

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901931376A1

Publication Date

20121001

Applicant

FONDAZIONE ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA

Title

COMPLESSO MAGNETICO APERTO A TRE FACCE ATTIVE,
PARTICOLARMENTE PER LA FORMAZIONE DI IMMAGINI PER RISONANZA
MAGNETICA.

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:
"Complesso magnetico aperto a tre facce attive,
particolarmente per la formazione di immagini per
risonanza magnetica"

di: FONDAZIONE ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA,
nazionalità italiana, Via Morego 30, 16163 GENOVA
Inventori designati: Franco BERTORA, Pasquale FAB-
BRICATORE, Andrea VIALE, Alice BORCETO, Giulio SAN-
DINI

Depositata il: 31 marzo 2011

* * *

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda la generazione
di campi magnetici, in particolare per la formazio-
ne di immagini da risonanza magnetica.

Più specificamente, l'invenzione riguarda un
complesso magnetico secondo il preambolo della ri-
vendicazione 1.

La formazione di immagini da risonanza magne-
tica (MRI) richiede un campo magnetico di alta in-
tensità ed uniformità su una regione di interesse.
Nel caso di formazione di immagini di soggetti uma-
ni è anche necessario che la conformazione del ma-
gnete sia tale da poter permettere facilmente il
posizionamento del soggetto da esaminare, in modo

che il volume da esaminare si trovi in corrispondenza della regione di omogeneità del campo, ossia della regione in cui il campo magnetico presenta intensità costante ed è unidirezionale.

I campi elettromagnetici sono governati dalle equazioni di Maxwell che non ammettono l'esistenza di campi uniformi nell'aria, se non in volumi completamente racchiusi all'interno di elementi generatori dei campi stessi. Generalmente, però, la cavità del magnete è prevista per il posizionamento del soggetto da esaminare. È quindi a priori esclusa la possibilità di realizzare un magnete che fornisca un campo perfettamente omogeneo ed allo stesso tempo presenti aperture adatte all'introduzione del paziente.

Secondo la teoria dei campi magnetici una regione di uniformità del campo magnetico in un volume non percorso da correnti elettriche, quale è appunto la regione di interesse per le applicazioni di cui si tratta, può esistere esclusivamente nell'intorno di un punto di sella. Ciò è conseguenza del fatto che non possono esistere massimi o minimi del campo in un volume non percorso da correnti. Inoltre, l'intensità del campo decresce all'aumentare della distanza dalle correnti generatrici.

L'arte della realizzazione di magneti adatti alla formazione di immagini da risonanza magnetica è quindi stata centrata sull'individuazione di tecniche che permettessero di approssimare al meglio le condizioni desiderate impiegando generatori di campo magnetico costituiti da avvolgimenti conduttivi, all'interno dei quali scorre una corrente elettrica continua, o da blocchi di materiale magnetizzato. Le tecniche impiegate al riguardo sono molte e differiscono in modo sostanziale a seconda che il campo sia generato da avvolgimenti o da blocchi di materiale magnetizzato. Da un punto di vista basilare, però, i principi fisici sono gli stessi.

Lo stato corrente dell'arte nel campo della formazione di immagini da risonanza magnetica (MRI) richiede intensità di campo che vanno da un minimo di 1 Tesla fino a valori di 8 o 9 Tesla. La forma costruttiva più comune per un generatore di campo magnetico destinato ad applicazioni di MRI è quella di una serie di bobine circolari avvolte a differenti diametri e distanze assiali su di un unico asse di simmetria cilindrica. Una opportuna scelta delle dimensioni delle bobine e della loro collocazione permette di ottenere campi con le caratteri-

stiche di intensità ed omogeneità richieste sul volume di interesse, che è situato in prossimità del centro della struttura. L'impiego di bobine esterne in cui la corrente fluisce in direzione opposta a quelle interne permette inoltre la "schermatura", ovvero la riduzione del campo nelle regioni in cui questo non è necessario (od addirittura dannoso).

In conseguenza di questa scelta costruttiva il magnete assume la forma di un cilindro all'interno del quale collocare il paziente. La regione di formazione di immagini risulta essere vicina al centro del cilindro ed è quindi difficilmente accessibile dall'esterno. Poiché spesso nella regione di formazione di immagini viene posizionata la testa (esami dell'encefalo) od il torace o la vita del paziente (esami cardiaci o addominali), quest'ultimo si trova racchiuso nel volume cilindrico del magnete, il che genera spesso situazioni di ansietà, disagio o aperta claustrofobia che, in percentuali non trascurabili di casi, rendono impossibile l'esame.

Un'altra struttura impiegata è la configurazione "aperta" in cui un nucleo ferroso comprendente due espansioni polari circolari o di altra forma è eccitato tramite avvolgimenti o materiale permanentemente magnetizzato. Questo tipo di magneti è

limitato nella massima intensità di campo che può essere raggiunta dalla massima magnetizzazione residua dei magneti permanenti disponibili o dalle caratteristiche di saturazione del ferro che costituisce il nucleo.

L'uso di materiali magnetici permanenti limita l'intensità massima di campo raggiungibile che risulta essere dell'ordine di 0,5-0,8 Tesla, inferiore ai livelli correntemente offerti dai magneti superconduttivi.

Di fatto, le strutture che hanno trovato finora un'applicazione pratica nella formazione di immagini da risonanza magnetica sono le configurazioni di avvolgimenti a bobine separate, o i magneti di volume conformati a C od a H.

US 5,592,090 e US 5,305,749 descrivono entrambi un complesso magnetico a struttura aperta avente una singola sorgente di campo magnetico nella forma di un avvolgimento, ed una struttura di materiale magnetico per la propagazione del campo eccitato dalla sorgente e per stabilire un campo uniforme in una regione di una cavità destinata a ricevere un paziente.

Queste configurazioni sono comunemente descritte come configurazioni a due facce attive,

poiché solo due superfici generano attivamente il campo magnetico nella regione di interesse.

In generale, la generazione di un campo magnetico uniforme in una regione di interesse entro una cavità o un volume di spazio aperto, accessibile da un paziente, è generalmente ottenuta a discapito dell'efficienza, che è definita come il rapporto tra l'energia del campo magnetico compreso nella regione spaziale di interesse e l'energia totale impiegata per generare il suddetto campo, ovvero come il rapporto tra l'intensità del campo magnetico nella regione spaziale di interesse e la densità di corrente di picco che fluisce negli avvolgimenti eccitatori del suddetto campo.

E' immediatamente evidente ad un esperto del settore che l'efficienza di un complesso magnetico è tanto minore quanto maggiore è il numero di lati aperti della struttura. Ad esempio, un magnete solenoidale o "a tunnel" è aperto alle facce estreme opposte, perpendicolari alla direzione del vettore di campo magnetico, mentre un magnete a C è aperto su quattro facce parallele al campo (involuppo del traferro), per cui quest'ultima configurazione, più confortevole per il paziente, soffre di una efficienza limitata rispetto a quella solenoidale.

La qualità delle immagini ottenibili, fino ad una risoluzione sub-millimetrica, è determinata essenzialmente dal rapporto segnale/rumore del complesso. Il rumore, tipicamente dovuto a contributi di origine termica, non può essere ridotto oltre i limiti imposti dalla temperatura corporea del paziente. Viceversa, il segnale utile è proporzionale all'intensità del campo magnetico che si stabilisce nella regione di interesse, da cui la necessità di generare intensità di campo elevate in questa regione per ottenere una migliore qualità delle immagini e ridotti tempi di esame e quindi di esposizione del paziente alle radiazioni magnetiche.

Il problema teorico e pratico di progettare un magnete aperto si riduce quindi al problema di determinare una configurazione atta a generare un campo magnetico avente le caratteristiche di intensità ed omogeneità richieste in una regione di interesse per quanto possibile lontana dalla struttura magnetica, e quindi accessibile, tale da garantire la funzionalità in particolari applicazioni di formazione di immagini per risonanza magnetica, ad esempio per lo studio della corteccia motoria umana, ove è richiesto che il paziente sia mantenuto in una posizione naturale eretta o seduta, con li-

bertà di movimenti.

La presente invenzione si prefigge lo scopo di realizzare un complesso magnetico a struttura aperta atto a produrre un campo magnetico uniforme di intensità accresciuta ed idonea ad garantire la formazione di immagini da risonanza magnetica in una regione di interesse accessibile ad un paziente, in cui la generazione del campo magnetico presenta una efficienza superiore alle configurazioni note.

Secondo la presente invenzione tale scopo viene raggiunto grazie ad un complesso magnetico avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 1.

Modi particolari di realizzazione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti, il cui contenuto è da intendersi come parte integrale o integrante della presente descrizione.

Forma ulteriore oggetto dell'invenzione una apparecchiatura per la formazione di immagini da risonanza magnetica, come rivendicato.

In sintesi, la presente invenzione si fonda sul principio di ottenere un campo magnetico omogeneo in una regione di interesse per addizione di campi generati da due strutture principali diffe-

renti di un complesso magnetico a struttura aperta, che formano un complesso magnetico a tre facce attive.

L'invenzione discende dalla considerazione che nel caso di una struttura magnetica aperta la chiave per aumentare l'intensità del campo magnetico è di limitare il "grado di apertura", ossia l'apertura dell'angolo solido sotteso dall'apertura totale visto dal centro della regione di interesse, attribuendo un ruolo attivo di generazione del campo magnetico alla parete di fondo della cavità, che in una struttura a C convenzionale ha solo funzione strutturale.

Il ruolo attivo della parete di fondo della cavità è ottenuto imponendo una densità di corrente lineare uniforme sulla parete o in prossimità di essa, chiudendo la corrente su percorsi di ritorno disposti in modo tale da non ostruire l'apertura, né accrescere l'ingombro della struttura nel suo complesso.

Più specificamente, il complesso magnetico oggetto dell'invenzione include una prima sorgente di campo magnetico nella forma di una struttura magnetica a C di forma prismatica che definisce una cavità di magnete aperta entro la quale è posiziona-

bile un soggetto da esaminare. La struttura magnetica a C è ad esempio un corpo magnetico a C formato da un volume di materiale magnetizzato in modo permanente o da un volume cavo o contenente materiale ad elevata permeabilità magnetica al quale è associata una disposizione di avvolgimenti di eccitazione, o una struttura di avvolgimenti equivalente, le cui espansioni polari definiscono tra loro una regione di campo magnetico uniforme.

Una seconda sorgente di campo magnetico è aggregata alla struttura magnetica a C principale e formata da avvolgimenti che abbracciano almeno un ramo della struttura a C e definiscono almeno una distribuzione di corrente unidirezionale su una superficie interna alla cavità, atta a generare un campo magnetico di intensità e direzione costante entro la cavità e nella regione spaziale di traferro compresa tra le espansioni polari della struttura magnetica a C.

Il complesso magnetico oggetto dell'invenzione permette di ottenere un campo magnetico con le caratteristiche di intensità ed omogeneità richieste su una regione di interesse situata nel volume interno alla cavità, tra la parete di fondo di quest'ultima e le espansioni polari della struttura

a C, e la sua conformazione è tale da poter permettere facilmente il posizionamento del soggetto da esaminare in modo che il volume da esaminare si trovi in corrispondenza della regione di omogeneità del campo.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione verranno più dettagliatamente esposti nella descrizione particolareggiata seguente di una sua forma di attuazione, data a titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 è una rappresentazione schematica di una prima forma di realizzazione del complesso magnetico oggetto dell'invenzione;

le figure 2a e 2b sono rappresentazioni schematiche equivalenti della forma di realizzazione di figura 1;

la figura 3 è una rappresentazione schematica di una seconda forma di realizzazione del complesso magnetico oggetto dell'invenzione;

la figura 4 è una rappresentazione schematica di una variante di realizzazione del complesso magnetico illustrato in figura 3;

la figura 5 è una rappresentazione schematica di una terza forma di realizzazione del complesso

magnetico oggetto dell'invenzione;

la figura 6 è una rappresentazione esemplificativa di una apparecchiatura per la formazione di immagini da risonanza magnetica utilizzante un complesso magnetico del tipo mostrato in figura 1; e

la figura 7 è una rappresentazione schematica della prima forma di realizzazione del complesso magnetico oggetto dell'invenzione, provvista di avvolgimenti laterali correttivi del campo magnetico complessivo.

Un complesso magnetico oggetto dell'invenzione, indicato con M, è rappresentato nelle forme e varianti di realizzazione attualmente preferite con riferimento alle figure 1-5, e comprende una prima sorgente di campo magnetico 10 ed una seconda sorgente di campo magnetico 20 accoppiate, elettricamente indipendenti, che definiscono una cavità di magnete C aperta da almeno un lato e generano ciascuna un contributo al campo magnetico risultante in una regione di interesse interna a detta cavità.

La prima sorgente di campo magnetico 10 è formata da un corpo magnetico a C di forma prismatica simmetrica rispetto al piano di simmetria yz comune della sorgente. Il corpo magnetico a C è formato da un volume di materiale magnetizzato o di materiale

magnetico al quale è associata una disposizione di avvolgimenti di eccitazione (non raffigurati) di materiale conduttore o superconduttore, o ancora in termini magneticamente equivalenti, una disposizione di avvolgimenti in aria secondo un inviluppo prismatico a C.

La struttura magnetica a C della prima sorgente di campo 10 include una sezione centrale 12 che definisce una parete di fondo della cavità C, dalle cui estremità dipartono due sezioni laterali parallele 14, sostanzialmente ortogonali alla sezione centrale, che definiscono alle estremità terminali libere rispettive espansioni polari N, S affacciate.

Questa sorgente è predisposta per generare una componente di campo magnetico principale avente un orientamento ed una intensità sostanzialmente uniforme in una regione spaziale compresa tra le espansioni polari, la cui intensità decresce allontanandosi dalla regione centrale del traferro e verso l'interno della cavità.

La seconda sorgente di campo 20 comprende una struttura conduttrice, preferibilmente superconduttrice, di corrente che include almeno un avvolgimento continuo, o una disposizione di avvolgimenti

continui coassiali, o ancora più preferibilmente una pluralità di bobine (ad esempio bobine planari) separate, elettricamente indipendenti, di fili o nastri conduttori avvolte intorno ad almeno una sezione della struttura magnetica della prima sorgente di campo 10.

In altri termini, la seconda sorgente di campo 20 definisce almeno una struttura composta sostanzialmente bidimensionale entro la cavità di magnete C, atta a sostenere una distribuzione bidimensionale di corrente ampia, che contribuisce a generare un campo magnetico utile le cui linee di flusso si sovrappongono per direzione e verso alle linee di flusso del campo magnetico generato tra le espansioni polari della prima sorgente di campo, accrescendo l'intensità del campo omogeneo nella regione di interesse compresa all'interno della cavità.

La seconda sorgente di campo magnetico può essere rappresentata teoricamente in un modello elettrico da un foglio di corrente adiacente alla parete di fondo del complesso, atto ad essere percorso da un flusso di corrente unidirezionale distribuito su una superficie piana o incurvata, determinato dall'affiancamento di una pluralità di percorsi di corrente sostanzialmente paralleli ed equiversi ap-

partenenti ad una pluralità di avvolgimenti distinti, ed indicato schematicamente in figura dalle frecce parallele di circolazione della corrente entro le spire.

La corrente complessiva genera nel volume di spazio affacciato alla parete di fondo e compreso tra essa e le espansioni polari N, S, esternamente alle bobine, un campo magnetico supplementare sostanzialmente unidirezionale orientato perpendicolarmente alla direzione del flusso di corrente generatore interno alla cavità, che decade allontanandosi dalla parete di fondo.

Il complesso magnetico M definisce una cavità di magnete C aperta da tre lati entro cui è individuata una regione spaziale accessibile di interesse, e presenta una struttura complessiva simmetrica rispetto ad un piano mediano longitudinale di simmetria yz. Entrambe le sorgenti generano un contributo al campo magnetico risultante, di seguito identificati rispettivamente come campo magnetico principale (generato dalla prima sorgente 10) e campo magnetico supplementare (generato dalla seconda sorgente 20).

In una prima forma di realizzazione schematicamente illustrata in figura 1, la seconda sorgente

di campo 20 include un avvolgimento solenoidale o, ancora più preferibilmente, una pluralità di bobine planari parallele $B_1, \dots, B_i, \dots, B_N$ avvolte intorno alla sezione centrale 12 della struttura magnetica a C del complesso, ciascuna percorsa da una rispettiva corrente $I_1, \dots, I_i, \dots, I_N$. La configurazione a bobine planari parallele è preferibile poiché consente un migliore controllo locale della densità di corrente che forma la seconda sorgente di campo, permettendo di modulare l'intensità di corrente circolante in ciascuna bobina indipendentemente dalle altre e così di controllare attivamente la curvatura delle linee di campo nella regione di interesse.

I segmenti di conduttore delle bobine disposti internamente alla cavità contribuiscono a generare un campo magnetico le cui linee di flusso si sovrappongono per direzione e verso alle linee di flusso del campo magnetico generato tra le espansioni polari della prima sorgente di campo, in definitiva contribuendo ad accrescere l'intensità del campo omogeneo nella regione di interesse.

La struttura magnetica ad elevata efficienza mostrata in figura 1, in cui la sezione centrale della porzione di ritorno del flusso magnetico del-

la struttura magnetica a C è circondata da bobine a sezione trasversale rettangolare, è schematizzata ulteriormente in figura 2a, unitamente alla configurazione magnetica equivalente di figura 2b.

Se le bobine sono trasformate in blocchi magnetizzati equivalenti, le cariche magnetiche risultanti assumono la configurazione mostrata in figura. Il campo risultante mostra un punto di sella in una posizione interna alla cavità, che è condizione necessaria per la realizzazione di una regione di campo uniforme. L'ottimizzazione di questa configurazione attiene al raggiungimento della massima estensione della regione uniforme e della massima intensità di campo entro di essa.

Al riguardo, si danno le seguenti considerazioni:

- sia le espansioni polari della struttura magnetica a C, sia la parete di fondo della cavità contribuiscono all'intensità di campo complessiva, ovvero non vi è cancellazione tra i due contributi;
- il contributo della bobina è massimo quando più la regione di uniformità del campo è prossima ad essa e quanto più è distante la parete opposta in prossimità della quale è il percorso di ritorno dei conduttori della bobina medesima;

- la regione di uniformità non può essere troppo vicina alla bobina, dovendosi prevedere l'ingombro di un criostato per il controllo della temperatura se la bobina è realizzata in materiale superconduttore;
- l'estensione della regione di uniformità dipende dal risultato di sovrapposizione dei gradienti opposti dei campi generati dalla bobina e dalla struttura magnetica a C;
- l'estensione della regione di uniformità nella direzione x di profondità della cavità del complesso magnetico dipende essenzialmente dalla posizione, lungo l'asse x , delle espansioni polari N, S e dal rapporto tra le correnti nella struttura magnetica a C e nelle bobine;
- l'estensione della regione di uniformità nella direzione y (larghezza della cavità) può essere controllata attraverso una modulazione spaziale della corrente nelle bobine, la modulazione non influenzando in modo rimarchevole l'estensione della regione di uniformità nella direzione x , a meno di variazioni nella corrente complessiva;
- l'estensione della regione di uniformità nella direzione z (altezza della cavità) dipende essenzialmente dall'estensione del magnete nella medesi-

ma direzione z .

Un complesso magnetico del tipo mostrato in figura 1 può essere descritto attraverso un numero limitato di parametri, rispettivamente:

- WxC : larghezza sull'asse x delle espansioni polari;
- WxS : larghezza sull'asse x delle bobine;
- Δx : distanza delle espansioni polari dalla parete di fondo attiva della cavità;
- Wy : traferro magnetico;
- Wz : lunghezza del magnete;
- R : rapporto tra la densità di corrente media nelle bobine e quella nella struttura di volume a C ;
- Nc : numero di bobine planari che costituiscono la seconda sorgente di campo;
- Wyp : altezza di ciascuna bobina planare height (che deve essere inferior a $Wy \times Nc$ per tenere in conto anche lo spazio necessario alla struttura meccanica di sostegno e alloggiamento delle bobine).

Dati i suddetti parametri geometrici è possibile determinare il valore di R che massimizza l'estensione della regione di uniformità in x .

In considerazione della linearità delle equazioni che governano il sistema la modulazione spa-

ziale delle correnti delle bobine può essere determinata calcolando la matrice pseudo-inversa di $M \times N_c$ che rappresenta il contributo di N_c bobine planari in M punti distribuiti su una regione di uniformità lungo y .

Applicata una modulazione di corrente, si rende necessario un controllo della corrente media nelle bobine, poiché ne viene influenzata l'omogeneità del campo sull'asse x . Un risultato di progettazione soddisfacente si ottiene dopo poche iterazioni.

L'estensione complessiva della regione di uniformità è funzione dei parametri geometrici originali e la posizione esatta del centro della regione di uniformità lungo l'asse x non può essere determinata a priori. In seguito alla scelta di diversi valori dei parametri iniziali la struttura del complesso magnetico può essere ottimizzata in sede di progettazione attraverso una combinazione di algoritmi di ottimizzazione meta-euristici ad obiettivi singoli o multipli (ad esempio, GODLIKE, una procedura software gratuita per MATLAB, The MathWorks, Natick, MA).

In una seconda forma di realizzazione schematicamente illustrata in figura 3, la seconda sor-

gente di campo 20 include una coppia di bobine planari speculari affiancate B'_1 , B'_2 nelle quali è stabilita una circolazione di corrente simmetrica, avvolte concentricamente intorno ad una rispettiva sezione laterale 14 della struttura magnetica a C del complesso e percorse da una rispettiva corrente I'_1 , I'_2 .

I segmenti di conduttore paralleli delle bobine planari disposti internamente alla cavità contribuiscono a generare un campo magnetico le cui linee di flusso si sovrappongono per direzione e verso alle linee di flusso del campo magnetico generato tra le espansioni polari della prima sorgente di campo, contribuendo ad accrescere l'intensità del campo omogeneo nella regione di interesse.

In una variante della seconda forma di realizzazione, schematicamente illustrata in figura 4, la seconda sorgente di campo 20 include una coppia di disposizioni speculari di bobine planari, ciascuna disposizione comprendendo una pluralità di bobine planari B''_{1a} , ..., B''_{1n} e rispettivamente B''_{2a} , ..., B''_{2n} di perimetro crescente avvolta intorno ad una rispettiva sezione laterale della struttura a C del complesso secondo una disposizione raggiata o a ventaglio, e percorse da rispettive correnti

$I''_{1a}, \dots, I''_{1n}, I''_{2a}, \dots, I''_{2n}$. In particolare, ciascuna bobina comprende un lato o una porzione di percorso conduttivo interna alla cavità, che giace su una superficie adiacente alla parete di fondo della cavità medesima, ad esempio su un piano parallelo alla parete di fondo, mentre i restanti segmenti conduttivi di ciascuna bobina giacciono su piani sostanzialmente paralleli alla superficie (alle facce) delle sezioni laterali 14 della struttura magnetica a C che abbracciano.

I segmenti di conduttore paralleli delle bobine planari disposti internamente alla cavità contribuiscono a generare un campo magnetico le cui linee di flusso si sovrappongono per direzione e verso alle linee di flusso del campo magnetico generato tra le espansioni polari della prima sorgente di campo, contribuendo ad accrescere l'intensità del campo omogeneo nella regione di interesse.

Questa variante di realizzazione si contraddistingue per un ingombro esterno ridotto rispetto alla forma di realizzazione di figura 3.

In una terza forma di realizzazione schematicamente illustrata in figura 5, la struttura di volume della prima sorgente di campo 10 include una sezione centrale 12 incurvata, con la concavità ri-

volta verso la cavità C del complesso magnetico.

La seconda sorgente di campo 20 include una coppia di disposizioni speculari di bobine planari, ciascuna disposizione comprendendo una pluralità di bobine planari $B'''_{1a}, \dots, B'''_{1n}$ e rispettivamente $B'''_{2a}, \dots, B'''_{2n}$ di perimetro crescente avvolte intorno ad una rispettiva sezione laterale della struttura magnetica a C del complesso secondo una disposizione impilata su piani paralleli, e percorse da rispettive correnti $I'''_{1a}, \dots, I'''_{1n}, I'''_{2a}, \dots, I'''_{2n}$. In particolare, ciascuna bobina comprende un lato o una porzione di percorso conduttivo interna alla cavità, che giace su una superficie curva parallela alla parete di fondo della cavità medesima, mentre i restanti segmenti conduttivi di ciascuna bobina giacciono su piani sostanzialmente paralleli alla superficie (alle facce) delle sezioni laterali 14 della struttura di volume a C che abbracciano.

I segmenti di conduttore paralleli delle bobine planari disposti internamente alla cavità contribuiscono a generare un campo magnetico le cui linee di flusso si sovrappongono per direzione e verso alle linee di flusso del campo magnetico generato tra le espansioni polari della prima sorgente.

te di campo, contribuendo ad accrescere l'intensità del campo omogeneo nella regione di interesse.

Nelle figure allegate per semplicità di rappresentazione le bobine sono raffigurate da una unica linea chiusa di sviluppo quadrangolare, su alcuni segmenti della quale una freccia indica il verso di circolazione della corrente. Un tecnico del settore comprenderà tuttavia che la bobina è comunque formata da un insieme di spire, il cui numero può variare tipicamente da 1 a diverse migliaia e la cui estensione spaziale può variare conseguentemente in diametro e spessore, in funzione del numero di spire e della struttura di avvolgimento adottata (ad esempio, bobine planari a "pancake" o a "doppio pankcake"). La stessa forma geometrica delle bobina non è vincolante, potendosi realizzare avvolgimenti di forma approssimativamente quadrangolare (a vertici arrotondati) o circolare o ancora ellittica, ad esempio in funzione della sezione trasversale della struttura a C che le bobine abbracciano.

Anche la sezione quadrangolare della struttura di volume è puramente indicativa, potendosi contemplare altre forme poligonali, una forma circolare o altre forme curve o forme più complesse con una

successione di lati retti e lati curvi, così come strutture complessive a C modificata, ottenibili curvando uno o più sezioni.

Si noti che in tutti gli esempi di realizzazione descritti le bobine generano un campo magnetico supplementare elettricamente e magneticamente indipendente dal campo generato dal magnete permanente o dalla configurazione equivalente di avvolgimenti solenoidali in aria.

Una rappresentazione esemplificativa dell'utilizzo di un complesso magnetico del tipo mostrato in figura 1 per la realizzazione di una apparecchiatura A per la formazione di immagini da risonanza magnetica è mostrata schematicamente in figura 6.

La struttura della prima sorgente di campo 10 forma una parete di fondo W della apparecchiatura in corrispondenza della sezione centrale 12 e pareti laterali L in corrispondenza delle sezioni laterali 14. La struttura della seconda sorgente di campo 20 cinge trasversalmente la parete di fondo W della struttura della prima sorgente di campo 10 lasciando un volume di spazio aperto C, accessibile da tre lati.

Nelle forme e varianti di realizzazione mo-

strate alle figure 3 a 5 la struttura della seconda sorgente di campo 20 cinge trasversalmente le pareti laterali L della struttura della prima sorgente di campo 10, sempre lasciando un volume di spazio aperto C, accessibile da tre lati.

Come si comprende chiaramente, un paziente H può essere accolto nella cavità C del complesso, facilmente accessibile, e posizionato nella regione di interesse tra le espansioni polari e la parete di fondo, ove può essere sottoposto ad un campo magnetico omogeneo per l'intero volume che si intende indagare. Il paziente può essere ricevuto nella cavità in posizione seduta o in piedi, e può godere di una seppur limitata possibilità di movimento nello spazio.

Vantaggiosamente, è possibile aggiungere una coppia di avvolgimenti laterali B_c correttivi del campo magnetico complessivo generato dai contributi della prima e della seconda sorgente, i quali sono disposti su superfici piane, coplanari o parallele alle espansioni polari N, S ed estesi per l'intera profondità della struttura del complesso magnetico, come mostrato in figura 7, atti a perturbare il campo generato per recuperare eventuali disomogeneità dovute ad errori residui e tolleranze di fab-

bricazione.

E' stato dimostrato che un complesso magnetico secondo l'invenzione, che massimizza l'efficienza e l'omogeneità di una apparecchiatura per la formazione di immagini da risonanza magnetica, in particolare per la formazione di immagini della corteccia motoria di un paziente che possa mantenere libertà di movimento, raggiunge un campo magnetico di intensità pari a 2T con densità di corrente compatibili con l'impiego di bobine superconduttrici di NbTi alla temperatura dell'elio liquido.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo allontanarsi dall'ambito di protezione dell'invenzione definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Complesso magnetico a struttura aperta, atto a generare un campo magnetico omogeneo in una regione spaziale accessibile, comprendente una prima ed una seconda sorgente di campo magnetico (10, 20) spazialmente accoppiate che definiscono una cavità di magnete (C) aperta da almeno un lato e generano ciascuna un contributo al campo magnetico risultante,

caratterizzato dal fatto che, la prima sorgente di campo magnetico (10) comprende una struttura magnetica includente una porzione centrale (12) che definisce una parete di fondo della cavità (C) ed una coppia di porzioni laterali (14) formanti alle estremità rispettive espansioni polari (N, S) affacciate, predisposta per generare in una regione di traferro una componente di campo magnetico sostanzialmente uniforme ed orientato lungo la direzione di collegamento tra le espansioni polari, la cui intensità presenta un gradiente in una direzione di allontanamento dalla regione di traferro; e dal fatto che la seconda sorgente di campo magnetico (20) comprende almeno un avvolgimento conduttore o superconduttore ($B_1, \dots, B_N; B'_1, B'_2; B''_{1a}, \dots, B''_{1n}, B''_{2a}, \dots, B''_{2n}; B'''_{1a}, \dots, B'''_{1n}, B'''_{2a},$

..., B'''_{2n}) sviluppato intorno ad una porzione (12; 14) della struttura magnetica in modo tale da presentare una pluralità di sezioni di conduttore che giacciono su una superficie interna alla cavità, atte ad essere percorse da un flusso di corrente unidirezionale ($I_1, \dots, I_N; I'_1, I'_2; I''_{1a}, \dots, I''_{1n}, I''_{2a}, \dots, I''_{2n}; I'''_{1a}, \dots, I'''_{1n}, I'''_{2a}, \dots, I'''_{2n}$) per cui generano nel volume di spazio affacciato ad esse un secondo campo magnetico sostanzialmente unidirezionale di orientamento corrispondente a quello del primo campo magnetico generato da detta prima sorgente (10), la cui intensità presenta un gradiente atto a compensare, in una regione di interesse, il gradiente della intensità del campo generata dalla prima sorgente (10).

2. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1, in cui la struttura magnetica prima sorgente di campo magnetico comprende un volume di materiale magnetizzato a C o una disposizione di avvolgimenti in aria avente un involuppo a C.

3. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la seconda sorgente di campo (20) include un avvolgimento solenoidale sviluppato intorno alla porzione centrale (12) della struttura magnetica della prima sorgente di campo magnetico

(10).

4. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la seconda sorgente di campo (20) include una pluralità di bobine planari parallele ($B_1, \dots, B_N$) avvolte intorno alla porzione centrale (12) della struttura magnetica della prima sorgente di campo magnetico (10).

5. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 4, in cui l'intensità di corrente ($I_1, \dots, I_N$) circolante in ciascuna bobina ($B_1, \dots, B_N$) è controllata indipendentemente, in modo tale da controllare localmente la densità di corrente di detta seconda sorgente di campo magnetico (20).

6. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la seconda sorgente di campo (20) include una coppia di bobine planari affiancate (B'_1, B'_2), ciascuna delle quali è avvolta intorno ad una rispettiva porzione laterale (14) della struttura magnetica della prima sorgente di campo magnetico (10).

7. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la seconda sorgente di campo (20) include una coppia di disposizioni di bobine planari, ciascuna disposizione comprendendo una pluralità di bobine planari ($B''_{1a}, \dots, B''_{1n}, B''_{2a}, \dots, B''_{2n}$)

avvolta intorno ad una rispettiva porzione laterale (14) della struttura magnetica della prima sorgente di campo magnetico (10) secondo una disposizione raggiata o a ventaglio, per cui ciascuna bobina comprende una porzione di percorso conduttivo interna alla cavità, in modo tale da formare una distribuzione bidimensionale di corrente ($I''_{1a}, \dots, I''_{1n}, I''_{2a}, \dots, I''_{2n}$) adiacente ad una parete di fondo (W) piana di detta cavità (C).

8. Complesso magnetico secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la seconda sorgente di campo (20) include una coppia di disposizioni di bobine planari, ciascuna disposizione comprendendo una pluralità di bobine planari ($B'''_{1a}, \dots, B'''_{1n}, B'''_{2a}, \dots, B'''_{2n}$) avvolte intorno ad una rispettiva porzione laterale della struttura magnetica della prima sorgente di campo magnetico (10) secondo una disposizione impilata su piani paralleli, per cui ciascuna bobina comprende una porzione di percorso conduttivo interna alla cavità, in modo tale da formare una distribuzione bidimensionale di corrente ($I'''_{1a}, \dots, I'''_{1n}, I'''_{2a}, \dots, I'''_{2n}$) adiacente ad una parete di fondo (W) incurvata di detta cavità (C).

9. Complesso magnetico secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente una cop-

pia di avvolgimenti laterali correttivi (B_C) del campo magnetico complessivo generato per sovrapposizione dei contributi di dette prima e seconda sorgente di campo (10, 20), giacenti su superfici coplanari o parallele alle espansioni polari (N, S).

10. Apparecchiatura per la formazione di immagini da risonanza magnetica, includente un complesso magnetico (M) secondo le rivendicazioni 1 a 9.

CLAIMS

1. An open-structure magnetic assembly, adapted to generate an homogeneous magnetic field in an accessible region of space, comprising a first and a second source of magnetic field (10, 20) spatially coupled, which define a magnet cavity (C) open at least at a side, each of which generating a contribution to the resulting magnetic field,

characterised in that the first source of magnetic field (10) comprises a magnetic structure including a middle portion (12) defining a back wall of the cavity (C) and a pair of lateral portions (14) forming at the ends respective facing poles (N, S), which is arranged for generating in a gap region a substantially uniform magnetic field component oriented along the direction connecting the poles, whose intensity has a gradient in a direction away from the gap region; and

in that the second source of magnetic field (20) comprises at least a conducting or superconducting winding ($B_1, \dots, B_N; B'_1, B'_2; B''_{1a}, \dots, B''_{1n}, B''_{2a}, \dots, B''_{2n}; B'''_{1a}, \dots, B'''_{1n}, B'''_{2a}, \dots, B'''_{2n}$) extended around a portion (12; 14) of the magnetic structure so as to have a plurality of conducting sections lying on a surface within the

cavity, adapted to be passed through by a unidirectional current flow ($I_1, \dots, I_N; I'_1, I'_2; I''_{1a}, \dots, I''_{1n}, I''_{2a}, \dots, I''_{2n}; I'''_{1a}, \dots, I'''_{1n}, I'''_{2a}, \dots, I'''_{2n}$) whereby they generate in the space volume facing them a second substantially unidirectional magnetic field having an orientation corresponding to that of the first magnetic field generated by said first source (10), whose intensity has a gradient adapted to compensate, in a region of interest, the gradient of the intensity of the field generated by the first source (10).

2. A magnetic assembly according to Claim 1, wherein the magnetic structure that is the first source of the magnetic field comprises a C-shaped volume of magnetized material or an arrangement of air core windings having a C-shaped envelope.

3. A magnetic assembly according to Claim 1 or 2, wherein the second field source (20) includes a solenoid winding extending around the middle portion (12) of the magnetic structure of the first source of magnetic field (10).

4. A magnetic assembly according to Claim 1 or 2, wherein the second field source (20) includes a plurality of parallel planar coils ($B_1, \dots, B_N$) wound around the middle portion (12) of the mag-

netic structure of the first source of magnetic field (10).

5. A magnetic assembly according to Claim 4, wherein the intensity of the current ($I_1, \dots, I_N$) flowing in each coil ($B_1, \dots, B_N$) is controlled in an independent way, so as to locally control the current density of said second source of magnetic field (20).

6. A magnetic assembly according to Claim 1 or 2, wherein the second field source (20) includes a pair of planar coils (B'_1, B'_2) arranged side by side, each of which is wound around a respective lateral portion (14) of the magnetic structure of the first source of magnetic field (10).

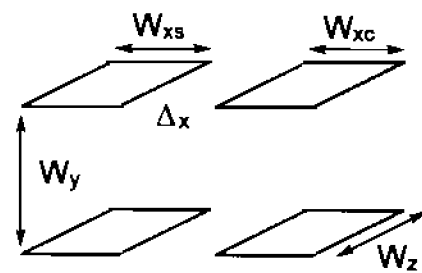
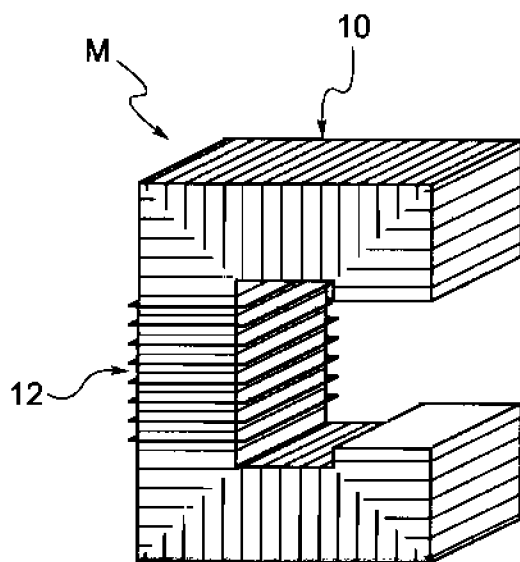
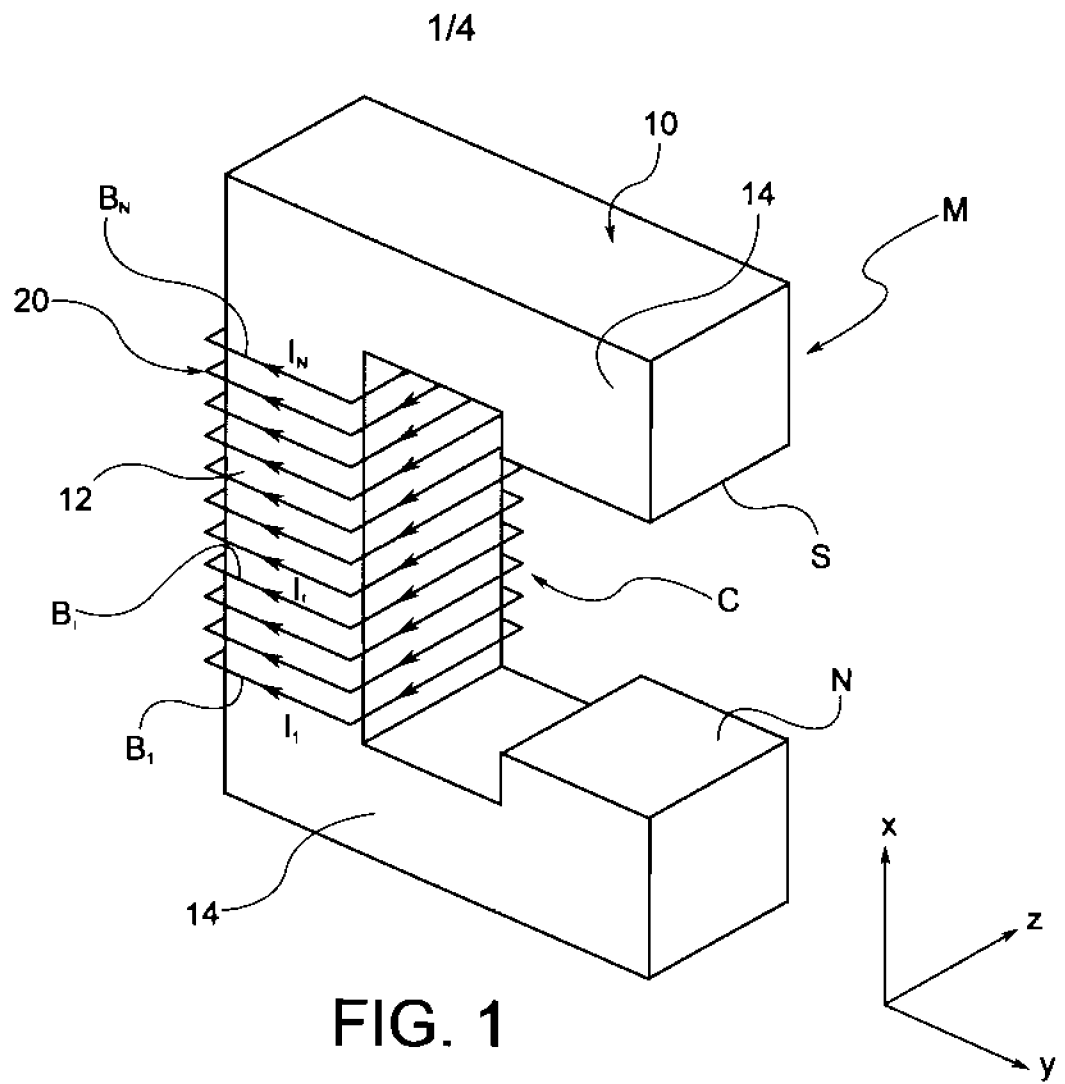
7. A magnetic assembly according to Claim 1 or 2, wherein the second field source (20) includes a pair of arrangements of planar coils, each arrangement comprising a plurality of planar coils ($B''_{1a}, \dots, B''_{1n}, B''_{2a}, \dots, B''_{2n}$) wound around a respective lateral portion (14) of the magnetic structure of the first source of magnetic field (10) according to a radial or fan arrangement, whereby each coil comprises a portion of the conductive path within the cavity, so as to form a two-dimensional distribution of current ($I''_{1a}, \dots, I''_{1n}, I''_{2a},$

..., I''_{2n}) adjacent to an even back wall (W) of said cavity (C).

8. A magnetic assembly according to Claim 1 or 2, wherein the second field source (20) includes a pair of arrangements of planar coils, each arrangement comprising a plurality of planar coils (B'''_{1a} , ..., B'''_{1n} , B'''_{2a} , ..., B'''_{2n}) wound around a respective lateral portion of the magnetic structure of the first source of magnetic field (10) according to a stacked arrangement on parallel planes, whereby each coil comprises a portion of the conductive path within the cavity, so as to form a two-dimensional distribution of current (I'''_{1a} , ..., I'''_{1n} , I'''_{2a} , ..., I'''_{2n}) adjacent to a curved back wall (W) of said cavity (C).

9. A magnetic assembly according to any one of the preceding claims, comprising a pair of correcting lateral windings (B_c) for correction of the overall magnetic field generated by superposition of the contributions of said first and second source of field (10, 20), lying on surfaces which are coplanar or parallel to the poles (N, S).

10. An apparatus for magnetic resonance imaging, including a magnetic assembly (M) according to claims 1 to 9.



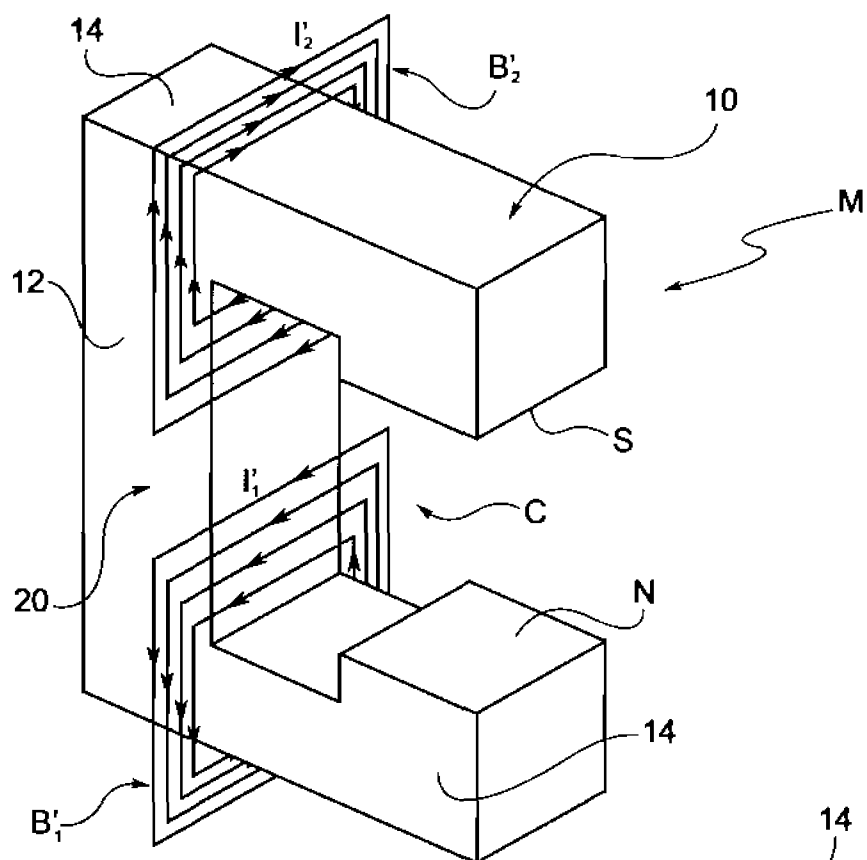


FIG. 3

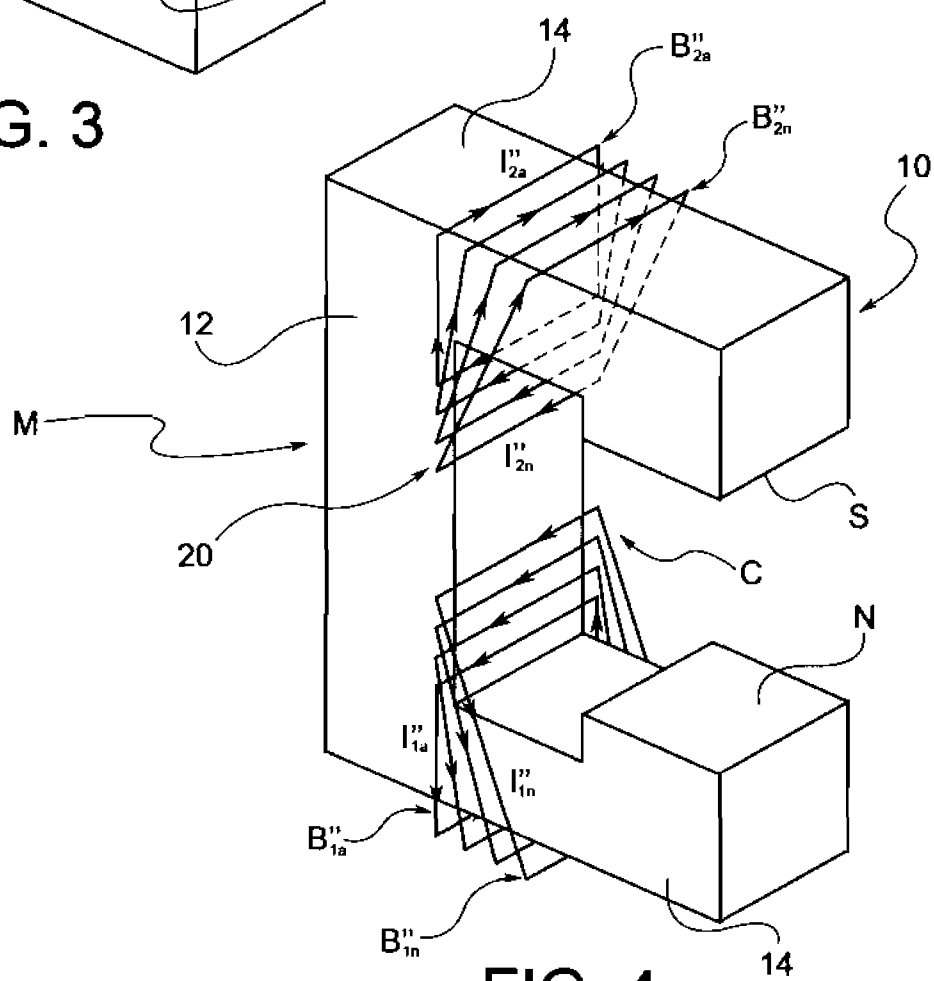


FIG. 4

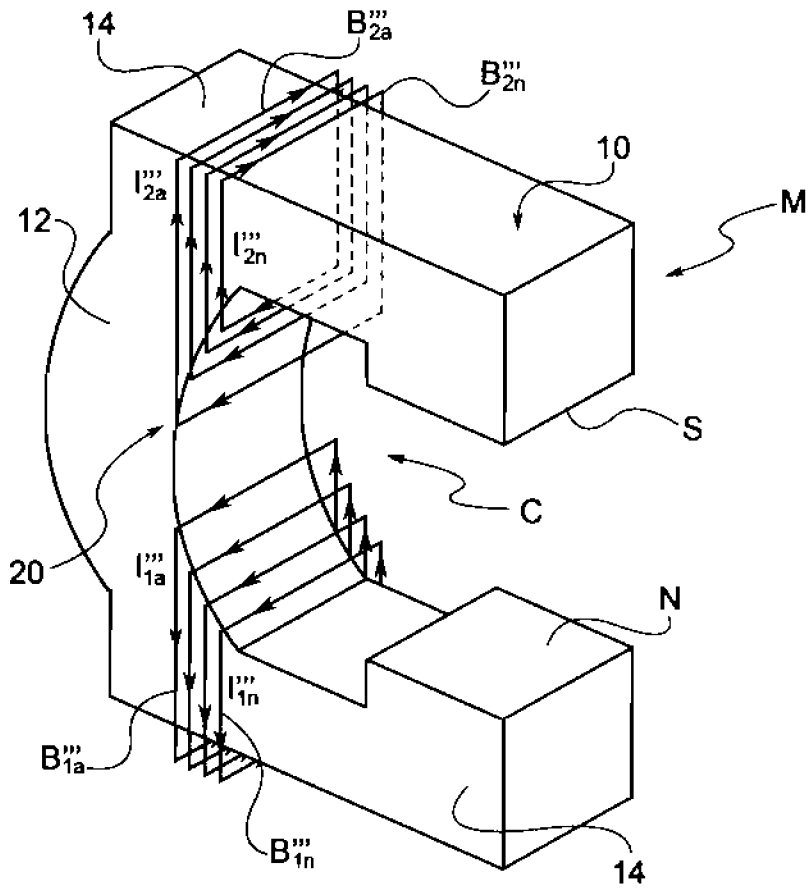


FIG. 5

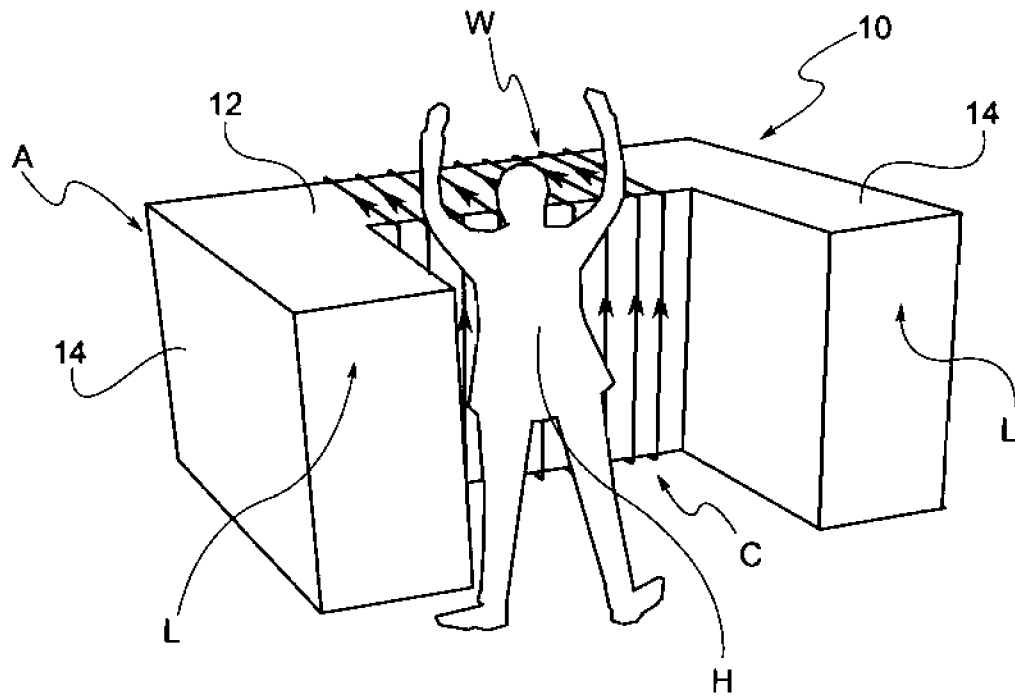


FIG. 6

