presente invención puede encontrarse en el intervalo de  $10^6$ - $10^{11}$  ohmios. También se debería hacer notar que en algunas realizaciones, no se utiliza una capa de distribución de carga y las trazas metálicas 502 son dotadas de un patrón directamente sobre el polímero. En este caso, el aire u otras especies químicas sobre la superficie del polímero puede ser suficiente para transportar carga entre las trazas. Se puede realzar este efecto al aumentar la conductividad superficial mediante tratamientos superficiales tales como ataque con plasma o implantación de iones.

En otro ejemplo, hay situados múltiples electrodos metálicos en el mismo lado de un polímero y se extienden la anchura del polímero. Los electrodos proporcionan capacidad expansiva en la dirección perpendicular a la anchura. Dos electrodos metálicos adyacentes actúan como electrodos para un material polimérico entre los mismos. Los múltiples electrodos metálicos se alternan de esta forma y los electrodos alternos pueden encontrarse en comunicación eléctrica para proporcionar una activación sincronizada del polímero.

La FIG. 4 ilustra un polímero predeformado 510 subyacente a un electrodo estructurado que no tiene capacidad expansiva direccional. El electrodo estructurado incluye trazas metálicas 512 dotadas de un patrón directamente sobre una superficie del polímero electroactivo 510 en líneas paralelas separadas uniformemente que forman un patrón con forma de "zigzag". Dos trazas metálicas 512 en superficies opuestas del polímero actúan como electrodos para el material polimérico electroactivo 510 entre las mismas. El patrón con forma de "zigzag" de las trazas metálicas 512 permite la expansión y la contracción del polímero y del electrodo estructurado en múltiples direcciones 514 y 516.

El uso de un conjunto de trazas metálicas como se describe con respecto a las FIGURAS 3 y 4 permite el uso de capas de distribución de carga que tienen un menor conductancia. Más específicamente, según se reduce la separación entre las trazas metálicas, puede reducirse la conductancia requerida del material entre las trazas. De esta forma, es posible utilizar materiales que no están considerados normalmente conductores para ser utilizados como capas de distribución de carga. A modo de ejemplo, se pueden utilizar los polímeros que tiene una resistividad superficial de  $10^{10}$  ohmios como una capa de distribución de carga de esta forma. En un ejemplo específico, se utilizó caucho como una capa de distribución de carga como parte de un electrodo estructurado en una capa polimérica que tiene un grosor de 25 micrómetros y una separación entre trazas metálicas paralelas de aproximadamente 500 micrómetros. Además de reducir la conductancia requerida de una capa de distribución de carga, las trazas metálicas separadas estrechamente también aumentan la velocidad de accionamiento, dado que la carga solo necesita atravesar la capa de distribución de carga durante una distancia corta entre las trazas metálicas separadas estrechamente.

Aunque se han descrito los electrodos estructurados que van a ser utilizados en la presente invención en términos de dos configuraciones específicas de trazas metálicas; los electrodos estructurados pueden ser dotados de un patrón de cualquier forma adecuada. Como apreciará un experto en la técnica, diversos patrones de trazas metálicas distribuidas uniformemente pueden proporcionar carga sobre la superficie de un polímero mientras que proporcionan capacidad expansiva en una o más direcciones. En algunos casos, un electrodo estructurado puede estar fijado a la superficie del polímero de una manera no uniforme. Dado que el accionamiento del polímero puede estar limitado a una región activa en una proximidad adecuada de un par de trazas metálicas dotadas de un patrón, se pueden definir regiones activa y no activa especializadas para un polímero electroactivo por medio de un patrón modificado a medida de las trazas metálicas. Estas regiones activa y no activa pueden estar formadas según geometrías a medida y con altas resoluciones según técnicas convencionales de deposición de trazas metálicas. Extendiendo esta práctica por toda la superficie de un polímero electroactivo, los patrones a medida para electrodos estructurados que comprenden numerosas regiones activas de geometría a medida pueden tener como resultado un accionamiento especializado y no uniforme del polímero electroactivo según el patrón de los electrodos estructurados.

Aunque se han expuesto los electrodos que van a ser utilizados con la presente invención fundamentalmente en términos de electrodos planos, se pueden utilizar "electrodos texturados" que comprenden diversas dimensiones fuera del plano para proporcionar un electrodo con capacidad expansiva. La FIG. 5 ilustra electrodos texturados ejemplares 520 y 521. Los electrodos texturados 520 y 521 están fijados a superficies opuestas de un polímero electroactivo 522, de forma que la flexión del polímero 522 tiene como resultado una deformación planar y no planar de los electrodos texturados 520 y 521. La capacidad expansiva planar y no planar de los electrodos 520 y 521 está proporcionada por un patrón ondulante que, tras una flexión planar y/o del grosor del polímero 522, proporciona una capacidad expansiva direccional en una dirección 526. Para proporcionar sustancialmente una capacidad expansiva uniforme de los electrodos texturados 520 y 521, se implementa el patrón ondulante por toda la superficie del polímero electroactivo en la dirección 526. En un ejemplo, los electrodos texturados 520 y 521 comprenden metal que tiene un grosor que permite un pliegue sin un agrietamiento del metal para proporcionar una capacidad expansiva. Típicamente, el electrodo texturado 520 está configurado de forma que la flexión no planar de los electrodos 520 y 521 es mucho menor que el grosor del polímero 522 para proporcionar un campo eléctrico sustancialmente constante al polímero 522. Los electrodos texturados pueden proporcionar una capacidad expansiva en más de una dirección. En un ejemplo específico, un electrodo áspero texturado proporciona una capacidad expansiva en direcciones planares ortogonales. El electrodo áspero texturado puede tener una topografía similar a la superficie áspera de la FIG. 1D.

En un ejemplo, los electrodos con capacidad expansiva de la presente invención comprenden una grasa conductora tal como grasa de carbono o grasa de plata. La grasa conductora proporciona una capacidad expansiva en múltiples direcciones. Las partículas pueden ser añadidas para aumentar la conductividad del polímero. A modo de ejemplo, se pueden combinar las partículas de carbono con un aglutinante polimérico tal como silicona para producir una grasa de carbono que tiene una elasticidad reducida y una conductividad elevada. Se pueden mezclar otros materiales en la grasa conductora para alterar una o más propiedades del material. Las grasas conductoras según la presente invención son adecuadas para flexiones de al menos aproximadamente un 100 por ciento de deformación.

Los electrodos con capacidad expansiva también pueden incluir suspensiones coloidales. Las suspensiones coloidales contienen partículas de tamaño submicrométrico, tales como grafito, plata y oro, en un vehículo líquido. En general, se puede utilizar cualquier suspensión coloidal que tenga una carga suficiente de partículas conductoras como un electrodo. En un ejemplo, se mezcla una grasa conductora que incluye partículas conductoras de tamaño coloidal con una silicona conductora que incluye partículas conductoras de tamaño coloidal en un aglutinante de silicona para producir una suspensión coloidal que se endurece para formar un semisólido conductor. Una ventaja de las suspensiones coloidales es que pueden ser dotadas de un patrón sobre la superficie de un polímero por medio de pulverización, recubrimiento por inmersión y otras técnicas que permiten un revestimiento uniforme delgado de un líquido. Para facilitar la adhesión entre el polímero y un electrodo, se puede añadir un aglutinante al electrodo. A modo de ejemplo, se puede añadir un caucho de látex o silicona de base acuosa como aglutinante a una suspensión coloidal que incluye grafito.

En otro ejemplo, se consiguen electrodos con capacidad expansiva utilizando una relación elevada entre dimensiones de material conductor tal como fibrillas de carbono y nanotubos de carbono. Estos materiales de carbono con una relación elevada entre dimensiones pueden formar conductividades superficiales elevadas en capas delgadas. Los materiales de carbono con una relación elevada entre dimensiones pueden impartir una conductividad elevada a la superficie del polímero con grosores relativamente reducidos de electrodos debido a la interconectividad elevada de los materiales de carbono con una relación elevada entre dimensiones. A modo de ejemplo, los grosores de los electrodos fabricados con formas comunes de carbono que no tienen una relación elevada entre dimensiones pueden encontrarse en el intervalo de 5 - 50 micrómetros, mientras que los grosores de los electrodos fabricados de fibrillas de carbono o de nanotubos de carbono pueden ser inferiores a 2 - 4 micrómetros. Las expansiones de área muy por encima del 100 por ciento en múltiples direcciones son adecuadas con electrodos de fibrillas de carbono y nanotubos de carbono en acrílico y otros polímeros. Los materiales de carbono con una relación elevada entre dimensiones pueden incluir el uso de un aglutinante polimérico para aumentar la adhesión con la capa polimérica electroactiva. De forma ventajosa, el uso del aglutinante polimérico permite que se seleccione un aglutinante específico con base en la adhesión con una capa polimérica electroactivo particular y con base en las propiedades elásticas y mecánicas del polímero.

En un ejemplo, los electrodos de carbono con una relación elevada entre dimensiones pueden fabricarse lo suficientemente delgados de forma que se pueda variar la opacidad de los electrodos según la flexión del polímero. A modo de ejemplo, se pueden fabricar los electrodos lo suficientemente delgados de forma que el electrodo cambie de opaco a semitransparente tras una expansión planar. Esta capacidad para manipular la opacidad del electrodo puede permitir que los transductores de la presente invención sean aplicados a un número de diversas aplicaciones ópticas, como se describirá a continuación.

En otro ejemplo, se pueden utilizar mezclas de materiales iónicamente conductores para los electrodos con capacidad expansiva. Esto puede incluir, por ejemplo, materiales poliméricos de base acuosa tales como glicerol o sal en gelatina, cauchos naturales dopados con yodo y emulsiones de base acuosa a las que se han añadido sales orgánicas tales como yoduro potásico. Para polímeros electroactivos hidrófobos que pueden no adherirse bien a un electrodo de base acuosa, se puede tratar anteriormente la superficie del polímero mediante ataque con plasma o con un polvo fino tal como grafito o negro de humo para aumentar la adherencia.

Los materiales utilizados para los electrodos que van a ser utilizados en la presente invención pueden variar mucho. Los materiales adecuados utilizados en un electrodo pueden incluir grafito, negro de humo, suspensiones coloidales, metales delgados incluyendo plata y oro, geles y polímeros de relleno de plata y de relleno de carbono, polímeros iónicamente o electrónicamente conductores. En un ejemplo, un electrodo adecuado para ser utilizado con la presente invención comprende un 80 por ciento de grasa de carbono y un 20 por ciento de negro de humo en un aglutinante de caucho de silicona tal como Stockwell RTV60-CON producido por Stockwell Rubber Co. Inc. de Filadelfia, Pensilvania, EE. UU. La grasa de carbono es de un tipo como la de Circuit Works 7200, proporcionada por ChemTronics, Inc. de Kennesaw, Georgia, EE. UU. También se puede mezclar la grasa conductora con un elastómero, tal como elastómero de silicio RTV 118 producido por General Electric de Waterford, Nueva York, EE. UU., para proporcionar una grasa conductora similar a un gel.

Se comprenderá que ciertos materiales de electrodo pueden funcionar bien con polímeros particulares y pueden no funcionar tan bien con otros. A modo de ejemplo, las fibrillas de carbono funcionan bien con polímeros elastoméricos acrílicos aunque no tan bien con polímeros de silicona. Para la mayor parte de los transductores, las propiedades deseables del electrodo con capacidad expansiva pueden incluir uno cualquiera de un módulo reducido de elasticidad, una amortiguación mecánica reducida, una resistividad superficial reducida, una resistividad uniforme, una estabilidad química y medioambiental, una compatibilidad química con el polímero electroactivo, una buena adherencia al polímero electroactivo, y una capacidad para formar superficies lisas. En algunos casos, puede ser deseable que el material de electrodo sea adecuado para un patrón preciso durante la fabricación. A modo de ejemplo, el electrodo con capacidad expansiva puede ser revestido por pulverización sobre el polímero. En este caso, serían deseables propiedades del material que benefician el revestimiento por pulverización. En algunos casos, un transductor de la presente invención puede implementar dos tipos distintos de electrodos. A modo de ejemplo, un accionador de diafragma puede tener un electrodo estructurado fijado a su superficie superior y un material de carbono con una relación elevada entre dimensiones depositado sobre el lado inferior.

Los accionadores electrónicos están conectados a los electrodos. La tensión proporcionada al polímero electroactivo dependerá de requerimientos específicos de una aplicación. En un ejemplo, un transductor de la presente invención es accionado eléctricamente al modular una tensión aplicada en torno a una tensión de polarización de CC. La modulación en torno a una tensión de polarización permite una mayor sensibilidad y linealidad del transductor a la tensión aplicada. A modo de ejemplo, un transductor utilizado en una aplicación de audio puede ser excitado por una señal de hasta 200 hasta 1000 voltios de pico a pico por encima de una tensión de polarización que varíe desde aproximadamente 750 hasta 2000 voltios de CC.

## 6. Aplicaciones

Dado que la presente invención incluye transductores que pueden ser implementados tanto en escalas micro como macro, y con una amplia variedad de diseños del accionador, la presente invención encuentra uso en una amplia gama de aplicaciones en las que la energía eléctrica es convertida en energía mecánica. A continuación se proporcionan varias aplicaciones ejemplares para algunos de los accionadores descritos anteriormente. En general, los accionadores de la presente invención pueden encontrar uso en cualquier aplicación que requiera una conversión de energía mecánica a eléctrica.

Como se ha mencionado anteriormente, se puede denominar a los polímeros electroactivos, bien de forma individual o bien enlazados mecánicamente en una colección, como músculo artificial. La expresión músculo artificial en sí misma implica que estos accionadores son muy adecuados para una aplicación en robots biológicamente inspirados o aplicaciones biomédicas en las que se desee la copia de un músculo, mamífero u otro. A modo de ejemplo, las aplicaciones tales como miembros protésicos, exoesqueletos, y corazones artificiales pueden beneficiarse de polímeros predeformados. La capacidad de cambio de escala del tamaño de los polímeros electroactivos y la capacidad para utilizar cualquier número de transductores o accionadores poliméricos en una colección permiten que el músculo artificial sea utilizado en una gama en aplicaciones mayor que sus homólogos biológicos. Dado que los accionadores de la presente invención tienen un intervalo de rendimiento muy distinto de sus homólogos biológicos, la aplicación de la presente invención no está limitada al músculo artificial que tiene un rendimiento correspondiente a un músculo real, y puede, ciertamente, incluir aplicaciones que requieren un rendimiento distinto del de un músculo real.

En un ejemplo de músculo artificial, una colección de accionadores de movimiento lineal comprende dos o más capas de polímero predeformado intercaladas entre sí y fijadas a dos placas rígidas en bordes opuestos de cada polímero. Los electrodos están sellados en el centro entre cada una de las capas poliméricas. Todos los accionadores de movimiento lineal en la colección pueden aprovecharse de limitaciones geométricas proporcionadas por las placas rígidas y una predeformación anisótropa para restringir la deformación del polímero en la dirección de accionamiento. Una ventaja de la construcción en capas es que se pueden apilar en paralelo tantas capas poliméricas electroactivas como se requieran para producir la fuerza deseada. Además, se puede aumentar la carrera de esta configuración del accionador de movimiento lineal al añadir accionadores similares de movimiento lineal en serie.

En el microdominio, los polímeros predeformados pueden variar en grosor desde varios micrómetros hasta varios milímetros y, preferentemente, desde varios micrómetros hasta cientos de micrómetros. Los micropolímeros predeformados son muy adecuados para aplicaciones tales como chorros de tinta, válvulas accionadas, microbombas, accionadores de tipo oruga, espejos de señalamiento, generadores de sonidos, microfijaciones, y aplicaciones microrrobóticas. Las aplicaciones microrrobóticas pueden incluir patas microrrobóticas, dispositivos de agarre, accionadores de puntero para cámaras CCD, alimentadores de alambre para microsoldadura y reparación, accionadores de fijación para mantener posiciones rígidas, y accionadores ultrasónicos para transmitir datos en distancias medidas. En otra aplicación, se puede implementar un accionador de diafragma en un conjunto de diafragmas poliméricos electroactivos similares en una configuración planar en una única superficie. A modo de ejemplo, un conjunto puede incluir sesenta y dos diafragmas con el diámetro de 150 micrómetros, cada uno dispuesto en una configuración planar. En un ejemplo, el conjunto de accionadores de diafragma pueden estar formados en una oblea de silicio. Los conjuntos de accionadores de diafragma producidos de esta forma pueden incluir, por ejemplo, entre 5 y 10.000 o más diafragmas, teniendo cada uno un diámetro en el intervalo de 60 a 150 micrómetros. El conjunto puede estar colocado sobre placas de rejilla que tienen agujeros separados de forma adecuada para cada diafragma.

En el macrodominio, cada uno de los accionadores descritos anteriormente puede ser muy adecuado a su propio conjunto de aplicaciones. Por ejemplo, el accionador de tipo oruga de la FIG. 21 es adecuado para ser utilizado con pequeños robots con capacidad para navegar a través de tubos con un diámetro menor de 2 cm. Otros accionadores son muy adecuados, por ejemplo, con aplicaciones tales como robótica, solenoides, generadores de sonido, accionadores lineales, accionadores aeroespaciales, y automatización general.

En otro ejemplo, se utiliza un transductor de la presente invención como un dispositivo de modulación óptica o un interruptor óptico. El transductor incluye un electrodo cuya opacidad varía con la flexión. Hay fijado un polímero predeformado transparente o sustancialmente traslúcido al electrodo de opacidad variable y se utiliza la flexión del polímero para modular la opacidad del dispositivo. En el caso de un interruptor óptico, el transductor de opacidad variable interrumpe una fuente de luz que se comunica con un fotosensor. Por lo tanto, la flexión del polímero transparente provoca que se flexione el electrodo de opacidad variable y afecte al fotosensor. En un ejemplo específico, el electrodo de opacidad variable incluye fibrillas de carbono o nanotubos de carbono que se vuelven menos opacos según aumenta el área del electrodo y se reduce la densidad de fibrillas del área. En otro ejemplo específico, se puede diseñar un dispositivo de modulación óptica que comprende un polímero electroactivo y un electrodo de opacidad variable para modular con precisión la cantidad de luz transmitida a través del dispositivo.

Los accionadores de diafragma pueden ser utilizados como bombas, válvulas, etc. En un ejemplo, un accionador de diafragma que tiene un polímero predeformado es adecuado para ser utilizado como una bomba. La acción de bombeo es creada al accionado reiteradamente el polímero. Las bombas de polímero electroactivo pueden ser implementadas tanto en micro como en macroescalas. A modo de ejemplo, el diafragma puede ser utilizado como una bomba que tiene un diámetro en el intervalo desde aproximadamente 150 micrómetros hasta aproximadamente 2 centímetros. Estas bombas pueden incluir deformaciones poliméricas superiores al 100 por ciento y pueden producir presiones de 20 kPa o más.

La FIG. 6 ilustra un sistema de bombeo en cascada de dos etapas que incluye bombas 540 y 542 de diafragma. Las bombas 540 y 542 de diafragma incluyen polímeros predeformados 544 y 546 fijados a bastidores 545 y 547. Los polímeros 544 y 546 se flexionan en los agujeros 548 y 550 en los bastidores 545 y 547, respectivamente, en una dirección perpendicular al plano de los agujeros 548 y 550. Los bastidores 545 y 547 junto con los polímeros 544 y 546 definen cavidades 551 y 552. La bomba 540 incluye un émbolo 553 que tiene un resorte 560 para proporcionar un empuje al 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 el gas fuera de la cavidad 551 al interior de la cavidad 552. Además, una válvula unidireccional 558 permite la salida del fluido o el gas de la cavidad 552. Tras el accionamiento de los polímeros 544 y 546, los polímeros se flexionan, a su vez, para cambiar la presión en el interior de las cavidades 551 y 552, respectivamente, moviendo de ese modo el fluido o gas desde la válvula unidireccional 555 hasta la cavidad 551, fuera de la válvula 556, al interior de la cavidad 552, y fuera de la válvula 558.

En el sistema de bombeo en cascada de dos etapas de la FIG. 6, la bomba 542 de diafragma no incluye un empuje, dado que la salida presurizada de la bomba 540 de diafragma empuja la bomba 542. En un ejemplo, solo la primera bomba en una serie en cascada de bombas de diafragma utiliza una presión de empuje —o cualquier otro mecanismo para un autocebado—. En algunos ejemplos, las bombas de diafragma proporcionadas en un conjunto pueden incluir tensiones proporcionadas mediante temporización electrónica para aumentar la eficacia de bombeo. En el ejemplo mostrado en la Figura 6, los polímeros 544 y 546 están accionados simultáneamente para el mejor rendimiento. Para otros ejemplos que pueden implicar más bombas de diafragma en la cascada, la temporización electrónica de los distintos accionadores está configurada idealmente, de forma que una bomba se contrae en volumen de cavidad mientras que la siguiente bomba en la serie (según se determina por medio de las válvulas unidireccionales) se expande. En un ejemplo, la bomba 540 de diafragma suministra gas con una tasa de 40 ml/min y una presión de aproximadamente 1 kPa mientras que la bomba 542 de diafragma suministra gas sustancialmente con el mismo caudal pero aumenta la presión a 2,5 kPa.

Los accionadores de varilla flexible, tales como los descritos con respecto a las FIGURAS 2K-2M, pueden ser utilizados en una variedad de dispositivos comerciales y aeroespaciales y en aplicaciones tales como ventiladores, interruptores y relés eléctricos, y escáneres de luz —tanto en el micro como en el macronivel—. Para los accionadores de varilla flexible utilizados como escáneres de luz, se puede unir una superficie reflectante tal como mylar aluminizado al extremo libre de un accionador de varilla flexible. Más específicamente, se refleja la luz cuando se acciona la varilla flexible y la luz pasa cuando la varilla flexible se encuentra en reposo. Entonces, se puede utilizar el reflector para reflejar luz entrante y formar un haz de barrido para formar un arco o línea según la flexión del accionamiento. Los conjuntos de accionadores de varilla flexible también pueden ser utilizados para medios de visualización de panel plano, para controlar el flujo de aire sobre una superficie, para altavoces de perfil bajo y supresores de vibraciones, como “pieles inteligentes” para controlar la transferencia de calor y/o la absorción de luz sobre una superficie, y pueden actuar como cilios de una forma coordinada para manipular objetos.

Los polímeros y las películas poliméricas que están enrollados en un accionador tubular o de cilindro de múltiples capas pueden ser implementados como un pistón que se expande de forma axial tras su accionamiento. Tal accionador es análogo a un pistón hidráulico o neumático, y puede ser implementado en cualquier dispositivo o aplicación que utilice estas formas tradicionales de flexión lineal.

Un accionador polimérico electroactivo también puede operar a velocidades elevadas para una variedad de aplicaciones que incluyen generadores de sonido y altavoces acústicos, impresoras de chorro de tinta, interruptores MEMS rápidos, etc. En un ejemplo específico, se utiliza un diafragma polimérico electroactivo como un escáner de luz. Más específicamente, se puede colocar un espejo en una estructura flexible que empuja hacia abajo sobre un diafragma polimérico electroactivo con un diámetro de 5 mm para proporcionar una estructura flexible especular. Se puede conseguir un buen escaneo de imágenes con un ángulo de barrido desde aproximadamente 10 hasta 30 grados con tensiones en el intervalo desde aproximadamente 190 hasta 300 voltios y frecuencias en el intervalo desde aproximadamente 30 hasta 300 Hz. También se pueden acomodar ángulos mayores de barrido, hasta 90 grados por ejemplo, utilizando tensiones en el intervalo de 400 a 500 V. Además, se pueden utilizar mayores frecuencias con una estructura flexible especular más rígida.

## 7. Fabricación

Dado que los polímeros predeformados pueden estar implementados tanto en micro como en macroescalas, 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 utilizados con la presente invención pueden variar mucho. A continuación se describen procedimientos adecuados para fabricar dispositivos electromecánicos que incluyen uno o más polímeros predeformados.

La FIG. 7A ilustra un flujo 600 de un procedimiento para fabricar un dispositivo electromecánico que puede ser un accionador de la presente invención que tiene al menos una capa polimérica electroactiva. Los procedimientos pueden incluir hasta varias etapas adicionales no descritas ni ilustradas aquí para no complicar la presente invención. En algunos casos, los procedimientos de fabricación pueden incluir materiales y técnicas convencionales tales como los polímeros disponibles comercialmente y técnicas utilizadas en la fabricación de microelectrónica y tecnologías de electrónica. Por ejemplo, se pueden producir microaccionadores de diafragma *in situ* sobre silicio utilizando técnicas convencionales para formar los agujeros y aplicar el polímero y los electrodos.

El flujo 600 del procedimiento comienza al recibir o fabricar un polímero (602). El polímero puede ser recibido o fabricado según varios procedimientos. En un ejemplo, el polímero es un producto disponible comercialmente tal como una película elastomérica acrílica disponible comercialmente. En otro ejemplo, el polímero es una película producida por uno de moldeo, inmersión, revestimiento por centrifugación o pulverización. En un ejemplo, el polímero es producido mientras se minimizan las variaciones en el grosor o cualquier otro defecto que pueda comprometer la maximización del campo eléctrico que puede ser aplicado en el polímero y, por lo tanto, comprometer el rendimiento.

Normalmente, el revestimiento por centrifugación supone aplicar una mezcla polimérica sobre un sustrato rígido y centrifugar hasta un grosor deseado. La mezcla polimérica puede incluir el polímero, un agente de polimerización y un dispersante o disolvente volátil. Se pueden alterar la cantidad de dispersante, la volatilidad del dispersante, y la velocidad de centrifugación para producir un polímero deseado. A modo de ejemplo, se pueden revestir por centrifugado películas de poliuretano en una disolución de poliuretano y tetrahidrofurano (THF) o ciclohexanona. En el caso de sustratos de silicio, el polímero puede ser revestido por centrifugación sobre un plástico aluminizado o un carburo de silicio. El aluminio y el carburo de silicio forman una capa sacrificial que es eliminada subsiguientemente por medio de un reactivo adecuado para ataque. Se pueden producir películas en el intervalo de un grosor de un micrómetro mediante revestimiento por centrifugación de esta forma. El revestimiento por centrifugación de películas poliméricas, tales como silicona, se puede llevar a cabo sobre un sustrato listo de plástico antiadherente, tal como polimetilmetacrilato o teflón. Entonces, se puede quitar la película polimérica al pelar mecánicamente o con la ayuda de alcohol u otro agente adecuado de liberación. El revestimiento por centrifugación también es adecuado para producir polímeros más gruesos en el intervalo de 10 – 750 micrómetros. En algunos casos, la mezcla polimérica puede ser centrifugada antes del revestimiento por centrifugación para eliminar materiales no deseados tales como materiales de carga, materiales particulados, impurezas y pigmentos utilizados en polímeros comerciales. Para aumentar la eficacia del centrifugado o para mejorar la consistencia del grosor, se puede diluir un polímero en un disolvente para reducir su viscosidad; por ejemplo, se puede dispersar silicona en nafta.

Entonces, se puede predeformar el polímero en una o más direcciones (604). En un ejemplo, se consigue la predeformación al estirar mecánicamente un polímero en una o más direcciones y al fijarlo a uno o más miembros macizos (por ejemplo, placas rígidas) mientras está deformado. Otra técnica para mantener la predeformación incluye el uso de uno o más refuerzos. Los refuerzos son estructuras rígidas largas colocadas sobre un polímero mientras se encuentra en un estado predeformado, por ejemplo, mientras está estirado. Los refuerzos mantienen la predeformación a lo largo de su eje. Los refuerzos pueden estar dispuestos en paralelo u otras configuraciones para conseguir una capacidad expansiva direccional del transductor. Se debería hacer notar que la mayor rigidez a lo largo del eje del refuerzo comprende la mayor rigidez proporcionada por el material de refuerzo al igual que la mayor rigidez del polímero en la dirección de predeformación.

Las superficies en el polímero predeformado pueden estar texturadas. En un ejemplo para proporcionar una texturización, se estira un polímero más de lo que puede estirarse cuando es accionado, y se deposita una capa delgada de material rígido sobre la superficie polimérica estirada. Por ejemplo, el material rígido puede ser un polímero que se endurece mientras se estira el polímero electroactivo. Después del endurecimiento, se relaja el polímero electroactivo y la estructura se deforma para proporcionar la superficie texturada. Se puede alterar el grosor del material rígido para proporcionar una texturización en cualquier escala, incluyendo niveles submicrométricos. En otro ejemplo, se producen superficies texturadas mediante ataque con iones reactivos (RIE). A modo de ejemplo, se puede llevar a cabo el RIE sobre un polímero predeformado 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 valles y crestas de onda con una profundidad de 4 a 5 micrómetros.

Entonces, se forman uno o más electrodos sobre el polímero (606). Para el polímero de silicona alterado por el RIE mencionado anteriormente, se puede depositar electrónicamente una capa delgada de oro sobre la superficie

texturada mediante RIE para proporcionar un electrodo texturado. En otro ejemplo, se pueden dotar de un patrón y depositar uno o más electrodos de grafito utilizando una plantilla. Los electrodos que comprenden grasas conductoras mezcladas con una silicona conductora pueden ser fabricados al disolver la grasa conductora y la silicona conductora no endurecida en un disolvente. Entonces, se puede pulverizar la disolución sobre el material polimérico electroactivo y puede incluir una máscara o plantilla para conseguir un patrón particular.

Las trazas metálicas de los electrodos estructurados de las FIGURAS 3 y 4 pueden ser dotadas de un patrón fotolitográficamente encima del polímero o de la capa de distribución de carga. A modo de ejemplo, se deposita electrónicamente una capa de oro antes de depositar una sustancia fotoendurecible sobre el oro. La sustancia fotoendurecible y el oro pueden ser dotados de un patrón según técnicas convencionales de fotolitografía, por ejemplo utilizando una máscara, seguido de uno o más aclarados para eliminar la sustancia fotoendurecible. Se puede depositar una capa de distribución de carga añadida entre el polímero y las trazas metálicas por medio de un revestimiento por centrifugación, por ejemplo.

En un ejemplo específico, un electrodo estructurado está formado sobre un polímero mediante la deposición electrónica de oro durante aproximadamente entre 2 y 3 minutos (según un grosor deseado) aproximadamente a 15 nm (150 angstroms) por minuto. Entonces, se reviste por centrifugación la sustancia fotoendurecible HPR 506 proporcionada por Arch Chemicals, de Norwalk, Connecticut, EE. UU. sobre el oro a aproximadamente 500 a 1500 rpm durante aproximadamente entre 20 y 30 segundos y luego es cocida a aproximadamente 90 grados Celsius. Entonces, se aplica una máscara antes de exponer a la sustancia fotoendurecible a luz UV y revelado para eliminar porciones no enmascaradas de la sustancia fotoendurecible. Entonces, se decapa el oro y se aclara la película. La sustancia fotoendurecible restante es eliminada mediante exposición a luz UV, revelado y aclarado. Entonces, se pueden estirar las trazas de oro para aumentar la tolerancia a deformaciones.

También se puede dotar de un patrón fotolitográficamente a electrodos texturados. En este caso, se deposita una sustancia fotoendurecible sobre un polímero predeformado y puede ser dotada de un patrón utilizando una máscara. Un ataque con plasma puede eliminar porciones del polímero electroactivo no protegidas por la máscara en un patrón deseado. Subsiguientemente se puede eliminar la máscara por medio de un decapado adecuado en mojado. Entonces, se pueden cubrir las superficies activas del polímero con la capa delgada de oro depositada por medio de una deposición electrónica, por ejemplo.

Entonces, se embala el transductor, que comprende el o los electrodos y las capas poliméricas, según una aplicación (608). El embalaje también puede incluir el montaje de múltiples transductores enlazados mecánicamente o apilados como múltiples capas. Además, las conexiones mecánicas y eléctricas a los transductores pueden estar formadas según una aplicación.

También hay procedimientos alternativos para fabricar dispositivos electromecánicos que incluyen múltiples capas de polímero predeformado. En un ejemplo, un procedimiento para fabricar dispositivos electromecánicos comienza al obtener o fabricar una capa polimérica. Entonces, se estira el polímero hasta la predeformación deseada y se fija a un primer bastidor rígido. A continuación, se depositan los electrodos sobre ambos lados del polímero, de forma que se definan áreas activas y se establezcan conexiones eléctricas. Los electrodos pueden ser dotados de un patrón por medio de una variedad de técnicas bien conocidas tales como un recubrimiento por pulverización a través de una máscara. Si se desea, entonces se estira una segunda capa polimérica sobre un segundo bastidor. Entonces, se dota de un patrón a electrodos sobre esta segunda capa polimérica. Entonces, se acopla la segunda capa polimérica a la primera capa al apilar sus bastidores respectivos. Las capas de adhesivos con capacidad expansiva pueden ser utilizadas para unir las dos capas y los electrodos, si es necesario. Se escoge el tamaño de los bastidores para que no interfiera con las capas poliméricas creando un contacto íntimo. Si hay presente una interferencia, entonces puede ser deseable eliminar el segundo bastidor, por ejemplo, al cortar la capa polimérica en torno a la periferia del primer bastidor. Si se desea, se puede añadir una tercera capa de polímero con electrodos de una forma similar a como se añadió la segunda capa a la primera. Este procedimiento puede continuar hasta que se alcanza un número deseado de capas.

Entonces, se fijan bastidores rígidos, miembros rígidos u otros conectores eléctricos y mecánicos a las capas poliméricas, por ejemplo, mediante encolado. Si se desea, se puede retirar el polímero del primer bastidor. En algunos casos, el primer bastidor puede servir como una parte estructural del o de los accionadores finales. Por ejemplo, el primer bastidor puede ser un conjunto de agujeros para producir un conjunto de accionadores de diafragma.

Las FIGURAS 7B-F ilustran un segundo procedimiento para fabricar un dispositivo electromecánico 640 que tiene múltiples capas de polímero electroactivo. Los procedimientos pueden incluir hasta varias etapas adicionales no descritas ni ilustradas en el presente documento para no complicar la presente invención. El procedimiento comienza al producir un polímero predeformado 622 sobre un sustrato rígido adecuado 624, por ejemplo mediante un revestimiento por centrifugación de un polímero sobre un disco de polimetilmetacrilato (PMMA), estirar el polímero (FIG. 7B) y luego fijarlo al sustrato rígido 624. Después de que se endurece el polímero 622, se dota de un patrón a los electrodos 625 en el lado expuesto 626 del polímero 622. Entonces, se deposita un miembro macizo

627 tal como una película flexible que incluye uno de película de poliimida, de mylar o de acetato sobre el polímero electroactivo 622 (FIG. 7C) con un adhesivo adecuado 628.

Entonces, se quita el sustrato rígido 624 del polímero electroactivo 622 (FIG. 7D). Se puede utilizar un agente de liberación tal como alcohol de isopropilo para facilitar la liberación. Entonces, se dota de un patrón a los electrodos 629 en el lado previamente no expuesto del polímero 622. Entonces, se une el conjunto a otra capa polimérica electroactiva 630 fijada a un sustrato rígido 631 (FIG. 7E). Las capas poliméricas 622 y 630 pueden ser unidas por medio de una capa adhesiva 632 que comprende silicona GE RTV 118, por ejemplo. Entonces, se quita el sustrato rígido 631 del polímero 630 y se dota de un patrón a los electrodos 633 en el lado disponible 634 del polímero 630. Si se desean capas poliméricas adicionales, se pueden repetir las etapas de añadir una capa polimérica, de retirar el sustrato rígido, y de añadir electrodos para producir tantas capas poliméricas como se desee. La capa polimérica 635 ha sido añadida de esta forma. Para facilitar la comunicación eléctrica con los electrodos en las capas internas del dispositivo 640, se puede empujar un pasador metálico a través de la estructura para hacer contacto con los electrodos en cada capa.

Entonces el miembro macizo 627 puede ser dotado de un patrón o eliminado según sea necesario para proporcionar el bastidor o las conexiones mecánicas requeridos por el tipo específico de accionador. En un ejemplo, los accionadores de diafragma pueden estar formados mediante la formación de un patrón en un miembro macizo 627 para formar agujeros 636 que proporcionan regiones activas para el dispositivo electromecánico 640 utilizando una máscara o técnica adecuada de ataque (FIG. 7F). En otro ejemplo, si el área activa no es grande y los electrodos pueden ser añadidos a las regiones activas de los polímeros sin daño, el miembro macizo 627 puede ser dotado de un patrón con los agujeros 636 antes de la fijación al polímero 622.

Para el procedimiento de las FIGURAS 7B-F, normalmente se quita el sustrato rígido 624 del polímero electroactivo 622 al pelar el polímero electroactivo flexible. El pelado es muy adecuado para fabricar dispositivos que comprenden polímeros electroactivos con un perfil sustancialmente plano. En otro ejemplo, se pueden utilizar capas sacrificatorias entre el polímero o los electrodos y el sustrato rígido para facilitar la liberación. Las capas sacrificatorias permiten que el polímero, los electrodos y el conjunto fijado sean liberados de un sustrato rígido al decapar la capa sacrificatoria. Los metales que comprenden aluminio y plata son adecuados para ser utilizados como las capas sacrificatorias, por ejemplo. El uso de metales permite que las capas sacrificatorias sean decapadas por líquidos que no afectan a las capas poliméricas. Las capas sacrificatorias metálicas también pueden ser dotadas de un patrón fácilmente con diversas técnicas de enmascarado para proporcionar bastidores, conectores para otros componentes estructurales para el dispositivo electromecánico 640. Las capas sacrificatorias también pueden ser utilizadas para fabricar dispositivos que comprenden transductores con perfiles no planos, por ejemplo, utilizando sustratos rígidos formados como tubos. Para transductores geoméricamente complejos, se pueden utilizar capas sacrificatorias en combinación con un recubrimiento por inmersión para proporcionar la geometría compleja.

Aunque se ha descrito brevemente la fabricación de los polímeros predeformados con respecto a algunos ejemplos específicos, los procedimientos y las técnicas de fabricación pueden variar en consecuencia para cualquiera de los accionadores o las aplicaciones descritos anteriormente. Por ejemplo, el procedimiento para fabricar un accionador de diafragma puede incluir revestir por centrifugación un polímero sobre un sustrato antes de que se fabrique un electrodo estructurado sobre el polímero. Entonces, se estira el polímero y los bastidores rígidos que incluyen uno o más agujeros dimensionados para el área activa de cada accionador de diafragma son unidos al polímero predeformado, incluyendo cualquier porción de solapamiento del electrodo estructurado. En otro ejemplo, los agujeros son formados por decapado en el sustrato en vez de utilizar un bastidor rígido separado, por ejemplo, cuando el sustrato comprende silicio. Entonces, se quita el sustrato del polímero y se fija un electrodo al lado inferior del polímero.

## 8. Conclusión

Aunque se ha descrito la presente invención en términos de varias realizaciones preferentes, hay alteraciones, permutaciones, y equivalentes que se encuentran dentro del alcance de la presente invención que han sido omitidos en aras de la brevedad. A modo de ejemplo, aunque se ha descrito la presente invención en términos de varios electrodos numerosos de materiales aplicados, la presente invención no está limitada a estos materiales y en algunos casos puede incluir aire como un electrodo.

**REIVINDICACIONES**

1. Un accionador para convertir energía eléctrica en energía mecánica, comprendiendo el accionador:  
un miembro flexible que tiene un extremo fijo y un extremo libre, comprendiendo el miembro flexible al menos dos electrodos; y  
5 un polímero predeformado con un módulo de elasticidad de, como máximo, aproximadamente 100 MPa dispuesto de forma que provoca que una porción del polímero se flexione en respuesta a un cambio en el campo eléctrico proporcionado por los al menos dos electrodos.
2. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el extremo libre tiene dos grados de libertad.
3. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el miembro flexible tiene una rigidez superior a la del  
10 polímero.
4. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el polímero comprende uno de entre un elastómero de silicona, poliuretano, copolímero de PVDF o elastómero adhesivo.
5. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el polímero comprende uno de entre un caucho de silicona y un acrílico.
- 15 6. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el polímero está enrollado.
7. El accionador según la Reivindicación 1, en el que el polímero comprende una superficie texturada.
8. El accionador según la Reivindicación 1, en el que al menos un electrodo comprende una superficie dotada de un patrón.
- 20 9. El accionador según la Reivindicación 1, en el que los al menos dos electrodos comprenden una superficie texturada.

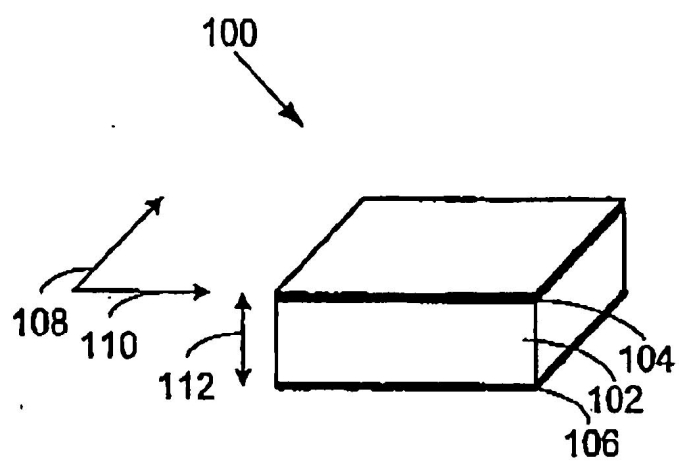


FIG. 1A

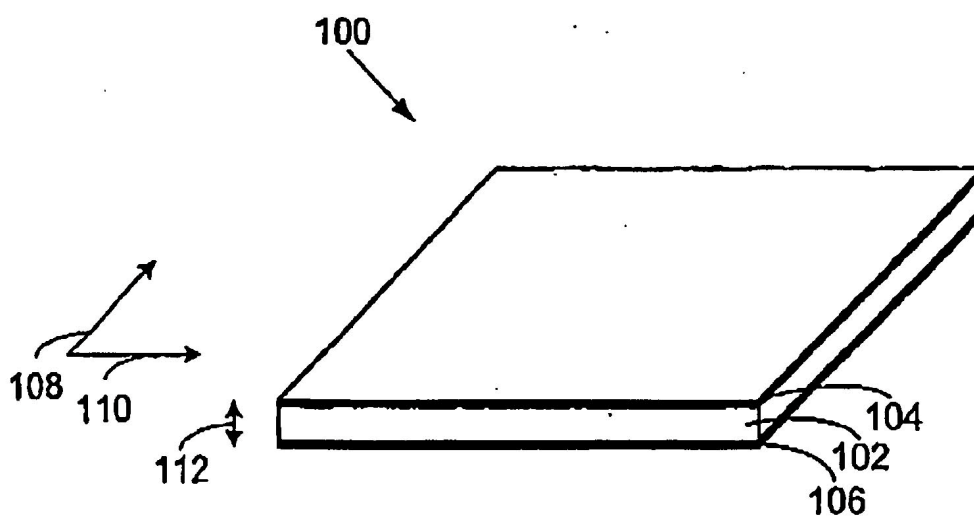


FIG. 1B

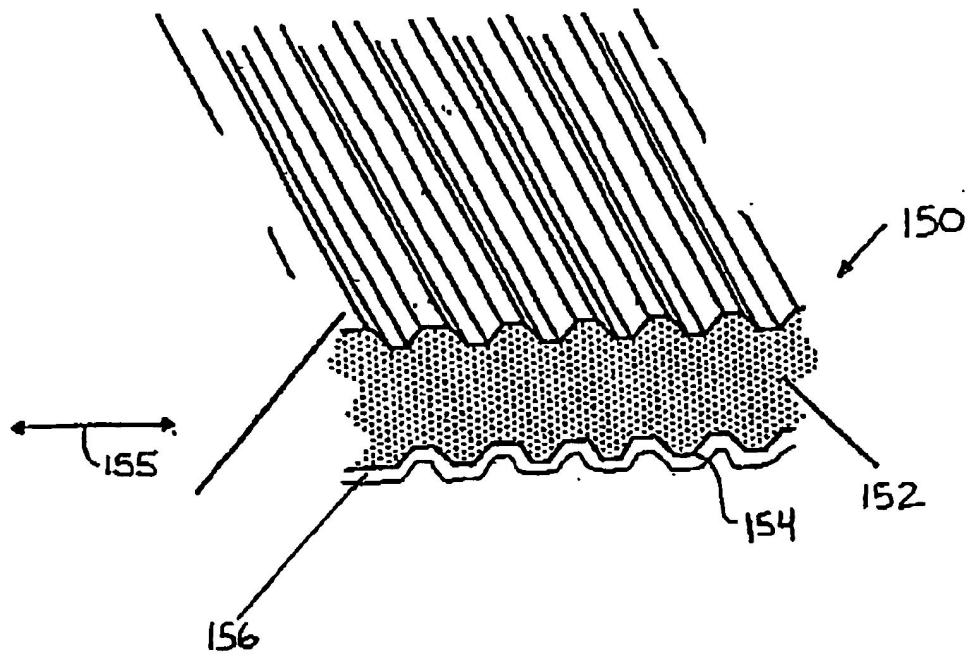


FIG. 1C

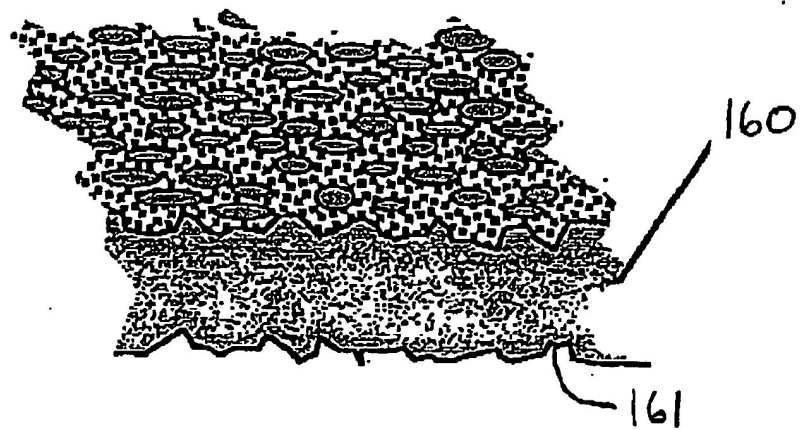


FIG. 1D

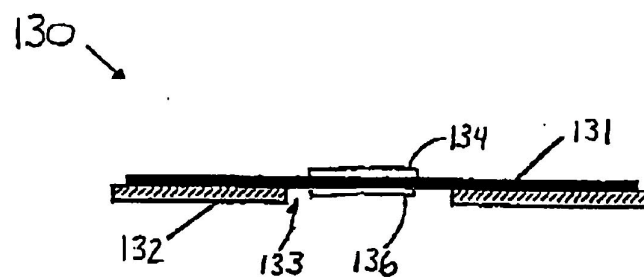


FIG. 1E

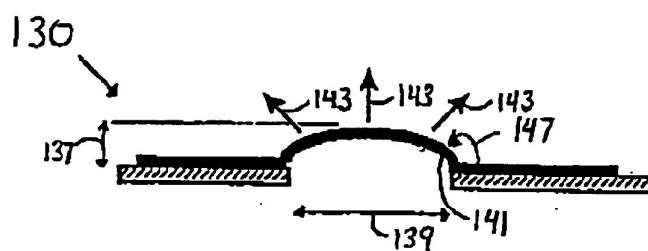


FIG. 1F

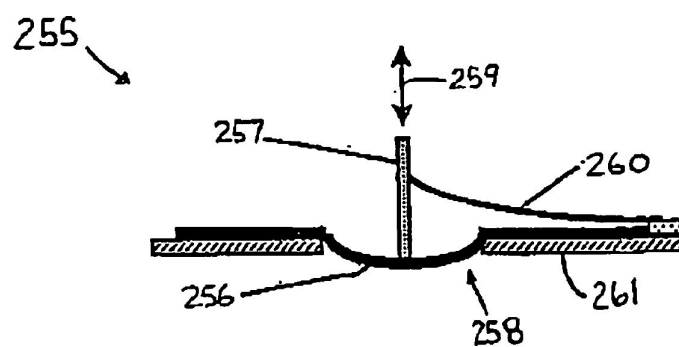


FIG. 2H

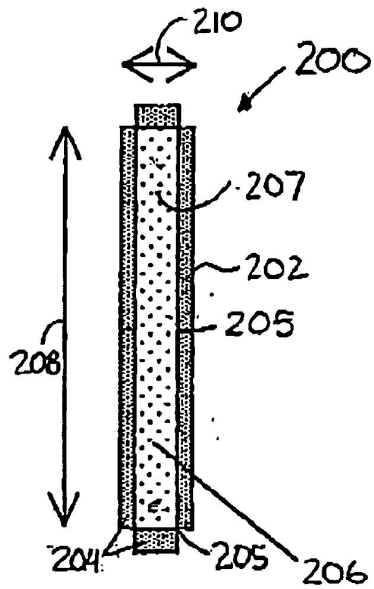


FIG. 2A

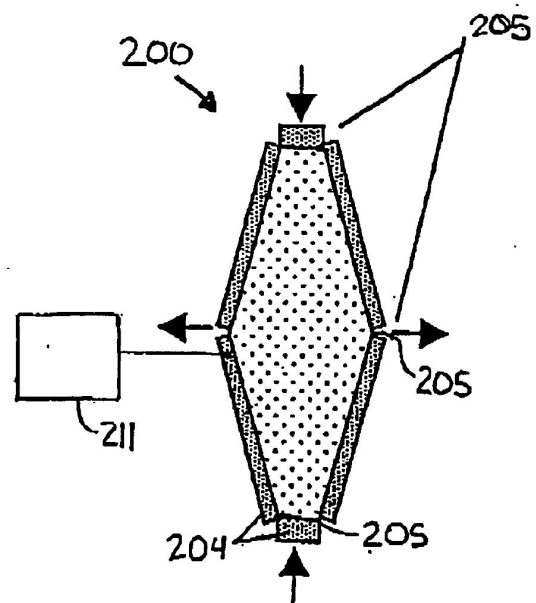


FIG. 2B

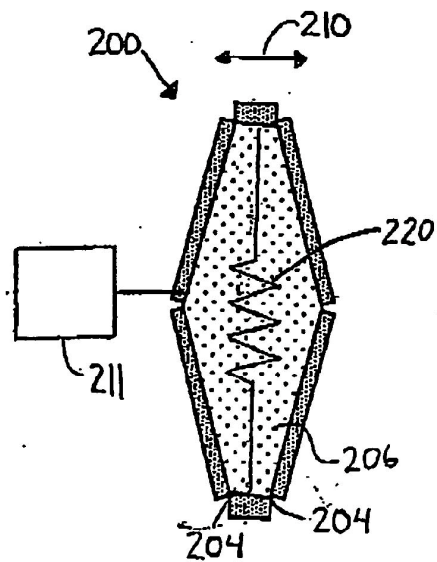


FIG. 2C

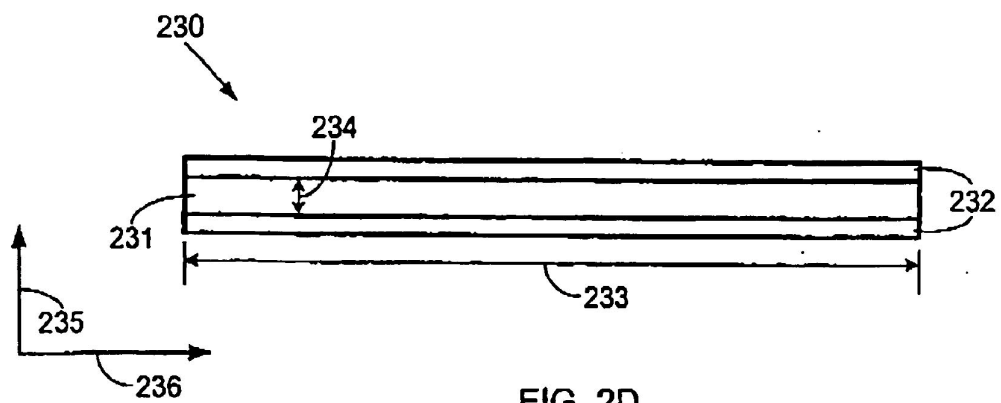


FIG. 2D

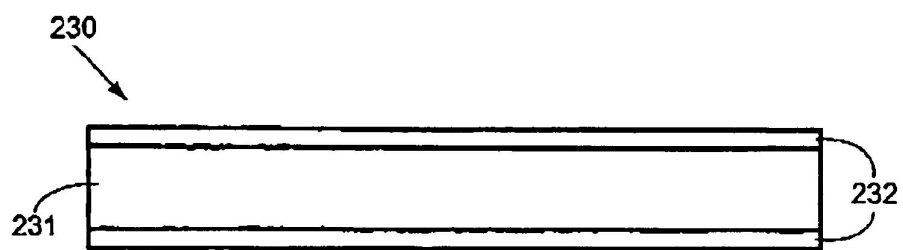


FIG. 2E

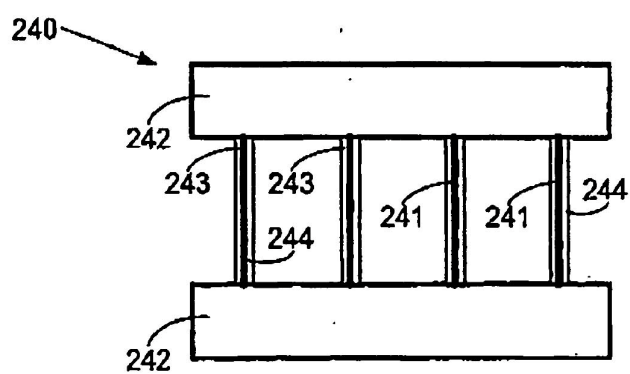


FIG. 2F

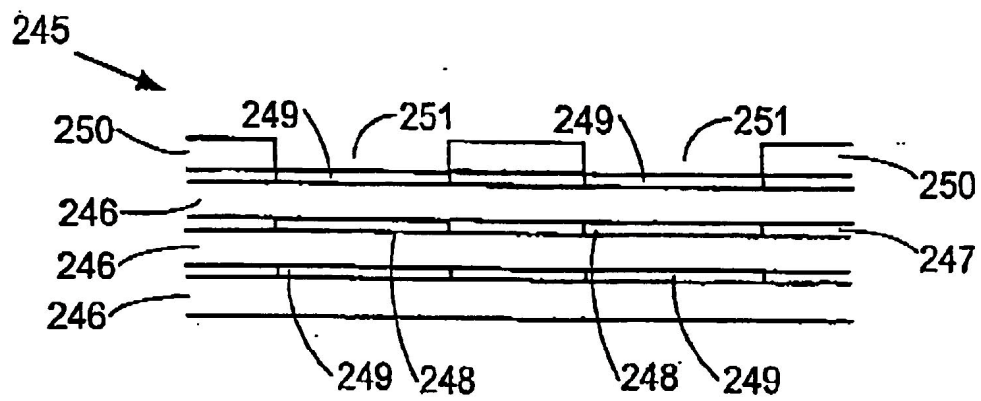


FIG. 2G

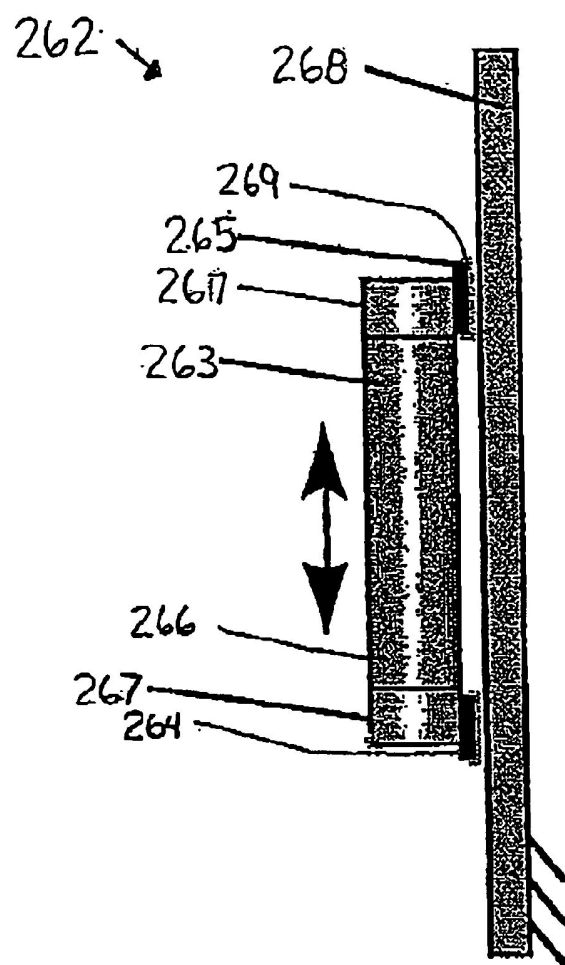


FIG. 2I

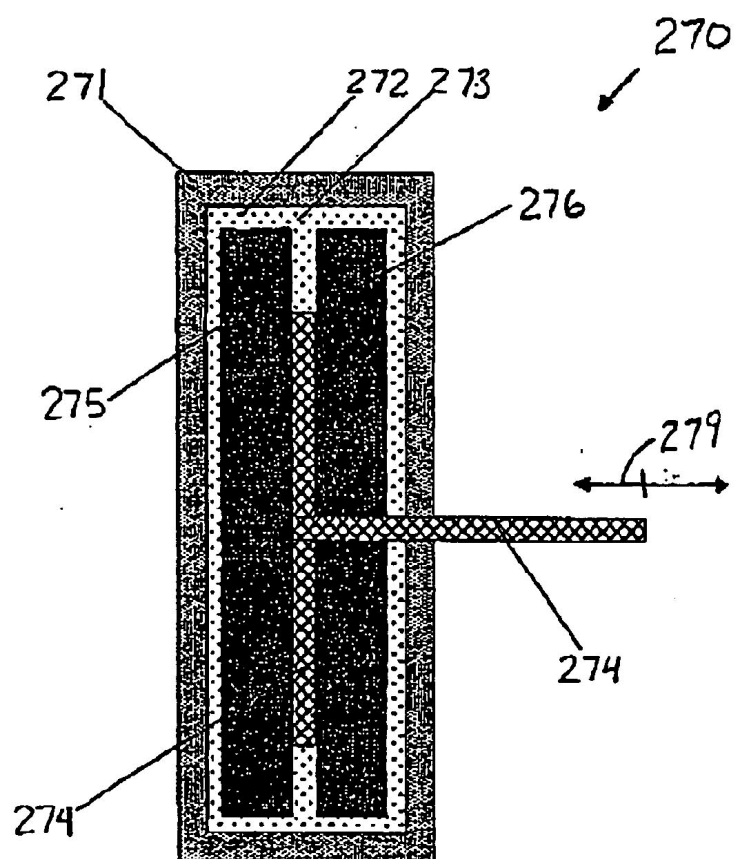


FIG 2J

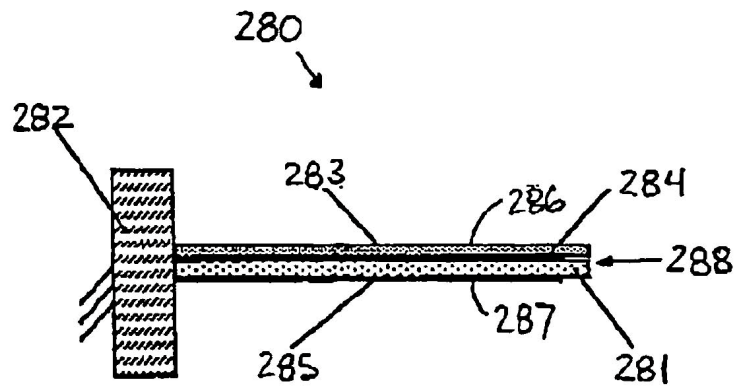


FIG. 2K

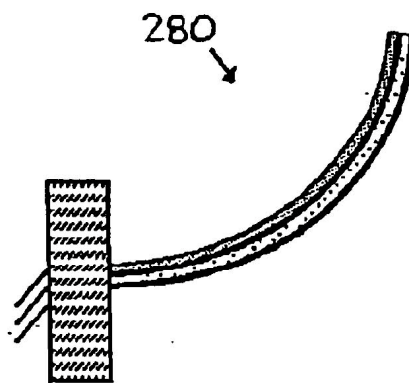


FIG. 2L

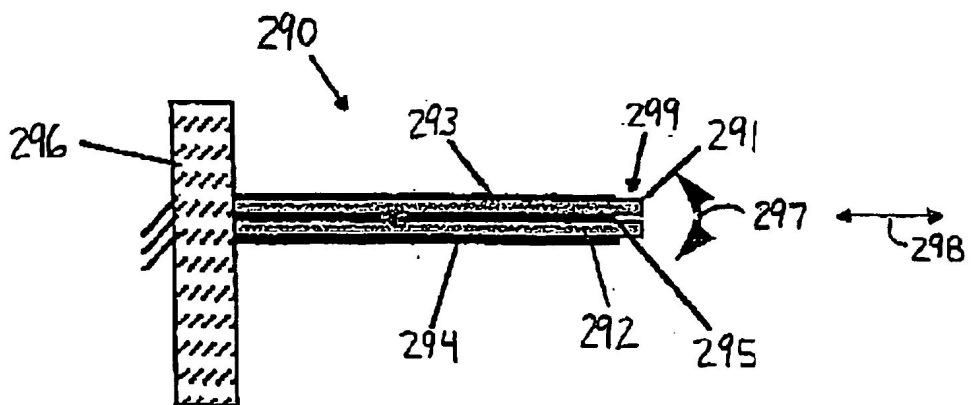


FIG. 2M

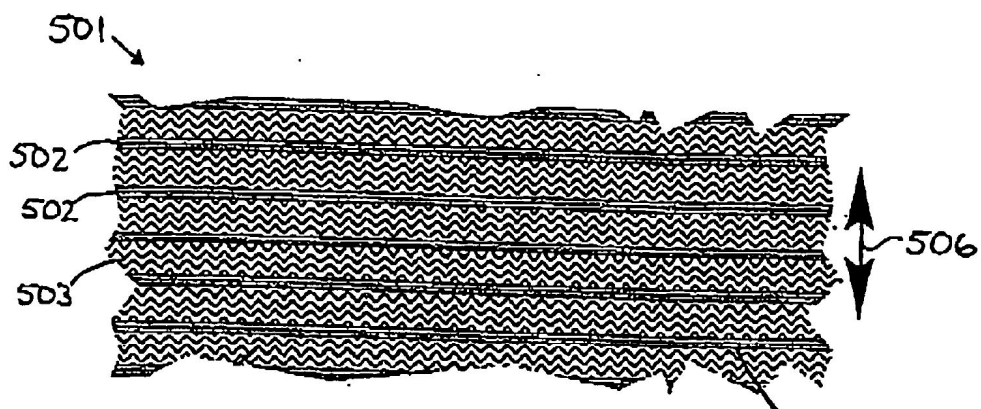


FIG. 3

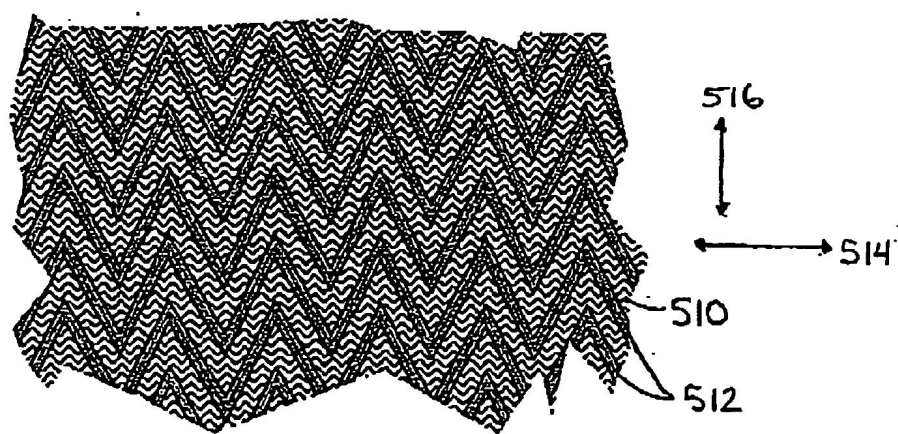


FIG. 4

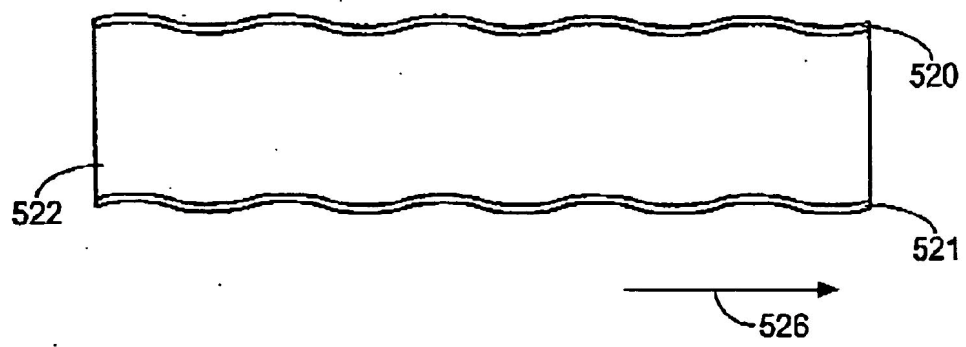


FIG. 5

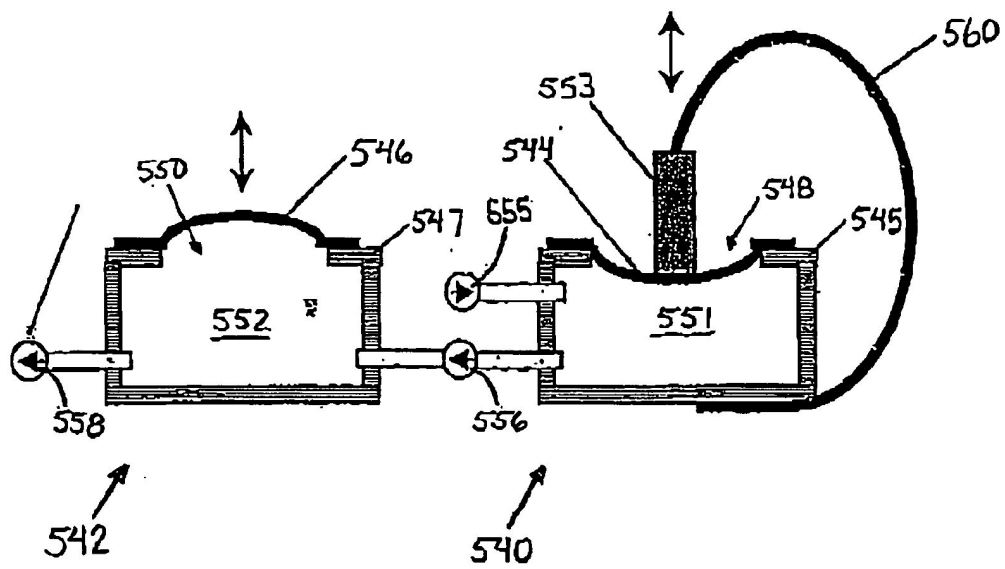


FIG. 6

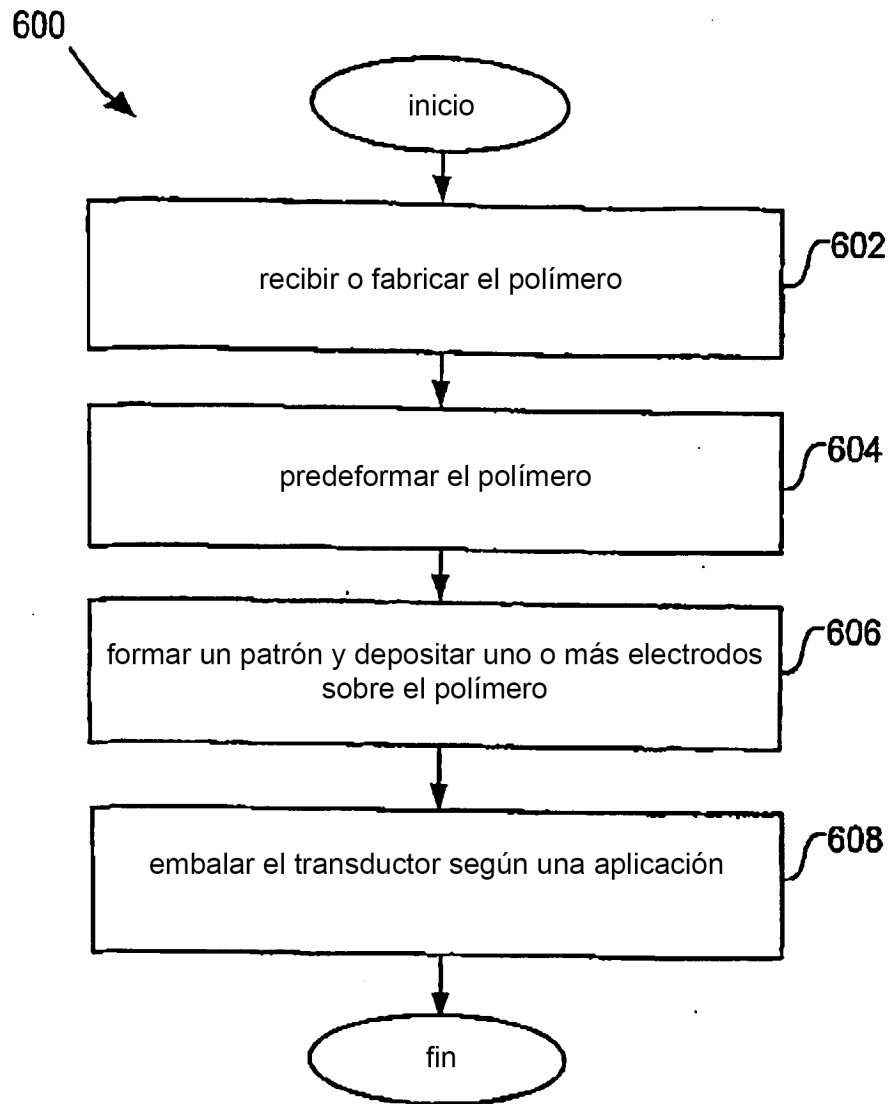


FIG. 7A

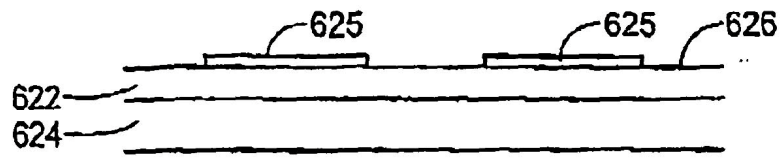


FIG. 7B

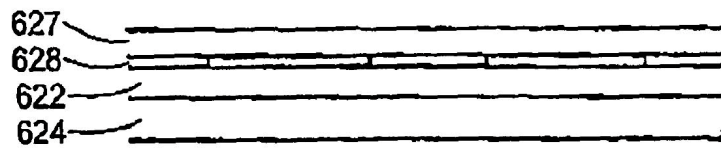


FIG. 7C

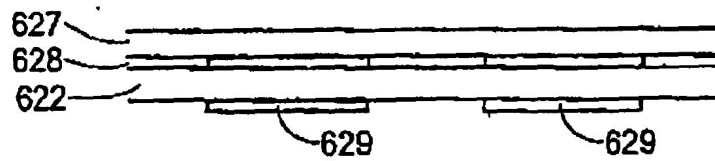


FIG. 7D

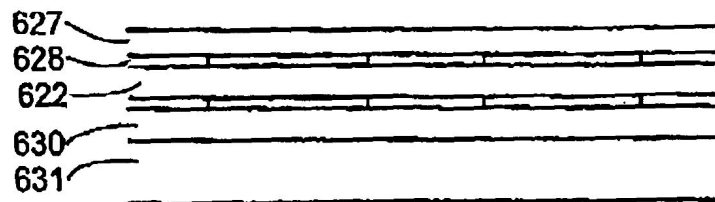


FIG. 7E

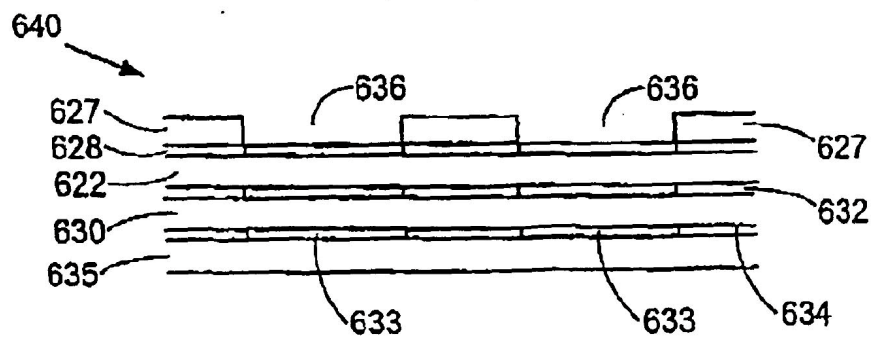


FIG. 7F