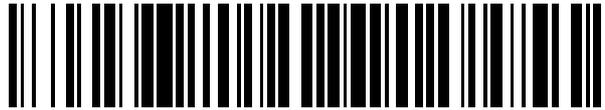


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 542 231**

51 Int. Cl.:

**B03C 1/32**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.02.2010 E 10708488 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.06.2015 EP 2396118**

54 Título: **Manipulación de partículas magnéticas en conductos mediante la propagación de paredes de dominio**

30 Prioridad:

**12.02.2009 IT VI20090026**

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

**03.08.2015**

73 Titular/es:

**ASOCIACIÓN-CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
COOPERATIVA EN NANOCIENCIAS - CIC  
NANOGUNE (100.0%)  
Investigación Cooperativa en Nanociencias  
Avenida Tolosa 76  
20018 San Sebastián-Donostia, ES**

72 Inventor/es:

**BERTACCO, RICCARDO;  
CANTONI, MATTEO;  
DONOLATO, MARCO;  
GOBBI, MARCO;  
PETTI, DANIELA;  
VAVASSORI, PAOLO y  
BRIVIO, STEFANO**

74 Agente/Representante:

**MILTENYI, Peter**

**ES 2 542 231 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

Manipulación de partículas magnéticas en conductos mediante la propagación de paredes de dominio

## 5 CAMPO DE LA PRESENTE INVENCION

La presente invención se refiere al campo de la manipulación de partículas magnéticas en suspensión. En particular, la presente invención se refiere al campo de la manipulación de partículas magnéticas por medio de la propagación de paredes de dominio. Todavía más concretamente, la presente invención se refiere al campo de la manipulación de partículas magnéticas por medio de la creación, propagación y destrucción de paredes de dominio dentro de conductos de material magnético correctamente estructurados.

## ANTECEDENTES

15 La manipulación controlada de partículas es uno de los principales objetivos de las nanotecnologías. La capacidad de conducir nanopartículas en suspensión con precisión nanométrica juega un papel principal en varios campos de la ciencia y la ingeniería, tales como la química, la física, la ciencia de los materiales, la biotecnología y la medicina. En particular, en el sector químico, biológico y médico, la posibilidad de realizar dispositivos miniaturizados a escala nanométrica y capaces de realizar análisis químicos y biológicos o de síntesis sobre pequeñas cantidades de muestra introducidas por medio de microfluidos es de interés relevante. En general, este tipo de enfoque se define "lab on a chip", que sugiere la ejecución de operaciones típicas de cualquier laboratorio científico a nivel microscópico, es decir, en un "laboratorio" que tiene las dimensiones de un microchip. Dentro de este sector, uno de los campos más prometedores se refiere a la manipulación controlada de partículas magnéticas en solución. Las partículas magnéticas, de hecho, desempeñan un papel particularmente importante para su empleo en aplicaciones de diagnóstico bioquímicas y médicas. Funcionalizando adecuadamente sus superficies, de hecho, es posible emplear partículas magnéticas como vehículos para el transporte o la separación de entidades biológicas gracias a la acción de las fuerzas magnéticas sobre las partículas o como marcadores moleculares para una detección basada en las propiedades magnéticas de las propias partículas.

30 Varios sistemas "lab on a chip" para la manipulación de partículas magnéticas se basan en complejos dispositivos que pueden comprender varios tipos de micro-válvulas y micro-bombas para la realización de estructuras para el transporte controlado de fluidos que comprenden partículas magnéticas en solución. Estos sistemas, además de ser complejos, y por lo tanto, costosos de diseñar y realizar, requieren también el empleo de aparatos externos que aumentan significativamente las dimensiones globales del sistema.

35 Por el contrario, existe la posibilidad de mover directamente las partículas magnéticas de manera independiente a partir del movimiento de los fluidos dentro de los cuales se encuentran dispersadas.

Uno de los enfoques empleados para la manipulación de partículas magnéticas se basa en las interacciones entre dichas partículas y un sustrato magnético, en particular un sustrato magnetizado.

45 La idea de base de este enfoque es operar en la configuración magnética del sustrato modificándolo de modo que las partículas magnéticas reaccionen a esta modificación de manera controlada y predecible, aunque la capacidad de control y la previsibilidad conseguidas hasta ahora son muy limitadas. En general, sin embargo, los sistemas conocidos en la literatura se basan en dispositivos magnéticos basados en imanes permanentes macroscópicos o accionados por campos magnéticos externos y por elevadas corrientes eléctricas que deben ser conducidas por circuitos eléctricos apropiados que generalmente son difíciles de diseñar y realizar. Los sistemas basados en el paso de corrientes eléctricas son difíciles de emplear en entornos de reacción húmedos, en particular en presencia de soluciones, y en consecuencia requieren un cuidado exhaustivo con el fin de aislar los contactos eléctricos de las soluciones de partículas magnéticas.

Además, debido a la generación de fenómenos de corrientes de Foucault y, en general, al ruido electrónico, los sistemas basados en el paso de corriente eléctrica no permiten la miniaturización de los dispositivos y la creación de sistemas con una alta densidad de dispositivos y un alto nivel de paralelismo.

55 Uno de los problemas típicos relativos a los sistemas para la manipulación controlada de partículas magnéticas se refiere, además, a la resolución espacial que puede conseguirse. En particular, los sistemas conocidos en la literatura permiten controlar el movimiento de partículas magnéticas con una precisión del orden de algunas micras, aunque sería deseable que pudieran lograr un control mucho más preciso, idealmente en el intervalo de nanómetros.

60 Otro problema referente a los dispositivos tal como es conocido en la literatura se refiere a la dificultad de manipular con precisión partículas magnéticas individuales. En general, los dispositivos conocidos en la literatura permiten el movimiento de grupos de partículas, y éstos no permiten gestionar el movimiento de partículas individuales.

- En L. E. Helseth, T.M. Fischer, T.H. Johansen: "*Paramagnetic Beads surfing on domain walls*", Phys. Rev. 67, 042401 (2003), los autores describen una modalidad de movimiento de partículas magnéticas impulsadas por una amplia pared de dominio Bloch sobre una superficie de una película de granate de gadolinio. Debido a la geometría del sistema, un número muy elevado y no controlado de partículas magnéticas se desplaza siguiendo el desplazamiento de la pared de dominio. En consecuencia, el sistema descrito en L. E. Helseth, T.M. Fischer, T.H. Johansen: "*Paramagnetic Beads Surfing on domain walls*", Phys. Rev. 67, 042401 (2003) es inadecuado para el desplazamiento controlado de partículas magnéticas individuales.
- 10 En L. E. Helseth, T.M. Fischer, T.H. Johansen: "*Domain wall tip for manipulation of magnetic particles*", Phys. Rev. Letters, 91, 208302 (2003), se emplea una pared de dominio en forma de punta en una superficie de una película magnética. Al desplazar esta pared de dominio en forma de punta por medio de campos externos, las partículas superparamagnéticas en interacción con el elevado campo que sale de la punta de la pared de dominio son desplazadas. El mecanismo para la creación del dominio magnético en forma de punta descrito en L. E. Helseth, T.M. Fischer, T.H. Johansen: "*Domain wall tip for manipulation of magnetic particles*", Phys. Rev. Letters, 91, 208302 (2003) es extremadamente complejo y la posición exacta donde se forma la punta es difícil de controlar. Por otra parte, los desplazamientos obtenidos son de hasta 100 micras con una precisión del orden de una micra.

En Conroy, Zabow Moreland, Koretsky: "*Controlled Transport of magnetic particles using soft magnetic patterns*", Appl. Phys. Lett. 93, 203901 (2008), y en Gunnarsson, Roy y otros, "*Programmable motion and separation of single magnetic particles on patterned magnetic surfaces*" Adv. Mater. 17, 1730 (2005), se describe el desplazamiento de partículas magnéticas impulsadas por la acción combinada de campos magnéticos giratorios y estructuras ferromagnéticas. Se dirige un campo magnético externo sobre varios puntos de las estructuras magnéticas litografiadas durante el giro del campo y la forma y disposición especial de las estructuras permiten que las partículas magnéticas sigan estos puntos en un movimiento colectivo de avance a lo largo de una dirección particular. Sin embargo, la escala en la que se consideran los desplazamientos está en el intervalo de algunas micras o algunas decenas de micras a baja resolución. Por otra parte, no es posible obtener un control preciso sobre el movimiento de las partículas, ni en su número, durante el desplazamiento de las mismas. Finalmente, los sistemas descritos en estos documentos implican la presencia de campos magnéticos externos permanentes.

30 En la solicitud de patente americana nº 2008/0080222 A1 se describe un sistema para el desplazamiento digital de partículas paramagnéticas saltando de una pared de dominio a otra en una película continua de un granate magnético. Se muestran dos configuraciones diferentes: la creación de dominios de franjas alternos con paredes de dominios Bloch y la creación de burbujas magnéticas. El desplazamiento de las partículas magnéticas se activa por medio de campos magnéticos externos que varían la disposición de las paredes de dominio o de las burbujas magnéticas con el fin de crear una dirección de desplazamiento preferente. Los sistemas descritos en la solicitud de patente americana nº 2008/0080222 A1 permiten, en consecuencia, la realización del desplazamiento de grupos de partículas y no permiten el control sobre el movimiento de las partículas individuales. También en este caso, la disposición exacta de las paredes de dominio no es controlable.

#### 40 ÁMBITO DE LA INVENCION

A la luz de los problemas e inconvenientes relativos a la manipulación controlada de partículas magnéticas que se ha mencionado anteriormente, el ámbito de la presente invención es disponer un sistema y un procedimiento para la manipulación de partículas magnéticas que permitan superar dichos problemas.

En particular, el ámbito de la presente invención es disponer un sistema y un procedimiento para la manipulación de partículas magnéticas en suspensión que permita la manipulación controlada de cualquier número bien definido de partículas magnéticas, incluso de una sola. Además, el ámbito de la presente invención es disponer un sistema y un procedimiento para la manipulación de partículas magnéticas que permitan obtener un control de la posición de las partículas magnéticas individuales con una precisión del orden de 10-100 nanómetros. Además, el ámbito de la presente invención es disponer un sistema fácil de diseñar y de realizar y fácil de emplearse en una plataforma miniaturizada. Otro ámbito de la presente invención es disponer un sistema y un procedimiento que permita la manipulación de varias moléculas enlazadas a partículas magnéticas para promover interacciones y reacciones selectivas entre las moléculas. Otro ámbito de la presente invención es disponer un sistema y un procedimiento en el que la manipulación controlada de las partículas magnéticas no requiera la presencia de campos externos permanentes. Otro ámbito de la presente invención es disponer un sistema que permita la manipulación controlada de partículas magnéticas en solución sin el empleo de elementos mecánicos tales como bombas, jeringas y válvulas.

#### 60 DESCRIPCION

La presente invención se refiere a un sistema y un procedimiento para la manipulación controlada de partículas magnéticas. La presente invención se basa en la idea general de combinar el movimiento extremadamente preciso y

controlado de paredes de dominio magnético dentro de conductos magnéticos adecuadamente estructurados con la interacción efectiva que se establece entre dichas paredes de dominio magnético y partículas magnéticas individuales.

5 De acuerdo con una realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un sustrato, un conducto magnético adecuado para la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio y una solución de partículas magnéticas situada en las proximidades de la superficie de dicho conducto magnético, en el que dicho conducto magnético comprende una tira de material magnético de manera que dichas partículas magnéticas pueden atraparse, moverse  
10 y liberarse a lo largo de dicha tira como consecuencia de la creación, el movimiento y la destrucción de dichas paredes de dominio a lo largo de dicha tira y de la interacción entre dichas paredes de dominio y dichas partículas magnéticas, en el que la tira comprende una pluralidad de segmentos adyacentes en los que la longitud de dichos segmentos es sustancialmente mayor que las dimensiones transversales (anchura y grosor) de dichos segmentos de manera que las paredes de dominio quedan situadas transversalmente respecto a dicha tira y mantienen su  
15 integridad durante el movimiento tal como se define en la reivindicación 1.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende una tira de material magnético que comprende una pluralidad de segmentos adyacentes en el que dicha pluralidad de segmentos adyacentes comprenden una pluralidad de  
20 segmentos rectilíneos de manera que el desplazamiento de partículas magnéticas a lo largo de los segmentos rectilíneos es un desplazamiento digital.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende una tira de material magnético que comprende una pluralidad de  
25 segmentos adyacentes en el que dicha pluralidad de segmentos adyacentes comprende una pluralidad de segmentos curvos de manera que el desplazamiento de las partículas magnéticas a lo largo del segmento curvo es un desplazamiento continuo.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada  
30 de partículas magnéticas que comprende una tira de material magnético que comprende una pluralidad de segmentos adyacentes en el que dicha pluralidad de segmentos adyacentes comprende una multiplicidad de segmentos rectilíneos de modo que el desplazamiento de las partículas magnéticas a lo largo de los segmentos rectilíneos es un desplazamiento digital, y una multiplicidad de segmentos curvos de manera que el desplazamiento de las partículas magnéticas a lo largo de los segmentos curvos es un desplazamiento continuo.  
35

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende un anillo cuadrado de material magnético.

40 De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende un inyector para la inyección de paredes de dominio, una pluralidad de segmentos rectilíneos adyacentes que forman una estructura en zigzag para el desplazamiento digital controlado de dichas paredes de dominio y una terminación para la destrucción de dichas paredes de dominio.  
45

De acuerdo con otra realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende una estructura en zigzag modificada que comprende pares de segmentos inclinados colocados de manera que forman un ángulo  $2\alpha$  alternados con segmentos horizontales para el desplazamiento digital controlado de dichas paredes de  
50 dominio.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende un anillo circular de material magnético de manera que el desplazamiento de las paredes de dominio a lo largo del anillo circular es un movimiento  
55 controlado continuo.

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende un inyector para la inyección de paredes de dominio, una estructura curva para el movimiento controlado y continuo de dichas paredes de dominio y  
60 una terminación para la destrucción de dichas paredes de dominio.

De acuerdo con una realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un conducto magnético que comprende por lo menos una bifurcación que divide los citados conductos magnéticos en dos o más ramificaciones diferentes.

5 De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un dispositivo para la manipulación controlada de las partículas magnéticas que comprende por lo menos un sensor para la detección de paredes de dominio y/o partículas magnéticas.

De acuerdo con una realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un aparato para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende un dispositivo para la manipulación controlada de partículas magnéticas de acuerdo con la presente invención y medios para la generación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio de un conducto magnético.

10

De acuerdo con una realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un procedimiento para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende las siguientes etapas: deposición de una solución de partículas magnéticas en las proximidades de la superficie de un conducto magnético adecuada para la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio y que comprende una tira de material magnético; atrapamiento de por lo menos una de dichas partículas magnéticas a lo largo de la citada tira por medio de la creación de por lo menos una pared de dominio lo largo de dicha tira, tal como se define en la reivindicación 19.

15

De acuerdo con una realización particularmente ventajosa de la presente invención, se dispone un procedimiento para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende la etapa de mover dicha partícula atrapada por medio del movimiento controlado de por lo menos una pared de dominio a lo largo de la tira de material magnético.

20

De acuerdo con una realización particular de la presente invención, se dispone un procedimiento para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende la etapa de liberar dicha partícula magnética atrapada por medio de la destrucción de por lo menos una pared de dominio a lo largo de la tira de material magnético.

25

De acuerdo con otra realización de la presente invención, se dispone un procedimiento para la manipulación controlada de partículas magnéticas que comprende la etapa de funcionalización de por lo menos una partícula magnética por medio de sustancias adhesivas o de grupos reactivos de superficie de manera que dicha partícula magnética puede enlazarse a por lo menos una molécula no magnética.

30

#### 35 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La figura 1a muestra esquemáticamente un anillo de forma cuadrada realizado en un material magnético dentro del cual están presentes dos paredes de dominio.

40

La figura 1b muestra esquemáticamente el principio en la base de la creación de paredes de dominio en un sistema similar al que se muestra en la figura 1a.

La figura 1c muestra esquemáticamente el principio en la base del movimiento de paredes de dominio en un sistema similar a la que se muestra en la figura 1a.

45

La figura 2 muestra un diagrama vectorial de la fuerza que actúa sobre una nanoesfera superparamagnética situada en un plano por encima de una pared de dominio.

Las figuras 3a y 3b muestran esquemáticamente el principio en la base del movimiento de las partículas superparamagnéticas por medio del movimiento de paredes magnéticas en un sistema similar al que se muestra en la figura 1 de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

50

Las figuras 3c y 3d muestran dos imágenes experimentales tomadas mediante un microscopio óptico que muestra el desplazamiento de una nanoesfera superparamagnética mediante el movimiento de las paredes magnéticas en dos anillos de forma cuadrada real similares al mostrado en la figura 1a.

55

La figura 4a muestra un conducto magnético que tiene una estructura en zigzag de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

60

La figura 4b muestra la creación de una pared de dominio en el conducto mostrado en la figura 4a con una nanoesfera superparamagnética atrapada por dicha pared de dominio.

Las figuras 4c y 4d muestran la propagación de una pared de dominio y de la nanoesfera superparamagnética atrapada en el conducto mostrado en la figura 4a.

La figura 5 muestra el principio en la base de la captura a y la liberación b de partículas superparamagnéticas por medio de un conducto que tiene una estructura en zigzag similar a la mostrada en la figura 4.

La figura 6 muestra esquemáticamente un conducto que tiene una estructura en zigzag modificada de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

10 La figura 7 muestra esquemáticamente la creación y la propagación de una primera pared de dominio (pared de dominio HH) en un conducto similar al mostrado en la figura 6.

La figura 8 muestra esquemáticamente la creación y la propagación de una segunda pared de dominio (pared de dominio TT) en el sistema mostrado en la figura 7.

15 La figura 9 muestra esquemáticamente la estructura de un conducto magnético de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

La figura 10 muestra esquemáticamente la componente a lo largo de las direcciones X e Y de los campos magnéticos utilizados para la creación y la propagación de las paredes de dominio HH y TT en un conducto magnético, tal como se muestra en la figura 9. Las intensidades de campo magnético se expresan en unidades Oe. (1 Oe  $\cong$  79,6 A/m).

La figura 11 muestra esquemáticamente la creación y propagación de paredes de dominio HH y TT en un conducto que tiene forma de anillo circular de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

La figura 12 muestra esquemáticamente la creación, la propagación y la destrucción de una pared de dominio HH en un conducto que tiene forma curva de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

30 La figura 13 muestra un conducto magnético con una bifurcación de acuerdo con una realización particular de la presente invención.

En las figuras adjuntas, los elementos idénticos o correspondientes se identifican con los mismos números de referencia.

### 35 DESCRIPCIÓN DETALLADA

A continuación, la presente invención se describe con referencia a realizaciones particulares, tal como se muestra en los dibujos adjuntos. Sin embargo la presente invención no está limitada a las realizaciones descritas en la siguiente descripción detallada y mostradas en las figuras, sino que estas realizaciones ejemplifican diversos aspectos de la presente invención, cuyo alcance se define por las reivindicaciones.

Otras modificaciones y variaciones de la presente invención serán claras para el experto en la técnica. La presente invención tiene que considerarse como que comprende todas las citadas modificaciones y/o variaciones de la presente invención, cuyo alcance está definido por las reivindicaciones.

Una pared de dominio es una región de interfaz entre dos dominios magnéticos, es decir, entre dos regiones de un material con diferentes magnetizaciones uniformes. Con referencia a una estructura plana sobre un sustrato, es posible definir paredes de dominio Bloch y paredes de dominio Neel según si la magnetización presenta o no un componente fuera del plano. A continuación, se hará referencia a estructuras con paredes de Neel, pero el concepto de la presente invención puede extenderse al caso de paredes de Bloch.

En particular, el concepto de la presente invención aprovecha las paredes de dominio en tiras de material ferromagnético, donde la anisotropía de forma restringe la magnetización para que sea paralela al eje de la tira. En dicha tira, una pared de dominio es una interfaz móvil que separa zonas regiones de magnetización alineadas opuestas. Debido al confinamiento geométrico, la estructura giratoria de una pared de dominio puede controlarse a través de las dimensiones laterales y grosor de la película de la tira y su longitud viene determinada por la anchura de la tira. Por esta razón, dichas paredes de dominio se denominan paredes de dominio restringidas y en condiciones particulares, que son las implementadas en el concepto de la presente invención, estas paredes de dominio pueden manipularse dentro de la tira sin cambio de la estructura giratoria de la propia pared de dominio. Esta propiedad es una peculiaridad de la geometría de la tira considerada en el concepto de la presente invención y difiere sustancialmente de los casos anteriores en los que las paredes de dominio en sistemas bidimensionales y

tridimensionales extendidos (películas y multicapas), donde ni su número ni su longitud y manipulación puede controlarse, se han utilizado tanto para fines tanto diferentes como similares.

La figura 1a muestra esquemáticamente dos paredes de dominio en una estructura de anillo 100 que tiene una forma cuadrada. Los lados verticales del anillo 100 que se ilustra en la figura 1a muestran una magnetización uniforme dirigida a lo largo de la dirección positiva del eje y del marco de referencia x-y mostrado en la figura, mientras que los lados horizontales muestran una magnetización uniforme dirigida a lo largo de la dirección negativa del eje x. De esta manera, dos paredes de dominio HH y TT son visibles en la esquina superior izquierda y en la esquina inferior derecha, respectivamente, del anillo cuadrado 100. La pared de dominio en la esquina superior izquierda del anillo cuadrado se indica por HH ("Head to Head") ya que consiste en una interfaz entre dos dominios magnéticos cuyas magnetizaciones están ambas dirigidas hacia la propia pared de dominio. Por el contrario, la pared de dominio en la esquina inferior derecha se indica por TT ("Tail to Tail") ya que consiste de una interfaz entre dos dominios magnéticos cuyas magnetizaciones van dirigidas ambas hacia fuera respecto a la propia pared de dominio.

La figura 1b muestra esquemáticamente los principios en la base de la creación de dos paredes de dominio HH, TT en una estructura de anillo cuadrado 100, tal como se muestra en la figura 1a. Típicamente, una estructura de este tipo puede estar realizada con materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente. Ejemplos no exhaustivos de dichos materiales son hierro, níquel, cobalto, *permalloy* (aleación de níquel-hierro), óxidos magnéticos, manganitas, aleaciones Heussler, magnetita. Las estructuras mostradas en la presente descripción se han obtenido con *permalloy*, pero esto no tiene que entenderse como limitativo para el campo de aplicación de la presente invención. Aplicando a la estructura de anillo cuadrado 100 un campo magnético externo  $H_0$  dirigido a lo largo de la diagonal del cuadrado que conecta el vértice inferior derecho con el vértice superior izquierdo del cuadrado, se induce una magnetización uniforme en los lados del cuadrado, tal como se describe en la figura 1a. En particular, el campo  $H_0$  tiene una componente negativa  $H_{0x}$  y una componente positiva  $H_{0y}$ . La componente  $H_{0x}$  determina la magnetización uniforme en los lados horizontales del anillo cuadrado 100 mientras que la componente  $H_{0y}$  determina la magnetización uniforme en los lados verticales de dicho anillo. La aplicación del campo externo  $H_0$  tiene como resultado, por lo tanto, la creación de las paredes de dominio HH y TT en el vértice superior izquierdo y en el vértice inferior derecho, respectivamente, del anillo cuadrado 100. Dado que la magnetización de los lados del anillo 100, una vez adquirida, es estable incluso en ausencia del campo externo  $H_0$ , la configuración mostrada en la figura 1b permanece inalterada incluso al eliminar dicho campo externo, y las paredes de dominio HH y TT son estables.

Una de las propiedades interesantes de las paredes de dominio en estructuras similares al anillo cuadrado que se muestra en la figura 1a es la posibilidad de mover dichas paredes de manera controlada dentro de la propia estructura (véase por ejemplo P. Vavassori, M. Grimsditch, V. Novosad, V. Metlushko y B. Ilic, "Metastable states during magnetization reversal in square permalloy rings" Phys. Rev. B 67, 134429 (2003)). En la figura 1c se muestran los principios en la base del movimiento de paredes de dominio en una estructura de anillo cuadrado 100 tal como se muestra en la figura 1a. Una vez que se han creado las paredes de dominio HH y TT en el vértice superior izquierdo y en el vértice inferior derecho del anillo, respectivamente, tal como se muestra respecto a la figura 1b, dichas paredes de dominio son estables y permanecen sin cambios incluso si se elimina el campo  $H_0$  por medio del cual se han creado. Aplicando ahora un campo externo  $H_{ext}$  dirigido a lo largo del eje x en la dirección positiva y suficientemente intenso para invertir la magnetización uniforme de los lados horizontales del anillo cuadrado 100, se produce la configuración mostrada en la figura 1c. La magnetización de los lados verticales del anillo se mantiene sin cambios, dirigida hacia la dirección positiva del eje y ya que el campo  $H_{ext}$  tiene una componente nula en esta dirección. Por el contrario, respecto a la acción del campo  $H_{ext}$ , los lados horizontales del anillo muestran una magnetización uniforme dirigida a lo largo de la dirección positiva del eje x. En consecuencia, la pared de dominio HH queda situada ahora en el vértice superior derecho del anillo 100, mientras que la pared de dominio TT queda situada en el vértice inferior izquierdo. Básicamente, eliminando el campo  $H_0$  y aplicando el campo  $H_{ext}$ , se realiza el movimiento de las paredes de dominio en el interior del anillo 100.

Se sabe por la literatura (P. Vavassori, V. Metlushko, B. Ilic, M. Gobbi, M. Donolato, M. Cantoni, y R. Bertacco, "Domain wall displacement in Pysquare ring for single nanometric magnetic bead detection", Appl. Phys. Lett. 93, 203502, 2008) y de la solicitud de patente italiana TO2008A00314 que las paredes de dominio, tales como las que se muestran en las figuras 1a, 1b y 1c se caracterizan por la propiedad de atraer partículas magnéticas.

Esto es debido al hecho de que las paredes de dominio son estructuras geométricas confinadas en un espacio estrecho (típicamente del orden de 10 nanómetros a 100 nanómetros) y producen campos magnéticos intensos (hasta varios kOe; (1 Oe  $\cong$  79,6 A/m) que, a su vez, están localizados. Por lo tanto, el elevado gradiente del campo producido en las proximidades de una pared de dominio genera una fuerza de atracción capaz de atrapar partículas magnéticas.

Desde el punto de vista energético, una pared de dominio crea un pozo de potencial capaz de definir una configuración de enlace estable entre la partícula y la propia pared. Este efecto se observa tanto para partículas

ferromagnéticas, es decir, partículas con momento dipolar magnético estable a temperatura ambiente, como para partículas superparamagnéticas, es decir, partículas con un momento dipolar magnético total nulo a temperatura ambiente pero capaz de asumir un alto momento dipolar magnético (inducido) en presencia de un campo magnético externo. En el caso de partículas ferromagnéticas, el elevado gradiente del campo magnético generado por una pared de dominio orienta y atrae el dipolo magnético de las partículas. En el caso de partículas superparamagnéticas, el elevado gradiente del campo magnético generado por una pared de dominio induce un momento dipolar magnético en las partículas y, en consecuencia, las atrae. En general, por lo tanto, la presencia de paredes de dominio crea una acción de captura y focalización efectiva sobre nanopartículas o micropartículas. La fuerza de atracción creada por una pared de dominio sobre una partícula superparamagnética viene dada por la expresión:

$$F = \mu_0 (\mu \cdot \nabla) H,$$

donde  $\mu = \mu(H)h$ , donde  $\mu(H)$  es la curva de magnetización de la partícula como función de la intensidad del campo magnético  $H$  al cual está sometida la partícula, y  $h$  es un vector unitario paralelo al campo magnético  $H$ .

La figura 2 muestra esquemáticamente un diagrama vectorial de la fuerza que actúa sobre una nanoesfera superparamagnética cuyo centro se encuentra en un plano  $\gamma$  situado por encima de una pared de dominio HH. La pared de dominio se encuentra situada en el plano  $\delta$  paralelo al plano  $\gamma$  y a una distancia  $d$  del mismo. El diagrama vectorial mostrado en la figura 2 muestra claramente que la nanopartícula es atraída hacia la pared de dominio en cuya proximidad la fuerza de atracción es intensa.

Para una *permalloy* que tenga un grosor de 30 nm y con los segmentos la esquina 110 definiendo una anchura correspondiente a 200 nm, se encontró que la fuerza que actúa sobre una partícula *nanomag*<sup>®</sup>-D que tiene un diámetro de 130 nm situada a una distancia  $d$  igual a 100 nm de la superficie de la *permalloy* y centrada en la pared de dominio tiene un valor de aproximadamente 10 pN.

Aprovechando la propiedad de mover de manera controlada paredes de dominio por medio de la aplicación de campos magnéticos externos y la propiedad de atracción que ejercen las paredes de dominio sobre las partículas magnéticas, es posible manipular dichas partículas en suspensión con precisión.

Las figuras 3a y 3b muestran esquemáticamente el principio en la base del movimiento de las partículas superparamagnéticas por medio del movimiento de paredes de dominio en un anillo cuadrado 100 tal como el que se muestra en la figura 1a.

El anillo cuadrado 100 está provisto de dos paredes de dominio HH y TT en el vértice superior izquierdo y en el vértice inferior derecho, respectivamente, por medio de un campo externo  $H_0$  de manera similar a como se describe respecto a la figura 1b. Después se dispersa una solución que comprende partículas magnéticas en las proximidades del anillo 100. Como consecuencia de la atracción ejercida por las paredes de dominio HH y TT sobre las partículas magnéticas tal como se ha descrito anteriormente, algunas de las partículas quedan atrapadas en las proximidades de dichas paredes de dominio. En particular, en la figura 3a, la partícula A es atrapada en las proximidades de la pared de dominio HH en el vértice superior izquierdo del anillo 100. Es posible proceder ahora de manera similar a como se ha descrito respecto a la figura 1c para mover la pared de dominio HH en el vértice derecho superior del anillo 100 y la pared de dominio TT en el vértice inferior izquierdo del anillo de 100. Tal como se muestra en la figura 3b, la partícula A atrapada en las proximidades de la pared de dominio HH sigue el movimiento de dicha pared de dominio y se mueve de manera controlada respecto a su posición de partida.

Las figuras 3c y 3d muestran los resultados experimentales obtenidos por medio de un microscopio óptico en un grupo de sistemas similares al que se muestra esquemáticamente en la figura 1a.

Los anillos cuadrados que se muestran en las figuras 3c y 3d están realizados en *permalloy* depositada por medio de técnicas litográficas sobre un sustrato de  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . El grosor de la capa de *permalloy* es de 30 nanómetros. Los anillos tienen unas dimensiones de  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$  y la anchura de cada segmento del cuadrado es igual a 200 nm. Los anillos están cubiertos por una capa protectora de  $\text{SiO}_2$  con un grosor de 50 nanómetros. Además de la aplicación de un campo externo  $H_0$  que tiene una intensidad de 79,6 KA/m (1000 Oe) dirigido a lo largo de la diagonal de la imagen que conecta el vértice derecho inferior con el vértice superior izquierdo, cada uno de los anillos adopta una configuración tal como la que se muestra esquemáticamente en la figura 1b con las paredes de dominio HH y TT en los vértices en el vértice superior izquierdo y en el vértice inferior derecho, respectivamente, de cada anillo. La figura 3c se ha adquirido después de haber quitado el campo externo  $H_0$  y tras la deposición de una solución de partículas magnéticas (*nanomag*<sup>®</sup>-D, de 500 nm de diámetro) con una concentración de  $10^6$  partículas/ $\mu\text{l}$  en el sistema así configurado. Tal como puede apreciarse en la figura 3c, en este experimento particular, algunas de las partículas quedan atrapadas en los vértices superior izquierdo de los dos anillos cuadrados donde se encuentra situada la pared de dominio HH.

La figura 3d muestra una imagen adquirida con el microscopio óptico después de haber aplicado un campo externo  $H_{ext}$  dirigido horizontalmente hacia la derecha. En consecuencia, las paredes de dominio se mueven tal como se muestra esquemáticamente en la figura 1c y quedan situadas en el vértice superior derecho y en el vértice inferior izquierdo de cada anillo cuadrado. Tal como puede apreciarse en la figura 3d, las partículas magnéticas siguen el movimiento de la pared de dominio HH y quedan situadas en los vértices superior derecho de los anillos. En la práctica, las partículas magnéticas se han desplazado  $6 \mu\text{m}$  de manera totalmente controlada simplemente actuando sobre los campos externos  $H_0$  y  $H_{ext}$ .

10 En realidad, se sabe de la literatura, (véase, por ejemplo: D. A. Allwood, Gang Xiong, M. D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier, y R. P. Cowburn, "*Submicrometer ferromagnetic not gate and shift register*", Science 296, 2003 (2002)), que el movimiento de paredes de dominio se produce en un tiempo muy corto (unos pocos nanosegundos para una distancia del orden de  $1 \mu\text{m}$ ) tras la aplicación de  $H_{ext}$ . Por el contrario, los datos experimentales que se muestran han demostrado que el movimiento de las partículas magnéticas se produce de manera retardada respecto al movimiento de las paredes de dominio. En particular, se ha medido que el movimiento de las partículas magnéticas se produce en un tiempo de unos pocos cientos de milisegundos después de la aplicación de  $H_{ext}$  en el caso en el que el solvente es una solución acuosa de  $\text{NH}_4\text{-OH}$  con un pH 8. Esto se debe, en particular, a las otras fuerzas que juegan un papel en el sistema, tal como, por ejemplo, el rozamiento debido a la viscosidad del solvente, las interacciones electrostáticas entre las partículas, el sustrato y solvente, el movimiento browniano. A pesar de este retardo temporal, sin embargo, las partículas siguen con precisión el movimiento de las paredes de dominio gracias a la elevada atracción ejercida por estas últimas, por lo menos para espacios de desplazamiento de hasta algunas micras. Sin embargo, hay que señalar que la longitud máxima de los espacios rectilíneos a lo largo de los cuales se mueve una pared de dominio garantizando que las partículas magnéticas no se pierdan durante el movimiento de un extremo a otro depende en gran medida de las características específicas de las partículas, del solvente y del sustrato considerado, y en el grosor de las nanoestructuras de *permalloy*. En particular, un aumento de grosor implica un aumento de la fuerza de atracción y este grado de libertad puede utilizarse para aumentar la longitud de la distancia de desplazamiento.

La manipulación controlada de partículas magnéticas que se muestra en las figuras anteriores se implementa de acuerdo con varios aspectos de la presente invención tal como se ejemplifica a continuación.

La figura 4a muestra un conducto magnético 200 estructurado de acuerdo con una realización particular de la presente invención. El conducto magnético 200 comprende un inyector 202 empleado para la creación de paredes de dominio en el conducto magnético 200 de acuerdo con el procedimiento que se describe en detalle a continuación. El inyector mostrado en la figura 4a comprende dos rectángulos 202a y 202b. El conducto magnético 200 comprende, además, una estructura en zigzag 203 formada por una serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An que tienen la misma longitud y quedan situados en forma de zigzag de manera que los ángulos formados entre dos segmentos adyacentes tienen anchuras  $2\alpha$  o  $360^\circ - 2\alpha$ . En la realización particular de la presente invención que se muestra en la figura 4a,  $2\alpha$  corresponde a  $90^\circ$ . El conducto magnético 200 comprende, además, una terminación 204 para la destrucción de paredes de dominio. La terminación 204 que se muestra en la figura 4a es puntiaguda.

La estructura en zigzag formada por los segmentos adyacentes 203A1, 203An forma una serie de triángulos isósceles, iso-orientados y situados de manera que dos triángulos adyacentes comparten uno de los vértices de base. El ángulo del vértice de cada triángulo isósceles mide  $2\alpha$ , mientras que, debido a la geometría del sistema, los dos ángulos en la base miden  $90^\circ - \alpha$ .

Además, por simplicidad de la descripción de la figura, se considera un marco cartesiano de referencia x-y, donde el eje x es paralelo a la base de los triángulos isósceles. De esta manera, el ángulo formado por uno de los segmentos 203A1, 203An con el eje x es igual a  $90^\circ - \alpha$ , mientras que el ángulo formado con el eje y es igual a  $\alpha$ .

Los segmentos adyacentes 203A1, 203An inicialmente se magnetizan de manera uniforme aplicando un campo magnético externo  $H_0$  que tiene una componente negativa a lo largo del eje y de modo que no hay paredes de dominio en el sistema. De esta manera, el vector de magnetización de cada segmento de la estructura magnética 200 tiene una componente dirigida a lo largo de la dirección negativa del eje x.

Después de haber eliminado el campo  $H_0$ , se aplica un campo magnético externo  $H_i$  cuya intensidad es inferior a la intensidad del campo  $H_0$ . El campo  $H_i$  está dirigido principalmente a lo largo de la dirección positiva del eje x, pero con una pequeña componente negativa a lo largo del eje y para permitir que la pared se detenga en la esquina entre los segmentos 202b y 203A1. Preferiblemente, la componente a lo largo del eje y es tal que el campo forma un ángulo no mayor de  $20^\circ$  con el eje x. De esta manera, en el inyector 202 se crea un dominio magnético cuyo vector de magnetización está dirigido a lo largo de la dirección positiva del eje x. Por el contrario, los vectores de magnetización de los segmentos adyacentes 203A1, 203An mantienen una componente a lo largo de la dirección

negativa del eje x. Esto es posible debido a la geometría del inyector 202. En particular, el primer rectángulo 202a del inyector es más ancho que los segmentos adyacentes 203A1, 203An de la estructura en zigzag y, en consecuencia, se caracteriza por una anisotropía de forma inferior. Por esta razón, el campo magnético necesario para invertir la magnetización del inyector es inferior al campo magnético necesario para obtener la misma inversión en los segmentos adyacentes 203A1, 203An.

La presencia del campo  $H_i$  permite, por lo tanto, la creación de una pared de dominio HH entre el inyector 202 y el primer segmento 203A1 de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An, tal como se muestra en la figura 4b.

10 Tal como se muestra en la figura 4c, posteriormente se aplica un campo  $H_1$  paralelo al primer segmento 203A1 de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An. La intensidad del campo  $H_1$  es mayor que la intensidad del campo crítico necesario para mover la pared de dominio por medio de la inversión de la magnetización del segmento 203A1 pero es menor que el campo  $H_n$  necesario para invertir simultáneamente la magnetización de todos los segmentos 203An (con n impar), y que implicaría la creación de una configuración micro-magnética con una pared de dominio en cada esquina del conducto. De esta manera, la pared de dominio HH se mueve y queda situada entre el primer segmento 203A1 y el segundo segmento 203A2 de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An.

15 Tal como se muestra en la figura 4d, posteriormente se aplica un campo  $H_2$  paralelo al segundo segmento 203A2 de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An. Por simetría del sistema, la intensidad del campo  $H_2$  es igual a la intensidad de  $H_1$ . De esta manera, la pared de dominio HH se mueve y queda situada entre el segundo segmento 203A2 y el tercer segmento 203A3 de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An.

En consecuencia, aplicando una secuencia de campos  $H_1$  y  $H_2$ , tal como se ha descrito anteriormente, se obtiene el movimiento controlado de la pared de dominio HH a lo largo de la estructura magnética 200 hacia el enésimo segmento 203An.

Para invertir la dirección del movimiento de la pared de dominio HH es necesario invertir la dirección de los campos  $H_1$  y  $H_2$  con el fin de mover así la pared de dominio HH a lo largo de la estructura magnética 200 hacia el primer segmento.

30 Las intensidades de los campos  $H_0$ ,  $H_i$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_n$  dependen tanto de las propiedades magnéticas de la estructura magnética 200 como de las propiedades geométricas de dicha estructura. En particular, la anchura y el grosor del inyector 202 y de la serie de segmentos adyacentes 203A1, 203An y el ángulo  $2\alpha$  entre segmentos adyacentes determinan los valores de la intensidad de los campos  $H_0$ ,  $H_i$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_n$ .

35 En general, dichos campos magnéticos aumentan la reducción de la longitud y la anchura del conducto.

Teniendo en cuenta la geometría de la estructura 200 mostrada en la figura 4, es posible desconectar los dos procesos de creación y el movimiento de la pared de dominio si la proyección de  $H_1$  en la dirección de los lados oblicuos de la estructura en zigzag es inferior que las intensidades de  $H_1$  y  $H_2$ , por lo que la inyección no provoca la propagación de la pared de dominio.

45 Los vértices de los triángulos definidos por la estructura en zigzag formada por los segmentos adyacentes 203A1, 203An son posiciones estables para las paredes de dominio. Por consiguiente, una partícula magnética atraída por una pared de dominio situada en uno de estos vértices puede mantenerse en esta posición durante un tiempo indefinido en ausencia de campos magnéticos externos. Además, al mover una pared de dominio a lo largo de la estructura magnética 200 como se ha descrito anteriormente, la partícula magnética se mueve de manera controlada también.

50 En una realización particular de la presente invención, la estructura magnética 200 se caracteriza por una estructura de inyección 202 compuesta por dos rectángulos 202a y 202b que tienen dimensiones de  $4 \mu\text{m} \times 0,6 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m} \times 0,2 \mu\text{m}$ , respectivamente; y por segmentos adyacentes 203A1, 203An de  $2 \mu\text{m}$  de largo y  $0,2 \mu\text{m}$  de ancho. El grosor de la estructura es de  $0,03 \mu\text{m}$ . Las intensidades de los campos empleados preferiblemente para esta estructura son:  $H_0 = 79,6 \text{ KA/m}$  ( $1000 \text{ Oe}$ ),  $H_i = 11,14 \text{ KA/m}$  ( $140 \text{ Oe}$ ),  $H_1 = H_2 = 11,94 \text{ KA/m}$  ( $150 \text{ Oe}$ ). El ángulo formado por  $H_i$  con la dirección horizontal es preferiblemente  $50^\circ$ . Para completar, también se indica el valor del campo  $H_n = 23,87 \text{ KA/m}$  ( $300 \text{ Oe}$ ). En una estructura de este tipo, se ha observado que la velocidad de transferencia de las partículas magnéticas unidas a la pared de dominio es del orden de  $0,5 \text{ mm/s}$ .

En la figura 5 se muestra otra aplicación de la estructura magnética 200.

60 Después de la realización de una configuración magnética inicial en la que los segmentos adyacentes son magnetizados de manera uniforme de modo que no hay paredes de dominio, se aplica un campo magnético  $H_i$  a lo largo de la dirección positiva del eje y (es decir, que tiene componente 0 a lo largo del eje x). De esta manera se

obtuvo una configuración en la que una pared de dominio está presente en cada vértice de la estructura en zigzag, tal como se muestra en la figura 5a. Las paredes de dominio HH y TT se alternan. Cada vértice, en consecuencia, puede atraer y atrapar partículas magnéticas independientemente del tipo de pared de dominio presente. Posteriormente, la liberación de las partículas magnéticas tal como se muestra en la figura 5b se obtiene aplicando un campo magnético  $H_r$  capaz de destruir las paredes de dominio. De acuerdo con una realización particular de la presente invención, con las dimensiones y el material especificados anteriormente, los valores de las intensidades de los campos que se utilizan preferiblemente son:  $H_t = 31,83 \text{ KA/m}$  (400 Oe),  $H_r = 11,94 \text{ KA/m}$  (150 Oe).

La estructura magnética 200 que se muestra en la figura 4 no está adaptada para la inyección y la propagación de varias paredes de dominio, ya que las paredes TT y las paredes HH se propagan en direcciones opuestas bajo la acción del mismo campo. Esto sería desfavorable en el caso de que se vaya a transportar cualquier número de partículas magnéticas a lo largo del mismo conducto. La propagación de las paredes TT y HH en direcciones opuestas impediría, de hecho, un movimiento gradual eficaz de las partículas. Con el fin de remediar este problema, es necesario construir un conducto magnético en el cual se creen posiciones estables para las paredes de dominio HH respecto a los campos necesarios para mover las paredes de dominio TT y viceversa. En la figura 6 se muestra esquemáticamente un ejemplo de este tipo de conducto magnético de acuerdo con una realización particular de la presente invención. La figura 6 muestra un conducto magnético 300 con una estructura en zigzag 303 modificada. En particular, el conducto magnético 300 comprende segmentos adyacentes 303A1, 303A2, 303B1 303A2n-1, 303A2n, 303BN situados de manera que forman triángulos sin base alternados a segmentos horizontales. En el ejemplo mostrado en la figura 6, los triángulos son equiláteros y los segmentos horizontales tienen la misma longitud que los lados de los triángulos. En la práctica, la estructura en zigzag mostrada en la figura 6 puede describirse como una serie de medios hexágonos adyacentes en los que unos medios hexágonos adyacentes tienen un vértice en común. El conducto magnético 300 comprende, además, una estructura de inyección 302.

Aplicando un campo magnético externo  $H_0$  apropiado orientado a lo largo de la dirección negativa del eje x, y con una pequeña componente negativa a lo largo del eje y de modo que el campo preferiblemente forme un ángulo de aproximadamente  $10^\circ$  con la dirección de los segmentos horizontales (con el fin de saturar la magnetización de toda la estructura, incluidos los segmentos 302), el estado de magnetización inicial se realiza tal como se muestra en la figura 6 y en la figura 7a. Dicha componente negativa a lo largo del eje y tiene la función de facilitar la creación de un único dominio en toda la estructura que comprende el segmento 302 orientada según el eje y.

La figura 7 muestra la creación y la propagación de una primera pared de dominio HH en el conducto magnético 300. Después de eliminar el campo  $H_0$ , se aplica un campo magnético  $H_1$  con una componente positiva a lo largo del eje y, (figura 7b). De esta manera, la estructura de inyección 302 y el primer segmento 303A1 adoptan una nueva magnetización respecto al estado inicial. En particular, la magnetización del segmento 303A1 se invierte respecto al estado inicial y se crea una pared de dominio HH entre el primer segmento 303A1 y el segundo segmento 303A2 de la estructura en zigzag modificada. Aplicando un campo magnético externo  $H_1$  paralelo al segmento 303A2, la magnetización de dicho segmento se invierte y una pared de dominio HH se mueve de manera que queda situada entre el segundo segmento 303A2 y el primer segmento horizontal 303B1 (figura 7c). Aplicando un campo magnético externo  $H_2$  paralelo al primer segmento horizontal 303B1, la magnetización de dicho segmento se invierte y la pared de dominio HH se mueve de manera que queda situada entre el primer segmento horizontal 303B1 y el segmento 303A3 (figura 7d). Aplicando un campo magnético externo  $H_3$  paralelo al segmento 303A3, la magnetización de dicho segmento se invierte y una pared de dominio HH se mueve de manera que queda situada entre el segmento 303A3 y el segmento 303A4 (figura 7e).

Procediendo de manera similar a como se muestra en la figura 7c, se aplica un campo externo  $H_1$  paralelo al segmento 303A4 con el fin de mover la pared de dominio HH y colocarla entre el segmento 303A4 y el segundo segmento horizontal 303B2 (figura 7f).

Procediendo de manera similar a como se muestra en la figura 7D, se aplica un campo externo  $H_2$  paralelo al segundo segmento horizontal 303B2 con el fin de mover la pared de dominio HH y colocarla entre el segundo segmento horizontal 303B2 y el segmento 303A5 (figura 7g).

Las intensidades de los campos magnéticos aplicados tienen que cumplir unas condiciones apropiadas. Por ejemplo, el campo  $H_1$  tiene que ser tal que evite que la propagación de la pared de dominio a lo largo de los segmentos 303A2n provoque la inyección no deseada de otras paredes de dominio. Además, la intensidad del campo  $H_1$  tiene que ser inferior que la intensidad del campo  $H_n$  necesaria para invertir la magnetización de todos los segmentos 303A2n-1, creándose dos paredes en las terminaciones de cada segmento 303A2n-1. De manera más general, es necesario que los campos  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  empleados para el movimiento de la pared HH respectivamente a lo largo de los segmentos 303A2n, 303Bn, 303A2n-1 determinen solamente la inversión de la magnetización de los segmentos a los cuales están asociados y en cuyas extremidades ya hay una pared de dominio, sin ninguna otra perturbación de la magnetización de los otros segmentos.

Las condiciones que han de cumplir las intensidades de los campos magnéticos pueden obtenerse de varias maneras tales como, por ejemplo, variando la anchura del segmento que define la estructura de inyección 302.

De acuerdo con realizaciones particulares de la presente invención, los campos magnéticos utilizados tienen una intensidad del orden de algunos cientos de Oe ( $1 \text{ Oe} \cong 79,6 \text{ A/m}$ ).

El estado que se muestra en la figura 7g es un estado estable respecto al campo magnético externo necesario para inyectar una segunda pared TT en el conducto magnético 300. En la figura 8 se muestra esquemáticamente la inyección y el movimiento de la pared TT.

10

Aplicando un campo magnético externo  $H_{12}$  orientado a lo largo de la dirección negativa del eje x, la magnetización del primer segmento 303A1 del conducto magnético 300 se invierte y se crea una pared TT entre el primer segmento 303A1 y el segundo segmento 303A2 (figura 8a). El campo magnético  $H_{12}$  no tiene componentes eficaces para la inversión de la magnetización de los segmentos 303B2 y 303A5 entre los cuales está situada la pared HH. Por esta razón, la pared HH no se mueve cuando se inyecta la pared TT.

15

El movimiento de la pared TT se lleva a cabo de manera similar a como se ha descrito anteriormente respecto al movimiento de la pared HH. En particular, se aplican campos magnéticos externos capaces de invertir la magnetización de uno de los segmentos entre los cuales se encuentra situada la pared de dominio.

20

Aplicando un campo magnético externo  $H_4$  paralelo al segmento 303A2, la magnetización de dicho segmento se invierte y la pared TT se mueve de manera que queda situada entre el segmento 303A2 y el primer segmento horizontal 303B1 (figura 8b). El campo  $H_4$  tiene que ser tal que produzca sólo la inversión de la magnetización del segmento 303A1 sin influir en la posición de la pared TT.

25

Aplicando un campo magnético externo  $H_3$  paralelo al segmento 303A5, la magnetización de dicho segmento se invierte y la pared HH se mueve (figura 8c). El campo  $H_3$  no provoca variaciones de las magnetizaciones de los segmentos entre los cuales se encuentra colocada la pared de dominio TT y, en consecuencia, esta pared no se mueve.

30

Aplicando un campo magnético externo  $H_5$  paralelo al segmento 303B1, la magnetización de dicho segmento se invierte y la pared TT se mueve de manera que queda situada entre los segmentos 303B1 y el segmento 303A3 (figura 8d). En este caso, sin embargo, con el fin de evitar que la pared HH se mueva,  $H_5$  tiene que seleccionarse apropiadamente.

35

Aplicando un campo magnético externo  $H_1$  paralelo al segmento 303A6, la pared de dominio HH se mueve (figura 8e).

Procediendo de manera similar para la aplicación de campos magnéticos externos apropiados se obtiene la configuración mostrada en la figura 8j. Esta configuración es estable respecto a la inyección de una nueva pared de dominio HH tal como se muestra en la figura 8k.

40

Tal como se indicaba en la descripción del movimiento de las paredes, existen algunos puntos críticos en la elección de los campos de aplicación, implicando dichos puntos críticos las siguientes condiciones:

45

a) los campos  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  empleados para el movimiento de la pared HH a lo largo de los segmentos 303A<sub>2n</sub>, 303B<sub>n</sub>, 303A<sub>2n-1</sub>, respectivamente, tienen que determinar solamente la inversión de la magnetización de los segmentos a los que están asociados y en cuyas terminaciones ya hay presente una pared de dominio sin ninguna perturbación adicional de la magnetización de los otros segmentos. En particular, éstos no tienen que determinar la inyección de otras paredes;

50

b) los campos  $H_4$ ,  $H_5$ ,  $H_6$  empleados para el movimiento de la pared TT lo largo del segmento 303A<sub>2n</sub>, 303B<sub>n</sub>, 303A<sub>2n-1</sub>, respectivamente, tienen que determinar solamente la inversión de la magnetización de los segmentos a los cuales están asociados y en cuyas terminaciones ya se encuentra presente una pared de dominio sin ninguna otra perturbación de la magnetización de los otros segmentos. En particular, éstos no tienen que provocar la inyección de más paredes;

55

c) los campos de inyección no tienen que alterar los estados de magnetización de partes de la estructura que no sean el inyector en la característica de la configuración micro-magnética del momento en que se aplican.

60

La manera según la cual se obtienen estas condiciones, por ejemplo en términos de direcciones e intensidades de los campos a aplicar, dependen mucho de la geometría y el material empleado, de modo que el esquema mostrado

en la figura 8 tiene que entenderse como representativo del principio que puede aprovecharse de acuerdo con diversas realizaciones prácticas. En particular, no es necesario que los campos sean paralelos a los segmentos de la estructura.

5 La figura 9 muestra esquemáticamente un conducto magnético 400 de acuerdo con una realización particular de la presente invención y, en particular, de acuerdo con el esquema mostrado en la figura 8, empleado para la simulación de la creación y de la propagación de paredes de dominio HH y TT. El conducto magnético 400 está provisto de una estructura de inyección 402 de 0,2  $\mu\text{m}$  de ancho y 2  $\mu\text{m}$  de largo. Los segmentos 303A1, 303A2, 303A3 y 303A4 son de 2  $\mu\text{m}$  de largo y 0,2  $\mu\text{m}$  de ancho. El ángulo  $2\alpha$  entre segmentos adyacentes es igual a  $60^\circ$  de manera que los triángulos formados son triángulos equiláteros. El segmento horizontal 303B1 es de 2  $\mu\text{m}$  de largo y 0,1  $\mu\text{m}$  de ancho. En correspondencia con las terminaciones de los segmentos inclinados hay presente una esquina 405 con un ángulo de  $90^\circ$  para estabilizar las paredes en dichas posiciones. La terminación 404 para la destrucción de las paredes de dominio es puntiaguda y tiene una anchura máxima de 0,1  $\mu\text{m}$ . El conducto magnético 400 puede estar formado por una *permalloy* con un grosor de 30 nm depositada sobre un sustrato  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

15 En la figura 10 se muestran los campos necesarios para la creación y el movimiento de partículas magnéticas en una estructura tal como la que se muestra en la figura 9 y obtenidas por medio de simulaciones micro-magnéticas adecuadas. Las magnitudes de los vectores mostrados (intensidades de los campos) se expresan en Oe ( $1 \text{ Oe} \cong 79,6 \text{ A/m}$ ). La nomenclatura de los campos es la misma que la que se utiliza para las figuras 7 y 8 para las cuales se han descrito en detalle estos procesos. En particular, sin embargo, de manera distinta a lo que se muestra en las figuras 7 y 8, los campos que se utilizan de acuerdo con la realización de la presente invención descrita en las figuras 9 y 10 no son paralelos a los segmentos del conducto magnético 400. Esto se debe al hecho de que se ha observado que los campos magnéticos inclinados respecto a los segmentos del conducto facilitan la inmovilización de las paredes de dominio en las terminaciones de los segmentos y la reducción de los campos de inyección. En particular, es posible observar en la figura 10a que los campos magnéticos de inyección  $H_{i1}$  y  $H_{i2}$  están inclinados  $15^\circ$  respecto a la estructura de inyección 402. Los campos magnéticos durante el movimiento de las paredes HH están inclinados  $10^\circ$  respecto a los segmentos 403A2 y 403A1 y  $15^\circ$  respecto al segmento horizontal 403B1 (figura 10b). De manera similar, los campos magnéticos para el movimiento de las paredes TT están inclinados  $10^\circ$  respecto a los segmentos 403A2 y 403A1 y  $15^\circ$  respecto al segmento horizontal 403B1 (figura 10c).

30 La elección de los ángulos en los cuales se aplican los campos así como las magnitudes de dichos campos permite cumplir las condiciones a, b, y c descritas anteriormente garantizando la desconexión de la inyección de paredes HH y TT de la propagación de dichas paredes.

35 El empleo de conductos magnéticos que comprenden segmentos y esquinas, tales como los conductos magnéticos mostrados en las figuras 1, 4, 6, y 9 permiten el control preciso de la creación y el movimiento de paredes de dominio. En particular, gracias a la presencia de esquinas en las que las paredes de dominio son extremadamente estables, es posible conocer con precisión la ubicación de dichas paredes de dominio. De manera similar, en el caso en que las partículas magnéticas están unidas a dichas paredes de dominio, es posible conocer con precisión la ubicación de dichas partículas. En general la precisión máxima teórica con la que se conoce la localización de las partículas magnéticas corresponde a la extensión de las paredes de dominio. En consecuencia, la máxima precisión con la que se conoce la ubicación de las partículas magnéticas en conductos correctamente estructurados de acuerdo con la presente invención es del orden de 10 nanómetros. Esta precisión puede reducirse significativamente a algunos pocos cientos de nanómetros por motivos perturbativos externos, tales como el movimiento browniano de las partículas en solución y la presencia de irregularidades en las estructuras magnéticas.

El movimiento de las paredes de dominio a base de segmentos y esquinas es un movimiento digital. En particular, aunque el punto inicial y final de los movimientos de las paredes de dominio se conocen con precisión y corresponden a las terminaciones de los segmentos a lo largo de las cuales se mueven las paredes de dominio, no es fácil de controlar la naturaleza y el movimiento de dichas paredes durante el movimiento entre una terminación y la terminación siguiente. En los segmentos rectilíneos resulta difícil reducir la velocidad de las paredes de manera que las partículas puedan moverse con continuidad siguiendo las propias paredes. Además, si durante el movimiento la pared de dominio asume una estructura de vórtice en lugar de la estructura transversal típica, es posible que las partículas magnéticas se liberen. Para evitar este inconveniente, de acuerdo con una realización ventajosa particular de la presente invención, se emplean conductos magnéticos formados por segmentos curvos. El movimiento de las paredes de dominio a lo largo de segmentos curvos es un movimiento continuo con una velocidad igual a la velocidad de giro de un campo magnético externo y, en consecuencia, controlable.

La figura 11 muestra una realización particular de la presente invención basada en un conducto magnético 500 que tiene forma de anillo circular. La estructura circular del conducto magnético 500 permite el control preciso de la naturaleza de las paredes de dominio y de su movimiento en cada instante de los procesos.

Aplicando un campo magnético de saturación externo  $H_i$  se crea una pared de dominio HH y una pared de dominio TT, tal como se muestra en la figura 11a. Aplicando un campo magnético radial giratorio  $H_r$  es posible mover las paredes de dominio con extrema precisión a lo largo de la circunferencia del anillo 500 (figura 11b). Controlando la velocidad de giro del campo magnético  $H_r$  es posible controlar el movimiento de las paredes de dominio. En particular, la velocidad de giro de las paredes de dominio coincide con la velocidad de giro del campo magnético  $H_r$ . La intensidad del campo  $H_r$  viene determinada por la estructura del anillo 500, en particular, por la presencia de posibles irregularidades en la estructura circular y faltas de homogeneidad en el material del propio anillo. Como que el campo magnético  $H_r$  es radial, las paredes de dominio mantienen su estructura transversal durante todo el movimiento.

Como ejemplo, se dan algunos datos experimentales sobre la eficiencia del movimiento de partículas en anillos de *permalloy* que tienen un rayo igual a  $5 \mu\text{m}$  y una anchura de conducto de  $0,2 \mu\text{m}$ . En particular, en la tabla 1 se dan las frecuencias máximas de giro de partículas magnéticas en función de la intensidad del campo giratorio  $H_r$  aplicado. Una mayor frecuencia podría provocar que las partículas se desacoplen de las paredes.

$H_r$ (Oe) - $H_r$ (KA/m)	f (Hz)
135 - 10,79	0,1
235 - 18,70	0,8
300 - 23,87	1

Tabla 1

Estos datos se refieren al movimiento de partículas *nanomag*®-D con un diámetro de 500 nm en una solución acuosa de  $\text{NH}_4\text{-OH}$  con pH 8 y estructuras de *permalloy* con un recubrimiento de  $\text{SiO}_2$  de 50 nm de grosor.

En una estructura similar que tiene un radio de  $10 \mu\text{m}$ , con un campo  $H_r = 23,87 \text{ KA/m}$  (300 Oe) la frecuencia máxima de giro se reduce a 0,5 Hz y a menudo se observa la pérdida de las partículas magnéticas. Esto muestra cómo el campo necesario para el giro de la partícula y de la pared aumenta con el radio de curvatura.

A bajas velocidades de giro del campo  $H_r$  el movimiento controlado de partículas magnéticas permite un posicionamiento muy preciso de las mismas con una resolución observada del orden de 100 nanómetros.

La figura 12 muestra una realización particular de la presente invención con un conducto magnético 600 que tiene forma curva. El conducto magnético 600 comprende una estructura de inyección 602 para la inyección de paredes de dominio, una parte curva 603 y una terminación 604 para la destrucción de paredes de dominio. La parte curva 603 corresponde a la parte de una elipse. De acuerdo con realizaciones alternativas de la presente invención, la parte curva 603 puede corresponder a la parte de una parábola, una hipérbola o una circunferencia. La terminación 604 es puntiaguda. El conducto magnético 600 es magnetizado inicialmente de manera uniforme tal como se muestra en la figura 12a por medio de un campo magnético externo  $H_0$  como en la figura. Posteriormente, se quita el campo magnético  $H_0$  y se aplica un campo magnético externo  $H_i$  dirigido esencialmente a lo largo de la dirección positiva del eje y pero con una pequeña componente negativa a lo largo del eje x de manera que  $H_i$  está inclinado respecto a la dirección vertical. El campo  $H_i$  permite la inyección de una pared de dominio HH en la parte curva 603 del conducto magnético 600 (figura 12b). Aplicando un campo magnético giratorio radial H es posible mover con gran precisión la pared de dominio HH a lo largo de toda la parte curva 603 (figuras 12c, d, e). Las configuraciones micro-magnéticas mostradas en la figura 12 resumen sintéticamente los resultados para simulaciones apropiadas en una estructura de *permalloy* con una anchura del conducto igual a 200 nm y un grosor de 30 nm. Se aplica un campo  $H_0$  de 79,6 KA/m (1000 Oe) inclinado  $10^\circ$  respecto a la dirección horizontal para la inicialización, mientras que los campos  $H_i$ , y H corresponden respectivamente a 15,92 KA/m (200 Oe) y 23,87 KA/m (300 Oe), con  $H_i$  inclinado  $10^\circ$  respecto a la dirección vertical. La velocidad angular de rotación de la pared de dominio HH es igual a la velocidad de rotación angular del campo magnético H. La intensidad del campo H necesaria para un movimiento continuo y controlado viene determinada por el radio de curvatura (aumenta con éste) y por la estructura de la parte curva 603, en particular, por la presencia de posibles irregularidades en la parte curva 603 y por la falta de homogeneidad en el material de la propia parte curva. Cuando la pared de dominio HH alcanza la terminación 604 ésta es destruida (figura 12F). Con el conducto magnético 600 es posible mover una partícula magnética a lo largo de una distancia igual al diámetro de la parte curva 603. En general, dicha distancia puede ser del orden de algunas decenas de micras.

Teniendo en cuenta un conducto magnético 600 realizado en *permalloy* y de 30 nm de grosor con una parte curva 603 de 0,2 m de ancho y con un diámetro de  $10 \mu\text{m}$ , se ha calculado que la pared de dominio HH produce un campo magnético mayor de 7,96 KA/m (100 Oe) a una distancia de 200 nm de la estructura *permalloy*. El elevado gradiente del campo generado implica una fuerza de atracción igual a 10 pN sobre una partícula superparamagnética *nanomag*®-D que tiene un diámetro de 130 nm y con el centro a 200 nm desde la superficie de la parte curva 603. Este valor es comparable con el valor obtenido en el caso de una esquina en un anillo cuadrado. Las fuerzas calculadas para el conducto magnético 600 son, por lo tanto, suficientes para realizar un acoplamiento estable entre

las partículas magnéticas y las paredes de dominio. Claramente, es preferible que la capa protectora de SiO<sub>2</sub> depositada sobre el conducto magnético 600 tenga el menor grosor posible (50 nm para los datos experimentales que se muestran) con el fin de maximizar la fuerza de interacción durante el movimiento de las partículas.

5 De acuerdo con realizaciones particulares ventajosas de la presente invención se obtienen conductos magnéticos que comprenden secuencias de partes curvas conectadas que tienen diferentes propiedades magnéticas, tales como diferentes radios de curvatura, diferentes grosores y distintas anchuras.

Se ha demostrado que, por medio de conductos magnéticos correctamente estructurados de acuerdo con la  
10 presente invención, es posible controlar de una manera muy precisa la posición y el movimiento de las partículas magnéticas con una resolución nanométrica.

De acuerdo con realizaciones particulares de la presente invención, es posible realizar conductos magnéticos que comprendan bifurcaciones. El conducto magnético 700 que se muestra en la figura 13 comprende la bifurcación 701  
15 por medio de la cual el conducto magnético 700 se divide en las ramificaciones 700a y 700b. En la figura 13 se muestra una pared de dominio HH situada en la bifurcación 701. Si se aplica un campo magnético externo H<sub>a</sub> capaz de invertir la magnetización del primer segmento 703a de la ramificación 700a, la pared HH entra en la ramificación 700A y puede propagarse a lo largo de esta ramificación. Por el contrario, si se aplica un campo magnético externo H<sub>b</sub>, capaz de invertir la magnetización del primer segmento 703b de la ramificación 700b, la pared HH entra en la  
20 ramificación 700b y puede propagarse a lo largo de esta ramificación.

Los dispositivos mostrados en las figuras 1 a 13 ilustran realizaciones particulares de la presente invención que comprenden conductos magnéticos correctamente estructurados. En particular, los conductos magnéticos mostrados en las figuras 1 a 13 son sistemas bidimensionales de material ferromagnético a temperatura ambiente (por ejemplo,  
25 *permalloy*) depositado sobre un sustrato no magnético (por ejemplo, SiO<sub>2</sub>, Si). Los conductos magnéticos mostrados pueden estar cubiertos adicionalmente por una capa protectora de material no magnético (tal como SiO<sub>2</sub>). Sin embargo, de acuerdo con otras realizaciones de la presente invención, se disponen conductos magnéticos tridimensionales. De esta manera, se crean redes 3D a lo largo de las cuales es posible mover varias partículas magnéticas con una precisión extremadamente alta y un control completo. En consecuencia, es posible realizar la  
30 estratificación de varios entornos en los cuales las partículas magnéticas pueden moverse selectivamente mediante el movimiento de paredes de dominio. Esto permite obtener condiciones "*lab o a chip*" ideales en las cuales se obtiene la estratificación de entornos en los cuales pueden producirse diferentes reacciones químicas.

Otra realización de la presente invención consiste en proporcionar al conducto magnético de la presente invención  
35 unos sensores magnéticos capaces de detectar la presencia de paredes de dominio y partículas magnéticas unidas a las paredes magnéticas. Un ejemplo de dichos sensores puede encontrarse en la solicitud de patente italiana TO2008A00314 cuya descripción se incorpora aquí por referencia en su totalidad. Los sensores descritos de TO2008A00314 se basan en la detección de la presencia de una pared de dominio en un conducto magnético en base a los fenómenos de magnetorresistencia anisótropa. Básicamente, la resistencia eléctrica de un conducto  
40 magnético varía de acuerdo con la presencia o la ausencia de una pared de dominio en el conducto. A través de mediciones óhmicas, por consiguiente, es posible determinar la presencia de paredes de dominio en conductos magnéticos. Por otra parte, la detección de la presencia de una partícula magnética en las proximidades de un dominio magnético se basa en el hecho de que el campo magnético necesario para mover una pared de dominio a lo largo de un conducto magnético varía de acuerdo con el hecho de que la pared de dominio esté unida o no a la  
45 partícula magnética. En consecuencia, los sensores descritos en TO2008A00314 permiten la detección de paredes de dominio en un conducto magnético y la determinación de si dichas paredes de dominio están unidas o no a partículas magnéticas. Estos tipos de sensores, por lo tanto, son perfectamente integrables en las estructuras que se describen aquí. Con el fin de realizar mediciones óhmicas tal como se describe en TO2008A00314, es posible proporcionar a los citados conductos magnéticos unos contactos eléctricos, por ejemplo, unos contactos eléctricos  
50 de oro. De manera similar a los conductos magnéticos, los contactos eléctricos también pueden obtenerse por medio de técnicas litográficas. La presencia de sensores en los conductos magnéticos de la presente invención permite obtener contadores capaces de controlar con gran precisión el número de partículas magnéticas que pasan a través de un conducto magnético.

55 La creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio en conductos magnéticos de acuerdo con realizaciones de la presente invención se han descrito en relación a la aplicación de campos magnéticos externos. Los campos magnéticos externos pueden ser continuos o alternos. De acuerdo con realizaciones alternativas de la presente invención, es posible realizar la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio en conductos magnéticos por medio de la aplicación de campos electromagnéticos externos. De acuerdo con otras  
60 realizaciones de la presente invención, la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio se realiza por medio de corrientes eléctricas que pueden pasar a través de conductos magnéticos. Esto puede realizarse especialmente en el caso en el que los conductos magnéticos están realizados con materiales magnéticos caracterizados por una alta polarización de spin en el nivel de Fermi tales como, por ejemplo, manganitas,

aleaciones Heussler y magnetita. Con el fin de permitir que la corriente eléctrica pase por los conductos magnéticos, es posible dotar a los citados conductos magnéticos de contactos eléctricos, por ejemplo contactos eléctricos de oro. De manera similar a los conductos magnéticos, los contactos eléctricos pueden obtenerse también por medio de técnicas litográficas.

5

Se ha mostrado que es posible controlar con extrema precisión y exactitud el movimiento de las partículas magnéticas individuales por medio de la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio en conductos magnéticos correctamente estructurados y colocados en presencia de una solución de partículas magnéticas. Mediante del diseño exacto de la estructura (forma y dimensiones) de dichos conductos magnéticos, es posible atrapar partículas magnéticas individuales en posiciones predeterminadas por medio de la creación de paredes de dominio. Además, es posible liberar partículas magnéticas individuales en posiciones determinadas por medio de la destrucción de paredes de dominio. También es posible mover partículas magnéticas individuales de manera controlada y precisa a lo largo de conductos magnéticos a lo largo de los cuales pueden moverse paredes de dominio con precisión.

10

Esto permite el empleo del procedimiento y sistema de la presente invención en varios campos donde se requiere la manipulación controlada y precisa de partículas. En particular, la presente invención puede emplearse en cada campo en el que se requiere la captura, el movimiento, la acumulación y la transferencia de partículas magnéticas. Ejemplos de campos en los que la manipulación controlada de las partículas desempeña un papel importante se refieren, por ejemplo, a aplicaciones biomédicas donde se emplean partículas superparamagnéticas como marcadores o como soporte para la transferencia de moléculas biológicas. Algunos ejemplos de aplicación en estos campos se refieren, por ejemplo, al caso de identificación biomolecular por medio de biosensores o la extracción y purificación de ADN. Por medio de la presente invención, el enfoque "*lab on a chip*" se mejora en varios campos de aplicación. La obtención de matrices compactas de dispositivos de acuerdo con la presente invención permite la captura, el transporte y la liberación de grandes cantidades de partículas magnéticas según se requiera, por ejemplo, en el caso en el que tengan que prepararse muestras biológicas. Además, la presente invención permite obtener unos tipos de "pinzas magnéticas" muy precisas y exactas empleando conductos curvos (es posible obtener una resolución nanométrica) que podrían emplearse, por ejemplo, en los campos de química o síntesis biológica muy controlada.

15

Por medio de varios aspectos de la presente invención, se ha demostrado que es posible realizar tanto un movimiento digital extremadamente preciso y controlado de partículas magnéticas como un movimiento continuo extremadamente preciso y controlado de partículas magnéticas según el tipo de aplicación requerida.

20

La presente invención es particularmente ventajosa en el caso del empleo de partículas magnéticas funcionalizadas, por ejemplo, por medio de sustancias adhesivas o grupos reactivos de superficie a fin de enlazarlas a cualquier tipo de moléculas, ya sean biológicas o no biológicas, independientemente del hecho de que dichas moléculas sean magnéticas o no. Mediante el movimiento controlado de partículas magnéticas enlazarlas a una molécula específica, es posible dejar que dicha molécula interactúe de manera controlada con otras moléculas en solución localizadas en diferentes entornos a través de los cuales se mueve la partícula o con otras moléculas que se mueven, a su vez, por partículas magnéticas.

25

Como ejemplo concreto de aplicación, es posible considerar la síntesis de secuencias de ADN unidas a una esfera magnética que se mueve de manera secuencial a través de entornos que contienen las diferentes bases. El movimiento programado de esta esfera en un conducto adecuadamente diseñado con las bifurcaciones apropiadas permitiría obtener dicha funcionalidad.

30

Un ejemplo de aplicación del sistema y el procedimiento de acuerdo con la presente invención se refiere al campo de la preparación de muestras biológicas para un análisis posterior, tal como la reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real (PCR en tiempo real). En este caso, la preparación de la muestra de ADN a amplificar implica el empleo de partículas magnéticas para separar las moléculas de ADN y purificar la muestra. Esta función se obtiene generalmente mediante la intervención manual de un operario o de un robot que emplea tubos de ensayo e imanes permanentes que se disponen acercándolos o alejándolos de los tubos de ensayo con el fin de atraer o liberar las partículas magnéticas unidas al ADN en las distintas fases en las que la muestra se pone en contacto con un reactivo apropiado. La funcionalidad de captura, liberación y movimiento de las partículas magnéticas por medio de las estructuras que se muestran de acuerdo con la presente invención, permite la integración de la preparación de una muestra en un dispositivo "*lab on a chip*". Esto permitiría la eliminación de una fase de preparación externa de la muestra en favor de la perspectiva de un análisis completamente "*lab on a chip*".

35

40

45

50

55

**REIVINDICACIONES**

1. Dispositivo para la manipulación de partículas magnéticas (A) en suspensión que comprende:

5 un sustrato;

un conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) adecuado para la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT), estando situado dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) sobre dicho sustrato;

10

una suspensión de partículas magnéticas (A) situada en las proximidades de la superficie de dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700);

caracterizado por el hecho de que:

15

dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) comprende una tira de material magnético de manera que dichas partículas magnéticas (A) pueden ser atrapadas, movidas y liberadas a lo largo de dicha tira como consecuencia de la creación, el movimiento y la destrucción de dichas paredes de dominio lo largo de dicha tira y de la interacción entre dichas paredes de dominio (HH, TT) y dichas partículas magnéticas (A), en el que dicha tira

20

comprende una pluralidad de segmentos adyacentes (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) y la longitud de dichos segmentos es sustancialmente mayor que las dimensiones transversales (anchura y grosor) de dichos segmentos (202, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) de manera que dichas paredes de dominio (HH, TT) son paredes de dominio restringidas situadas transversalmente

25

respecto a dicha tira y mantienen su integridad durante el movimiento.

2. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1,

caracterizado por el hecho de que:

30

el grosor de dichos segmentos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) es de 100 nm o menos.

3. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 ó 2,

35

caracterizado por el hecho de que:

la anchura de dichos segmentos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) es 1  $\mu\text{m}$  o menos.

40

4. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3,

caracterizado por el hecho de que:

45

dicha pluralidad de segmentos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) comprende una pluralidad de segmentos rectos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 604) y/o una pluralidad de segmentos curvos (603) de manera que el movimiento de dichas partículas magnéticas (A) a lo largo de dichos segmentos rectos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) es un movimiento digital entre los puntos extremos de dichos segmentos rectos y el movimiento a lo largo de dichos segmentos curvos (603) es un movimiento continuo.

50

5. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4,

55 caracterizado por el hecho de que:

dicha pluralidad de segmentos adyacentes forma un anillo cuadrado (100).

6. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4,

60

caracterizado por el hecho de que:

dicha pluralidad de segmentos adyacentes (202, 203A1, 203An, 204) forma una estructura en zigzag (203) de modo que el movimiento de dichas partículas (A) a lo largo de dicha estructura en zigzag (203) es un movimiento digital y por el hecho de que dicha tira comprende, además, un inyector (202) y una terminación de tira (204).

5 7. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4,

caracterizado por el hecho de que:

10 dicha pluralidad de segmentos adyacentes (302, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 304) forma una estructura en zigzag modificada (303) que comprende pares de segmentos oblicuos (303A(2n-1), 303A2n) situados de manera que forman un ángulo  $2\alpha$  alternado con segmentos horizontales (303Bn) de manera que el movimiento de dichas partículas (A) a lo largo de dicha estructura en zigzag modificada (303) es un movimiento digital y por el hecho de que dicha tira comprende, además, un inyector (302) y una terminación de tira (304).

15 8. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1,

caracterizado por el hecho de que:

20 dicha tira comprende un inyector (602), una estructura curva (603) y una terminación de tira (604) de manera que el movimiento de dichas partículas a lo largo de dicha tira es un movimiento continuo.

9. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 6 ó 7,

caracterizado por el hecho de que:

25 dicha tira comprende por lo menos una bifurcación (701).

10. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1, 2, 3, 4, 6, 7 ó 9,

30 caracterizado por el hecho de que:

dicha tira comprende segmentos en el plano definido por dicho sustrato y segmentos situados a lo largo de direcciones que salen de dicho plano definido por dicho sustrato para formar un circuito tridimensional.

35 11. Dispositivo para la manipulación de partículas magnéticas (A) en suspensión, que comprende,

un sustrato;

40 un conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) adecuado para la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT), estando situado dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) sobre dicho sustrato;

una suspensión de partículas magnéticas (A) situada en las proximidades de la superficie de dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700);

45 caracterizado por el hecho de que:

50 dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) comprende una tira de material magnético de manera que dichas partículas magnéticas (A) pueden ser atrapadas, movidas y liberadas a lo largo de dicha tira como consecuencia de la creación, el movimiento y la destrucción de dichas paredes de dominio lo largo de dicha tira y de la interacción entre dichas paredes de dominio (HH, TT) y dichas partículas magnéticas (A), en el que dicha tira forma un anillo circular (500) de manera que el movimiento de dichas partículas (A) a lo largo de dicha tira es un movimiento continuo y en el que la circunferencia del citado anillo circular es sustancialmente mayor que las dimensiones transversales (anchura y grosor) de dicho anillo circular (500) de manera que dichas paredes de 55 dominio (HH, TT) son paredes de dominio restringidas situadas transversalmente respecto a dicha tira y mantienen su integridad durante el movimiento.

12. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 11,

60 caracterizado por el hecho de que:

dicho dispositivo comprende, además, por lo menos un sensor para la detección de paredes de dominio (HH, TT) y/o partículas magnéticas (A).

13. Dispositivo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 12,

caracterizado por el hecho de que:

5

dicho material magnético es un material ferromagnético a temperatura ambiente tal como, por ejemplo, *permalloy*, cobalto, hierro, níquel, manganitas,  $Fe_3O_4$  o aleaciones Heussler.

14. Aparato para la manipulación de partículas magnéticas,

10

caracterizado por el hecho de que:

dicho aparato comprende un dispositivo para la manipulación de partículas magnéticas (A) que comprende un conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 13; y por el hecho de que dicho aparato comprende, además, medios para la generación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT) en dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700).

15

15. Aparato de acuerdo con la reivindicación 14,

20 caracterizado por el hecho de que:

dichos medios para la generación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT) comprenden medios para la creación de campos externos.

25 16. Aparato de acuerdo con la reivindicación 15,

caracterizado por el hecho de que:

dichos campos externos comprenden uno de campo magnético externo o campo electromagnético externo.

30

17. Aparato de acuerdo con la reivindicación 14,

caracterizado por el hecho de que:

35 dichos medios para la generación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT) comprenden medios para la generación de corrientes eléctricas que pasan por dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700).

18. Aparato de acuerdo con una de las reivindicaciones 14 a 17,

40

caracterizado por el hecho de que:

dicho aparato comprende, además, medios para depositar dicha suspensión de partículas magnéticas (A) en las proximidades de la superficie de dicho conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) tal como, por ejemplo, pipetas, micro-bombas o micro-válvulas.

45

19. Procedimiento para la manipulación de partículas magnéticas,

caracterizado por el hecho de que:

50

dicho procedimiento comprende las siguientes etapas:

depositar una suspensión de partículas magnéticas (A) en las proximidades de la superficie de un conducto magnético (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700) adecuado para la creación, el movimiento y la destrucción de paredes de dominio (HH, TT) y que comprende una tira de material magnético;

55

atrapar por lo menos una de dichas partículas magnéticas (A) a lo largo de dicha tira mediante la creación de por lo menos una pared de dominio (HH, TT) lo largo de dicha tira,

60 en el que dicha tira comprende una pluralidad de segmentos adyacentes (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404, 602, 603, 604) y la longitud de dichos segmentos es sustancialmente mayor que las dimensiones transversales (anchura y grosor) de dichos segmentos (202b, 203A1, 203An, 204, 302, 303A1, 303An, 304, 303A2(n-1), 303A2n, 303B1, 303Bn, 402, 403A1, 403An, 404,

602, 603, 604) de manera que dicha pared de dominio (HH, TT) es una pared de dominio restringida situada transversalmente respecto a dicha tira y mantiene su integridad durante el movimiento.

20. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 19,

5

caracterizado por el hecho de que:

dicho procedimiento comprende, además, las siguientes etapas:

10 mover dicha partícula atrapada (A) moviendo dicha pared de dominio restringida (HH, TT) lo largo de dicha tira.

21. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 19 ó 20,

caracterizado por el hecho de que dicho procedimiento comprende, además, las siguientes etapas:

15

liberar dicha partícula magnética (A) atrapada mediante la destrucción de dicha pared de dominio restringida (HH, TT) lo largo de dicha tira.

22. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 19 a 21,

20

caracterizado por el hecho de que:

dicho procedimiento comprende, además, las siguientes etapas:

25 funcionalización de dicha partícula magnética (A) con sustancias adhesivas o con grupos reactivos de superficie de manera que dicha partícula magnética (A) puede enlazarse a por lo menos una molécula o célula no magnética y la manipulación de dicha partícula magnética (A) permite la manipulación de dicha molécula o célula.

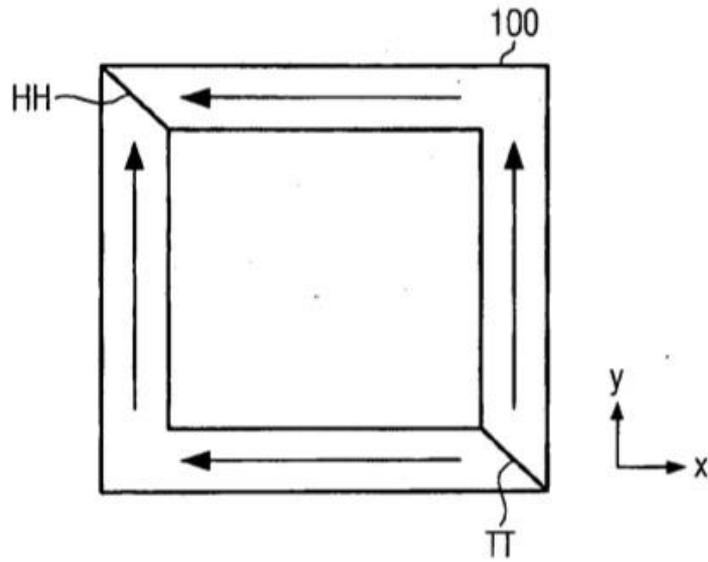


FIG. 1a

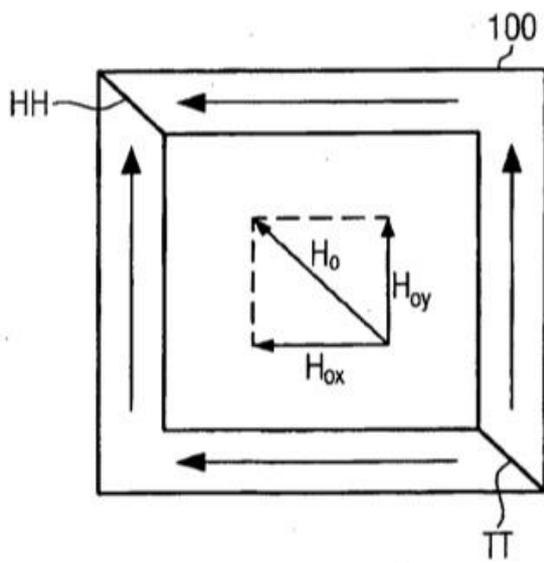


FIG. 1b

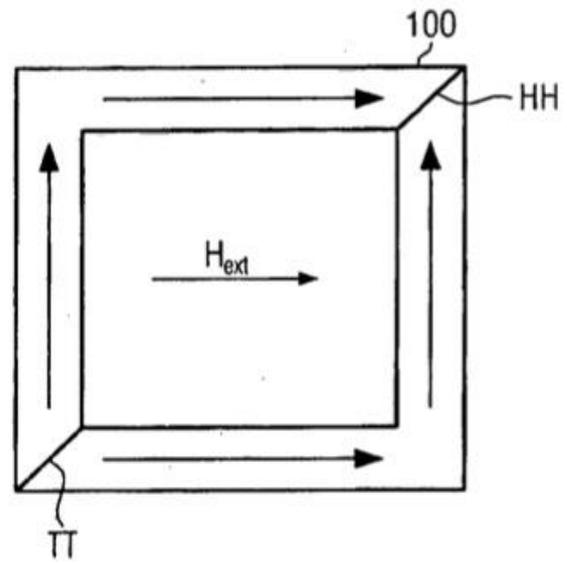


FIG. 1c

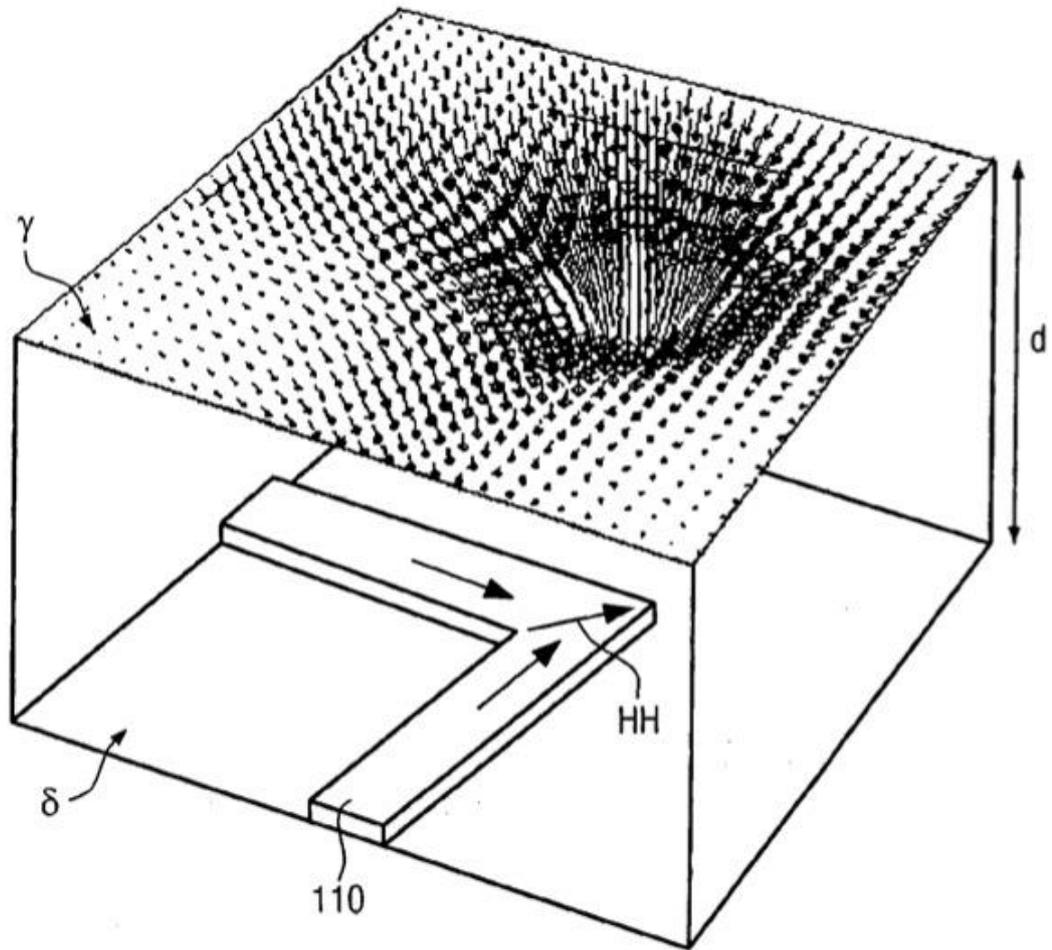


FIG. 2

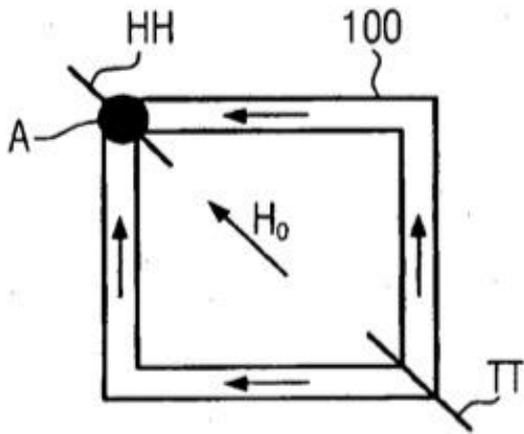


FIG. 3a

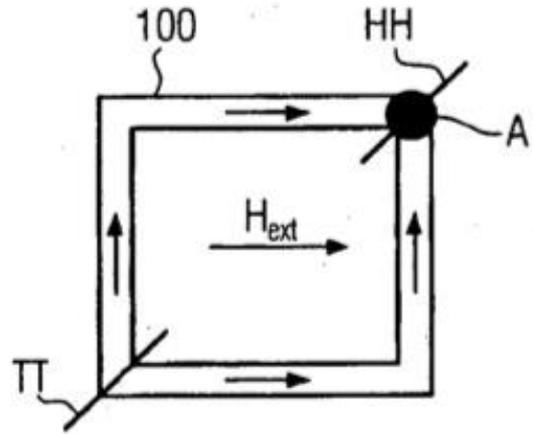


FIG. 3b



FIG. 3c

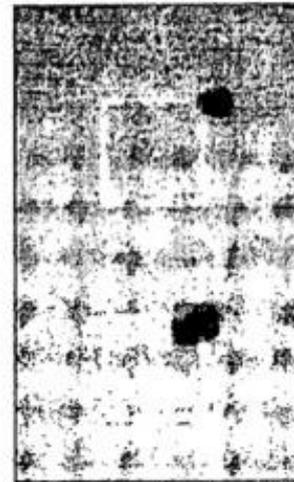
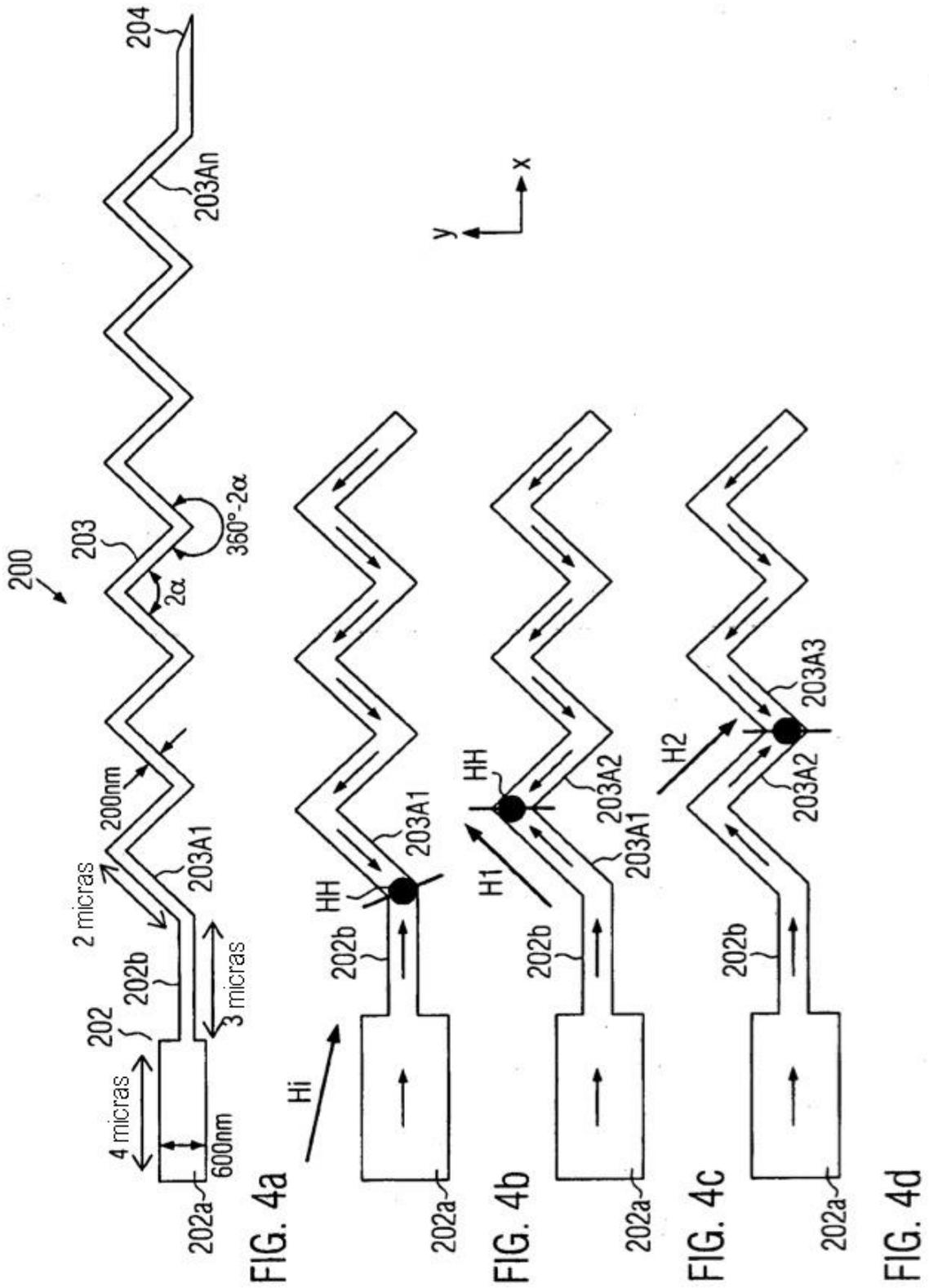


FIG. 3d



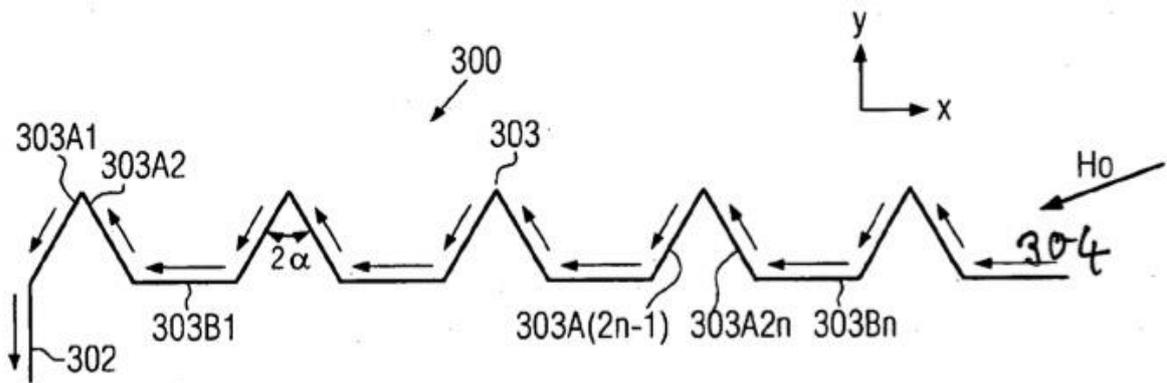
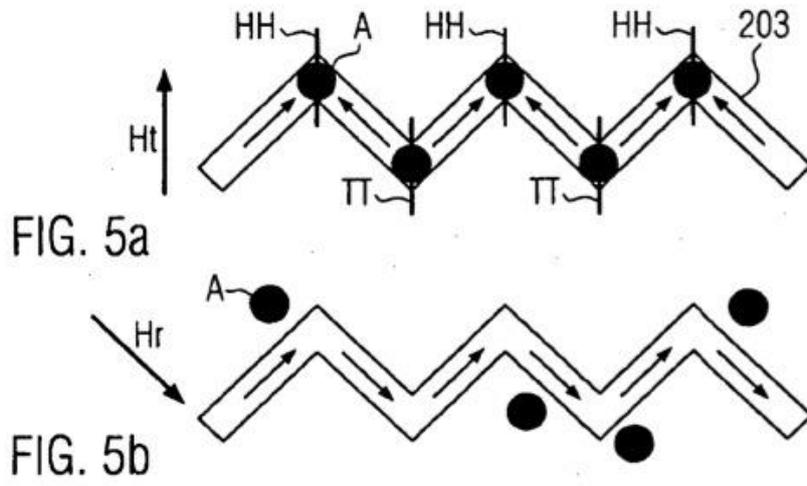


FIG. 6

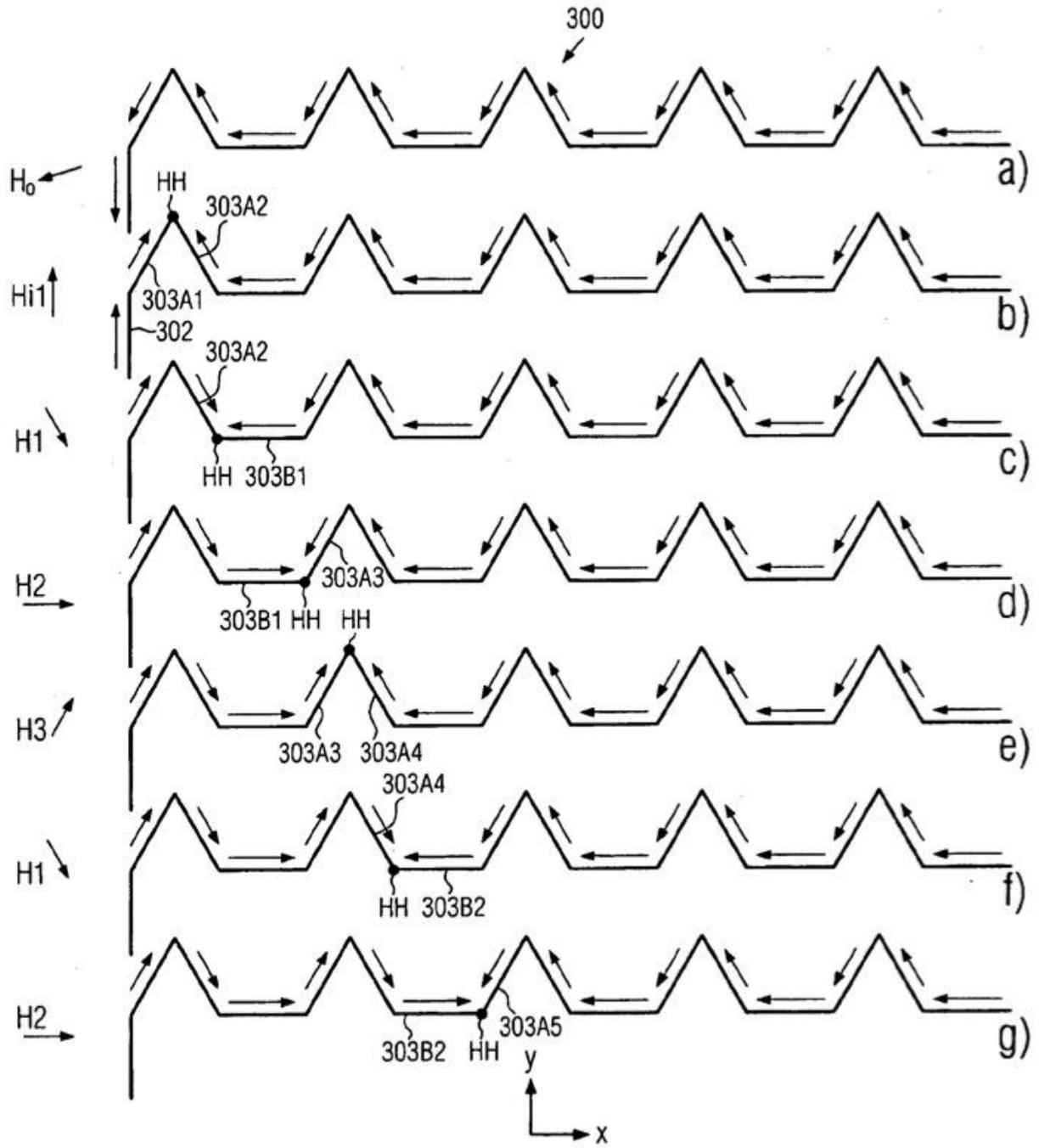


FIG. 7

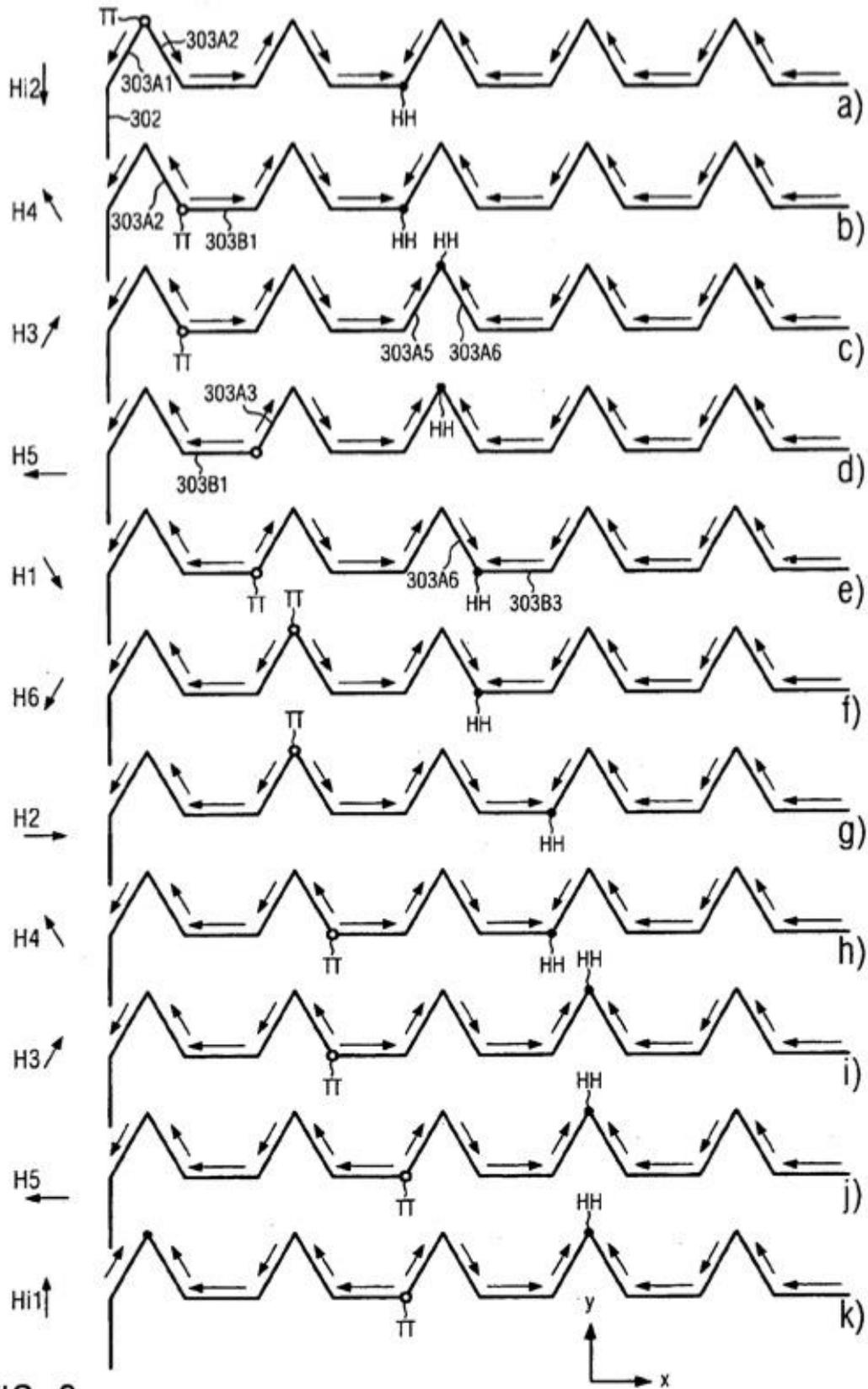


FIG. 8

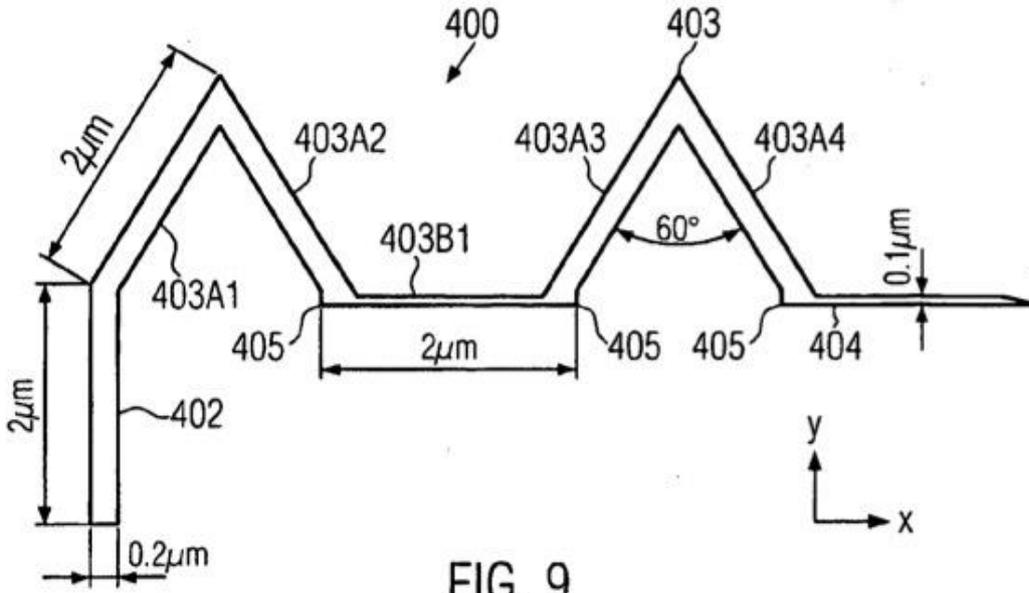


FIG. 9

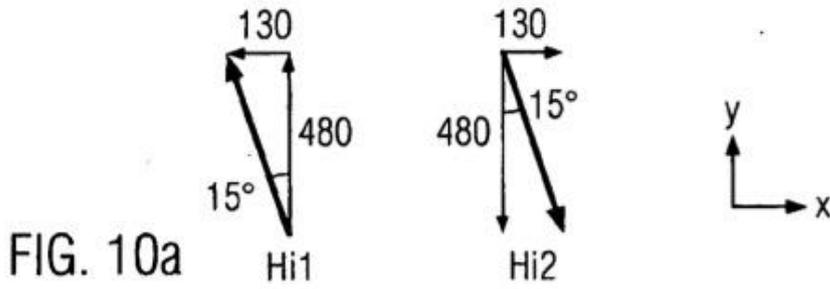


FIG. 10a

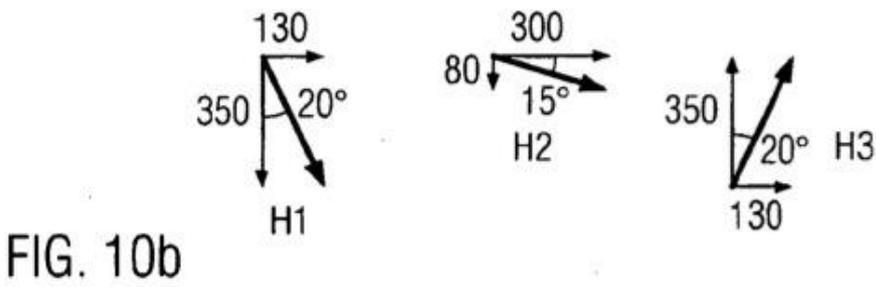


FIG. 10b

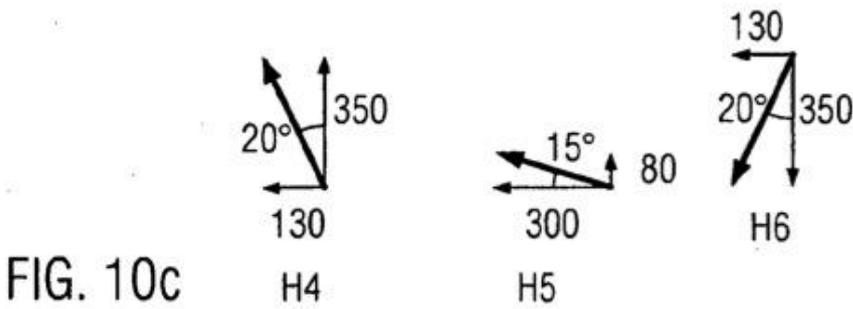


FIG. 10c

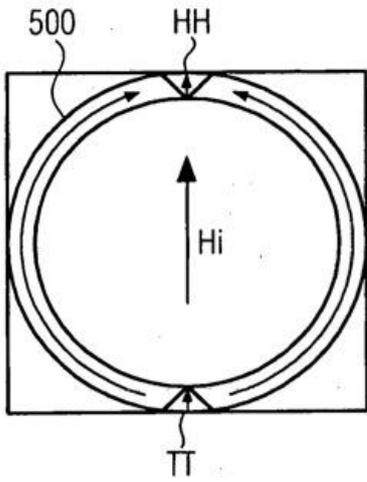


FIG. 11a

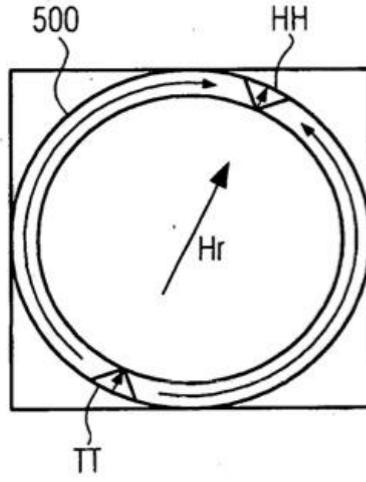
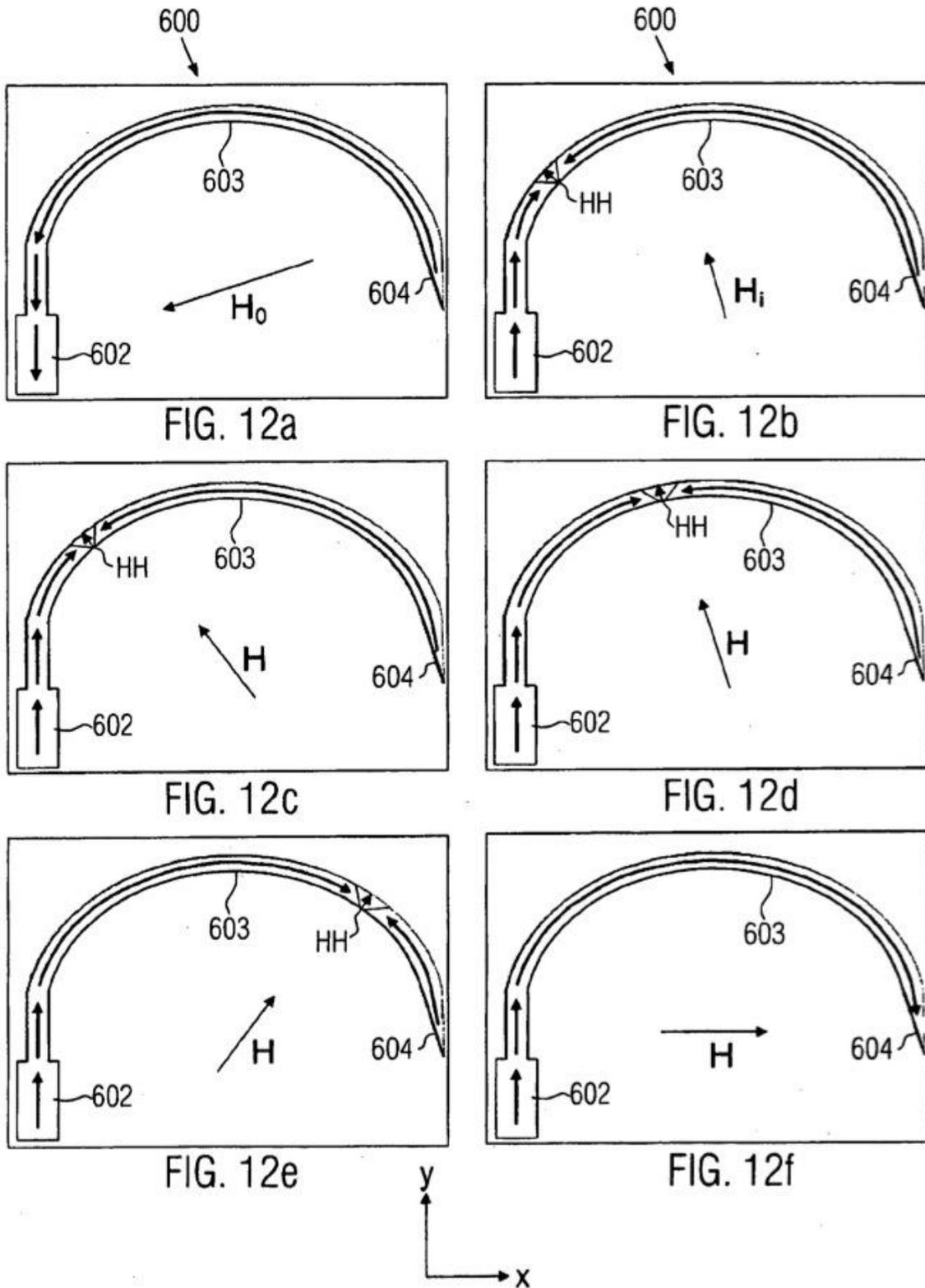


FIG. 11b



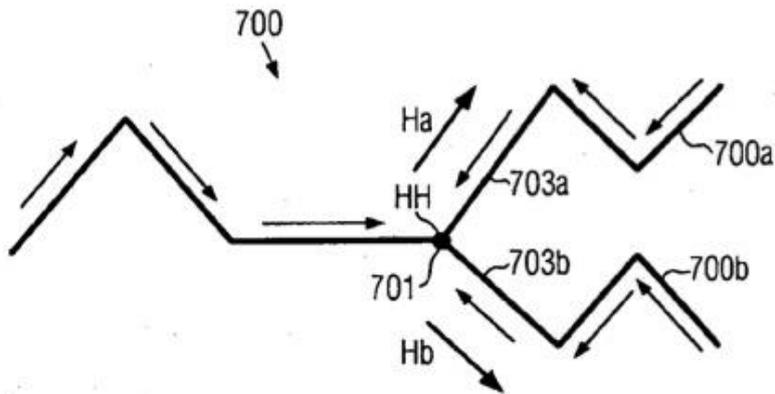


FIG. 13