

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 621 536**

51 Int. Cl.:

H01L 41/08 (2006.01)

H01L 41/113 (2006.01)

H01L 41/187 (2006.01)

H01L 41/314 (2013.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G01L 1/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.08.2012 E 12178902 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.01.2017 EP 2565953**

54 Título: **Método y sistema de fabricación de un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT**

30 Prioridad:

17.08.2011 US 201113212037

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

04.07.2017

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (50.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-1596, US y
UNIVERSITY OF WASHINGTON THROUGH ITS
CENTER FOR COMMERCIALIZATION (50.0%)**

72 Inventor/es:

**DUCE, JEFFREY LYNN;
JOHNSTON, SCOTT ROBERT;
SHEN, I-YEU;
CAO, GUOZHONG y
HUANG, HSIEN-LIN**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

Observaciones :

**Véase nota informativa (Remarks, Remarques
o Bemerkungen) en el folleto original publicado
por la Oficina Europea de Patentes**

ES 2 621 536 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

Método y sistema de fabricación de un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT

Antecedentes

1) Campo de la divulgación

- 5 La divulgación se refiere, en general, a métodos y sistemas de fabricación de sensores, y más particularmente, a métodos y sistemas para fabricar sensores piezoeléctricos de nanopartículas, depositados sobre una estructura.

2) Descripción de la técnica relacionada

10 Los sensores pequeños, tales como microsensores, pueden usarse en diversas aplicaciones incluyendo en sistemas y métodos de monitorización de la integridad estructural (SHM) para monitorizar estructuras de forma continua, tales como estructuras de material compuesto o de metal, y para medir características del material y niveles de tensión y deformación con el fin de evaluar el rendimiento, posible daño, y estado actual de las estructuras. Los sistemas y métodos de SHM conocidos pueden incluir el uso de sensores discoideos de cerámica pequeños y rígidos integrados sobre un sustrato de poliimida y conectados a cableado de alimentación y comunicación. Dichos sensores conocidos están normalmente unidos de forma manual a una estructura con un adhesivo. Dicha instalación
15 manual puede incrementar los costes de mano de obra y de instalación y dicho adhesivo puede degradarse a lo largo del tiempo y puede dar como resultado que el sensor se desprenda de la estructura. Además, dichos sensores conocidos pueden estar hechos de materiales rígidos, planos y/o quebradizos que pueden limitar su uso, por ejemplo, el uso en una superficie de sustrato curva o no plana puede ser difícil. Además, en una gran disposición ordenada de dichos sensores conocidos, la cantidad de cableado de alimentación y comunicación requerida puede
20 incrementar la complejidad y el peso de la estructura.

Además, los sistemas y métodos sensores conocidos, tales como sistemas y métodos microelectromecánicos (MEMS), pueden incluir el uso de depósito sobre un sustrato de sensores piezoeléctricos, tales como sensores de zirconato-titanato de plomo (PZT), que tienen nanopartículas. Los métodos conocidos para fabricar dichos MEMS pueden incluir síntesis en sal fundida de polvo de PZT para tintas de escritura directa. Sin embargo, las aplicaciones
25 de los sensores de PZT fabricados con dichos métodos conocidos pueden estar limitadas por la geometría física de los sensores de PZT. Dichas limitaciones de geometría física pueden dar como resultado capacidades de detección inadecuadas o respuestas al accionamiento inadecuadas. Además, los sensores de PZT fabricados con dichos métodos conocidos pueden ser incapaces de ser aplicados o ubicados en zonas donde su función puede ser importante debido al método de fabricación de los sensores de PZT. Por ejemplo, métodos de síntesis en sal fundida
30 conocidos pueden requerir procesamiento a temperaturas más elevadas que la que ciertos sustratos de aplicación pueden tolerar.

Además, dichos sistemas y métodos MEMS conocidos también pueden incluir el uso de sensores que tienen nanopartículas que no se han cristalizado y que pueden ser menos eficientes que nanopartículas que se han cristalizado. Las estructuras no cristalizadas normalmente presentan una mayor desorganización que da como
35 resultado una sensibilidad de respuesta reducida a deformación y tensión, mientras que las estructuras cristalizadas normalmente presentan una mayor organización interna, dando como resultado una sensibilidad de respuesta incrementada a la deformación y una menor necesidad de energía para funcionar. Además, las nanopartículas de los sensores pueden ser demasiado grandes para algunos procesos y sistemas de depósito conocidos, tales como un proceso de depósito por chorro atomizado (JAD), y dichas nanopartículas pueden requerir un proceso de sinterización/cristalización a alta temperatura que puede dar como resultado daños a sustratos o estructuras
40 sensibles a la temperatura.

El documento JP 2009 031048 A desvela un sensor de presión piezoeléctrico miniaturizable. El sensor se prepara mediante una adhesión por colisión de partículas finas de PZT mediante un método de depósito por aerosol. Se puede hacer que las partículas finas de PZT se adhieran en un entorno de temperatura ordinaria.

- 45 El documento JP 2008 172157 A desvela un elemento piezoeléctrico. El elemento se prepara formando capas de un cuerpo piezoeléctrico sobre una capa eléctrica usando procesos en fase líquida. La capa de un cuerpo piezoeléctrico depositada se seca. Se realiza un tratamiento térmico para cristalizar una capa precursora de PZT.

Por consiguiente, en la técnica existe una necesidad de un sistema y método mejorados de fabricación de sensores piezoeléctricos de PZT que tienen nanopartículas que pueden usarse en sistemas y métodos de monitorización de la
50 integridad estructural para estructuras, donde dichos método y sistema mejorados proporcionan ventajas respecto a métodos y sistemas conocidos.

Sumario

Esta necesidad de un método y sistema de fabricación de sensores piezoeléctricos de zirconato-titanato de plomo (PZT) que tienen nanopartículas que pueden usarse en sistemas y métodos de monitorización de la integridad estructural para estructuras, está satisfecha. Tal como se describe en la descripción detallada a continuación, realizaciones del método y sistema pueden proporcionar ventajas significativas respecto a métodos y sistemas existentes.

En una realización de la divulgación, se proporciona un método de fabricación de un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). El método comprende formular una tinta de nanopartículas de PZT que comprende nanopartículas de zirconato-titanato de plomo precristalizadas. El método comprende, además, depositar la tinta de nanopartículas de PZT sobre un sustrato mediante un proceso de depósito de tinta para formar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. La tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo comprende un promotor de adhesión a base de sol-gel que promueve la adhesión de la tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo al sustrato o un promotor de adhesión a base de polímero para promover la adhesión de la tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo al sustrato.

Puede proporcionarse un método de fabricación de un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). El método comprende formular una tinta de nanopartículas de PZT que comprende nanopartículas de PZT precristalizadas. El método comprende, además, suspender la tinta de nanopartículas de PZT en un promotor de adhesión a base de sol-gel. El método comprende, además, depositar la tinta de nanopartículas de PZT sobre un sustrato mediante un proceso de impresión por escritura directa para formar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT.

En otra realización de la divulgación, se proporciona un sistema para fabricar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). El sistema comprende una tinta de nanopartículas de PZT formulada que comprende nanopartículas de zirconato-titanato de plomo precristalizadas. El sistema comprende, además, un aparato de depósito de tinta que deposita la tinta de nanopartículas de PZT sobre un sustrato para formar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. La estructura puede tener una estructura no curva o plana, una superficie curva o no plana, o una combinación de una superficie no curva o plana y una superficie curva o no plana. El sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede depositarse sobre una superficie de la estructura con una o más capas de aislamiento, revestimientos, o pintura entre un cuerpo de la estructura y el sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT.

Las características, funciones y ventajas que se han descrito pueden conseguirse independientemente en diversas realizaciones de la divulgación o pueden combinarse en otras realizaciones más, de las cuales pueden verse detalles adicionales con referencia a la siguiente descripción y dibujos.

Breve descripción de los dibujos

La divulgación puede entenderse mejor con referencia a la siguiente descripción detallada tomada junto con los dibujos adjuntos que ilustran realizaciones preferidas y ejemplares, pero que no están dibujados necesariamente a escala, en los que:

La figura 1 es una ilustración de una vista en perspectiva de un avión ejemplar para el cual puede usarse una de las realizaciones del sistema y el método de la divulgación;

La figura 2 es una ilustración de una vista de sección transversal de una de las realizaciones de un conjunto de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado;

La figura 3 es una ilustración de una vista de sección transversal de otra de las realizaciones de un conjunto de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado;

La figura 4 es una ilustración de una vista en perspectiva superior de una de las realizaciones de un conjunto de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado, depositado sobre una estructura de material compuesto;

La figura 5 es una ilustración de un diagrama de bloques de una de las realizaciones de un sistema para fabricar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación;

La figura 6A es una ilustración de una vista esquemática de una de las realizaciones de un proceso y aparato de depósito de tinta para fabricar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación;

La figura 6B es una ilustración de una vista en primer plano del sensor a base de tinta de nanopartículas

piezoeléctrica de PZT siendo depositado sobre el sustrato;

La figura 7 es una ilustración de un diagrama esquemático de una de las realizaciones de un sistema de monitorización de la integridad estructural que usa los sensores piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación;

5 La figura 8 es una ilustración de un diagrama de flujo de una realización de un método de la divulgación;

La figura 9 es una ilustración de un diagrama de flujo de otra realización de un método de la divulgación; y,

La figura 10 es una ilustración de un diagrama de bloques de realizaciones de los procesos de depósito de tinta y aparatos de depósito de tinta que puede usarse para fabricar el sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación.

10 Descripción detallada

A continuación se describirán realizaciones desveladas más completamente en lo sucesivo en el presente documento con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran algunas, pero no todas, de las realizaciones desveladas. De hecho, pueden proporcionarse varias realizaciones diferentes y no deben interpretarse como limitadas a las realizaciones expuestas en el presente documento. En su lugar, estas realizaciones se proporcionan de modo que esta divulgación sea exhaustiva y completa y transmita completamente el alcance de la divulgación a los expertos en la materia. La siguiente descripción detallada es de los mejores modos de llevar a cabo la divulgación contemplados actualmente. La descripción no debe tomarse en un sentido limitante, sino que se realiza simplemente con el fin de ilustrar los principios generales de la divulgación, dado que el alcance de la divulgación está definido por las reivindicaciones adjuntas.

20 Con referencia ahora a las figuras, la figura 1 es una ilustración de una vista en perspectiva de un avión 10 de la técnica anterior ejemplar para el que puede usarse una de las realizaciones de un sistema 100 (véase la figura 5), un método 200 (véase la figura 8), o un método 250 (véase la figura 9), para fabricar un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) (véase la figura 5) para una estructura 30, tal como la estructura 102 de material compuesto (véase la figura 1) o una estructura metálica 132 (véase la figura 3).

25 Tal como se usa en el presente documento, el término "PZT" significa zirconato-titanato de plomo - un material cerámico ferroeléctrico y piezoeléctrico compuesto por los elementos químicos plomo y zirconio y el compuesto químico titanato que pueden combinarse a altas temperaturas. PZT exhibe propiedades piezoeléctricas favorables. Tal como se usa en el presente documento, el término "piezoeléctrico" en relación con PZT significa que PZT desarrolla una diferencia de tensión o potencial por dos de sus caras cuando se deforma, lo que es ventajoso para aplicaciones de sensores, o cambia físicamente de forma cuando se aplica un campo eléctrico externo, lo que es ventajoso para aplicaciones de accionador. Para fines de esta solicitud, el término "ferroeléctrico" en relación con PZT significa que PZT tiene una polarización eléctrica espontánea o dipolo eléctrico que puede invertirse en presencia de un campo eléctrico.

35 El avión 10 comprende un fuselaje 12, un morro 14, una cabina 16, alas 18 acopladas de forma operativa al fuselaje 12, una o más unidades de propulsión 20, un estabilizador 22 vertical de cola, y uno o más estabilizadores 24 horizontales de cola. Aunque el avión 10 mostrado en la figura 1 es generalmente representativo de un avión de pasajeros comercial, el sistema 100 y los métodos 200, 250 desvelados en el presente documento también pueden emplearse en otros tipos de avión. Más específicamente, las enseñanzas de las realizaciones desveladas pueden aplicarse a otro avión de pasajeros, avión de carga, avión militar, helicóptero, y otros tipos de avión o vehículos aéreos, así como vehículos aeroespaciales tales como satélites, lanzaderas espaciales, cohetes y otros tipos de vehículos aeroespaciales. También puede apreciarse que realizaciones de sistemas, métodos y aparatos de acuerdo con la divulgación pueden utilizarse en otros vehículos, tales como barcos y otras embarcaciones, trenes, automóviles, camiones, autobuses, y otros tipos de vehículos. Puede apreciarse también que realizaciones de sistemas, métodos y aparatos de acuerdo con la divulgación pueden utilizarse en estructuras arquitectónicas, palas de turbina, dispositivos médicos, equipo de accionamiento electrónico, dispositivos electrónicos de consumo, equipo vibratorio, amortiguadores pasivos y activos, u otras estructuras adecuadas.

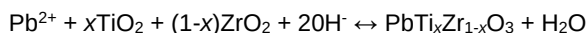
En una realización de la divulgación, se proporciona un sistema 100 para fabricar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). La figura 5 es una ilustración de un diagrama de bloques de una de las realizaciones del sistema 100 para fabricar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación. Tal como se muestra en la figura 5, el sistema 100 para fabricar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT comprende una tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) formulada. La tinta 104 de nanopartículas de PZT comprende partículas o nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica. Las nanopartículas de tinta de PZT a escala nanométrica se precristalizan. La tinta 104 de nanopartículas de PZT preferentemente tiene un tamaño de partículas de PZT a escala nanométrica en un intervalo de aproximadamente 20 nanómetros a aproximadamente 1 μm . El tamaño de

partículas de tinta de PZT a escala nanométrica permite que la tinta 104 de nanopartículas de PZT se deposite usando un amplio intervalo de procesos, aparatos y sistemas de depósito de tinta y, en particular, permite que la tinta 104 de nanopartículas de PZT se deposite usando un proceso de depósito por chorro atomizado 126 (véase las figuras 6A y 10), un sistema y un aparato de depósito por chorro atomizado 146 (véase las figuras 6A y 10). El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede tener un grosor en un intervalo de aproximadamente 1 μm a aproximadamente 500 μm . El grosor del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede medirse en términos de un factor de tamaño de nanopartículas de las nanopartículas de PZT y el grosor de electrodos conductores 114, 118 (véase la figura 2). El grosor del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT también puede depender del tamaño del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT, dado que una relación de aspecto apropiada puede incrementar la sensibilidad del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT.

La tinta 104 de nanopartículas de PZT comprende, además, un promotor de adhesión 108 a base de sol-gel (véase la figura 5) para promover la adhesión de la tinta 104 de nanopartículas de PZT a un sustrato 101. Como alternativa, la tinta 104 de nanopartículas de PZT comprende un promotor de adhesión a base de polímero tal como un epoxi u otro promotor de adhesión a base de polímero adecuado. Las nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica pueden suspenderse en un sol-gel de sílice y a continuación depositarse usando un proceso 122 de depósito de tinta tal como un proceso de impresión por escritura directa 124. El sol-gel de sílice en la formulación de tinta de nanopartículas de PZT permite que la tinta 104 de nanopartículas de PZT se una a una variedad más amplia de sustratos que ciertos promotores de adhesión conocidos. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT preferentemente presenta modalidades basadas en la propagación de ondas ultrasónicas y la impedancia electromecánica.

La tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) formulada puede formularse mediante métodos desvelados en la solicitud de patente no provisional de Estados Unidos presentada de forma contemporánea Número de Serie 13/211.554, titulada "METHODS FOR FORMING LEAD ZIRCONATE TITANATE NANOPARTICLES", que tiene el número de expediente del apoderado UWOTL-1-37259, presentada el 17 de agosto de 2011.

En particular, en dicha divulgación, se proporcionan métodos para formar nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). Las nanopartículas de PZT se forman a partir de una solución precursora que comprende una fuente de plomo, una fuente de titanio, una fuente de zirconio, y un mineralizador - que experimenta un proceso hidrotérmico de acuerdo con la siguiente reacción ("el proceso hidrotérmico"):



En los métodos proporcionados, las propiedades de las nanopartículas de PZT formadas son dictadas al menos por la concentración de mineralizador, el tiempo de procesamiento, la velocidad de calentamiento, y la velocidad de enfriamiento.

En un aspecto, se proporciona un método para formar una pluralidad de nanopartículas de PZT (también denominadas en el presente documento "nanocristales"). En una realización, el método incluye las etapas de: (a) proporcionar una solución precursora acuosa que comprende una solución de mineralizador, una fuente de titanio, una fuente de zirconio y una fuente de plomo; y (b) calentar la solución precursora para producir nanopartículas de PZT, en el que calentar la solución precursora comprende un primer programa de calentamiento que incluye al menos las etapas secuenciales de: (i) calentar la solución precursora a una primera velocidad a una primera temperatura, en la que dicha primera velocidad está entre aproximadamente 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (grados Celsius por minuto) y aproximadamente 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, y en la que dicha primera temperatura está entre aproximadamente 120 $^{\circ}\text{C}$ y aproximadamente 350 $^{\circ}\text{C}$; (ii) mantener durante un primer tiempo de mantenimiento a la primera temperatura, en la que dicho primer tiempo de mantenimiento está entre aproximadamente 5 y aproximadamente 300 minutos; y (iii) enfriar a una segunda velocidad para proporcionar una solución de PZT en nanopartículas que comprende una pluralidad suspendida de nanopartículas de PZT de perovskita que tienen una dimensión la más pequeña de entre aproximadamente 20 nm (nanómetro) y aproximadamente 1000 nm, en la que dicha segunda velocidad está entre aproximadamente 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y aproximadamente 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Solución precursora

La solución precursora está definida por reactantes que son procesados para formar nanopartículas de PZT. Específicamente, la solución precursora incluye al menos una fuente de titanio, una fuente de zirconio, una fuente de plomo y un mineralizador. La solución precursora incluye opcionalmente disolventes o estabilizantes adicionales, tal como se describirá con más detalle a continuación.

Los componentes de la solución precursora pueden combinarse todos simultáneamente en un único recipiente de

reacción, o pueden combinarse escalonadamente, dependiendo del carácter de los componentes de la solución precursora y una potencial necesidad de minimizar la interacción entre los componentes del precursor antes de la reacción hidrotérmica para producir nanopartículas de PZT. Por ejemplo, la fuente de titanio y la fuente de zirconio pueden combinarse para formar un gel precursor, que se combina a continuación con una fuente de plomo en forma acuosa y el mineralizador para proporcionar la solución precursora. Dicha estrategia permite el máximo control sobre las cantidades molares relativas de cada uno de los reactantes (es decir, las fuentes de titanio, zirconio y plomo).

Las fuentes de plomo, titanio y zirconio están presentes en la solución precursora en cantidades molares suficientes para obtener nanopartículas de PZT que tienen la fórmula $Pb_xZr_yTi_zO_3$, en la que x está entre 0,8 y 2, en la que y está entre 0,4 y 0,6, y en la que y más z es igual a 1. Por ejemplo, una fórmula común para nanopartículas de PZT de perovskita es $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$. Sin embargo, será apreciado por los expertos en la materia que las cantidades relativas de plomo, zirconio y titanio pueden modificarse dentro de los intervalos proporcionados para producir las características deseadas de las nanopartículas de PZT.

La fuente de titanio en la solución precursora puede ser cualquier compuesto que contiene titanio que permita la formación de partículas de PZT de acuerdo con el método proporcionado en el presente documento. En una realización, la fuente de titanio es $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$. Fuentes de titanio adicionales pueden comprender TiO_2 , $TiO_2 \cdot nH_2O$, $Ti(OC_4H_9)_4$, $Ti(NO_3)_2$, $TiCl_3$, $TiCl_4$.

La fuente de zirconio en la solución precursora puede ser cualquier compuesto que contiene zirconio que permita la formación de partículas de PZT de acuerdo con el método proporcionado en el presente documento. En una realización, la fuente de zirconio es $Zr[O(CH_2)_2CH_3]_4$. Fuentes de zirconio adicionales pueden comprender $Zr(NO_3)_4 \cdot 5H_2O$, $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, $ZrO_2 \cdot nH_2O$, ZrO_2 .

La fuente de plomo en la solución precursora puede ser cualquier compuesto que contiene plomo que permita la formación de partículas de PZT de acuerdo con el método proporcionado en el presente documento. En una realización, la fuente de plomo es $Pb(CH_3COOH)_2$. Fuentes de plomo adicionales pueden comprender $Pb(NO_3)_2$, $Pb(OH)_2$, PbO , Pb_2O_3 , PbO_2 .

En ciertas realizaciones, se añade plomo en exceso a la solución precursora. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "plomo en exceso" se refiere a una relación de cantidad mayor que una para la fuente de plomo. El plomo en exceso es un medio para ejercer un control adicional sobre las características de las nanopartículas de PZT. Normalmente, el plomo en exceso se consigue en la solución precursora añadiendo una cantidad en exceso de la misma fuente de plomo que se ha descrito anteriormente. Por ejemplo, si la fuente de plomo es acetato de plomo trihidrato, cualquier cantidad de acetato de plomo trihidrato añadida a la solución precursora que da como resultado que la relación del acetato de plomo trihidrato sea mayor que uno en comparación con la fuente de zirconio y la fuente de titanio, se considerará una cantidad en exceso de plomo. En ciertas realizaciones, la cantidad en exceso de plomo proviene de una segunda fuente de plomo diferente.

El plomo en exceso no altera la composición química de las nanopartículas de PZT, sino que, en su lugar, modifica las condiciones de reacción hidrotérmica para producir varios efectos deseables sobre las nanopartículas de PZT formadas. Aunque el plomo en exceso no altera la estructura cristalina fundamental de las nanopartículas de PZT, mejora la morfología, reduce los subproductos amorfos, y reduce el grado de aglomeración entre partículas.

Un efecto secundario menos deseable del plomo en exceso es que también causa la formación de un compuesto de óxido de plomo que es una impureza. Sin embargo, la impureza de óxido de plomo puede retirarse lavando las nanopartículas de PZT formadas con un disolvente apropiado (por ejemplo, ácido acético diluido).

El mineralizador en la solución precursora facilita la formación de PZT durante el proceso hidrotérmico. El mineralizador actúa como una fuente de iones hidróxido para facilitar la síntesis hidrotérmica de PZT. Los mineralizadores representativos incluyen KOH, NaOH, LiOH, NH_4OH , y combinaciones de los mismos. La concentración del mineralizador, en una solución de mineralizador antes de añadirla a los otros componentes de la solución precursora, es de aproximadamente 0,2 M a aproximadamente 15 M si el mineralizador es líquido, tal como NaOH. Si el mineralizador es sólido, tal como KOH, en primer lugar se añade agua DI a la mezcla de Zr, Ti, Pb y a continuación se añade el mineralizador sólido. La concentración de mineralizador óptima depende de las condiciones del proceso hidrotérmico, tal como es conocido por los expertos en la materia.

La concentración del mineralizador afecta al tamaño de nanopartículas de PZT producidas. Por ejemplo, nanopartículas de PZT similares formadas usando mineralizador KOH 5 M y 10 M tienen morfología similar, pero el mineralizador 5 M da como resultado nanopartículas más pequeñas que las formadas con mineralizador 10 M, si todas las condiciones del procesamiento son iguales.

En ciertas realizaciones, se añade un estabilizante al precursor para prevenir la gelificación y/o precipitación de ciertos componentes del precursor antes del proceso hidrotérmico. Es decir, pueden requerirse estabilizantes para mantener todos los componentes necesarios del precursor en solución antes del proceso hidrotérmico. Por ejemplo, en una realización, se añade acetilacetona ("AcAc") a la fuente de titanio (por ejemplo, isopropóxido de titanio) para prevenir la gelificación y precipitación antes de la reacción para formar PZT. En otra realización, se añade propóxido a la fuente de titanio.

La solución precursora es normalmente acuosa, aunque se apreciará que también puede usarse cualquier otro disolvente capaz de poner en solución los componentes de la solución precursora y facilitar la formación de nanopartículas de PZT. Alternativas al agua pueden comprender solución acuosa, mezcla de agua y disolvente orgánico, o ácido orgánico débil, por ejemplo, etilendiamina, CH_2Cl_2 , sal de amonio, ácido acético u otra alternativa adecuada.

En una realización ejemplar, la solución precursora comprende KOH como solución mineralizadora, isopropóxido de titanio como fuente de titanio, n-propóxido de zirconio como fuente de zirconio, acetato de plomo trihidrato como fuente de plomo, acetilacetona como estabilizante, y agua. El acetato de plomo trihidrato, n-propóxido de zirconio, e isopropóxido de titanio están presentes en el precursor en una relación de peso de aproximadamente 1 a aproximadamente 2 partes de acetato de plomo trihidrato, de aproximadamente 0,5 a aproximadamente 1 parte de n-propóxido de zirconio, y de aproximadamente 0,8 a aproximadamente 1,6 partes de isopropóxido de titanio. La solución mineralizadora de KOH es de aproximadamente 0,2 a aproximadamente 15 M.

Programa de calentamiento.

Las nanopartículas de PZT se forman a través de procesamiento hidrotérmico de la solución precursora. El proceso hidrotérmico incluye un programa de calentamiento que comprende una rampa de calentamiento a una primera temperatura, un mantenimiento a la primera temperatura, y una rampa de enfriamiento a temperatura ambiente.

El programa de calentamiento se realiza a una presión mayor que 1,013 bares (1 atm). Por consiguiente, la solución precursora está contenida dentro de un aparato configurado tanto para calentar como para presurizar. En ciertas realizaciones, la presión aplicada durante el programa de calentamiento es de aproximadamente 1,013 bares (1 atm) a aproximadamente 20,265 bares (20 atm). En una realización ejemplar, la solución precursora está contenida dentro de un autoclave y se acumula presión autógena en el autoclave en el transcurso del programa de calentamiento. Como alternativa, una presión constante puede ser proporcionada por una bomba u otro aparato conocido por los expertos en la materia.

En una realización, calentar la solución precursora para producir nanopartículas de PZT incluye al menos las etapas secuenciales de: (i) calentar la solución precursora a una primera velocidad a una primera temperatura, en la que dicha primera velocidad está entre aproximadamente 1 °C/min (grados Celsius por minuto) y aproximadamente 30 °C/min, y en la que dicha primera temperatura está entre aproximadamente 120 °C y aproximadamente 350 °C; (ii) mantener durante un primer tiempo de mantenimiento a la primera temperatura, en la que dicho primer tiempo de mantenimiento está entre aproximadamente 5 minutos y aproximadamente 300 minutos; y, (iii) enfriar a una segunda velocidad para proporcionar una solución de PZT en nanopartículas que comprende una pluralidad suspendida de nanopartículas de PZT de perovskita que tienen una dimensión la más pequeña de entre aproximadamente 20 nm (nanómetros) y aproximadamente 1000 nm, en la que dicha segunda velocidad está entre aproximadamente 1 °C/min y aproximadamente 30 °C/min.

La velocidad de la rampa de calentamiento ("primera velocidad") se usa para elevar la temperatura de la solución precursora de aproximadamente temperatura ambiente (T_{TA}) a la temperatura máxima de procesamiento hidrotérmico ($T_{m\acute{a}x}$). La primera velocidad es de aproximadamente 1 °C/min y aproximadamente 30 °C/min.

La temperatura de procesamiento ("primera temperatura"; $T_{m\acute{a}x}$) está entre aproximadamente 120 °C (Celsius) y aproximadamente 350 °C. En ciertas realizaciones, la primera temperatura es 200 °C o menos. Mientras que el programa de calentamiento se describe principalmente en el presente documento como incluyendo una única primera temperatura, a la que se calienta la solución, se apreciará que el método desvelado contempla variaciones en la primera temperatura que pueden originarse de la reacción hidrotérmica o imprecisiones en el equipo de calentamiento. Además, la etapa de calentamiento del programa de calentamiento puede incluir segunda, tercera, o temperaturas adicionales a las que se somete la solución precursora calentada. La segunda, tercera, o temperaturas adicionales pueden ser mayores o menores que la primera temperatura, según se requiera para producir las nanopartículas de PZT deseadas.

La primera velocidad es particularmente importante para controlar el tamaño de las nanopartículas de PZT producidas. A este respecto, a medida que la temperatura de la solución precursora se calienta de T_{TA} a $T_{m\acute{a}x}$, existe una temperatura intermedia, T_{nuc} , a la que los cristales de PZT comienzan a nuclearse ("Zona de nucleación"). El crecimiento óptimo de cristales de PZT se produce a $T_{m\acute{a}x}$, y cualesquiera cristales nucleados a una temperatura más

baja que $T_{\text{máx}}$ crecerán probablemente a mayor tamaño con agregados mayores y/o mayor grado de aglomeración que los cristales de PZT nucleados a $T_{\text{máx}}$.

Una velocidad de rampa lenta da como resultado una mayor cantidad de tiempo que la solución precursora pasa entre T_{nuc} y $T_{\text{máx}}$. Por consiguiente, una velocidad de rampa lenta da como resultado más nucleación de cristales de PZT a temperaturas por debajo de $T_{\text{máx}}$, dando como resultado un tamaño de cristales y una estructura cristalina de PZT inconsistentes. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "velocidad de rampa lenta" se refiere a una velocidad de rampa de por debajo de 1 °C/min.

A la inversa, una velocidad de rampa relativamente rápida da como resultado nucleación de cristales de PZT homogénea haciendo pasar a la solución precursora rápidamente a través del intervalo de temperatura entre T_{nuc} y $T_{\text{máx}}$. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "velocidad de rampa rápida" se refiere a una velocidad de rampa de 10 °C/min o mayor. En ciertas realizaciones, la velocidad de rampa elevada es una velocidad de rampa de 20 °C/min o mayor.

Como resultado de la dinámica de nucleación descrita anteriormente, cuanto mayor es la velocidad de rampa, más pequeñas serán las partículas de PZT generadas. Aunque la velocidad de la rampa de calentamiento afecta al tamaño y al número de cristales de PZT, ésta no afecta a la estructura cristalina. Análogamente, la velocidad de enfriamiento no afecta a la estructura cristalina.

La etapa de "mantenimiento" del programa de calentamiento da a los cristales de PZT tiempo para formarse y crecer. La etapa de mantenimiento está entre aproximadamente 5 minutos y aproximadamente 300 minutos a la primera temperatura. Normalmente, un tiempo de mantenimiento más prolongado da como resultado cristales más grandes. El tiempo de mantenimiento es, preferentemente, para permitir crecer a los cristales. Si el tiempo de mantenimiento es demasiado corto, el producto final puede no tener composición de PZT.

Después de la etapa de mantenimiento, el programa de calentamiento avanza a una etapa de "enfriamiento". La velocidad de enfriamiento reduce la temperatura desde la temperatura máxima de procesamiento a temperatura ambiente a una "segunda velocidad." El intervalo de la velocidad de enfriamiento es de aproximadamente 1 °C/min a aproximadamente 30 °C/min. La velocidad de enfriamiento afecta a varios aspectos de las nanopartículas de PZT. La velocidad de enfriamiento determina parcialmente la morfología y el tamaño de las nanopartículas de PZT formadas. Una velocidad de enfriamiento relativamente rápida, por ejemplo, una velocidad de enfriamiento de más de 20 °C por minuto, da como resultado nanopartículas de PZT en el intervalo de 100 nm a 500 nm y una forma cúbica distinta.

Adicionalmente, una velocidad de enfriamiento relativamente rápida da como resultado nanopartículas de PZT que están unidas físicamente, en oposición a unidas químicamente. Las nanopartículas de PZT unidas físicamente son preferibles a aquellas que están unidas químicamente debido a que la separación de nanopartículas unidas físicamente se consigue más fácilmente que la separación de nanopartículas unidas químicamente (por ejemplo, mediante agitación mecánica). Finalmente, una velocidad de enfriamiento más rápida minimiza la presencia de la fase de PbTiO_3 en el producto final. Esto es deseable porque PbTiO_3 no solamente es una impureza que debe ser retirada para obtener nanopartículas de PZT puras, sino que la formación de PbTiO_3 también reduce el rendimiento de la reacción de formación de PZT consumiendo plomo y titanio en una forma diferente de PZT.

En ciertas realizaciones, la segunda velocidad es suficientemente grande para que se formen partículas de PZT que son formas no de perovskita de PZT. A este respecto, en ciertas realizaciones, el método comprende, además, una etapa de tratar la solución de PZT en nanopartículas para eliminar las formas no perovskita de PZT. Dicho tratamiento puede incluir disolución asistida químicamente, grabado húmedo, lavado con ácido, lavado con base, y combinaciones de los mismos. Puede usarse cualquier método que elimine selectivamente (por ejemplo, disuelva) la PZT no de perovskita. Por ejemplo, puede usarse un lavado con ácido acético diluido para eliminar el componente no perovskita PbTiO_3 de la síntesis hidrotérmica de PZT.

Como alternativa, en lugar de eliminar las partículas de PZT no de perovskita, en ciertas realizaciones, el método incluye, además, una etapa de separar las nanopartículas de PZT de perovskita de las formas no perovskita de PZT en la solución de PZT en nanopartículas. La suspensión final se lava con agua DI, ácido diluido, o etanol para retirar las formas no de perovskita.

En ciertas realizaciones, la segunda velocidad es suficientemente grande para que la solución de PZT en nanopartículas se vuelva supersaturada. La nucleación y el crecimiento de cristales se permiten cuando la solución está supersaturada y se detienen cuando la concentración llega a un equilibrio. Para todas las temperaturas, existe una concentración en equilibrio en respuesta a esto. Por lo tanto, cuando la segunda velocidad es lenta, la solución puede estar supersaturada múltiples veces y el cristal puede tener una mayor oportunidad de hacerse más grande. Para una segunda velocidad rápida, la concentración inicial puede estar muy por encima del equilibrio y la concentración alta puede promover que se produzca una segunda nucleación junto con el crecimiento de cristales.

La velocidad de nucleación es alta cuando la concentración es alta, así que tanto la nucleación como el crecimiento son rápidos. Debido a esto, de la forma más probable, la nucleación secundaria y el crecimiento no formarán cristales estables o los crearán amorfos, que pueden ser retirados.

La ruta para formar las nanopartículas de PZT más pequeñas y de más alta calidad se consigue usando el tiempo de procesamiento más corto posible para el procesamiento hidrotérmico, lo que incluye usar la velocidad de la rampa de calentamiento más alta, la velocidad de rampa de enfriamiento más rápida, y una concentración de mineralizador "media", dado que el tiempo de procesamiento requerido será diferente si la concentración de mineralizador se cambia. Por ejemplo, si se usa mineralizador 5 M, el tiempo de procesamiento puede ser de tan solo una (1) hora pero para mineralizador 2 M, el tiempo de procesamiento requerido es de tres (3) horas. Si la concentración de mineralizador es menor a 0,4 M, no se formará PZT independientemente del tiempo de procesamiento.

Después de la etapa de enfriamiento, se obtiene una solución de nanopartículas de PZT. La solución de nanopartículas de PZT contiene una pluralidad de nanopartículas de PZT suspendidas en agua. La solución de nanopartículas de PZT puede filtrarse o manipularse de otro modo para aislar las nanopartículas de PZT. Dependiendo de la eficiencia del proceso hidrotérmico, la solución también puede contener PbTiO_3 , PbZrO_3 , PbO , TiO_2 , ZrO_2 , KOH u otras impurezas potenciales. Lavar la solución con ácido acético es un método para retirar PbO . Las muestras con plomo en exceso pueden lavarse con ácido acético.

Tal como se muestra en la figura 5, el sistema 100 comprende, además, un aparato 142 de depósito de tinta (véase también la figura 6A) que deposita la tinta 104 de nanopartículas de PZT sobre un sustrato 101 para formar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. El aparato 142 de depósito de tinta y un proceso 122 de depósito de tinta usando el aparato 142 de depósito de tinta no requieren el crecimiento de cristales de PZT 166 (véase la figura 6B) sobre el sustrato 101. Dado que los cristales de PZT 166 ya han crecido en las nanopartículas de PZT, la tinta 104 de nanopartículas de PZT no requiere un proceso de sinterización a alta temperatura una vez depositada durante el proceso 122 de depósito de tinta. El aparato 142 de depósito de tinta preferentemente comprende un aparato de impresión por escritura directa 144 (véase la figura 10). La figura 10 es una ilustración de un diagrama de bloques de realizaciones de los aparatos y procesos de depósito de tinta que pueden usarse para fabricar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación. Tal como se muestra en la figura 10, el aparato de impresión por escritura directa 144 puede comprender un aparato de depósito por chorro atomizado 146, un aparato de impresión por inyección de tinta 147, un aparato de impresión en aerosol 190, un aparato de evaporación por láser pulsado 192, un aparato de impresión por flexografía 194, un aparato de impresión por micropulverización 196, un aparato de impresión serigráfica en lecho plano 197, un aparato de impresión serigráfica rotativa 198 u otro aparato de serigrafía adecuado, un aparato de impresión por huecogrado 199 u otro aparato de impresión con prensa adecuado, u otro aparato de impresión por escritura directa adecuado 144.

La tinta 104 de nanopartículas de PZT puede depositarse sobre el sustrato 101 con el aparato 142 de depósito de tinta mediante un proceso 122 de depósito de tinta (véase las figuras 6A y 10). El proceso 122 de depósito de tinta preferentemente comprende un proceso de impresión por escritura directa 124 (véase la figura 10). Tal como se muestra en la figura 10, el proceso de impresión por escritura directa 124 puede comprender un proceso de depósito por chorro atomizado 126, un proceso de impresión por inyección de tinta 128, un proceso de impresión en aerosol 180, un proceso de evaporación por láser pulsado 182, un proceso de impresión por flexografía 184, un proceso de impresión por micropulverización 186, un proceso de impresión serigráfica en lecho plano 187, un proceso de impresión serigráfica rotativa 188 u otro proceso de serigrafía adecuado, un proceso de impresión por huecogrado 189 u otra impresión con prensa adecuada, u otro proceso de impresión por escritura directa adecuado 124.

Tal como se muestra en la figura 5, el sustrato 101 puede tener una superficie no curva o plana 136, una superficie curva o no plana 138, o una combinación de una superficie no curva o plana 136 y una superficie curva o no plana 138. Tal como se muestra en la figura 2, el sustrato 101 puede tener una primera superficie 103a y una segunda superficie 103b. El sustrato 101 preferentemente comprende un material compuesto, un material metálico, una combinación de un material compuesto y un material metálico, u otro material adecuado. Tal como se muestra en la figura 2, el sustrato 101 puede comprender una estructura 102 de material compuesto. La estructura 102 de material compuesto puede comprender materiales compuestos tales como materiales compuestos poliméricos, materiales compuestos reforzados con fibras, polímeros reforzados con fibras, plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP), plásticos reforzados con vidrio (GRP), materiales compuestos termoplásticos, materiales compuestos termoendurecibles, materiales compuestos de resina epoxi, materiales compuestos poliméricos con memoria de forma, materiales compuestos de matriz de cerámica, u otro material compuesto adecuado. Tal como se muestra en la figura 3, el sustrato 101 puede comprender una estructura metálica 132. La estructura metálica 132 puede comprender materiales metálicos tales como aluminio, acero inoxidable, titanio, aleaciones de los mismos, u otro metal o aleación metálica adecuada. El sustrato 101 también puede comprender otro material adecuado.

La figura 6A es una ilustración de una vista esquemática de una de las realizaciones de un proceso 122 de depósito de tinta y un aparato 142 de depósito de tinta para fabricar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación. Un proceso de impresión por escritura directa 124 y aparato de impresión

por escritura directa 144 ejemplares se muestran en la figura 6A, que muestra el proceso de depósito por chorro atomizado 126 y el aparato de depósito por chorro atomizado 146. Tal como se muestra en la figura 6A, nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica pueden ser transferidas mediante una entrada 148 al interior de un recipiente de mezcla 150 que contiene un disolvente 152. Las nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica se mezclan preferentemente con el disolvente 152 en el recipiente de mezcla para formar una suspensión 154 de tinta de nanopartículas de PZT. La suspensión 154 de tinta de nanopartículas de PZT puede atomizarse mediante un mecanismo ultrasónico 158 para formar nanopartículas 156 de tinta de PZT atomizadas. Las nanopartículas 156 de tinta de PZT atomizadas pueden transferirse a continuación a través de un cuerpo de boquilla 160 y dirigirse a través de una punta de boquilla 162 al sustrato 101 para depósito e impresión del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT sobre el sustrato 101.

La figura 6B es una ilustración de una vista en primer plano del sensor 110 a base de tinta de nanopartículas piezoeléctrica de PZT siendo depositado sobre el sustrato 101. La figura 6B muestra las nanopartículas 156 de tinta de PZT atomizadas en el cuerpo de boquilla 160 y la punta de boquilla 162 siendo depositadas sobre el sustrato 101 para formar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. Tal como se muestra en la figura 6B, el sensor o sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT pueden depositarse sobre el sustrato 101 en una forma personalizada 164, tal como letras, diseños, logotipos, o insignias, o formas geométricas tales como círculos, cuadrados, rectángulos, triángulos, u otras formas geométricas, u otra forma personalizada deseada. El proceso 122 de depósito de tinta y el aparato 142 de depósito de tinta no requieren el crecimiento de cristales de PZT 166 sobre el sustrato 101. Además, las nanopartículas de tinta de PZT a escala nanométrica depositadas 106 contienen una estructura de partícula cristalina que no requiere ninguna etapa post-procesamiento para hacer crecer los cristales. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede depositarse sobre una superficie de la estructura 30 con una o más capas de aislamiento, revestimientos, o pintura entre un cuerpo de la estructura 30 y el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT.

Las figuras 2 y 3 muestran realizaciones de un conjunto 115 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado. La figura 2 es una ilustración de una vista de sección transversal de una de las realizaciones de un conjunto 116 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado, que está depositado sobre un sustrato 101 que comprende una estructura 102 de material compuesto. El conjunto 116 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado comprende el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT acoplado a un conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación que actúa como un accionador 141 (véase la figura 4). El conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación está formado preferentemente por una tinta conductora 168 (véase la figura 4) que puede depositarse mediante el aparato 142 de depósito de tinta y mediante el proceso 122 de depósito de tinta sobre el sustrato 101. El conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación que actúa como un accionador 141 (véase la figura 4) puede comprender un primer electrodo conductor 114, un segundo electrodo conductor 118, un primer cable de rastreo conductor 112a, y un segundo cable de rastreo conductor 112b. El primer electrodo conductor 114, el segundo electrodo conductor 118, el primer cable de rastreo conductor 112a, y el segundo cable de rastreo conductor 112b pueden ser adyacentes al sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT.

La figura 3 es una ilustración de una vista de sección transversal de otra de las realizaciones de un conjunto 130 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado que está depositado sobre un sustrato 101 que comprende una estructura metálica 132. El conjunto 130 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado comprende el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT acoplado a un conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación que actúa como un accionador 141 (véase la figura 4). El conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación está formado, preferentemente, por una tinta conductora 168 (véase la figura 4) que puede depositarse mediante el aparato 142 de depósito de tinta y mediante el proceso 122 de depósito de tinta sobre el sustrato 101. El conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación que actúa como el accionador 141 puede comprender el primer electrodo conductor 114, el segundo electrodo conductor 118, el primer cable de rastreo conductor 112a, y el segundo cable de rastreo conductor 112b. El primer electrodo conductor 114, el segundo electrodo conductor 118, el primer cable de rastreo conductor 112a, y el segundo cable de rastreo conductor 112b pueden ser adyacentes al sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. Tal como se muestra en la figura 3, el conjunto 130 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado comprende, además, una capa de aislamiento 134 depositada entre el sustrato 101 que comprende la estructura metálica 132 y el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT acoplado al conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación. La capa de aislamiento 134 puede comprender un revestimiento polimérico aislante, un material dieléctrico, un material cerámico, un material polimérico, u otro material de aislamiento adecuado.

La figura 4 es una ilustración de una vista en perspectiva superior del conjunto 115 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado, depositado sobre una estructura 102 de material compuesto. La figura 4 muestra una pluralidad de sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT acoplados a una pluralidad de conjuntos 140 de cable de alimentación y comunicación, todos depositados sobre la estructura 102 de material compuesto. Análogamente, para una estructura metálica 132, el conjunto 130 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado puede tener una pluralidad de sensores 110 piezoeléctricos a

base de tinta de nanopartículas de PZT acoplados a una pluralidad de conjuntos 140 de cable de alimentación y comunicación, todos depositados sobre la estructura metálica 132.

El depósito de los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT sobre el sustrato 101 o la estructura 30 (véase la figura 7) permite la instalación *in situ* de los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT para aplicaciones tales como monitorización de la integridad estructural. Los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT pueden ser un facilitador clave de sistemas 170 de monitorización de la integridad estructural de alta densidad. La figura 7 es una ilustración de un diagrama de bloques de una de las realizaciones de un sistema 170 de monitorización de la integridad estructural que usa los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT de la divulgación. Pueden usarse dos o más sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas para permitir al sistema 170 de monitorización de la integridad estructural la monitorización de la integridad estructural 172 de una estructura 30, tal como una estructura 102 de material compuesto (véase la figura 1) o una estructura metálica 132 (véase la figura 3), u otra estructura adecuada, y proporcionar datos de integridad estructural 174. Los datos de integridad estructural 174 pueden comprender faltas de adherencia, unión débil, niveles de deformación, entrada de humedad, cambio de materiales, grietas, espacios vacíos, delaminación, porosidad, u otros datos de integridad estructural adecuados 174 o propiedades electromecánicas u otras irregularidades que pueden afectar de forma adversa al rendimiento de la estructura 30.

El sistema 170 de monitorización de la integridad estructural preferentemente comprende un conjunto 115 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado (véase también las figuras 2 y 3). El conjunto 115 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado puede comprender el conjunto 116 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado (véase la figura 2), si se usa con la estructura 102 de material compuesto, y puede comprender el conjunto 130 de sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT depositado (véase la figura 3), si se usa con una estructura metálica 132. El sistema 170 de monitorización de la integridad estructural puede comprender, además, una fuente de suministro 176 de tensión 176 que puede usarse para invertir la polaridad del sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT antes del uso en el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "invertir la polaridad" significa un proceso mediante el cual se aplica un campo eléctrico intenso por un material, habitualmente a temperaturas elevadas, con el fin de orientar o alinear dipolos o dominios. La fuente de suministro 176 de tensión también puede accionar algunos sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT, de modo que se conviertan en accionadores 141 que envían señales de interrogación a otros sensores piezoeléctricos 110.

Tal como se muestra en la figura 7, el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural comprende, además, una fuente de alimentación eléctrica 178 para proporcionar energía eléctrica a los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT. La fuente de alimentación eléctrica 178 puede comprender baterías, tensión, RFID (identificación por radiofrecuencia), transmisión por inducción magnética, u otra fuente de alimentación eléctrica adecuada. La fuente de alimentación eléctrica 178 puede ser inalámbrica. Tal como se muestra en la figura 7, el sistema 170 puede comprender, además, una red de comunicación 179 de datos digital para recuperar y procesar datos de integridad estructural 174 provenientes de los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT. La red 179 de comunicación de datos digital puede ser inalámbrica. La red 179 de comunicación de datos digital puede recuperar datos recibidos desde los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT, tales como con un receptor (no mostrado), y puede procesar datos recibidos desde los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT, tales como con un procesador informático (no mostrado). La red 179 de comunicación de datos digital puede ser inalámbrica.

En una realización de la divulgación, se proporciona un método 200 de fabricación de un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). La figura 8 es una ilustración de un diagrama de flujo de una realización del método 200 de la divulgación. El método 200 comprende la etapa 202 de formular una tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). La tinta 104 de nanopartículas de PZT comprende nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica. Tal como se ha descrito anteriormente, la tinta 104 de nanopartículas de PZT preferentemente tiene un tamaño de partículas de PZT a escala nanométrica en un intervalo de aproximadamente 20 nanómetros a aproximadamente 1 μm . La tinta 104 de nanopartículas de PZT comprende un promotor de adhesión 108 a base de sol-gel (véase la figura 5) para promover la adhesión de la tinta 104 de nanopartículas de PZT al sustrato 101. La tinta 104 de nanopartículas de PZT se formula mediante el proceso, tal como se ha descrito en detalle anteriormente.

El método 200 comprende, además, la etapa 204 de depositar la tinta 104 de nanopartículas de PZT sobre el sustrato 101 mediante un proceso 122 de depósito de tinta para formar el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. El proceso 122 de depósito de tinta preferentemente comprende un proceso de impresión por escritura directa 124 (véase la figura 10). Tal como se muestra en la figura 10, el proceso de impresión por escritura directa 124 puede comprender un proceso de depósito por chorro atomizado 126, un proceso de impresión por inyección de tinta 128, un proceso de impresión en aerosol 180, un proceso de evaporación por láser pulsado 182, un proceso de impresión por flexografía 184, un proceso de impresión por micropulverización 186, un proceso de impresión serigráfica en lecho plano 187, un proceso de impresión serigráfica rotativa 188 u otro proceso de

serigrafía adecuado, un proceso de impresión por huecogrado 189 u otra impresión con prensa adecuada, u otro proceso de impresión por escritura directa adecuado.

El sustrato 101 preferentemente comprende un material compuesto, un material metálico, una combinación de un material compuesto y un material metálico, u otro material adecuado. El sustrato 101 preferentemente comprende una primera superficie 103a y una segunda superficie 103b. El sustrato 101 puede tener una superficie no curva o plana 136 (véase la figura 5), una superficie curva o no plana 138 (véase la figura 5), o una combinación de una superficie no curva o plana 136 (véase la figura 5) y una superficie curva o no plana 138 (véase la figura 5). El proceso 122 de depósito de tinta no requiere el crecimiento de cristales de PZT 166 sobre el sustrato 101. Además, las nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica depositadas contienen una estructura de partícula cristalina que no requiere ninguna etapa post-procesamiento para hacer crecer los cristales. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede depositarse sobre el sustrato 101 en una forma personalizada 164 (véase la figura 6B).

El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede someterse a un proceso de inversión de la polaridad con una fuente de suministro 176 de tensión (véase la figura 7) antes de ser usado en el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural para monitorización de la integridad estructural 172 de una estructura 30. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede acoplarse a un conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación formado a partir de una tinta conductora 168 depositada sobre el sustrato 101 mediante el proceso 122 de depósito de tinta antes de usarlo en el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural. Pueden usarse dos o más sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT para permitir el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural.

En otra realización de la divulgación, se proporciona un método 250 de fabricación de un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). La figura 9 es una ilustración de un diagrama de flujo de otra realización del método 250 de la divulgación. El método 250 comprende la etapa 252 de formular una tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) que comprende nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica que están precristalizadas.

El método 250 comprende, además, la etapa 254 de suspender la tinta 104 de nanopartículas de PZT en un promotor de adhesión 108 a base de sol-gel. El método 250 comprende, además, la etapa 256 de depositar la tinta 104 de nanopartículas de PZT sobre un sustrato 101 mediante un proceso de impresión por escritura directa 124 para formar un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. Tal como se muestra en la figura 10, el proceso de impresión por escritura directa 124 puede comprender un proceso de depósito por chorro atomizado 126, un proceso de impresión por inyección de tinta 128, un proceso de impresión en aerosol 180, un proceso de evaporación por láser pulsado 182, un proceso de impresión por flexografía 184, un proceso de impresión por micropulverización 186, un proceso de impresión serigráfica en lecho plano 187, un proceso de impresión serigráfica rotativa 188 u otro proceso de serigrafía adecuado, un proceso de impresión por huecogrado 189 u otra impresión con prensa adecuada, u otro proceso de impresión por escritura directa adecuado 124.

El sustrato 101 preferentemente comprende un material compuesto, un material metálico, una combinación de un material compuesto y un material metálico, u otro material adecuado. El sustrato 101 preferentemente comprende una primera superficie 103a y una segunda superficie 103b. El sustrato 101 puede tener una superficie no curva o plana 136 (véase la figura 5), una superficie curva o no plana 138 (véase la figura 5), o una combinación de una superficie no curva o plana 136 (véase la figura 5) y una superficie curva o no plana 138 (véase la figura 5). El proceso 122 de depósito de tinta no requiere el crecimiento de cristales de PZT 166 sobre el sustrato 101. Además, las nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica depositadas contienen una estructura de partícula cristalina que no requiere ninguna etapa post-procesamiento para hacer crecer los cristales. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede depositarse sobre el sustrato 101 en una forma personalizada 164 (véase la figura 6B).

El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede someterse a un proceso de inversión de la polaridad con una fuente de suministro 176 de tensión antes de usarlo en el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural para monitorización de la integridad estructural 172 de una estructura 30. El sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT puede acoplarse a un conjunto 140 de cable de alimentación y comunicación formado a partir de una tinta conductora 168 depositada sobre el sustrato 101 mediante el proceso 122 de depósito de tinta antes de usarlo en el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural. Pueden usarse dos o más sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT para permitir el sistema 170 de monitorización de la integridad estructural.

La estructura 30 puede comprender un avión, una nave espacial, un vehículo aeroespacial, una lanzadera espacial, un cohete, un satélite, un helicóptero, una embarcación, un barco, un tren, un automóvil, un camión, un autobús, una estructura arquitectónica, una pala de turbina, un dispositivo médico, equipo de accionamiento electrónico, un dispositivo electrónico de consumo, equipo vibratorio, amortiguadores pasivos y activos, u otra estructura adecuada. El sistema 100 y los métodos 200, 250 pueden usarse en muchas industrias que incluyen, por ejemplo, generación

de energía eólica (monitorización de la integridad de palas de turbinas), aplicaciones aeroespaciales, aplicaciones militares, aplicaciones médicas, equipo de accionamiento electrónico, productos electrónicos de consumo, o cualquier aplicación donde estructuras o materiales requieran un sistema de monitorización.

Realizaciones del sistema 100 y métodos 200, 250 desveladas en el presente documento para fabricar los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT que pueden usarse para diversas aplicaciones incluyendo detección ultrasónica de daños para estructuras de material compuesto y metálicas, sensores de detección de propagación de grietas, sensores de presión, u otro sensor adecuado. Por ejemplo, los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT 110 del sistema y los métodos 200, 250 proporcionan una base para monitorización de la integridad seria de diversos componentes en aviones tales como detección de daños para inmediaciones de puertas, plataformas militares tales como detección del crecimiento de grietas para aviones militares, y sistemas de espacio tales como monitorización de la integridad de tanques criogénicos. Los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT pueden proporcionar datos que previamente no estaban disponibles que pueden influir en diseños nuevos y eficientes que pueden reducir costes.

El uso del proceso de impresión por escritura directa 124 y, por ejemplo, el proceso de depósito por chorro atomizado 126, junto con la tinta 104 de nanopartículas de PZT formulada, permite que muchos sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT se depositen sobre un sustrato 101 o estructura 30 y a un menor coste en comparación con sensores piezoeléctricos conocidos. Realizaciones del sistema 100 y métodos 200, 250 desveladas en el presente documento proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT que permiten la colocación de los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT en numerosas áreas de una estructura y en grandes cantidades, dos cosas que, ambas, pueden ser difíciles con sensores piezoeléctricos conocidos.

Además, realizaciones del sistema 100 y métodos 200, 250 desveladas en el presente documento para fabricar los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT que son ventajosos respecto a sensores conocidos, dado que no requieren un adhesivo para unirlos a la estructura, y esto disminuye la posibilidad de que los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT puedan desprenderse de la estructura. Realizaciones del sistema 100 y los métodos 200, 250 desveladas en el presente documento para fabricar los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT que están permitidos por la disponibilidad de nanopartículas 106 de tinta de PZT a escala nanométrica que tienen propiedades piezoeléctricas favorables y que se depositan sobre un sustrato o estructura en una configuración deseada para uso sin el uso de adhesivo. Dado que los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT pueden depositarse sobre un sustrato o estructura sin ningún adhesivo entre los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT y el sustrato o estructura, puede conseguirse un acoplamiento de señales mejorado en la estructura que está siendo interrogada. Además, realizaciones del sistema 100 y métodos 200, 250 desveladas en el presente documento para fabricar los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT no requieren colocación o instalación manual sobre el sustrato o estructura y pueden depositarse o imprimirse sobre el sustrato o estructura, junto con todos los conjuntos de cable de alimentación y comunicación requeridos, reduciendo de este modo los costes de mano de obra y de instalación, así como reduciendo la complejidad y el peso de la estructura. Además, los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT pueden fabricarse a partir de numerosos procesos de impresión por escritura directa, incluyendo el proceso de depósito por chorro atomizado 126; pueden fabricarse a partir de tamaños de partícula de nanopartículas que han sido pre-cristalizadas y pueden ser más eficientes que sensores conocidos que no han sido cristalizados; no requieren un proceso de sinterización/cristalización a alta temperatura y, de este modo, reducen o eliminan posible daño a sustratos o estructuras sensibles a la temperatura; pueden depositarse sobre sustratos o estructuras curvas o no planas; no tienen ninguna o tienen mínimas limitaciones de geometría física y, por lo tanto, disminuyen la posibilidad de capacidades de detección inadecuadas o respuestas de accionamiento inadecuadas. Finalmente, realizaciones del sistema 100 y métodos 200, 250 desveladas en el presente documento para fabricar los sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT proporcionan sensores 110 piezoeléctricos a base de tinta de nanopartículas de PZT que pueden usarse para predecir el deterioro o la debilidad de una estructura antes del desarrollo real de dicho deterioro o debilidad, y de este modo, pueden incrementar la fiabilidad de la estructura o piezas componentes estructurales, y pueden reducir los costes globales de fabricación y mantenimiento durante la vida de la estructura o piezas componentes estructurales; y que tienen la capacidad de predecir, monitorizar, y diagnosticar la integridad, estado, e idoneidad de una estructura sin tener que desmontar o retirar la estructura o taladrar agujeros en la estructura para inserción de cualesquiera instrumentos de medición.

En las realizaciones anteriores, se desvela un método de fabricación de un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) que incluye formular una tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo PZT; y, depositar la tinta 104 de nanopartículas de PZT sobre un sustrato 101 mediante un proceso 122 de depósito de tinta para formar un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. La tinta 104 de nanopartículas de PZT incluye partículas 106 de PZT a escala nanométrica. La tinta 104 de

nanopartículas de PZT incluye un promotor de adhesión a base de sol-gel para promover la adhesión de la tinta 104 de nanopartículas de PZT al sustrato 101. El proceso 122 de depósito de tinta no requiere crecimiento de cristales de PZT sobre el sustrato 101. En otra variante, el proceso 122 de depósito de tinta incluye un proceso de impresión por escritura directa 124 seleccionado entre un grupo que comprende un proceso de depósito por chorro atomizado 126, un proceso de impresión por inyección de tinta 128, un proceso de impresión en aerosol 180, un proceso de evaporación por láser pulsado 182, un proceso de impresión por flexografía 184, un proceso de impresión por micropulverización 186, un proceso de impresión serigráfica en lecho plano 187, un proceso de impresión serigráfica rotativa 188, y un proceso de impresión por huecogrado 189. En una variante, el sustrato 101 incluye un material seleccionado entre un grupo que comprende un material compuesto, un material metálico, y una combinación de un material compuesto y un material metálico. En una alternativa, el sustrato 101 tiene una superficie curva 138. En otra realización más, el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT se deposita sobre el sustrato 101 en una forma personalizada.

De acuerdo con las realizaciones anteriores, se desvela un sistema para fabricar un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT), el sistema incluye una tinta 104 de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) formulada; y, un aparato 142 de depósito de tinta que deposita la tinta 104 de nanopartículas de PZT sobre un sustrato 101 para formar un sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. La tinta 104 de nanopartículas de PZT incluye partículas 106 de PZT a escala nanométrica. La tinta 104 de nanopartículas de PZT incluye un promotor de adhesión 108 a base de sol-gel para promover la adhesión de la tinta 104 de nanopartículas de PZT a una superficie del sustrato 101. En otra variante más, el aparato 142 de depósito de tinta no requiere crecimiento de cristales de PZT sobre una superficie del sustrato 101.

En una alternativa, el aparato 142 de depósito de tinta incluye un aparato de impresión por escritura directa 144 seleccionado entre un grupo que comprende un aparato de depósito por chorro atomizado 146, un aparato de impresión por inyección de tinta 147, un aparato de impresión en aerosol 190, un aparato de evaporación por láser pulsado 192, un aparato de impresión por flexografía 194, un aparato de impresión por micropulverización 196, un aparato de impresión serigráfica en lecho plano 197, un proceso de impresión serigráfica rotativa 188, y un proceso de impresión por huecogrado 189. En otra alternativa, el sustrato 101 incluye un material seleccionado entre un grupo que comprende un material compuesto, un material metálico, y una combinación de un material compuesto y un material metálico. En otra variante, el sensor 110 piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT se deposita sobre el sustrato 101 en una forma personalizada.

En aún otra realización, se desvela un método de fabricación de un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). En este método, se formula una tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) que comprende nanopartículas de PZT precristalizadas. Además, tinta de nanopartículas de PZT se suspende en un promotor de adhesión a base de sol-gel; y, la tinta de nanopartículas de PZT se deposita sobre un sustrato mediante un proceso de impresión por escritura directa para formar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. En una variante, la tinta de nanopartículas de PZT incluye partículas de PZT a escala nanométrica. En otra variante, el proceso de impresión por escritura directa no requiere el crecimiento de cristales de PZT sobre el sustrato. De nuevo, el proceso de impresión por escritura directa puede ser un proceso seleccionado entre un grupo que comprende un proceso de depósito por chorro atomizado, un proceso de impresión por inyección de tinta, un proceso de impresión en aerosol, un proceso de evaporación por láser pulsado, un proceso de impresión por flexografía, un proceso de impresión por micropulverización, un proceso de impresión serigráfica en lecho plano, un proceso de impresión serigráfica rotativa, y un proceso de impresión por huecogrado.

En otra realización más, se desvela un sistema para fabricar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT). El sistema incluye: una tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo (PZT) formulada; y, un aparato de depósito de tinta que deposita la tinta de nanopartículas de PZT sobre un sustrato para formar un sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT. En una variante, el sustrato es curvo. En una variante, el sensor piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de PZT se deposita sobre el sustrato en una forma personalizada.

Muchas modificaciones y otras realizaciones de la divulgación vendrán a la mente de un experto en la materia a la que pertenece esta divulgación, que tienen el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y los dibujos asociados. Las realizaciones descritas en el presente documento pretenden ser ilustrativas y no pretenden ser limitantes o exhaustivas. Aunque en el presente documento se emplean términos específicos, estos se usan en un sentido genérico y descriptivo solamente y no para fines de limitación.

REIVINDICACIONES

1. Un método de fabricación de un sensor piezoeléctrico (110) a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo, comprendiendo el método:

formular una tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo; y

5 depositar la tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo sobre un sustrato (101) mediante un proceso (122) de depósito de tinta para formar un sensor piezoeléctrico (110) a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo;

en el que la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo comprende nanopartículas de zirconato-titanato de plomo precristalizadas, caracterizado porque

10 la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo comprende un promotor de adhesión a base de sol-gel para promover la adhesión de la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo al sustrato (101) o un promotor de adhesión a base de polímero para promover la adhesión de la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo al sustrato (101).

15 2. El método de la reivindicación 1, en el que el proceso (122) de depósito de tinta no requiere crecimiento de cristales de zirconato-titanato de plomo sobre el sustrato (101).

3. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en el que el proceso (122) de depósito de tinta comprende un proceso de impresión por escritura directa (124) seleccionado entre un grupo que comprende un proceso de depósito por chorro atomizado (126), un proceso de impresión por inyección de tinta (128), un proceso de impresión en aerosol (180), un proceso de evaporación por láser pulsado (182), un proceso de impresión por flexografía (184),
20 un proceso de impresión por micropulverización (186), un proceso de impresión serigráfica en lecho plano (187), un proceso de impresión serigráfica rotativa (188) y un proceso de impresión por huecogrado (189).

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que el sustrato (101) comprende un material seleccionado entre un grupo que comprende un material compuesto, un material metálico y una combinación de un material compuesto y un material metálico.

25 5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que el sustrato (101) tiene una superficie curva (138).

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en el que el sensor (110) piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo se deposita sobre el sustrato (101) en una forma personalizada.

7. Un sistema para fabricar un sensor (110) piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo, comprendiendo el sistema:

30 una tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo formulada; y

un aparato (142) de depósito de tinta que deposita la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo sobre un sustrato (101) para formar un sensor piezoeléctrico (110) a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo;

35 en el que la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo comprende nanopartículas de zirconato-titanato de plomo precristalizadas, caracterizado porque

la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo comprende un promotor (108) de adhesión a base de sol-gel para promover la adhesión de la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo a una superficie del sustrato (101) o un promotor de adhesión a base de polímero para promover la adhesión de la tinta (104) de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo al sustrato (101).

40 8. El sistema de la reivindicación 7, en el que el aparato (142) de depósito de tinta no requiere crecimiento de cristales de zirconato-titanato de plomo sobre una superficie del sustrato (101).

9. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 7-8, en el que el aparato (142) de depósito de tinta comprende un aparato de impresión por escritura directa (144) seleccionado entre un grupo que comprende un aparato de depósito por chorro atomizado (146), un aparato de impresión por inyección de tinta (147), un aparato de impresión en aerosol (190), un aparato de evaporación por láser pulsado (192), un aparato de impresión por flexografía (194), un aparato de impresión por micropulverización (196), un aparato de impresión serigráfica en lecho plano (197), un proceso de impresión serigráfica rotativa (188) y un proceso de impresión por huecogrado (189).
45

10. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 7-9, en el que el sustrato (101) comprende un material seleccionado entre un grupo que comprende un material compuesto, un material metálico y una combinación de un material compuesto y un material metálico.

- 5 11. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 7-10, en el que el sensor (110) piezoeléctrico a base de tinta de nanopartículas de zirconato-titanato de plomo se deposita sobre el sustrato (101) en una forma personalizada.

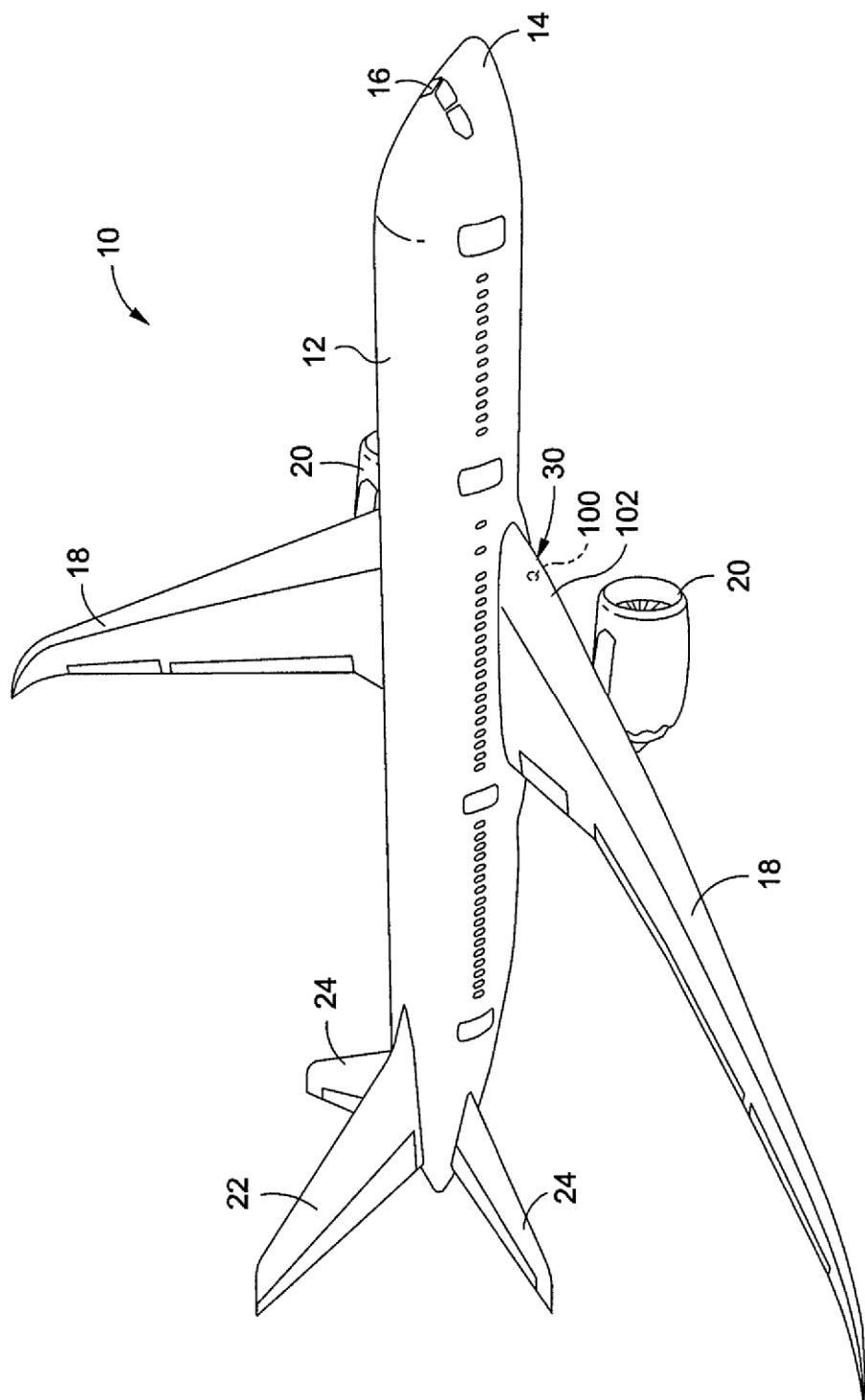


FIG. 1

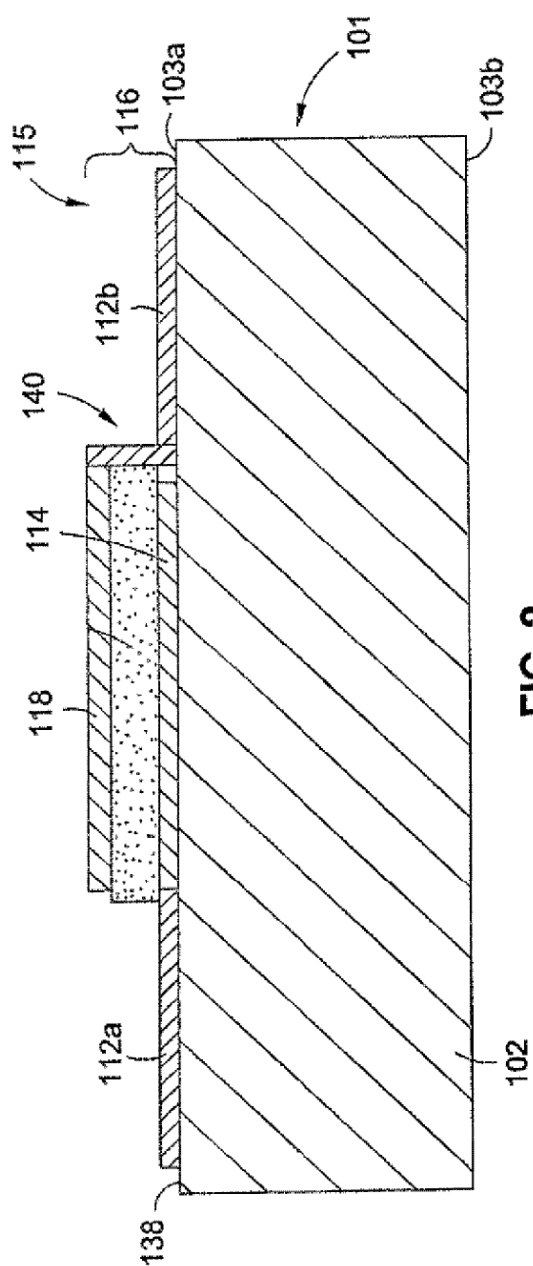


FIG. 2

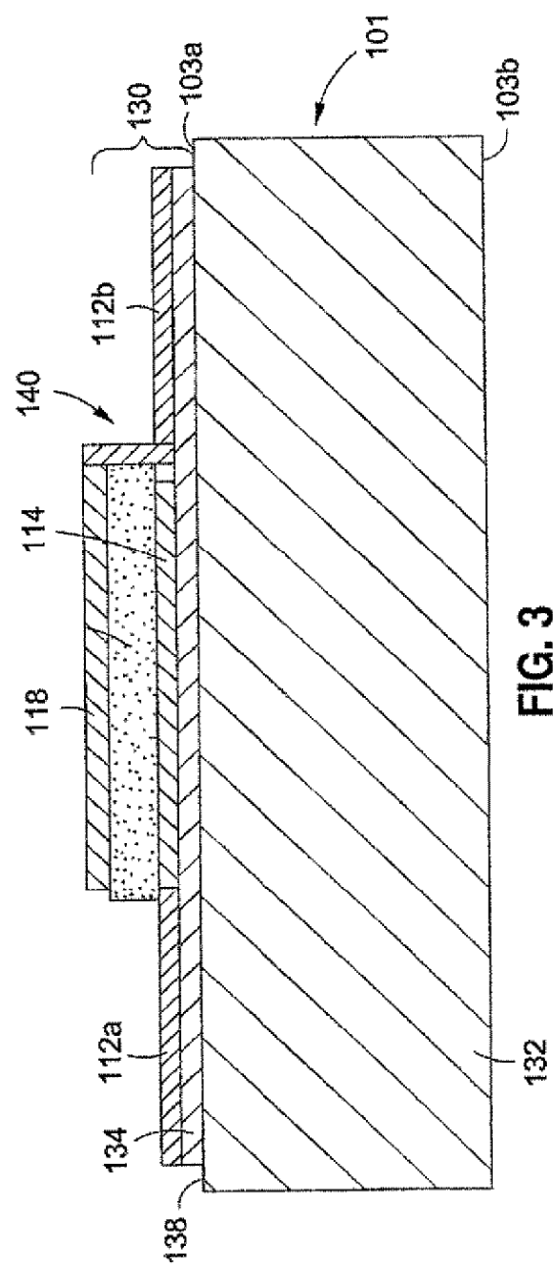


FIG. 3

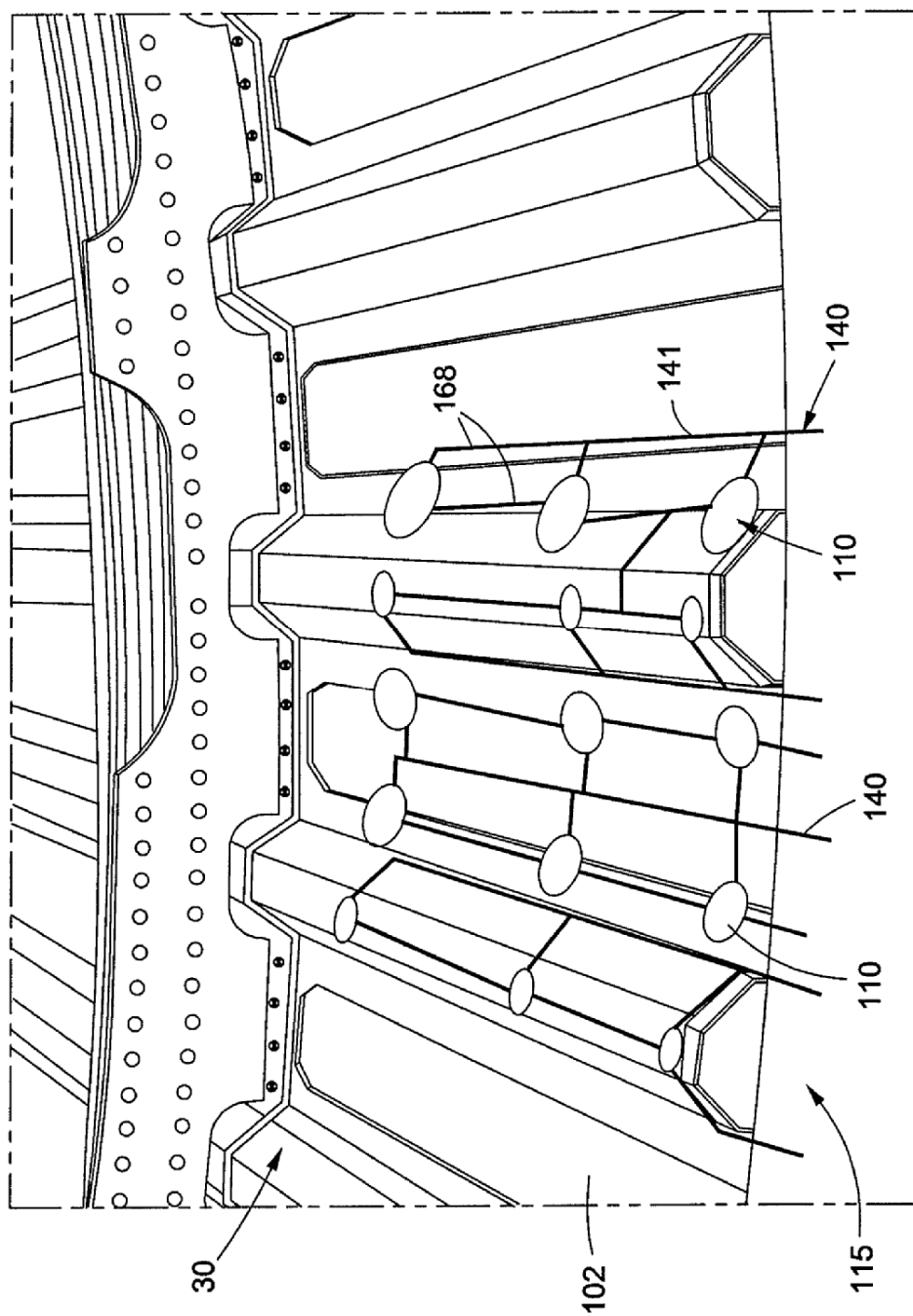


FIG. 4

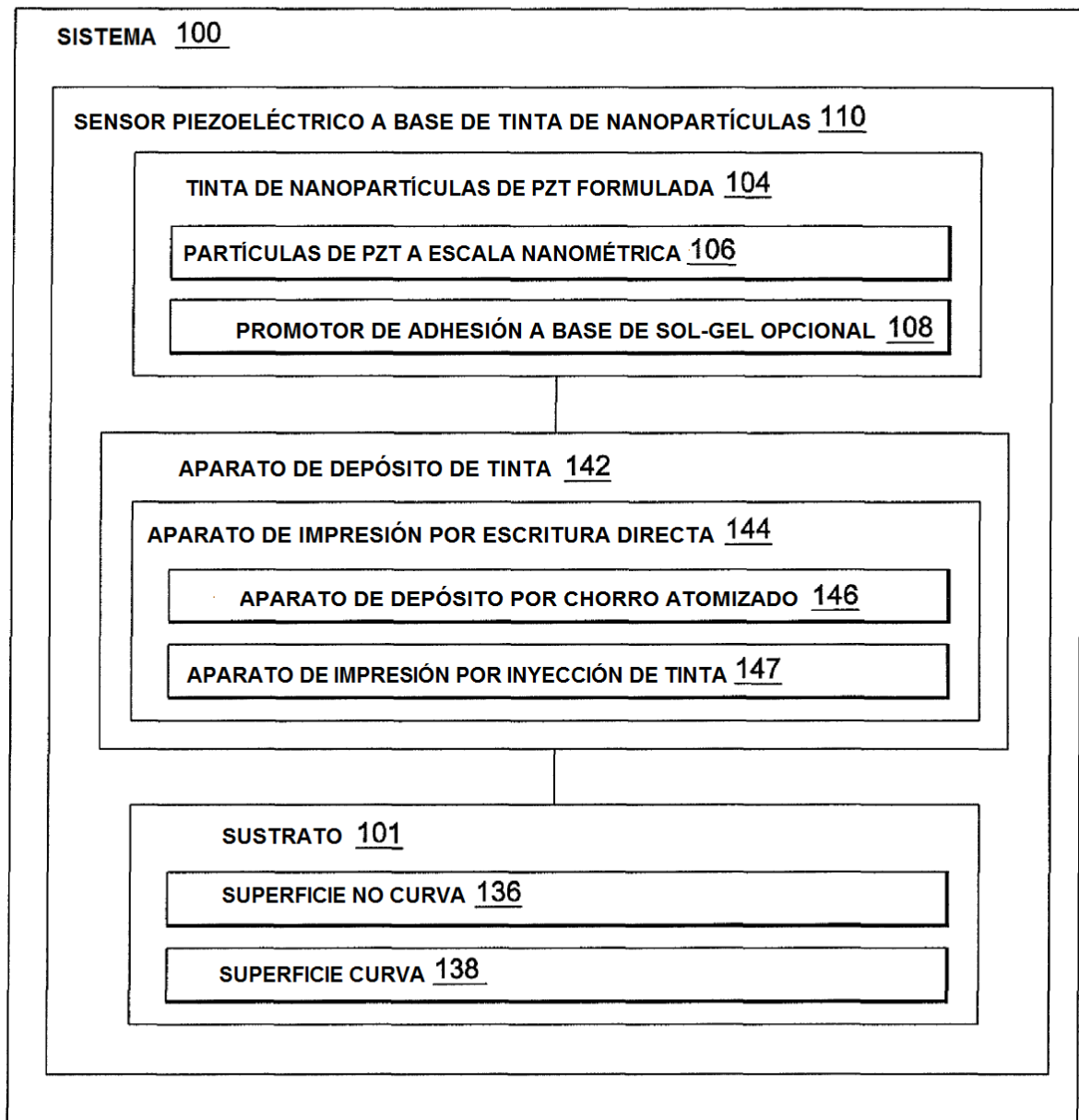


FIG. 5

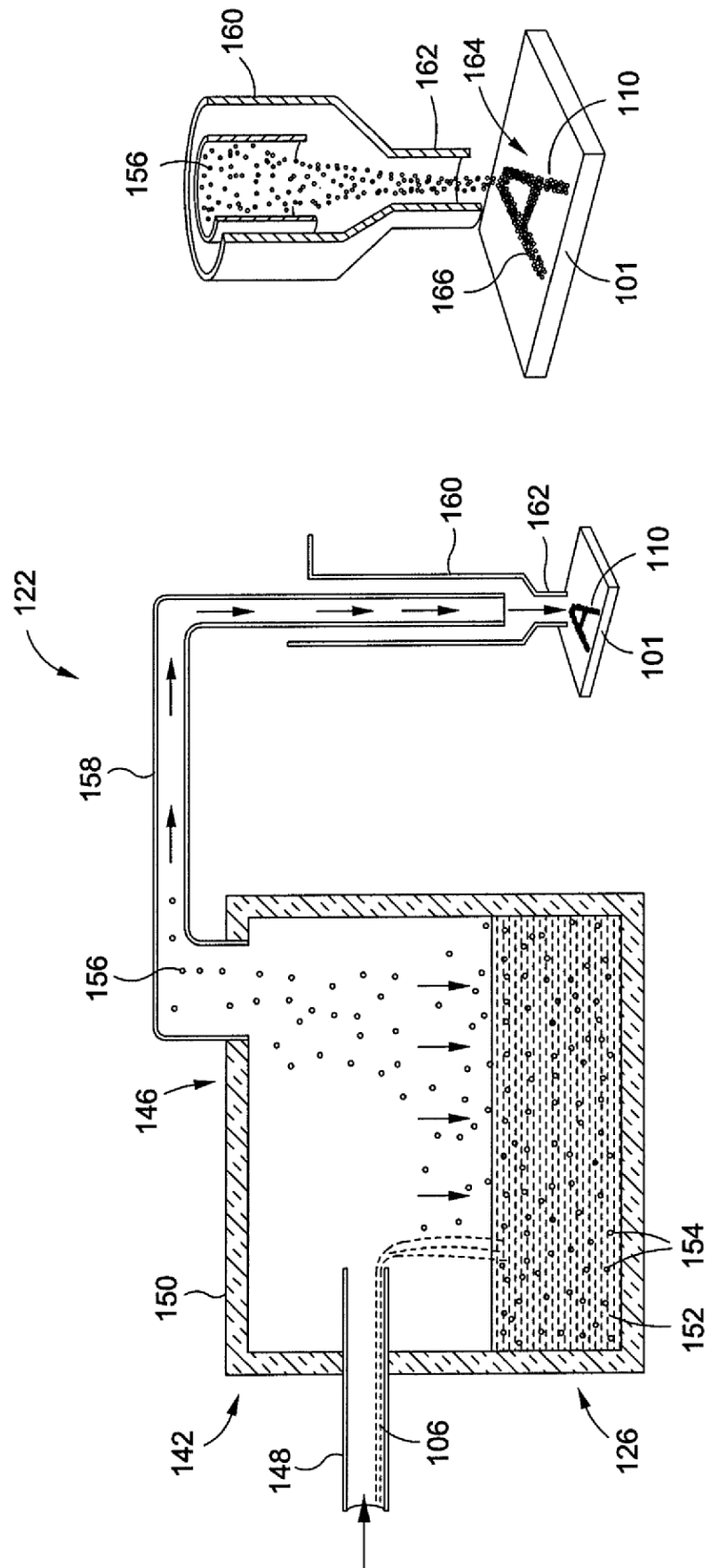


FIG. 6B

FIG. 6A

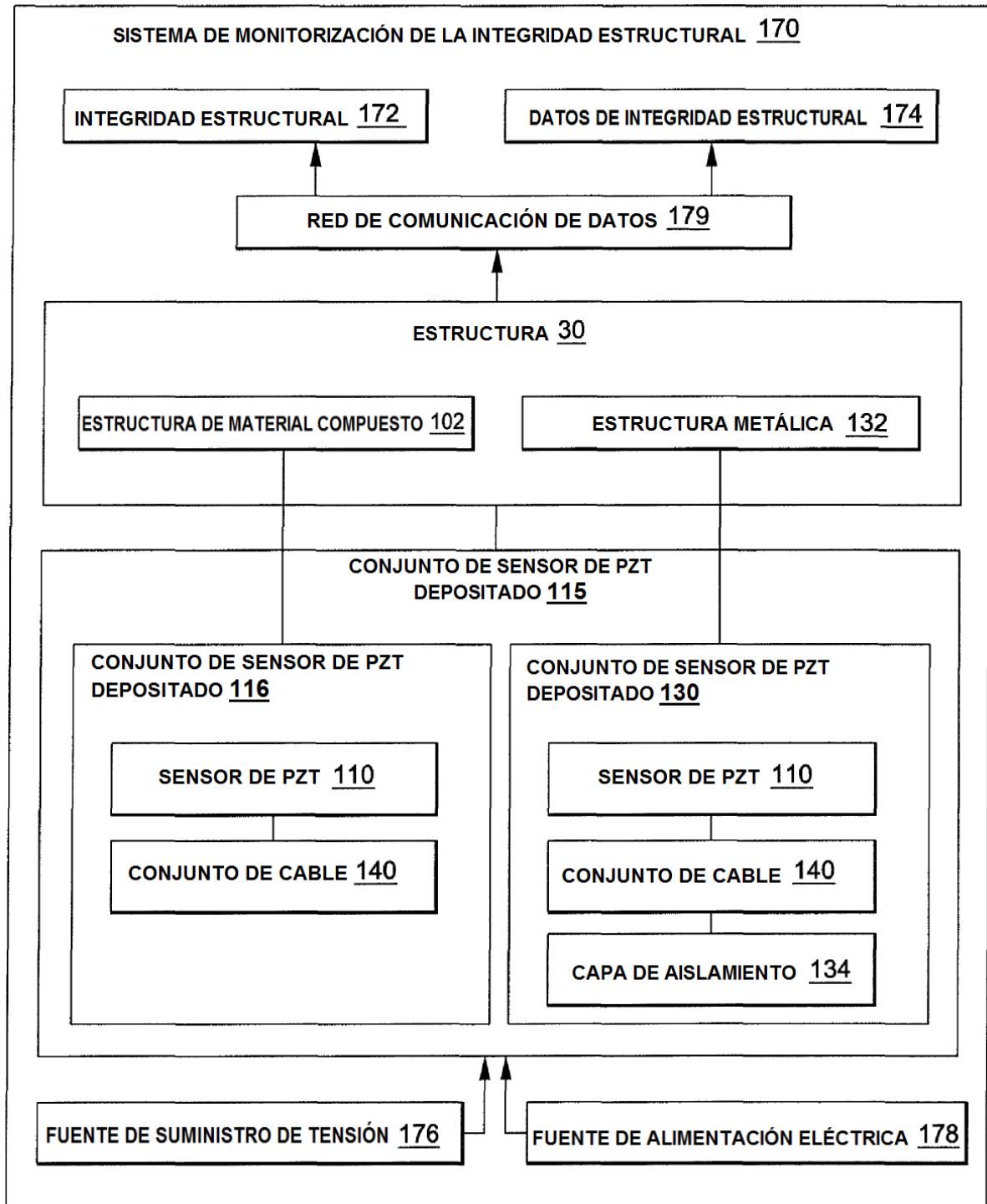


FIG. 7

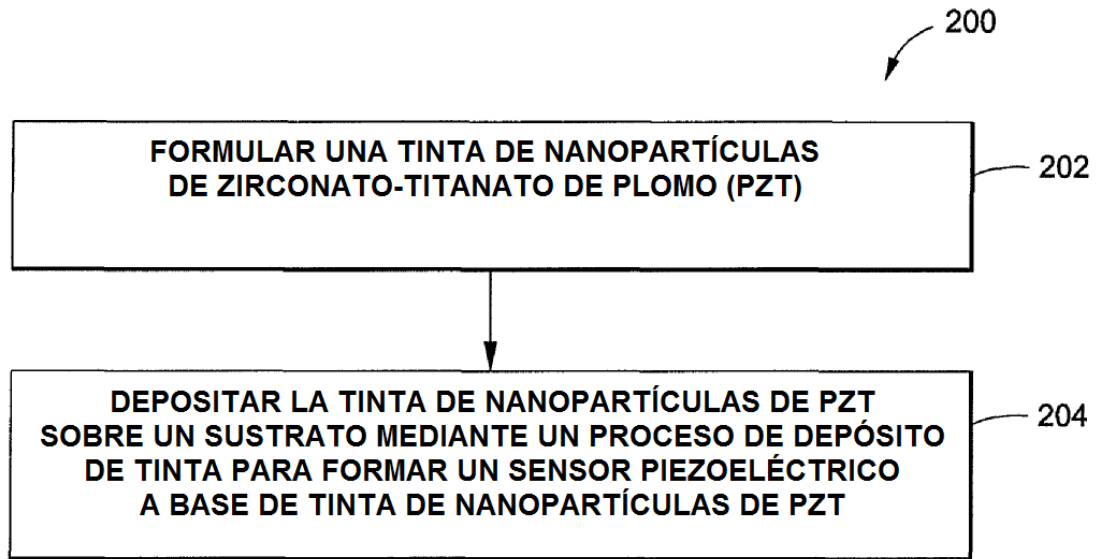


FIG. 8

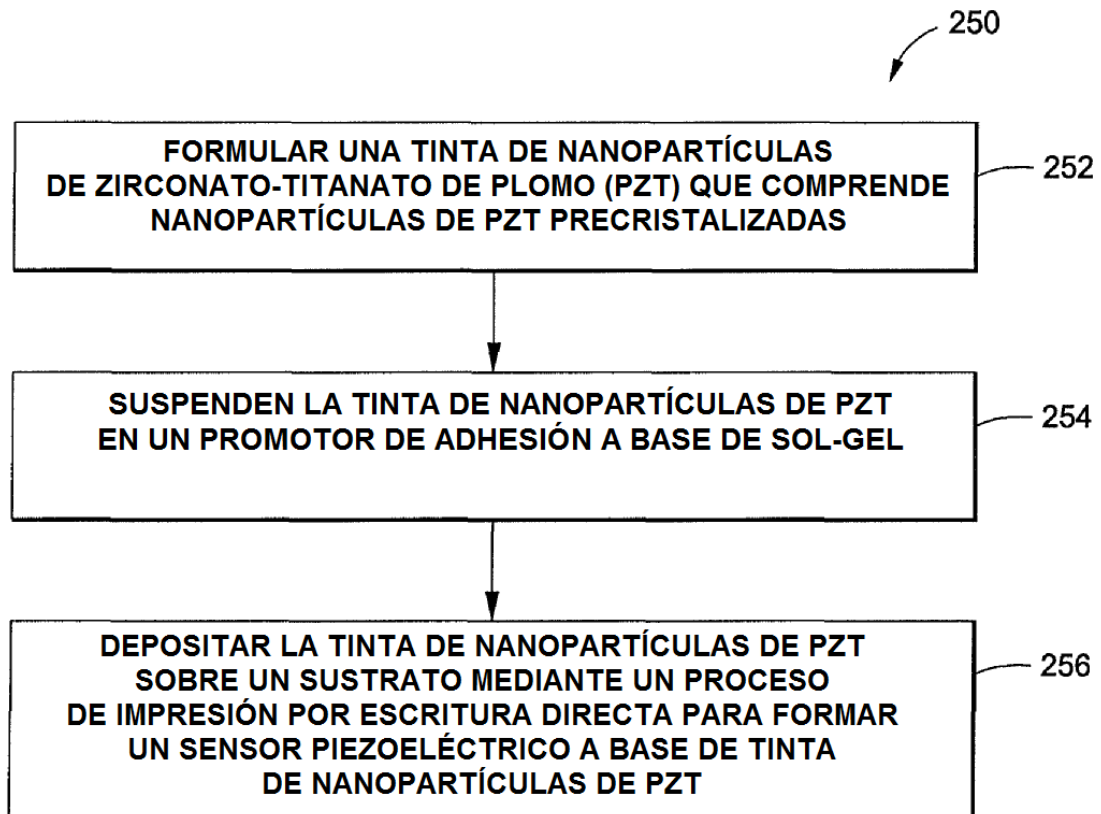


FIG. 9

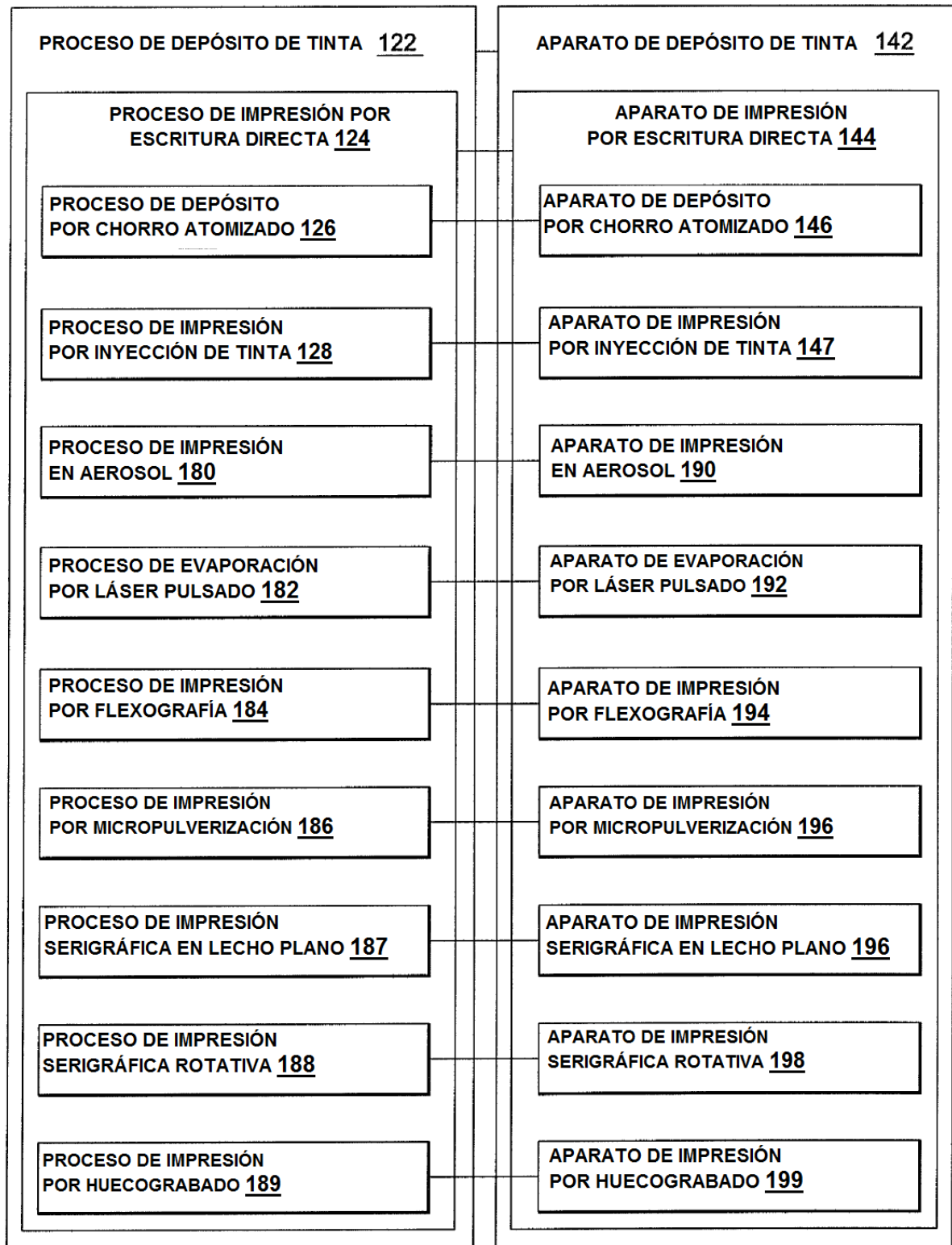


FIG. 10