

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 378 160**

51 Int. Cl.:  
**H01F 21/08** (2006.01)  
**H01F 29/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **04775086 .4**  
96 Fecha de presentación: **13.10.2004**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1676284**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **05.07.2006**

54 Título: **Núcleo para un dispositivo inductor controlable**

30 Prioridad:  
**14.10.2003 GB 0324092**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**09.04.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**09.04.2012**

73 Titular/es:  
**MAGTECH AS**  
**P.O. BOX 462**  
**1502 MOSS, NO**

72 Inventor/es:  
**HAUGS, Espen y**  
**STRAND, Frank**

74 Agente/Representante:  
**Carpintero López, Mario**

ES 2 378 160 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Núcleo para un dispositivo inductor controlable

La presente invención se refiere a un inductor controlable, y más en particular, a un inductor controlable que comprende elementos de tubo coaxiales y concéntricos primero y segundo que comprenden un material anisótropo, en el que los citados elementos están conectados el uno al otro en ambos extremos por medio de acopladores de extremo magnéticos, un primer devanado arrollado alrededor de ambos elementos de tubo magnéticos, un segundo devanado arrollado alrededor de al menos uno de los citados elementos de tubo magnéticos, en el que un eje de devanado del primer devanado es perpendicular a un eje de al menos uno de los elementos de tubo magnéticos, en el que un eje de devanado del segundo devanado coincide con el eje, en el que, cuando es energizado, el primer devanado genera un campo magnético en una primera dirección que coincide con la dirección de una primera permeabilidad magnética, en el que, cuando es energizado, el segundo devanado genera un campo magnético en una segunda dirección que coincide con la dirección de una segunda permeabilidad magnética, y en el que la primera permeabilidad magnética es sustancialmente mayor que la segunda permeabilidad magnética.

Hay interés desde hace mucho tiempo en el uso de un campo de control para controlar un campo principal en un dispositivo inductivo.

El documento US 4.210.859 describe un dispositivo que comprende un cilindro interior y un cilindro exterior unidos uno al otro en los extremos por medio de elementos de conexión. En este dispositivo, el devanado principal está arrollado alrededor del núcleo y pasa a través de la abertura central del cilindro. El eje de devanado sigue un trayecto a lo largo de la periferia del cilindro. Este devanado crea un campo magnético anular en la pared del cilindro y campos circulares en los elementos de conexión. El devanado de control se arrolla alrededor del eje del cilindro. De esta manera, producirá un campo en la dirección longitudinal del cilindro. Como es habitual en los materiales magnéticos, la permeabilidad del núcleo es modificada por la acción de la corriente de control aplicada al devanado de control. Debido a que los cilindros y los elementos de conexión están fabricados del mismo material, la velocidad de cambio de la permeabilidad es la misma en ambos tipos de elementos. Como consecuencia, la magnitud del campo de control se debe limitar para impedir la saturación del núcleo y la descomposición del campo de control. Como resultado, el rango de control de este inductor es, por lo tanto, limitado, y el dispositivo, en el documento US 4.210.859 tiene un volumen relativamente pequeño que limita la capacidad de gestión de potencia del dispositivo.

Otros dispositivos incluyen la permeabilidad controlada de sólo una parte del trayecto de flujo principal. Sin embargo, un enfoque de este tipo limita drásticamente el rango de control del dispositivo. Por ejemplo, el documento US 4.393.157 describe un inductor variable fabricado de material de fleje de chapa anisótropo. Este inductor comprende dos elementos de anillo unidos perpendicularmente el uno al otro con un área de intersección limitada. Cada elemento de anillo tiene un devanado. La parte del dispositivo en la que se puede realizar el control del campo magnético está limitada a la zona en la que se cruzan los anillos. El área controlable limitada es una porción relativamente pequeña de los circuitos magnéticos cerrados del campo principal y del campo de control. Parte del núcleo se saturará en primer lugar (la saturación no se conseguirá de forma simultánea en todas las partes del núcleo debido a que los diferentes campos actúan sobre diferentes áreas), y esta saturación producirá pérdidas generadas por campos de dispersión del flujo principal. La saturación parcial producirá un dispositivo con un intervalo de control muy limitado.

La Solicitud de Patente de los Estados Unidos US 2 883 604 desvela un variador de frecuencia magnético, en el que se proporciona un único núcleo de material de grano orientado con devanados de entrada situados sobre el núcleo, paralelos y perpendiculares a la dirección de la orientación de los granos. Esto se utiliza para proporcionar un variador de frecuencia magnético, ya sea como un divisor de frecuencia o como un multiplicador de frecuencia.

La Patente de los Estados Unidos US 3 351 860 desvela el cambio de la reactancia de un circuito aéreo para proporcionar sintonización automática, proporcionando una señal de control acoplada a un devanado en un núcleo de crisol de ferrita para variar la inductancia de un devanado controlado.

La Solicitud de Patente Internacional WO0190835 desvela un regulador de corriente o voltaje influenciado magnéticamente que comprende un cuerpo que se compone de un material magnetizable y proporciona un circuito magnético cerrado, al menos un primer conductor eléctrico arrollado alrededor del cuerpo de un primer devanado principal y al menos un segundo conductor eléctrico arrollado alrededor del cuerpo de un segundo devanado principal. El eje de devanado del devanado principal se encuentra dispuesto en ángulo recto con el eje de devanado del devanado de control con el objeto de proporcionar campos magnéticos ortogonales en el cuerpo y de esa manera controlar el comportamiento del material magnetizable en relación con el campo en el devanado principal, por medio del campo en el devanado de control.

Por lo tanto, la técnica anterior carece de un medio para controlar la permeabilidad en un núcleo para tener la capacidad sustancial de gestión de potencia sin introducir pérdidas considerables. Las deficiencias de la técnica anterior afectan a todas las geometrías de dispositivo inductivo, y en particular, a las estructuras curvadas fabricadas de flejes de chapa metálica debido a que se producen corrientes parásitas de Foucault y pérdidas de histéresis considerables en este tipo de estructuras curvadas.

La invención se refiere a estas deficiencias y se puede implementar en un dispositivo inductivo controlable de baja pérdida, adecuado para aplicaciones de alta potencia. En general, la invención se puede utilizar para controlar la conducción del flujo magnético en una dirección de laminación por medio del desplazamiento controlado de dominio en una dirección transversal.

- 5 La presente invención proporciona un núcleo para un inductor magnético controlable de acuerdo con la reivindicación 1 adjunta. Las realizaciones preferidas se exponen en las reivindicaciones dependientes.

Como se explicará en lo que sigue, la permeabilidad del material de grano orientado en la dirección de laminación es controlada mediante el empleo de un campo de control en la dirección transversal. Un dispositivo inductivo controlable de acero de grano orientado puede ser magnetizado en la dirección transversal. En una realización, se suministra un inductor controlable coaxial que comprende elementos de tubo coaxiales y concéntricos primero y segundo. Los elementos están conectados el uno al otro en ambos de extremo por medio de acopladores de extremo magnéticos. Un primer devanado se enrolla alrededor de los citados elementos, y un segundo devanado se enrolla alrededor de al menos uno de los citados elementos. El eje de devanado del primer devanado es perpendicular a los ejes de los elementos y el eje de devanado del segundo devanado coincide con los ejes de los elementos. Los elementos magnéticos primero y segundo están fabricados de un material magnético anisótropo, de manera que la permeabilidad magnética en la dirección de un campo magnético introducido por el primero de los devanados es significativamente mayor que la permeabilidad magnética en la dirección de un campo magnético introducido por el segundo de los devanados. En una versión de esta realización, el material anisótropo es seleccionado en un grupo que consiste en acero al silicio de grano orientado y acero al silicio de grano orientado de permeabilidad alta controlado por dominio.

En una realización, los acopladores de extremo magnéticos están fabricados de un material anisótropo y proporcionan un trayecto de permeabilidad baja para el campo magnético creado por el primer devanado y un trayecto de permeabilidad alta para el campo magnético creado por el segundo devanado. El inductor controlable también puede incluir una lámina de aislamiento delgada situada entre los bordes del elemento de tubo magnético y los acopladores de extremo.

También se describen en lo que sigue una estructura magnética controlable que incluye un circuito magnético cerrado. El circuito magnético cerrado incluye un primer elemento de circuito magnético, y un segundo elemento de circuito magnético. Cada uno de los elementos de circuito magnético está fabricado de un material anisótropo que tiene una dirección de permeabilidad alta. La estructura magnética controlable también incluye un primer devanado que está enrollado alrededor de una primera porción del circuito magnético cerrado, y un segundo devanado que está orientado perpendicular al primer devanado. El primer devanado genera un primer campo magnético en la dirección de la permeabilidad alta del primer elemento de circuito y el segundo devanado genera un segundo campo en una dirección ortogonal a la dirección del primer campo cuando los devanados respectivos están excitados (es decir, energizados).

En un ejemplo, la estructura magnética controlable incluye un primer elemento de circuito que es un miembro de tubo y un segundo elemento de circuito magnético que es un acoplador de extremo que conecta un primer miembro de tubo a un segundo miembro de tubo. En una versión de este ejemplo, el primer miembro de tubo y el segundo miembro de tubo se encuentran situados coaxialmente alrededor de un eje y la dirección de la permeabilidad alta es una dirección anular con respecto al eje. Además, la segunda dirección de permeabilidad alta puede ser en una dirección radial con respecto al eje. En otra versión de este ejemplo, la estructura magnética regulable está fabricada de un material de grano orientado. En otra versión de este ejemplo, la estructura magnética controlable es un inductor.

En otro ejemplo, el aislamiento se encuentra localizado en el circuito magnético cerrado entre el primer elemento de circuito magnético y el segundo elemento magnético. En otro ejemplo, el segundo elemento de circuito magnético tiene un volumen que es del 10% al 20% del volumen del primer elemento de circuito magnético.

De acuerdo con la invención, se proporciona un núcleo para un inductor magnético controlable. El núcleo incluye elementos de tubos coaxiales y concéntricos primero y segundo y cada elemento de tubo se fabrica de un material magnético anisótropo. Un eje está definido por cada elemento de tubo y los elementos de tubo están conectados el uno al otro en ambos extremos por medio de acopladores de extremo magnéticos. Además, el núcleo presenta una primera permeabilidad magnética en una primera dirección paralela a los ejes de los elementos que es significativamente menor que la segunda permeabilidad magnética en una segunda dirección ortogonal a los ejes de los elementos. Además, en el núcleo de la realización, existe en el acoplador una tercera permeabilidad magnética en una dirección anular con respecto a los ejes de los elementos y existe en el acoplador una cuarta permeabilidad magnética en una dirección radial con respecto a los ejes de los elementos. La cuarta permeabilidad magnética sustancialmente mayor que la tercera permeabilidad magnética.

En una versión de esta realización, los elementos de tubo primero y segundo están fabricados de un material de chapa laminada que comprende un extremo de chapa y un recubrimiento de un material de aislamiento. En otra versión, el primer elemento de tubo incluye un espacio en la tercera dirección paralela a los ejes de los elementos y los elementos de tubo primero y segundo están unidos uno al otro por medio de una capa de aislamiento de un gro-

sor del orden de un micrómetro en una junta situada entre los elementos de tubo primero y segundo. En otra versión, un entrehierro se extiende en la dirección axial en cada elemento de tubo y la primera reluctancia de un primer elemento es igual a la segunda reluctancia del segundo elemento. En un ejemplo, el material de aislamiento se selecciona en un grupo que consiste en MAGNETITA-S y UNISIL - H-.

- 5 Un dispositivo acoplador magnético conecta los elementos de tubo coaxiales y concéntricos primero y segundo, uno al otro, para proporcionar un núcleo magnético de un inductor controlable. Los acopladores de extremo magnéticos están fabricados de un material anisótropo y proporcionan un trayecto de permeabilidad baja para el campo magnético creado por el primer devanado y un trayecto de permeabilidad alta para el campo magnético creado por un segundo devanado. En una versión de esta realización, el acoplamiento magnético incluye chapas de metal de grano orientado con una dirección transversal a la que corresponde a la dirección de grano orientado de los elementos de tubo en un núcleo montado. Además, la dirección de grano orientado corresponde a la dirección transversal de los elementos de tubo en el núcleo montado para asegurar que los acopladores de extremo se saturan después de los elementos de tubo. En una versión de esta realización, los acopladores de extremo magnéticos se fabrican de un solo cable de material magnético. En otra versión de esta realización, los acopladores de extremo magnéticos se fabrican de cables trenzados de material magnético.

Los acopladores de extremo magnéticos puede ser producidos por una variedad de medios. En una realización, los acopladores de extremo son producidos laminando un material de chapa magnética para formar un núcleo toroidal. El núcleo tiene un tamaño y forma para adaptarse a los elementos de tubo, y los núcleos se dividen en dos mitades a lo largo de un plano perpendicular a la dirección de Orientación del Grano (GO) del material. Además, el ancho del acoplador de extremo se ajusta para hacer que los segmentos conecten el primer elemento de tubo al segundo elemento de tubo en los extremos de los elementos de tubo. En otra realización, los acopladores de extremo magnéticos son producidos a partir de ya sea de material magnético de cables trenzados o de cable único arrollado para formar un toro y el toro se divide en dos mitades a lo largo de un plano perpendicular a todos los cables.

En otra realización, la invención implementa un dispositivo de inducción variable con remanencia baja, de manera que el dispositivo puede ser fácilmente restablecido entre los ciclos de trabajo en la operación de CA y puede proporcionar una variación de inductancia grande, aproximadamente lineal.

La invención se describirá en detalle por medio de ejemplos que se ilustran en los dibujos que siguen.

La figura 1 muestra una chapa de material magnético y la posición relativa de la dirección de laminación y la axial.

La figura 2 muestra un núcleo laminado y las direcciones de laminación y axial definidas en el mismo.

- 30 La figura 3 muestra una chapa de material de grano orientado y las direcciones de grano y transversal definidas en la misma.

La figura 4 muestra un núcleo laminado de material de grano orientado, y las direcciones de grano y el transversal definidas en él.

La figura 5 muestra las posiciones relativas de las diferentes direcciones en un elemento de tubo.

- 35 La figura 6 muestra esquemáticamente una parte de un dispositivo de acuerdo con una realización de la invención.

La figura 7 muestra el dispositivo de acuerdo con la realización de la figura 6.

La figura 8 muestra una vista seccionada del dispositivo que se muestra en la figura 7.

La figura 9 muestra la posición de láminas de aislamiento delgadas entre los acopladores de extremo magnéticos y los núcleos cilíndricos de un dispositivo de acuerdo con una realización de la invención.

- 40 La figura 10 muestra la producción de acopladores de extremo magnéticos sobre la base del material 10 de chapa magnética.

La figura 11 muestra un toro para la producción de acopladores de extremo magnéticos sobre la base de trenzados de material magnético.

- 45 La figura 12 muestra una sección transversal de un material magnético en forma de toro para la producción de los acopladores de extremo magnéticos.

La figura 13 muestra la dirección del grano transversal en acopladores de extremo magnéticos descritos en la presente memoria descriptiva.

La figura 14 muestra una vista de un toro para la producción de acopladores de extremo magnéticos cuya forma está ajustada para ajustarse a los elementos de tubo, de acuerdo con una realización de la invención.

- 50 La figura 15 muestra un toro producido con cable magnético.

La figura 16 muestra una vista en sección transversal del toro de la figura 15.

La figura 17 muestra la estructura de dominio en el material de grano orientado.

5 El material de fleje de chapa se utiliza en la producción de núcleos magnéticos. Estos núcleos se pueden hacer, por ejemplo, laminando una chapa de material en un cilindro o apilando varias chapas juntas y a continuación cortando los elementos que formarán el núcleo. Es posible definir al menos dos direcciones en el material utilizado para producir los núcleos "laminados", por ejemplo, la dirección de laminación ("RD") y la dirección axial ("AD").

Las figuras 1 y 2 muestran una chapa de material magnético y un núcleo laminado, respectivamente. Las direcciones de laminación y la axial (RD, AD) se muestran en estas figuras. Como se muestra en la figura 2, la dirección de laminación de un núcleo laminado sigue la periferia del cilindro y la dirección axial coincide con el eje del cilindro.

10 El material que tiene características magnéticas que varían dependiendo de la dirección en el material se conoce como anisótropo. Las figuras. 3 y 4 muestran direcciones definidas en una chapa de material anisótropo de grano orientado. El material de grano orientado ("GO") se fabrica laminando una masa de material entre rodillos en varias etapas, junto con calentamiento y enfriamiento de la chapa resultante. Durante la fabricación, el material está recubierto con una capa de aislamiento que afecta a una reducción de dominio y a una reducción de pérdida correspondiente en el material. El proceso de la deformación de material produce un material en el que los granos (y como consecuencia, los dominios magnéticos) están orientados principalmente en una dirección. La permeabilidad magnética alcanza un máximo en esta dirección. En general, esta dirección se conoce como la dirección de GO. La dirección ortogonal a la dirección de GO se conoce como dirección transversal ("TD"). UNISIL y UNISIL - H, por ejemplo, son tipos de materiales magnéticos anisótropos. En una realización, el material de grano orientado, proporciona un porcentaje sustancialmente alto de dominios disponibles para la rotación en la dirección transversal. Como resultado, el material tiene bajas pérdidas y permite un control mejorado de la permeabilidad en la dirección de grano orientado por medio de la aplicación de un campo de control en la dirección transversal TD.

25 Otros tipos de material anisótropo son las aleaciones amorfas. La característica común de todos estos tipos es que se puede definir una dirección de magnetización "fácil" o "suave" (permeabilidad alta) y una dirección de magnetización "difícil" o "dura" (permeabilidad baja). La magnetización en la dirección de permeabilidad alta se logra por movimiento de la pared de dominio, mientras que en la dirección de permeabilidad baja, la magnetización se logra mediante la rotación de la magnetización de dominio en la dirección del campo. El resultado es un bucle m - h cuadrado en la dirección de la permeabilidad alta y un bucle m - h lineal en la dirección de la permeabilidad baja (en el que m es la polarización magnética en función de la intensidad de campo h). Además, en una realización, el bucle m - h en la dirección transversal no muestra coercitividad y tiene remanencia cero. En esta descripción, el término GO se utiliza cuando se refiere a la dirección de permeabilidad alta, mientras que el término dirección transversal ("TD") se utiliza cuando se refiere a la dirección de permeabilidad baja. Estos términos se utilizarán no sólo para los materiales de grano orientado, sino para cualquier material anisótropo utilizado en el núcleo de acuerdo con una realización de la invención. En una realización, la dirección de GO y la dirección de RD están en la misma dirección. En otra realización, la dirección TD y la dirección AD están en la misma dirección. En otra realización, el material anisótropo se selecciona de un grupo de aleaciones amorfas que consisten en Aleación Magnética METGLAS 2605SC, Aleación Magnética METGLAS 2605SA1, Aleación Magnética METGLAS 2605CO, Aleación Magnética METGLAS 2714A, Aleación Magnética METGLAS 2826MB y Nanokristallin R102. En todavía otra realización más, el material anisótropo se selecciona en un grupo de aleaciones amorfas que comprende aleaciones basadas en hierro, aleaciones basadas en cobalto y aleaciones basadas en hierro - níquel.

45 Aunque se describe el uso de material anisótropo, otros materiales pueden ser utilizados siempre que tengan una adecuada combinación de las siguientes características: 1) polarización magnética de pico alto y permeabilidad en la RD, 2) pérdidas reducidas, 3) permeabilidad baja en la TD, y 4) polarización magnética de pico bajo en la TD, y 5) magnetización de rotación en la dirección transversal. La Tabla 1 incluye una lista parcial de los materiales con los que puede implementarse el fleje de chapa y algunas de las características de los materiales que son relevantes para una o más realizaciones de la invención.

50

**TABLA I**

<b>Material</b>	<b>Bmax a 800 A/m</b>	<b>Pérdida a 1,5T, 50Hz</b>	<b>Tipo de Material</b>	<b>Grosor</b>
Unisil-H 103-27-P5	1,93T	0,74W / kg	grano orientado	0,27 mm
Unisil-H 105-30-P5	1,93T	0,77W / kg	grano orientado	0,30 mm
Calidad número 20	1,45T	2,7W / kg	no orientado	0,2 mm
Unisil M 140-30-S5	1,83T	0,85W/kg Permeabilidad max. es aprox. 6000	grano orientado	0,3 mm
Unisil 140-30-S5, Curva de magnetización en CA en la dirección transversal	1,4T (1,15T a 120 A/m)	La permeabilidad max. es aprox. 800		

La figura 5 muestra un ejemplo de un elemento de tubo en una inductancia variable de acuerdo con una realización de la invención. Debido a que este elemento se fabrica laminando una chapa de material anisótropo, se puede definir la dirección de laminación (RD), la dirección axial (AD), la dirección de permeabilidad alta (GO), y la dirección de permeabilidad baja (TD). Las posiciones relativas de estas direcciones en el elemento se muestran en la figura 5. El elemento de tubo puede tener cualquier sección transversal debido a que la forma de la sección transversal, simplemente dependerá de la forma del elemento alrededor del cual se lamina la chapa. Si la chapa se lamina en un paralelepípedo con sección transversal cuadrada, el elemento de tubo tendrá una sección transversal cuadrada. De manera similar, una chapa laminada en un tubo con una sección transversal ovalada tendrá la forma de un tubo con una sección transversal ovalada. En una realización, el elemento de tubo es un cilindro.

La figura 6 muestra esquemáticamente una parte de la realización de un dispositivo 100 de acuerdo con la invención. Este dispositivo 100 comprende un primer elemento de tubo 101 y un segundo elemento de tubo 102, en el que los elementos están conectados uno al otro en ambos de extremo por medio de acopladores de extremo magnéticos. Para mayor claridad, los acopladores de extremo magnéticos no se muestran de esta forma. Un primer devanado 103 está arrollado alrededor de los elementos 101 y 102 con un eje perpendicular a los ejes de los elementos. El campo magnético (Hf, Bf), creado por este devanado cuando se activa, tendrá una dirección a lo largo de la periferia del elemento i.c.7 en una dirección anular relativa a los ejes de los elementos. Un segundo devanado 104 se arrolla alrededor del elemento 102 con un eje de devanado paralelo a los ejes de los elementos. El campo magnético creado por el devanado cuando se activa (Hs, Bs) tendrá una dirección paralela a los ejes de los elementos, es decir, una dirección axial con respecto a los ejes de los elementos. En una realización, el eje de devanado del segundo devanado 104 es coincidente con los ejes de los elementos. En otra realización, los ejes de los elementos no son coincidentes uno con el otro.

Si se combinan los devanados y los campos magnéticos de la figura 6 con el núcleo de material laminado de la figura 5, resulta un dispositivo 100 de acuerdo con una realización de la invención. En una versión de esta realización, la permeabilidad magnética en la dirección de un campo magnético (Hf, Bf) introducido por el primer devanado 103 (es decir, la dirección de GO, RD) es significativamente mayor que la permeabilidad magnética en la dirección de un campo magnético (Hs, Bs) introducido por el segundo devanado 104 (es decir, la dirección de TD, AD).

En una realización, el primer devanado 103 constituye el devanado principal y el segundo devanado 104 constituye el devanado de control. En esta realización, el campo principal (Hf, Bf) es generado en la dirección de la permeabilidad alta (GO, RD) y el campo de control (Hs, Bs) es generado en la dirección de la permeabilidad baja (TD, DC).

Las pérdidas mínimas se producen cuando el material anisótropo se utiliza para proporcionar el dispositivo 100 tal como se describe con referencia a las figuras 5 y 6. Estos resultados se logran con independencia de si el dispositivo 100 se emplea en una aplicación lineal o en una aplicación conmutada. En una aplicación lineal, el dispositivo 100 se conecta y se mantiene en un circuito tal como una inductancia. En una aplicación conmutada, el dispositivo 100 se utiliza para conectar y desconectar otro dispositivo a una fuente de alimentación.

Las pérdidas bajas permiten que el dispositivo 100 sea empleado en aplicaciones de alta potencia, por ejemplo, aplicaciones en circuitos que pueden utilizar transformadores que varían desde unos pocos cientos de kVA a varios MVA de tamaño .

Como se muestra en la ecuación 44) la capacidad de gestión de potencia del núcleo depende de la tensión máxima de bloqueo  $U_b$  con permeabilidad alta y la máxima corriente de magnetización  $I_m$  en el valor mínimo de la permeabilidad controlada.

$$P_s = U_b \cdot I_m \quad (44)$$

- 5 Si la corriente de magnetización y la tensión de bloqueo son expresadas en función de la densidad de campo magnético  $E_m$ , la potencia aparente puede ser expresada como:

$$P_s = \pi \cdot f \cdot B_m^2 \cdot \frac{V_j}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (45)$$

- 10 En la que  $V_j$  es el volumen del trayecto principal del flujo en el núcleo,  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre, y  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa del núcleo. La ecuación 45) muestra que la capacidad de gestión de potencia está relacionada con el volumen del núcleo así como con la permeabilidad relativa del núcleo. Con una permeabilidad muy alta, la corriente de magnetización se encuentra en su nivel más bajo y sólo una pequeña cantidad de potencia está siendo conducida.

- 15 Se desprende de la ecuación 45) que la potencia aparente  $P_s$  por unidad de volumen del núcleo está relacionada con la permeabilidad relativa  $\mu_r$ . En dos núcleos similares en los que la permeabilidad relativa mínima del primer núcleo es la mitad de la permeabilidad relativa mínima de un segundo núcleo, la potencia aparente del primer núcleo es el doble que la del segundo núcleo. Por lo tanto, la gestión de potencia de un volumen de núcleo dado está limitada por la permeabilidad relativa mínima del volumen del núcleo.

- 20 Por consiguiente, en una realización, el volumen de los acopladores de extremo magnéticos es aproximadamente del 10% al 20% del núcleo principal, pero el volumen del acoplador de extremo magnético se puede reducir adicionalmente a  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{1}{4}$  de este, dependiendo de la construcción del núcleo y de la capacidad de gestión de potencia necesaria. En una de tales realizaciones, el volumen de los acopladores de extremo magnéticos es del 5% al 10% del volumen del núcleo principal. En todavía otra realización, el volumen de los acopladores de extremo magnéticos es del 2,5% al 5% del volumen del núcleo principal.

- 25 Una nueva teoría fenomenológica de las curvas de magnetización y de las pérdidas por histéresis en laminaciones de grano orientado (GO) se describe en un artículo titulado, "Modelo Integral de la Curva de Magnetización, Ciclos de Histéresis, y Pérdidas en Cualquier Dirección Fe - Si de Grano Orientado", de Fiorillo et al., publicado en IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, número. 3, Mayo de 2002 (en la presente memoria descriptiva y a continuación "Fiorillo et al."). Fiorillo et al. proporciona una prueba teórica y experimental de que el volumen que evoluciona con la magnetización en la dirección transversal es ocupado para la magnetización en la dirección de laminación. De esta manera, el artículo demuestra que es posible controlar la permeabilidad en una sola dirección por medio de un campo en otra dirección.

- 30 Fiorillo et al. también proporciona un modelo de los procesos en un material de GO. Presenta, por ejemplo, un modelo que incluye curvas de magnetización, ciclos de histéresis, y pérdidas de potencia en cualquier dirección en una laminación de GO. El modelo está basado en la aproximación de cristal único y describe que los dominios evolucionan de una manera compleja cuando un campo se aplica a lo largo de la TD. Haciendo referencia a la figura 17, una chapa de GO comprende un patrón de 180 paredes de dominio, básicamente, dirigidas a lo largo de la RD.

- 35 El estado desmagnetizado (figura 17a) se caracteriza por la magnetización  $J_s$  que está dirigida a lo largo de [001] y [001]. Cuando se aplica un campo en la TD (figura 17b), los dominios básicos de  $180^\circ$  se transforman, por medio de procesos de pared de dominio de  $90^\circ$ , en un patrón hecho de dominios en masa, que tienen la magnetización dirigida a lo largo de [100] y [010] (es decir, formando un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al plano de laminación). Cuando esta estructura de dominio nueva ocupa un volumen de muestra fraccional, el valor de magnetización macroscópica es el siguiente:

$$J_{90} = \frac{J_s}{\sqrt{2}} V_{90} \quad (46)$$

$J_{90}$  = Magnetización en la TD

- 45  $J_s$  = Magnetización en la RD

$V_{90}$  = Volumen de la muestra fraccionada

La magnetización máxima que se puede obtener al final del proceso de magnetización es  $J_{90} = 1,42$  Tesla y se obtiene un incremento adicional por las rotaciones de momentos de los dominios.

Fiorillo et al. también muestra que el volumen de la muestra ocupada por dominios de 180° disminuye debido al crecimiento de los dominios de 90°. Por lo tanto, la permeabilidad o conducción de flujo de los campos aplicados en la dirección de laminación puede ser controlada con un campo de control y un desplazamiento de dominio controlado en la dirección transversal.

5 El comportamiento de la magnetización en la dirección transversal en el acero de GO se describe en el documento "Dominios Magnéticos", de Hubert et al, Springer 2000, páginas 416 - 417 y 532.- 533. El control del desplazamiento de dominio en la dirección transversal para controlar la permeabilidad en la dirección de laminación es el más favorable debido principalmente a que se evitan los movimientos de las 180 paredes cuando se aplica un campo perpendicular a las 180 paredes. Por lo tanto, el campo principal no afecta al campo de control ortogonal, en los volúmenes de TD ya magnetizados.

En contraste con el acero de GO, en el que el mecanismo de magnetización en las direcciones de GO y TD difieren, la magnetización de acero no orientado consiste principalmente en 180 desplazamientos de pared de dominio; por lo tanto, el volumen controlado es afectado continuamente por el campo principal y por el campo de control en acero no orientado.

15 La figura 7 muestra un dispositivo 100 de acuerdo con una realización de la invención. La figura muestra el primer elemento de tubo 101, el primer devanado 103, y los acopladores de extremo magnéticos 105, 106. La característica anisótropa del material magnético para los elementos de tubo que ya ha sido descrita, consiste en que el material tenga la dirección de magnetización suave (GO) en la dirección de laminación (RD).

Los elementos de tubo se fabrican laminando una chapa de material de GO. En una realización, el material de GO es un acero de calidad de grado alto con pérdidas mínimas, por ejemplo, Unisil HM10530P5 de Cogent.

La permeabilidad de acero de GO en la dirección transversal es de aproximadamente del 1% al 10% de la permeabilidad en la dirección de GO, dependiendo del material. Como resultado, la inductancia de un devanado que crea un campo en la dirección transversal es sólo del 1% al 10% de la inductancia del devanado principal, que crea un campo en la dirección de GO, siempre que ambos devanados tengan el mismo número de vueltas. Esta relación de inductancia permite un alto grado de control sobre la permeabilidad en la dirección del campo generado por el devanado principal. Además, con un flujo de control en la dirección transversal, la polarización magnética de pico es aproximadamente el 20% menor que en la dirección de GO. Como resultado, los acopladores de extremo magnéticos en el dispositivo de acuerdo con una realización de la invención no están saturados por el flujo principal o por el flujo de control, y pueden concentrar el campo de control en el material en todo momento.

30 Para prevenir que se produzcan pérdidas por corrientes parásitas de Foucault y trayectos cerrados secundarios en el campo de control, en una realización una capa de aislamiento se encuentra emparedada entre las capas adyacentes de material de chapa. Esta capa se aplica como un revestimiento en la chapa de material. En una realización, el material de aislamiento se selecciona de un grupo que contiene MAGNETITA y MAGNETITA - S. Sin embargo, otro material aislante, tal como C y C - 6, fabricados por Rembrandtin Lack Ges. m.b.H, y otros similares se puede emplear siempre que sean suficientemente resistentes mecánicamente para soportar el proceso de producción, y también que tengan la suficiente resistencia mecánica para impedir cortocircuitos eléctricos entre las capas adyacentes de la lámina. La idoneidad para alivio de tensión por recocido y sellado por colado de aluminio también son características ventajosas para el material de aislamiento. En una realización, el material de aislamiento incluye sistemas mixtos orgánicos / inorgánicos que están exentos de cromo. En otra realización, el material de aislamiento incluye un polímero orgánico térmicamente estable que contienen cargas inorgánicas y pigmentos.

La figura 8 es una vista en sección del dispositivo 100. En esta realización, el primer elemento de tubo 101 comprende un espacio de separación 107 en la dirección axial del elemento localizado entre una primera capa y una segunda capa de la primera capa del tubo. La función principal del espacio de separación 107 es adaptar la capacidad de gestión de potencia y el volumen del material en una aplicación específica. La presencia de un entrehierro en la dirección longitudinal del núcleo producirá una reducción en la remanencia del núcleo. Esto causará una reducción en el contenido de armónicos de la corriente en el devanado principal cuando la permeabilidad del núcleo se reduzca por medio de una corriente en el devanado de control. Una capa de aislamiento delgada se encuentra situada en el espacio de separación 107 entre las dos partes del elemento 101. En una versión de esta realización, los acopladores de extremo magnéticos no están divididos en dos partes.

50 Las figuras 9 - 16 se relacionan con diferentes ejemplos de los acopladores de extremo magnéticos. En una realización, el material utilizado para los acoplamientos de extremo magnéticos es anisótropo. En una versión de esta realización, los acopladores de extremo magnéticos proporcionar un trayecto de magnetización dura (permeabilidad baja) para el campo magnético principal  $H_f$ , que es creado por el primer devanado 103. El campo de control  $H_s$  creado por el segundo devanado 104 (no mostrado en la figura 7), se encontrará con un trayecto de permeabilidad alta en los acopladores de extremo magnéticos y de permeabilidad baja en los elementos de tubo.

Los acopladores de extremo magnéticos o conectores de control de flujo, puede ser fabricados de chapas o cables de metal de GO de material magnético con el campo de control en la dirección de GO y el campo principal en la dirección transversal. Los cables pueden ser cables únicos o cables trenzados.

En una realización, los acopladores magnéticos están fabricados de acero de GO para asegurarse de que los acopladores de extremo no se saturan antes de que los elementos de tubo o los núcleos cilíndricos se encuentren en la TD, sino que por el contrario, concentran el flujo de control a través de los elementos de tubo. En otra realización, los acopladores magnéticos están fabricados de hierro puro.

5 A continuación se describirá el comportamiento del campo magnético en los acopladores de extremo en una realización del dispositivo correspondiente a la figura 7. Inicialmente, es decir, cuando el segundo devanado o devanado de control 104 no está activado, sólo una fracción muy pequeña (aproximadamente del 0,04% al 0,25%) del campo principal  $H_f$  entra en el volumen de los acopladores de extremo magnéticos debido a la permeabilidad muy baja en la dirección del campo principal (TD) en el acoplador de extremo magnético. La permeabilidad en la dirección del campo principal  $H_f$ , TD, es de 8 a 50 a través del acoplador extremo, dependiendo de la construcción y de los materiales utilizados. Como resultado, el flujo principal  $B_f$  se desplaza en el volumen de los elementos de tubo o núcleos cilíndricos 101, 102. Además, la concentración del flujo principal permite que la permeabilidad de los núcleos principales 101, 102 se ajuste hacia abajo a aproximadamente 10.

15 El trayecto del flujo de control ( $B_s$  en las figuras 6 y 7) se eleva axialmente dentro de uno de la pared del núcleo de los elementos de tubo 101, 102, y hacia abajo dentro de la pared del núcleo del otro elemento y se cierra por medio de acopladores de extremo magnéticos 105, 106 en cada extremo de los elementos de tubo concéntricos 101, 102.

20 El trayecto del flujo de control (B) tiene entrehierros muy pequeños provistos de láminas de aislamiento delgadas 108 entre los acopladores de extremo magnéticos 105, 106 y las áreas extremas circulares de los núcleos cilíndricos (figura 9). Esto es importante para prevenir la creación de un trayecto cerrado de corriente para la acción transformadora del primer devanado 103 a través del "devanado" hecho por los elementos de tubo primero y segundo 101, 102 y los acopladores de extremo magnéticos 105, 106.

25 Como se ha mencionado más arriba, los acopladores de extremo magnéticos en una realización de la invención están fabricados de varias chapas de material magnético (láminas). A continuación se hace referencia a las figuras 10 - 14, que son útiles para la comprensión de la presente invención. La figura 10 muestra un acoplador extremo magnético de chapa de acero de GO y los elementos de tubo 101 y 102 vistos desde arriba. Cada segmento 105 de acoplador extremo (por ejemplo, los segmentos 105a y 105b) se estrecha progresivamente desde un extremo radialmente hacia el interior 110 a un extremo radialmente hacia el exterior 112, en el que el extremo radialmente hacia el interior 110 es más estrecho que el extremo radialmente hacia el exterior 112. Las direcciones de GO y TD se muestran en la figura 10 tal como se aplican a cada segmento 105a, 105b del acoplador de extremo. Una porción del acoplador de extremo 105 en los lados izquierdo y derecho de la figura 10 se ha eliminado para mostrar los extremos 114 de la chapa del núcleo interno 102 y del núcleo externo 101. La figura 11 muestra un miembro en forma de toro 116, que, cuando se corta en dos partes, proporciona los acopladores de extremo magnéticos. La figura 12 muestra una sección transversal del toro y la posición relativa de las chapas (por ejemplo, láminas) 105' de material magnético. Las figuras 12 y 13 muestran la dirección de GO en los acopladores de extremo magnéticos, que coincide con la dirección del campo principal. La figura 14 muestra cómo el tamaño y la forma del segmento de acoplador magnético 105 están ajustados para asegurar que el acoplador conecta el primer elemento de tubo 101 (núcleo cilíndrico exterior) al segundo elemento de tubo 102 (núcleo cilíndrico interior) en cada extremo. En la figura 14, el extremo radialmente hacia adentro 110 es más estrecho que el extremo radialmente hacia afuera 112.

35 En otro ejemplo de fondo, que es útil para entender la invención, que se muestra en la figura 15, el mismo tipo de segmentos se fabrica utilizando cable magnético. La producción de los acopladores de extremo utiliza material magnético de cable único o de cable trenzado. La forma toroidal formada por el material magnético se corta en dos mitades como se indica en la sección transversal A - A en la figura 15. La figura 16 muestra cómo los extremos de los cables magnéticos proporcionan las áreas de entrada y de salida del campo magnético  $H_f$ . Cada cable proporciona entonces un trayecto para que el campo magnético  $H_f$ .

45 Para poder aumentar la potencia gestionada por el dispositivo inductivo controlable, el núcleo puede ser fabricado de un material laminado de fleje de chapa. Esto también será ventajoso en la conmutación en la que se requiere cambios rápidos de la permeabilidad.

**REIVINDICACIONES**

1. Un núcleo para un inductor magnético controlable, que comprende:
  - elementos de tubos coaxiales y concéntricos primero (101) y segundo (102), comprendiendo cada elemento de tubo (101, 102) un material magnético anisótropo y definiendo un eje;
  - 5 en el que los elementos de tubo (101, 102) están conectados el uno al otro en ambos extremos por medio de acopladores de extremo magnéticos (105, 106), y
  - en el que el núcleo presenta una primera permeabilidad magnética en una primera dirección ortogonal a los ejes de los elementos (101, 102) significativamente más alta que la segunda permeabilidad magnética en una segunda dirección paralela a los ejes de los elementos (101, 102);
  - 10 el núcleo **se caracteriza porque:**
    - existe en el acoplador (105, 106) una tercera permeabilidad magnética en la dirección anular con respecto a los ejes de los elementos (101, 102), y existe en el acoplador (105, 106) una cuarta permeabilidad magnética en una dirección radial en relación con los ejes de los elementos (101, 102), en el que la cuarta permeabilidad magnética es sustancialmente mayor que la tercera permeabilidad magnética.
2. Un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los elementos de tubos primero (101) y segundo (102) están fabricados de un material de chapa laminada que comprende un extremo de chapa y un recubrimiento de un material aislante.
3. Un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) están fabricados de un acero o hierro de grano orientado (GO).
4. Un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1 ó 3, en el que los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) comprenden:
  - una pluralidad de segmentos (105a, 105b), teniendo cada segmento (105a, 105b) un extremo radialmente hacia el exterior (112) y un extremo radialmente hacia el interior (110);
  - 25 estando estrechado progresivamente cada segmento desde el extremo radialmente hacia el interior (110) hasta el extremo radialmente hacia el exterior (112), y
  - siendo más estrecho el extremo radialmente hacia el interior (110) que el extremo radialmente hacia el exterior (112).
5. Un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1, comprendiendo el primer elemento de tubo (101):
  - 30 una primera capa (101);
  - una segunda capa (101), y
  - un espacio de separación (107) en una tercera dirección paralela a los ejes de los elementos,
  - en el que la primera capa (101) y la segunda capa (101) del primer elemento de tubo (101) están unidas una a la otra por medio de una capa de aislamiento del orden de un micrómetro de grosor en una junta (107) situada entre las capas primera y segunda.
  - 35
6. Un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende, además:
  - un entrehierro (107) que se extiende en una dirección axial en cada elemento de tubo (101, 102), y
  - en el que la primera reluctancia del primer elemento (101) es igual a una segunda reluctancia del segundo elemento (102).
- 40 7. Un inductor controlable (100) que comprende un núcleo de acuerdo con la reivindicación 1, comprendiendo el citado inductor controlable, además:
  - un primer devanado (103) arrollado alrededor de ambos de los citados elementos de tubo magnéticos, y
  - un segundo devanado (104) arrollado alrededor de al menos uno de los citados elementos de tubo magnéticos (101, 102), en el que un eje de devanado del primer devanado (103) es perpendicular a un eje de al menos uno de los elementos de tubo magnéticos (101, 102);
  - 45 en el que un eje de devanado del segundo devanado (104) coincide con el eje del núcleo;

en el que:

el primer devanado (103), cuando es energizado, está adaptado para generar un campo magnético en una primera dirección que coincide con una dirección de la primera permeabilidad magnética;

5 el segundo devanado (104), cuando es energizado, está adaptado para generar un campo magnético en una segunda dirección que coincide con una dirección de la segunda permeabilidad magnética;

la primera permeabilidad magnética es sustancialmente mayor que la segunda permeabilidad magnética, y

10 los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) están fabricados de un material anisótropo y están adaptados para proporcionar un trayecto de permeabilidad baja para el campo magnético creado por el primer devanado (103) y un trayecto de permeabilidad alta para el campo magnético creado por el segundo devanado (104).

8. El inductor controlable (100) de acuerdo con la reivindicación 7, en el que el material anisótropo es seleccionado en un grupo que consiste en acero al silicio de grano orientado y acero al silicio de grano orientado de permeabilidad alta controlado por dominio.

9. Un inductor controlable de acuerdo con la reivindicación 7, en el que los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) están fabricados de acero o de hierro de grano orientado (GO).

10. Un inductor controlable de acuerdo con la reivindicación 7 o 9, en el que los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) comprenden:

20 una pluralidad de segmentos (105a, 105b), teniendo cada segmento (105a, 105b) un extremo radialmente hacia el exterior (112) y un extremo radialmente hacia el interior (110);

estrechándose progresivamente cada segmento desde el extremo radialmente hacia el interior (110) hasta el extremo radialmente hacia el exterior (112), y

25 siendo más estrecho el extremo radialmente hacia el interior (110) que el extremo radialmente hacia el exterior (112).

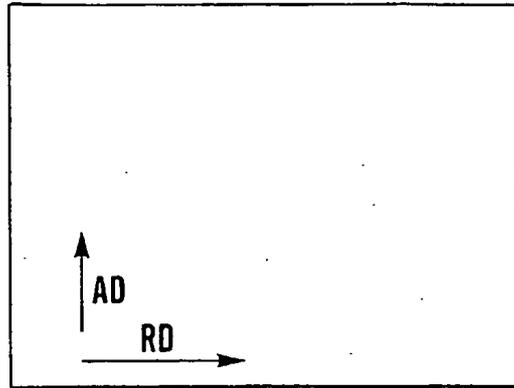
11. El inductor controlable de acuerdo con la reivindicación 7, que comprende, además una lámina de aislamiento delgada (108) situada entre los bordes de los elementos de tubo magnéticos (101, 102) y los acopladores de extremo (105, 106).

30 12. El inductor controlable de acuerdo con la reivindicación 7, en el que un volumen de los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) es del 10% al 20% del volumen de los elementos de tubo magnéticos (101, 102).

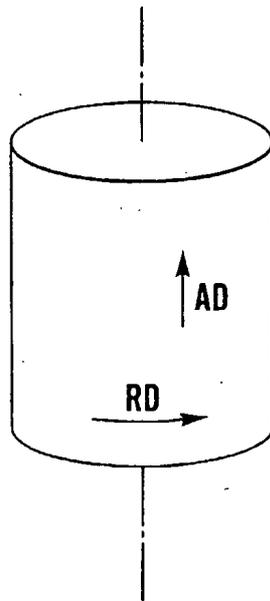
13. El inductor controlable de acuerdo con la reivindicación 7, en el que el volumen de los acopladores de extremo magnéticos (105, 106) es del 25% al 50% del volumen de los elementos de tubo magnéticos (101, 102).

14. El inductor controlable de reivindicación 7, en el que la dirección del campo magnético introducido por el primer devanado (103) está en una dirección anular con respecto al eje de al menos uno de los elementos (101, 102).

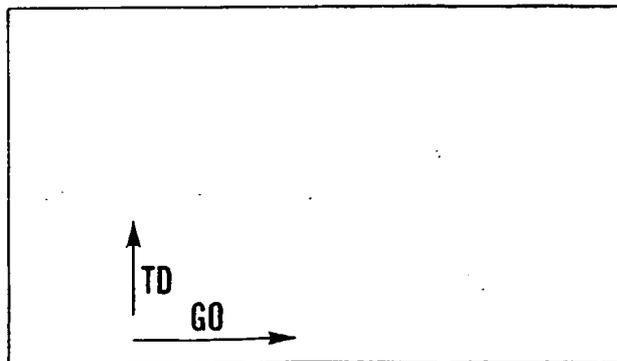
35 15. El inductor controlable de reivindicación 7, en el que la dirección del campo magnético introducido por el segundo devanado (104) está en una dirección paralela al eje de al menos uno de los elementos (101, 102).



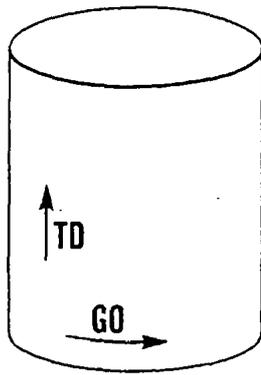
*Fig. 1*



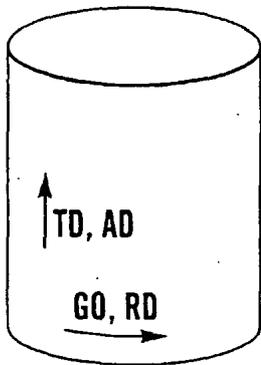
*Fig. 2*



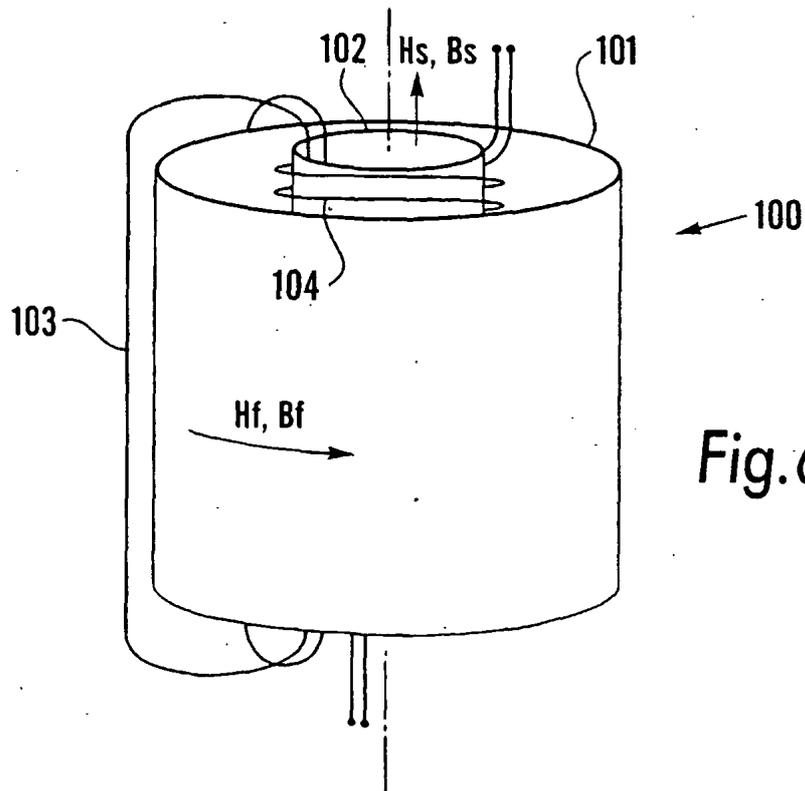
*Fig. 3*



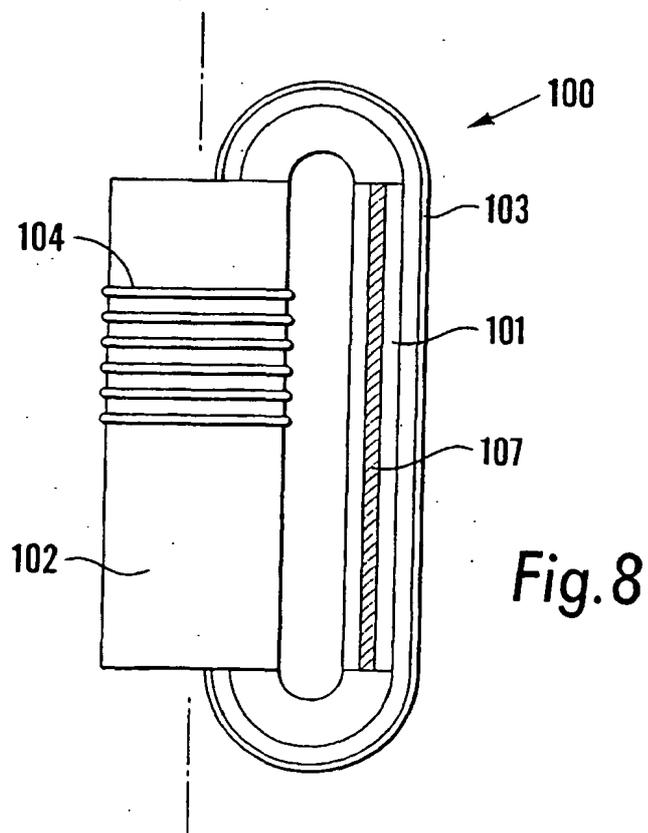
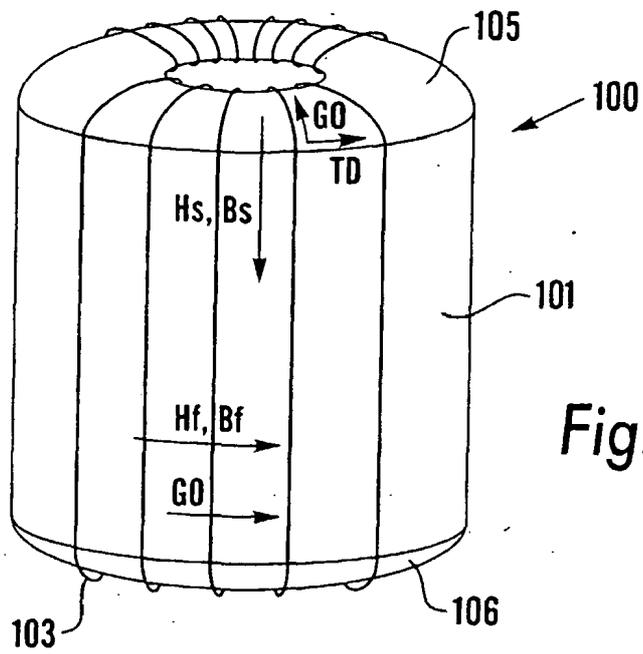
*Fig. 4*

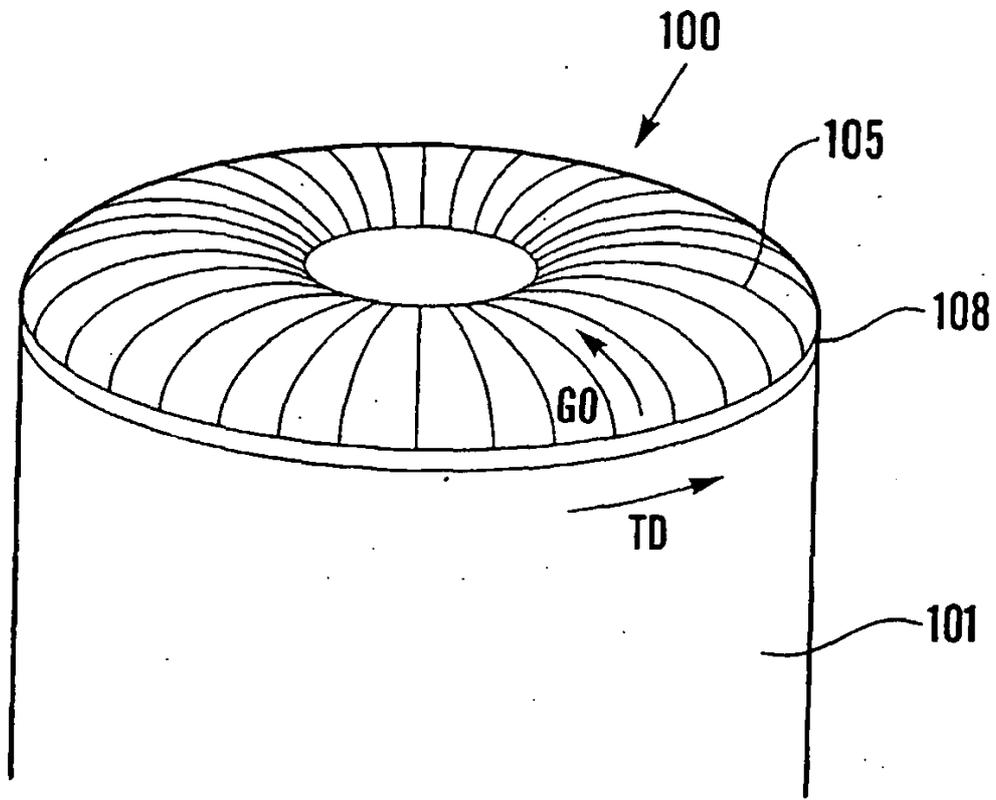


*Fig. 5*



*Fig. 6*





*Fig. 9*

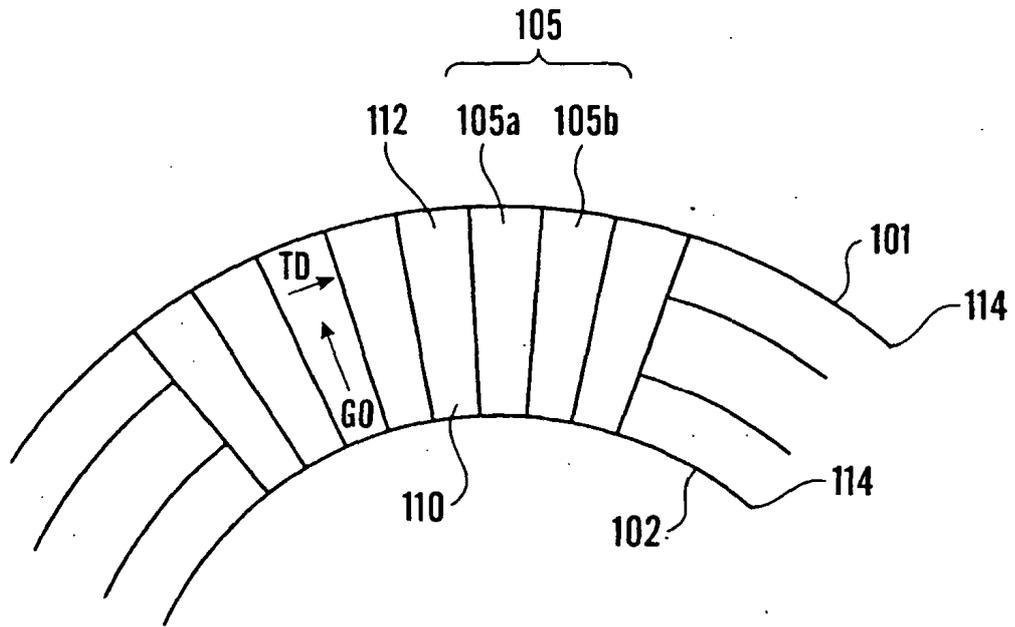


Fig. 10

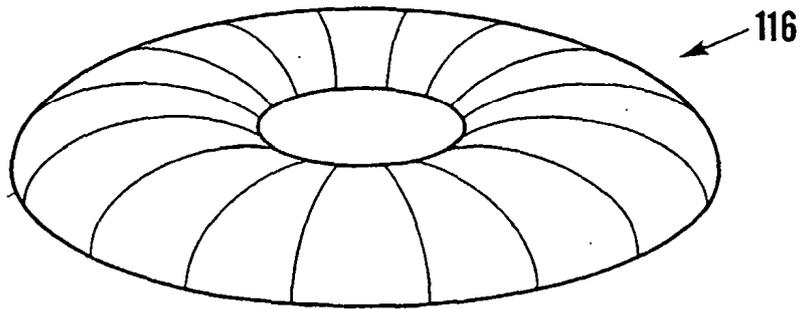


Fig. 11

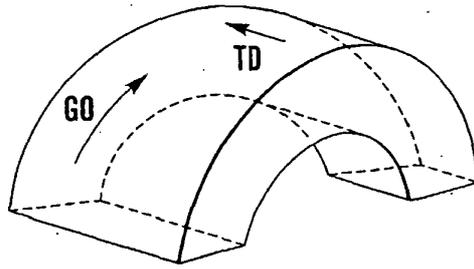


Fig. 13

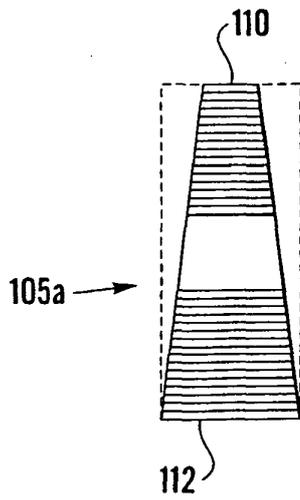


Fig. 14

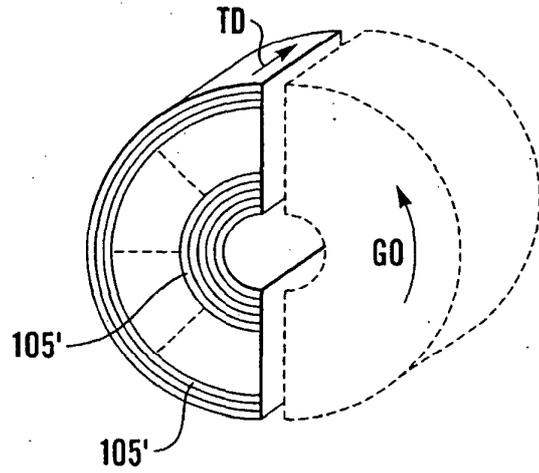


Fig. 12

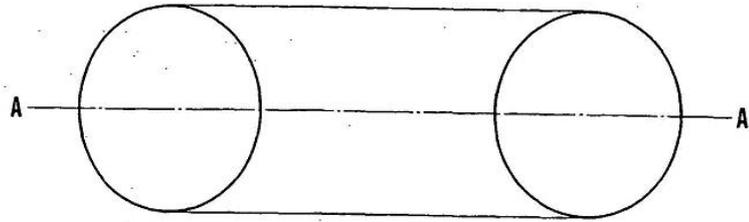


Fig. 15

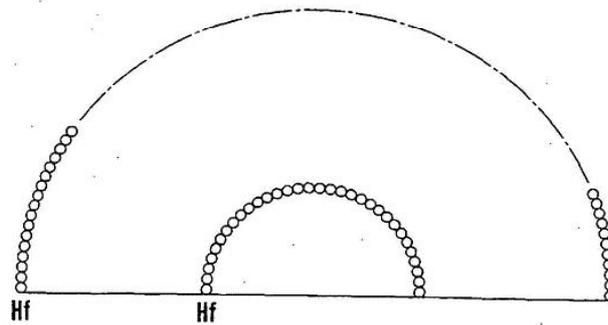


Fig. 16

A-A

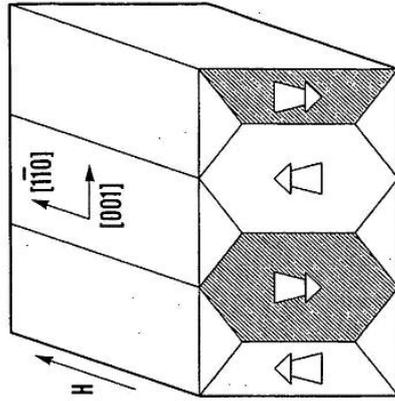


Fig. 17b

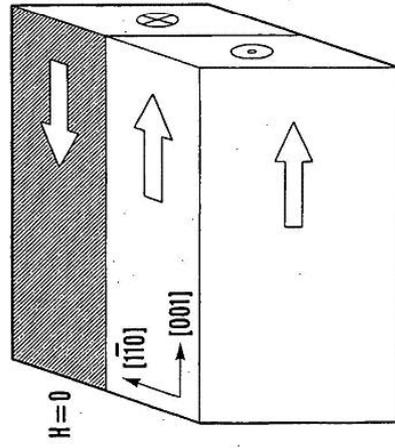


Fig. 17a