(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 26 034 T2** 2006.04.20

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 957 368 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 26 034.5**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 302 839.8**
(96) Europäischer Anmeldetag: **13.04.1999**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **17.11.1999**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **06.07.2005**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.04.2006**

(51) Int Cl.[8]: ***G01R 33/34*** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
98106937 14.04.1998 RU

(73) Patentinhaber:
Koninklijke Philips Electronics N.V., Eindhoven, NL

(74) Vertreter:
Volmer, G., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 52066 Aachen

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, NL

(72) Erfinder:
Sementchenko, Mikhail G., St. Petersburg, RU

(54) Bezeichnung: **Rf-Spulen für die Magnetresonanzbildgebung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Magnetresonanzbildgebung. Sie findet insbesondere Anwendung in Verbindung mit dabei verwendeten Hochfrequenzspulen (HF-Spulen).

[0002] Die Magnetresonanzbildgebung (MRI) ist ein weit verbreitetes diagnostisches Bildgebungsverfahren. MRI-Vorrichtungen enthalten ein Magnetgerät zur Erzeugung eines sehr starken, homogenen statischen Magnetfelds innerhalb einer Untersuchungsregion. Eine so genannte „offene" Magnetanordnung umfasst ein an gegenüberliegenden Seiten der Untersuchungsregion angeordnetes Paar Polschuhe. Weiterhin enthalten MRI-Systeme eine HF-Spulenanordnung, um magnetische Resonanz in der Untersuchungsregion anzuregen und zu erkennen. Um magnetische Resonanz anzuregen, werden Sendespulen zur Erzeugung eines rotierenden HF-Felds verwendet. Ein Beispiel für ein derartiges System, das dem Gerät gemäß der Einleitung von Anspruch 1 entspricht, ist in der Patentschrift EP-A-0.803.738 zu finden, in der unter anderem planare HF-Spulen für C-Magneten beschrieben werden.

[0003] Eine Reihe sich teilweise widersprechender Betrachtungen haben Einfluss auf die HF-Spulenkonstruktion. Für eine maximale Größe der Untersuchungsregion ist es wünschenswert, dass die Spulen möglichst dünn sind. Gleichzeitig ist es erwünscht, dass die Spulen möglichst effizient sind, so dass sie bei einer gegebenen Eingangsleistung ein relativ großes HF-Feld erzeugen. Außerdem ist es erforderlich, dass die Spulen auf die HF-Erregungsfrequenz abgestimmt sind, beispielsweise auf die Larmorfrequenz von Wasserstoffatomen, die vom statischen Magnetfeld beeinflusst werden. Um ein HF-Feld zu erzeugen, das in einer Ebene senkrecht zum Hauptmagnetfeld rotiert, wurden zwei in einem Winkel von 90° zueinander gedrehte HF-Spulen vorgesehen, die um 90° phasenverschoben angesteuert werden.

[0004] HF-Spulen für so genannte offene Magnetsysteme haben planare Butterfly-Spulen. Jede Hälfte einer Butterfly-Spule enthält eine relativ kleine Anzahl von Leiterwindungen (z.B. zwei), die so gestaltet sind, dass sie das gewünschte Magnetfeld innerhalb der Untersuchungsregion erzeugen. Die Spulen sind durch Leiterbahnen mit einer „Bank" aus diskreten Abstimmkondensatoren verbunden. Diese Anordnung hat verschiedene Nachteile. Erstens kann es zu einer signifikanten kapazitiven Kopplung zwischen den rotierenden Spulen kommen. In Verbindung mit der an den Spulen anliegenden hohen Spannung hat dies eine nachteilige Auswirkung auf den Wirkungsgrad der Spule. Außerdem sind die mit den diskreten Abstimmkondensatoren verbundenen Schaltungsbrücken häufig schmal und erhöhen dadurch die gespeicherte magnetische Energie, was nicht zum nützlichen Magnetfeld beiträgt. Ferner müssen die Abstimmkondensatoren selbst von relativ hoher Qualität sein und sind auch oft unförmig. Obwohl eine größere Anzahl von Spulen wünschenswert ist, führte eine Erhöhung der Windungszahl zu einer Verringerung der Eigenresonanzfrequenz der Spule, die dadurch unter die Larmorfrequenz fiel. Zudem haben mit den Spulen verbundene radiale Stromkomponenten zu unerwünschten Komponenten im HF-Feld geführt.

[0005] In P. Sullenberger et al.: „Surface Coil Designs for Easy Patient Specific Tuning", 7. Treffen der SMR, 1988, Bd. 2, S. 864, wird eine Abstimmspule beschrieben und in **Fig. 2** dargestellt. Um einen Abschnitt eines Acrylrohrs herum wurde eine 5 Zoll (12,7 cm) große konzentrische Plattenkondensatorspule geformt, die durch eine variierende Plattenüberlappung abgestimmt wird. Indem man die parallelen ringförmigen Platten dreht, lässt sich die Kapazität der Spule verändern. Die beschriebenen Spulen sind kleine Oberflächenspulen, die in einem begrenzten interessierenden Bereich eingesetzt werden.

[0006] Ein Spulenpaar wurde mit dem oberen Polschuh und ein entsprechendes Paar mit dem unteren Polschuh verbunden. Die den Polschuhen am nächsten liegenden Spulen wurden in einer ersten Winkelposition ausgerichtet, und die der Abbildungsregion am nächsten liegenden Spulen wurden in einer zweiten, 90° zur ersten versetzten und um die z-Achse gedrehten Winkelposition ausgerichtet. Die dem Polschuh am nächsten liegenden Spulen wurden angesteuert, um eine erste Komponente des rotierenden HF-Feldes zu erzeugen, während die der Abbildungsregion am nächsten liegenden Spulen angesteuert wurden, um eine um 90° versetzte Feldkomponente zu erzeugen. Allerdings war der Wirkungsgrad des den Polschuhen näher liegenden Spulenpaares (und damit der HF-Schirm bzw. die HF-Abschirmung) geringer als der des der Untersuchungsregion näher liegenden Paares. Infolgedessen hatte das HF-Feld im Zentrum der Abbildungsregion eine unerwünschte lineare Komponente, die aus der Differenz zwischen der Amplitude der 0°- und der 90°-Komponente resultierte.

[0007] Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung umfasst ein Magnetresonanzbildgebungsgerät einen Magneten mit ersten und zweiten Polschuhen, die an gegenüberliegenden Seiten einer Untersuchungsregion angeordnet sind, Mittel zum Erzeugen zeitvariabler Gradientenmagnetfelder innerhalb der Untersuchungsregion, Mittel zum Anregen magnetischer Resonanz in einem in der Untersuchungsregion befindlichen Objekt, Mittel zum Erkennen magnetischer Resonanz in dem Objekt, und Mittel zum Erzeugen eines Bildes, das durch Detektionsmittel erkannte Magnetresonanzsignale anzeigt. Das Mittel zum Anregen von Magnetresonanz umfasst

eine Spule zum Erzeugen eines HF-Felds in der Untersuchungsregion. Die Spule enthält ein Substrat mit einer ersten und einer zweiten Hauptoberfläche, eine erste Vielzahl von Spulensegmenten, die auf der ersten Hauptoberfläche angeordnet ist, und eine zweite Vielzahl von Spulensegmenten, die auf der zweiten Hauptoberfläche angeordnet ist. Aufeinanderfolgende der genannten, in Reihe geschalteten Spulensegmente sind auf alternierenden ersten und zweiten Hauptoberflächen des Substrats angeordnet. Überlappende Teile der entsprechenden auf den ersten und zweiten Hauptoberflächen angeordneten Spulensegmente bilden einen Kondensator, der dazwischen eine elektrische Reihenschaltung schafft.

[0008] Gemäß einem eingeschränkten Aspekt der vorliegenden Erfindung bilden die erste und die zweite Vielzahl von Spulensegmenten eine im Allgemeinen spiralförmige Wicklung.

[0009] Gemäß einem weiteren, eingeschränkteren Aspekt ist die Wicklung durch sechs Windungen gekennzeichnet.

[0010] Gemäß einem weiteren, noch stärker eingeschränkten Aspekt hat das Gerät in den Wicklungen Brücken, die jeweils eine radiale Stromkomponente einbringen, wobei eine entsprechende Brücke auf der anderen Seite des Substrats, die eine gleiche, aber entgegengesetzte radiale Stromkomponente einbringt, weshalb die Summe der von den einzelnen Brücken eingebrachten radialen Stromkomponenten im Wesentlichen Null ist.

[0011] Gemäß einem weiteren eingeschränkten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die Resonanzfrequenz der Spule gleich der Frequenz eines an die Spule angelegten Anregungssignals.

[0012] Gemäß einem weiteren, eingeschränkteren Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die Breite des überlappenden Teils der Spulensegmente gleich der Breite des nicht überlappenden Teils.

[0013] Gemäß einem weiteren eingeschränkten Aspekt der vorliegenden Erfindung enthält das Gerät weiterhin Mittel, um den Überlappungsbereich zwischen den ersten und zweiten Spulensegmenten zu justieren.

[0014] Gemäß noch einem weiteren eingeschränkten Aspekt der vorliegenden Erfindung enthalten die Anregungsmittel eine erste, zwischen dem ersten Polschuh und der Untersuchungsregion angeordnete Spule, eine zweite, zwischen der ersten Spule und der Untersuchungsregion angeordnete Spule, eine dritte, zwischen dem zweiten Polschuh und der Untersuchungsregion angeordnete Spule, und eine vierte, zwischen der dritten Spule und der Untersuchungsregion angeordnete Spule. Die erste und die dritte Spule erzeugen eine erste HF-Feldkomponente, und die zweite und die vierte Spule erzeugen eine HF-Feldkomponente mit 90° Versatz zur ersten HF-Feldkomponente.

[0015] Gemäß einem weiteren eingeschränkten Aspekt der vorliegenden Erfindung umfasst das Substrat ein Glasfasergewebe und PTFE.

[0016] Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Ausführung der Erfindung anhand von Beispielen und unter Bezugnahme auf die begleitende Zeichnung ausführlich beschrieben. Es zeigen:

[0017] Fig. 1 ein Magnetresonanzbildgebungsgerät gemäß der vorliegenden Erfindung;

[0018] Fig. 2 eine schematische Seitenansicht des Magnetresonanzbildgebungsgerätes, die die relative Lage der HF-Sendespulen darstellt;

[0019] Fig. 3 eine Draufsicht auf die untere Ebene einer ersten HF-Spule;

[0020] Fig. 4 eine Draufsicht auf die obere Ebene einer ersten HF-Spule;

[0021] Fig. 5 ein Ersatzschaltbild für eine HF-Spule;

[0022] Fig. 6 eine Draufsicht auf die untere Ebene einer zweiten HF-Spule; und

[0023] Fig. 7 eine Draufsicht auf die obere Ebene einer zweiten HF-Spule.

[0024] Bezug nehmend auf Fig. 1 enthält ein MRI-Gerät, das Bilder von der Anatomie eines Patienten 1 erzeugt, einen im Wesentlichen c-förmigen Magnetkörper **3**. Der Patient 1 wird in einer Bildgebungsregion platziert, die sich zwischen einem Paar sich gegenüberliegender Polschuhe **23** befindet. Eine Hauptmagnetfeldsteuerung **5** führt den zu jedem Polschuh gehörenden Treiberspulen **2** Erregerstrom zu, um das Hauptmagnetfeld Bo in z-Richtung zu erzeugen. Streben **4** verbinden die Polschuhe **23** mit dem Magnetkörper **3** und schaffen so einen Rückweg durch den Magnetkörper.

[0025] Zwischen den Polschuhen **23** und der Abbildungsregion befindliche Gradientenspulenanordnungen **6** erzeugen zeitvariierende Gradientenmagnetfelder, vorzugsweise in drei orthogonalen Richtungen (z.B. x, y, z). Die jeweiligen Gradientenspulen werden durch eine Gradientenfeldsteuerung **9** erregt, die einen zu jeder Spule gehörenden Gradientenfeldverstärker enthält. Die Gradientensteuerung **9** wird ihrerseits durch einen Computer **11** gesteuert, um zeitvariierende Gradientensequenzen zu erzeugen, die zur Ausführung einer gewünschten Magnetresonanzanregungs- und -erkennungssequenz erforderlich sind.

[0026] Ein HF-Spulensystem **7** dient dazu, magnetische Resonanz in dem zu untersuchenden Objekt anzuregen und zu erkennen. Vorzugsweise sind separate Sende- und Empfangsspulen vorgesehen. Alternativ kann eine einzelne Spule sowohl im Sende- als auch im Empfangsmodus betrieben werden. Obwohl nur die zu dem unteren Polschuh gehörenden Spulen **7** dargestellt sind, ist auf ähnliche Weise ein zweiter Satz HF-Spulen in Beziehung zum oberen Polschuh angeordnet, wie nachfolgend ausführlicher beschrieben wird.

[0027] Zum Anregen von Magnetresonanz im Objekt wird unter der Steuerung des Computers **11** ein Sendespulensystem durch einen HF-Sender **15** mit Strom versorgt, um ein HF-Feld anzulegen. Um Magnetresonanzsignale zu erkennen, werden von einer Empfangsspule aufgenommene Signale über einen Empfänger **19** an einen Bildgeber **21** weitergeleitet, der die Signale unter der Steuerung des Computers **11** verarbeitet, um ein Bild zu erstellen, das den Körper des Patienten darstellt. Diese Signale werden wiederum an eine Anzeigevorrichtung **24** weitergeleitet, um eine visuell lesbare Darstellung des Bildes zu liefern.

[0028] Bei Betrieb des Geräts definiert das vom Magneten erzeugte starke Magnetfeld im Körper des Patienten 1 eine Gleichgewichtsachse magnetischer Ausrichtung. Um ein Bild des ausgewählten Bereichs zu erhalten, beispielsweise einer Querschnittschicht des Körpers, wird dem Patienten zunächst mit Hilfe des Spulensystems **7** ein HF-Feldimpuls zugeführt, um im ausgewählten Bereich magnetische Resonanz anzuregen. Zu diesem Zweck erzeugt das Spulensystem **13** ein Feld orthogonal zur Richtung des statischen Felds, um die Spins der Kerne im ausgewählten Bereich aus der Richtung des statischen Felds zu kippen. Um die Anregung auf einen gewünschten Bereich zu begrenzen, wird der HF-Feldimpuls in Verbindung mit den durch die Spulenanordnung **6** auferlegten Magnetfeldgradienten zugeführt, wobei die Frequenz des HF-Felds in Verbindung mit der Größe und der Richtung der auferlegten Gradienten so gewählt wird, dass die Larmorfrequenz von Protonen im Körper, z.B. von Wasserstoffprotonen, nur mit der HF-Feldfrequenz im gewünschten Bereich übereinstimmt.

[0029] Die aus der Anregung resultierenden HF-Signale werden dann räumlich codiert, indem ein oder mehrere weitere Gradientenmagnetfelder auf bekannte Weise angelegt, durch das HF-Spulensystem **7** erkannt und verarbeitet werden, um ein visuell lesbares Bild beispielsweise auf einem Monitor **24** zu erzeugen. Normalerweise ist eine Anzahl von Anregungs- und Signalerkennungssequenzen erforderlich, um genügend Daten für die Erzeugung eines zufrieden stellenden Bildes zu sammeln.

[0030] Bezug nehmend auf Fig. 2 befinden sich zwischen dem oberen Polschuh **23U** und der Untersuchungsregion obere Gradientenspulen **6U**. Zwischen den oberen Gradientenspulen **6U** und der Untersuchungsregion sind ein HF-Schirm oder eine HF-Abschirmung **50U** bestehend aus einem leitenden Material wie einem Kupferdrahtgeflecht, eine Isolierschicht **52**, eine erste HF-Spule **54**, eine Isolierschicht **56** und eine zweite HF-Spule **58** angeordnet. Auf ähnliche Weise sind zwischen dem unteren Polschuh **23L** und der Untersuchungsregion untere Gradientenspulen **6L** angeordnet. Zwischen den unteren Gradientenspulen **6L** und der Untersuchungsregion sind ein zweiter HF-Schirm **50L**, eine Isolierschicht **60**, eine dritte HF-Spule **62**, eine Isolierschicht **64** und eine vierte HF-Spule **66** angeordnet. Zwischen den Sendespulen und der Untersuchungsregion befinden sich Empfangsspulen (nicht dargestellt). Um die Streukapazität zwischen den verschiedenen Schichten zu minimieren, sind die Isolierschichten **52**, **56**, **60**, **64** aus einem Material mit einer dielektrischen Konstante nahe Eins hergestellt, zum Beispiel einem polymeren PVC-Schaum.

[0031] Die HF-Sendespulen **54**, **58**, **62**, **66** haben jeweils elektrische Leiter, die auf beiden Seiten eines isolierenden Substrats angeordnet sind. Vorzugsweise wird ein handelsübliches Leiteplattenmaterial wie ein mit PTFE beschichtetes Glasfasergewebe verwendet, das auf beiden Seiten mit Kupfer überzogen ist. In den Kupferüberzug sind geeignete Leitermuster eingeätzt. Das Leiterplattenmaterial sollte so dünn wie möglich sein und eine relativ hohe dielektrische Konstante haben. Um die Wiederholbarkeit und Stabilität der Spulenabstimmung sicherzustellen, sollte das Verhältnis von dielektrischer Konstante zur Dicke des Materials gleichmäßig und von Einheit zu Einheit sowie über den gesamten zu erwartenden Betriebstemperaturbereich der Spule möglichst stabil sein. Ein zufrieden stellender Betrieb wurde beispielsweise mit einem Substrat erreicht, das eine Dicke von 0,5 mm und eine dielektrische Konstante von etwa 2,55 hat.

[0032] Fig. 3 zeigt das Leitermuster für die untere Seite der Spulen **58** und **66**, wobei Kupfer schwarz dargestellt ist. Die untere Seite enthält im Allgemeinen symmetrische erste **100** und zweite **102** Hälften. Fig. 4 zeigt das Leitermuster für die obere Seite der Spulen **58** und **66**. Die obere Seite enthält ebenfalls im Allgemeinen symmetrische erste **104** und zweite **106** Hälften. Bei Überlagerung werden die Leiter auf der oberen und unteren Seite kombiniert, um ein spiralförmiges Leitermuster aus mehreren Windungen auf beiden Spulenhälften zu schaffen.

[0033] Weiterhin Bezug nehmend auf die Fig. 3 und Fig. 4, wobei insbesondere die erste Hälfte **104** der Spule betrachtet wird, enthalten die Spulen **58**, **66** Leiter **150**, **152**, **154**, **156**, **158**, **160**, **162**, **164**, **166**,

168 und **170**, die durch eine entsprechende, in den Fig. 3 und Fig. 4 als L1, L2 ... L11 bezeichnete Induktivität gekennzeichnet sind. Die Leiter auf der unteren Seite der Spulen überlappen die Leiter auf der oberen Seite in den in Fig. 3 mit **108**, **110**, **112**, **114**, **116**, **118**, **120**, **122**, **124** und **126** gekennzeichneten Bereichen, um die Platten der mit C1, C2 ... C10 bezeichneten Kondensatoren zu bilden. Zusätzliche Überlappungen treten in den mit **128** und **130** gekennzeichneten Bereichen auf, um die Platten der mit Cz und Cd bezeichneten Kondensatoren zu bilden. Die Kondensatoren Cz und Cd bilden ein kapazitives Teilernetzwerks, dass die Anpassung an ein 95-100-Ohm-HF-Kabel erleichtert. Die Kapazität der Kondensatoren lässt sich auf der Basis des Überlappungsbereichs (z.B. der Plattenfläche), des Abstands zwischen den Leitern und der dielektrischen Konstante des Leiterplattensubstrats berechnen. Der Wert jedes Kondensators wird vorzugsweise so gewählt, dass die in der Induktivität eines entsprechenden Spulensegments erzeugte Spannung kompensiert wird. Bei der Anregungsfrequenz ist der kapazitive Blindwiderstand jedes Kondensators gleich dem induktiven Blindwiderstand eines entsprechenden Spulensegments. In der dargestellten Ausführungsform hat jede Hälfte der Spule sechs Windungen.

[0034] Obwohl bisher hauptsächlich die erste Hälfte der Spule besprochen wurde, ist dies gleichermaßen auf die zweite Hälfte anwendbar. Die zugehörigen Spulenhälften sind so verbunden, dass das entsprechende Ersatzschaltbild der Spule wie in Fig. 5 dargestellt aussieht. Die HF-Anschlüsse an der Spule sind an den Punkten **180** und **182** vorgenommen worden. Günstigerweise fließt der HF-Strom durch die Spule durch die aus dem Material des Leiterplattensubstrats bestehenden Kondensatoren. Dadurch bilden das Spulensubstrat und die Leiter selbst die erforderlichen Kondensatoren, so dass jede Hälfte der Spule als L-C-Reihenschaltung ausgeführt werden kann. Die Resonanzfrequenz der Spule ist identisch mit der Frequenz des an die Spule angelegten Anregungssignals.

[0035] Zu jeder der Überlappungsflächen gehört eine Vielzahl von Zusatzleitern **200**, die jeweils einen Bereich haben, der es ermöglicht, den Wert jedes Kondensators zu verändern. Jeder Zusatzleiter **200** ist durch eine relativ dünne elektrisch leitende Leiterbahn **202** mit dem entsprechenden Hauptleiter verbunden. Der Überlappungsbereich, und damit die Kapazität, kann durch Abtrennen der dünnen Leiterbahn **202** leicht justiert werden. Dies wiederum erleichtert das Abstimmen der Spule. Alternativ können andere Verfahren für das Verändern des Überlappungsbereichs vorgesehen werden. Beispielsweise könnte man die Zusatzleiter von den Hauptleitern elektrisch isolieren, indem man nach Bedarf elektrische Drahtbrücken oder Verbinder einsetzt, oder es könnte zusätzliches Leitermaterial in hierfür vorgesehenen Bereichen am Spulensubstrat befestigt werden. Je nach Gleichförmigkeit der Leiterplattensubstrate, dem Ätzverfahren, der Reproduzierbarkeit der HF-Abschirmungsform und der erforderlichen Abstimmtoleranz können die Zusatzleiter weggelassen werden.

[0036] Mit Ausnahme der Überlappungsbereiche wird vorzugsweise die Überlappung zwischen den Leitern auf der ersten und der zweiten Seite minimiert. Wo die Schaltungskonfiguration zusätzliche Überlappungen erforderlich macht, sind entsprechende Brückenbereiche **204**, **206** vorgesehen. Die Leiter in den entsprechenden Brückenbereichen sind in einem Winkel so ausgerichtet, dass die Kopplung zwischen den Schichten minimiert wird. Ferner wird der Oberflächenbereich und damit die kapazitive Kopplung in den Brücken vorteilhaft reduziert, indem jeder Brückenbereich **204**, **206** so konfiguriert wird, dass er eine Vielzahl relativ schmalerer Leiterbahnen **206** enthält.

[0037] Um den auf Streukapazität zurückzuführenden minimalen Stromfluss zwischen der ersten und der zweiten Schicht zu minimieren, befinden sich die Brücken vorzugsweise dort, wo die Spannung zwischen den entsprechenden Leitern möglichst gering ist. Wie oben angemerkt ist es wünschenswert, dass die in jeder Windung angeordneten Kondensatoren die in der Windung akkumulierte Spannung kompensieren, so dass die Spannung entlang der Spule relativ niedrig bleibt. Wie aus den Fig. 3, Fig. 4, Fig. 6 und Fig. 7 ersichtlich ist, können die Brückenbereiche zweckmäßigerweise entlang einer Symmetrielinie der Spule angeordnet sein. Basierend auf einer gewünschten Anordnung für die Brücken wird der Wert der Kondensatoren so gewählt, dass die Spannung in den Brückenbereichen möglichst gering ist. Anders ausgedrückt wird die Spannung in den vorgegebenen Brückenstellen so niedrig wie möglich gehalten.

[0038] Die Leiter in jeder Hälfte der Spule sind so angeordnet, dass der rechtwinklig zu den Leitern fließende Strom im Wesentlichen aufgehoben wird. Insbesondere bringt jede Brücke **204** eine radiale Stromkomponente ein. Die entsprechende Brücke **206** auf der anderen Seite der Leiterplatte bringt jedoch eine gleiche, aber entgegengesetzte radiale Stromkomponente ein. Infolgedessen sind die von den einzelnen Brücken eingebrachten radialen Stromkomponenten im Wesentlichen Null. Die Leiter auf der einen Seite der Leiterplatte bilden eine Spirale, in der der Strom von der Außenseite zur Innenseite der Spirale fließt. Die Leiter auf der anderen Seite bilden eine Spirale, in der der Strom Innenseite zur Außenseite der Spirale fließt. Somit kann ein im Wesentlichen spiralförmiges Wicklungsmuster geschaffen werden, während unerwünschte radiale Stromkomponenten aufgehoben werden.

[0039] Die betrieblichen Eigenschaften der HF-Spule hängen von einer Reihe unabhängiger Variablen ab. Wünschenswert ist insbesondere, dass die Stärke des rotierenden HF-Felds über den gesamten Abbildungsbereich konstant ist und unerwünschte sphärische Oberschwingungen in der Zerlegung des rotierenden HF-Felds vermieden werden.

[0040] Um die Leistungsanforderungen des HF-Verstärkers zu minimieren und die HF-Feldstärke zu maximieren, ist es außerdem wünschenswert, dass die in der Spule gespeicherte magnetische Energie so gering wie möglich ist. Anders ausgedrückt ist es erwünscht, dass die Induktivität der HF-Spule so gering wie möglich ist.

[0041] Um maximalen Platz für den Patienten zu schaffen, sollte die HF-Spule so dünn wie möglich sein.

[0042] Es ist jedoch zu beachten, dass eine praktische Spule einen Kompromiss zwischen diesen Anforderungen darstellt.

[0043] Daher wird die Konfiguration der Spule vorzugsweise mit Hilfe eines in der Technik üblichen numerischen Optimierungsverfahrens optimiert. Um die Komplexität der Optimierung zu reduzieren und unerwünschte sphärische Oberschwingungen aus der Zerlegung des HF-Felds zu entfernen, wird die Form der Windungen durch eine Stromverteilungsfunktion V(r) ausgedrückt, wobei r der Radius eines Punktes auf einer Schicht ist.

[0044] Die Funktion V(r) beschreibt die Windungen wie folgt. Die Grenze zwischen zwei benachbarten Windungen ist eine Vielzahl von Punkten, die folgenden Ausdruck erfüllen:

$$U(r,\varphi) = V(r)\cos(\varphi)$$

wobei φ die Winkelposition zur x-y-Ebene ist.

[0045] Um die Funktion V(r) mit Hilfe der Kostenfunktion zu bestimmen, wird eine numerische Optimierung benutzt:

$$C(V) = a_L C_L(V) + a_E E(V)$$

wobei $C_L(V)$ eine Kostenfunktionskomponente ist, die mit der Nichthomogenität des HF-Feldes innerhalb des Abbildungsvolumens zusammenhängt, und E(V) die gesamte magnetische Energie ist. Die Koeffizienten a_L und a_E definieren die relative Wichtigkeit der einzelnen Terme.

[0046] Obwohl bisher hauptsächlich die inneren Spulen **58**, **66** behandelt wurden, ist zu beachten, dass sich die vorstehende Besprechung gleichermaßen auch auf die äußeren Spulen **54**, **62** anwenden lässt, deren obere und untere Schicht in den Fig. 6 bzw. Fig. 7 abgebildet sind. Die Form der äußeren Spulen **54**, **62** wird wie oben für die inneren Spulen **58**, **66** beschrieben optimiert, wobei ihre unterschiedliche Entfernung von der HF-Abschirmung **50U**, **50L** berücksichtigt wird. Die Fläche (und damit der Wert) der Kondensatoren in den äußeren Spulen **54**, **62** neigt dazu, größer als die Kondensatoren in den inneren Spulen **58**, **66** zu sein. Die Induktivität der äußeren Spulen **54**, **62** neigt dazu geringer zu sein, weil diese Spulen sich näher an den HF-Abschirmungen **50U**, **50L** befinden. Für eine gegebene Frequenz ist die erforderliche Kapazität dann größer.

[0047] Die Schichten der Spulen sind zudem geordnet, um die elektrische Entkopplung zwischen den inneren und äußeren Spulen zu optimieren. Um die Wirkungen der Reservekapazität zu optimieren, sind die Schichten so angeordnet, dass Schichten benachbarter Spulen, die im Durchschnitt das kleinere Potenzial tragen, dichter beieinander liegen.

[0048] Die erste HF-Spule **54** und die vierte HF-Spule **66** sind in einer entsprechenden Winkelposition in Bezug auf die z-Achse in der x-y-Ebene angebracht und werden angesteuert, um die 0°-Komponente des HF-Felds zu erzeugen. Die zweite HF-Spule **58** und die dritte HF-Spule **62** sind in einer entsprechenden Winkelposition mit einem Versatz von 90° zu der der ersten **54** und vierten **66** Spulen angebracht und werden angesteuert, um eine 90°-Komponente des HF-Felds zu erzeugen. Die 0°- und 90°-Spulen werden um 90° phasenverschoben angesteuert, um das rotierende HF-Feld zu erzeugen.

[0049] Ein besonderer Vorteil der bevorzugten Ausführungsform besteht darin, dass im Vergleich zu früheren Verfahren eine relativ größere Anzahl von Spulenwindungen benutzt werden kann. In der beschriebenen Ausführungsform enthält jede Spulenhälfte sechs Spulenwindungen. Für eine gewünschte Betriebsfrequenz wird die Anzahl der Windungen durch die Unfähigkeit begrenzt, die Spule basierend auf der Reservekapazität auf die zweite Spule und das HF-Feld abzustimmen. Da die größere Anzahl von Windungen die Verwendung dünnerer Leiterbahnen erlaubt, wird auch die von den Wirbelströmen in den Leitern verursachte Umverteilung des hochfrequenten Stroms reduziert.

[0050] Gleichzeitig verringert die Verteilung der Kapazität auf die Windungen die Spannungen zwischen den Spulenkomponenten und Masse. Da sich der durch eine beliebige Streukapazität fließende Strom proportional zur Spannung verhält, verringert dies wiederum den zwischen der Spule und Masse sowie zwischen den Quadraturspulen fließenden Strom und erhöht dadurch den Gesamtwirkungsgrad oder ermöglicht es, den Abstand zwischen den Quadratur-

spulen zu reduzieren.

[0051] Ein weiterer Vorteil der bevorzugten Ausführungsform besteht darin, dass die Amplituden der 0°- und 90°-Komponenten des rotierenden HF-Felds ausgeglichen werden. Die von den HF-Spulen **58**, **66** erzeugten HF-Felder, die dichter an der Untersuchungsregion liegen, sind typischerweise größer als die von den HF-Spulen erzeugten HF-Felder, die dichter an den HF-Abschirmungen **50U**, **50L** liegen. In der Anordnung der bevorzugten Ausführungsform sind die Amplituden der 0°- und 90°-Komponenten im Zentrum des Abbildungsbereichs ausgeglichen. Daher trägt im Vergleich zu herkömmlichen Anordnungen ein größerer Teil der Energie zur Erzeugung des nützlichen HF-Felds bei. Noch ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die oberen und unteren HF-Spulenanordnungen mechanisch identisch sein können.

[0052] Die Erfindung wurde unter Bezugnahme auf die bevorzugte Ausführungsform beschrieben. Es ist offensichtlich, dass anderen nach dem Lesen und Verstehen der vorstehenden Beschreibung Abwandlungen und Abänderungen einfallen werden. Die Erfindung ist daher so auszulegen, dass sie alle derartigen Abwandlungen und Abänderungen insofern beinhaltet, als sie im Rahmen der angefügten Ansprüche liegen.

Fig. 1

Bezugszeichenliste

Main magnetic field	Hauptmagnetfeld
Gradient field control	Gradientenfeldsteuerung
RF transmitter	HF-Sender
Imager	Bildgeber
Receiver	Empfänger
Control computer	Steuerungscomputer

Patentansprüche

1. Magnetresonanzbildgebungsgerät mit:
– einem Magneten mit ersten und zweiten, an gegenüberliegenden Seiten einer Untersuchungsregion angeordneten Polschuhen (**23U**, **23L**);
– Mittel (**9**) zum Erzeugen zeitvariabler Gradientenmagnetfelder in der Untersuchungsregion;
– Mittel (**15**, **54**, **58**, **62**, **66**) zum Anregen magnetischer Resonanz in der Untersuchungsregion, wobei die Mittel zum Anregen magnetischer Resonanz eine erste Spule (**54**, **58**, **62**, **66**) zum Erzeugen eines HF-Felds in der Untersuchungsregion umfassen;
– Mittel (**19**) zum Erkennen von Signalen, die auf magnetische Resonanz in der Untersuchungsregion hinweisen;
– Mittel (**21**) zum Erzeugen eines Bildes, das durch Detektionsmittel erkannte Magnetresonanzsignale anzeigt;
dadurch gekennzeichnet, dass die Spule Folgendes umfasst:
- ein Substrat mit einer ersten und einer zweiten Hauptoberfläche;
– eine Vielzahl erster Spulensegmente (**100**, **102**), die auf einer ersten Hauptoberfläche angeordnet ist;
– eine Vielzahl zweiter Spulensegmente (**104**, **106**), die auf einer zweiten Hauptoberfläche angeordnet ist;
wobei die ersten und zweiten Spulensegmente elektrisch in Reihe geschaltet sind, und wobei aufeinanderfolgende der genannten in Reihe geschalteten Spulensegmente auf alternierenden ersten und zweiten Hauptoberflächen des Substrats angeordnet sind und sich so überlappen, dass sie einen Kondensator (C1-C10) bilden, wobei der genannte Kondensator die elektrische Reihenschaltung dazwischen schafft.

2. Gerät nach Anspruch 1, wobei die Spulensegmente (**100**, **102**, **104**, **106**) jeweils eine im Wesentlichen spiralförmige Wicklung bilden.

3. Gerät nach Anspruch 2, wobei die Wicklung sechs Windungen hat.

4. Gerät nach Anspruch 2 oder Anspruch 3, das weiterhin Brücken (**204**, **206**) in den Wicklungen umfasst, wobei jede Brücke (**204**) jeweils eine radiale Stromkomponente einbringt, eine entsprechende Brücke (**206**) auf der anderen Seite des Substrats eine gleiche, aber entgegengesetzte radiale Stromkomponente einbringt, weshalb die Summe der von den einzelnen Brücken eingebrachten radialen Stromkomponenten im Wesentlichen Null ist.

5. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Resonanzfrequenz der Spule (**54**, **58**, **62**, **66**) gleich der Frequenz eines an die Spule angelegten Anregungssignals ist.

6. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei sich die ersten und zweiten Spulensegmente (**100**, **104**; **102**, **106**) teilweise überlappen und die Breite des überlappenden Teils der Spulensegmente gleich der Breite der nicht überlappenden Teile der Spulensegmente ist.

7. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 6, das weiterhin Mittel (**202**) umfasst, um den Überlappungsbereich zwischen den ersten und zweiten Spulensegmenten zu justieren.

8. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die erste Spule (**54**) zwischen dem ersten Polschuh (**23U**) und der Untersuchungsregion angeordnet ist, und die Mittel zum Anregen von Magnetresonanz (**15**, **54**, **58**, **62**, **66**) ferner eine zweite, zwischen der ersten Spule (**54**) und der Untersuchungsregion angeordnete Spule (**58**), eine dritte, zwischen dem zweiten Polschuh (**23L**) und der Untersuchungsregion angeordnete Spule (**62**), und eine vierte, zwischen

der dritten Spule (**62**) und der Untersuchungsregion angeordnete Spule (**66**) enthalten, wobei die erste und die vierte Spule (**54**, **66**) eine erste HF-Feldkomponente erzeugen und die zweite und dritte Spule (**58**, **62**) eine HF-Feldkomponente mit 90° Versatz zur ersten HF-Feldkomponente erzeugen.

9. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das Substrat aus Glasfasergewebe und PTFE besteht.

10. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 9, das weiterhin eine zweite Spule zum Erzeugen eines HF-Feldes in der Untersuchungsregion sowie ein zwischen den ersten und zweiten Spulen (**54**, **58**, **62**, **66**) angeordnetes polymeres PVC-Schaummaterial (**56**, **64**) umfasst.

11. Gerät nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei das Detektionsmittel (**19**) die erste Spule (**54**, **58**, **62**, **66**) enthält.

12. Hochfrequenzspule für die Verwendung in einem Magnetresonanzbildgebungsgerät zur Erzeugung eines Hauptmagnetfelds, das in ausgewählten Kernen eines abzubildenden Objekts Präzession mit Lamorfrequenz induziert, wobei die Spule gekennzeichnet ist durch:
– ein planares Substrat mit ersten und zweiten Hauptoberflächen;
– eine Vielzahl erster, an der ersten Hauptoberfläche angeordneter Spulensegmente (**100**, **102**); – eine Vielzahl zweiter, an der zweiten Hauptoberfläche angeordneter Spulensegmente (**104**, **106**); – in Reihe geschaltete erste und zweite Spulensegmente, wobei aufeinanderfolgende der genannten in Reihe geschalteten Spulensegmente auf alternierenden ersten und zweiten Hauptoberflächen des Substrats angeordnet sind und sich so überlappen, dass sie einen Kondensator (C1-C10) bilden, wobei der genannte Kondensator die elektrische Reihenschaltung dazwischen schafft.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

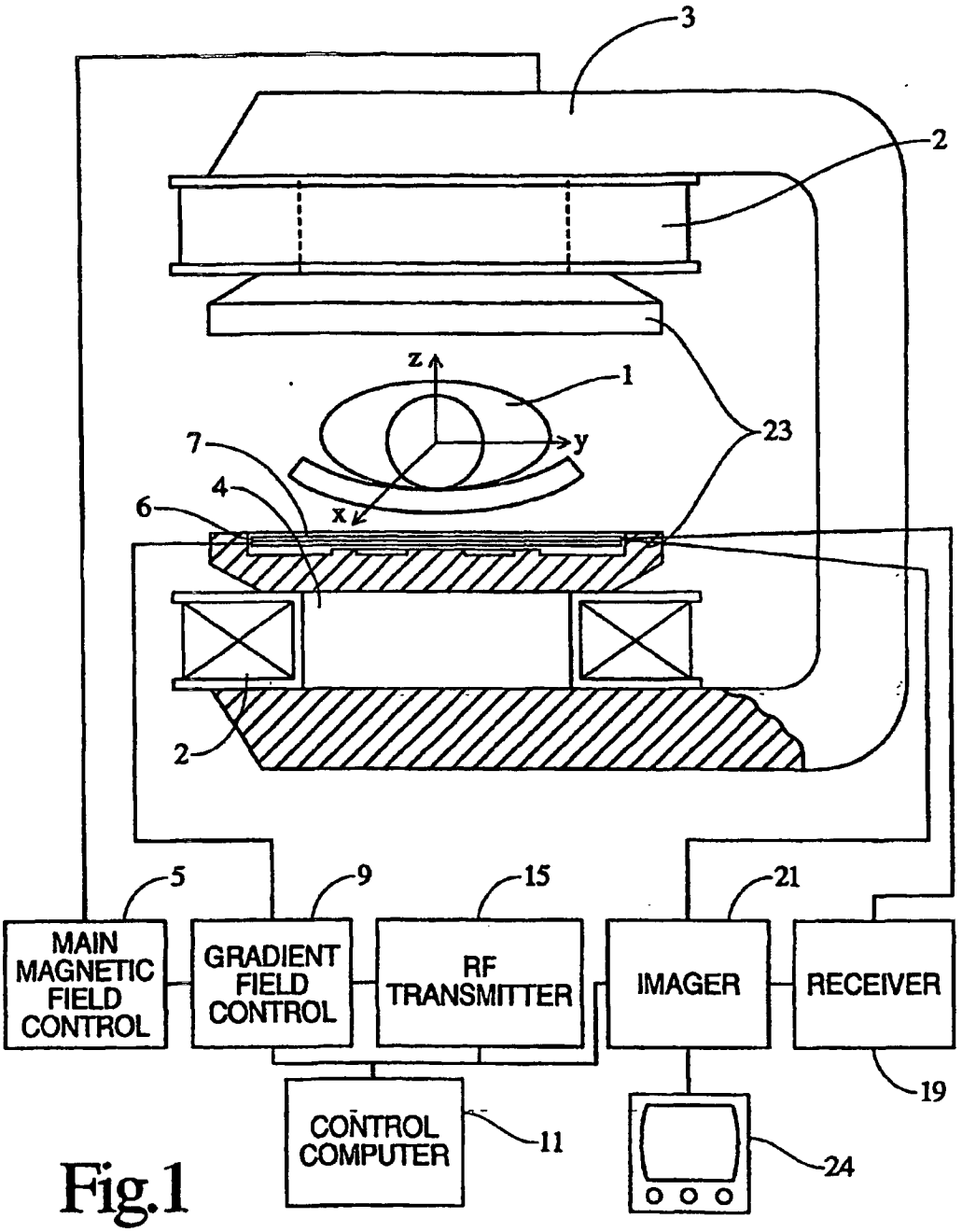

Fig.1

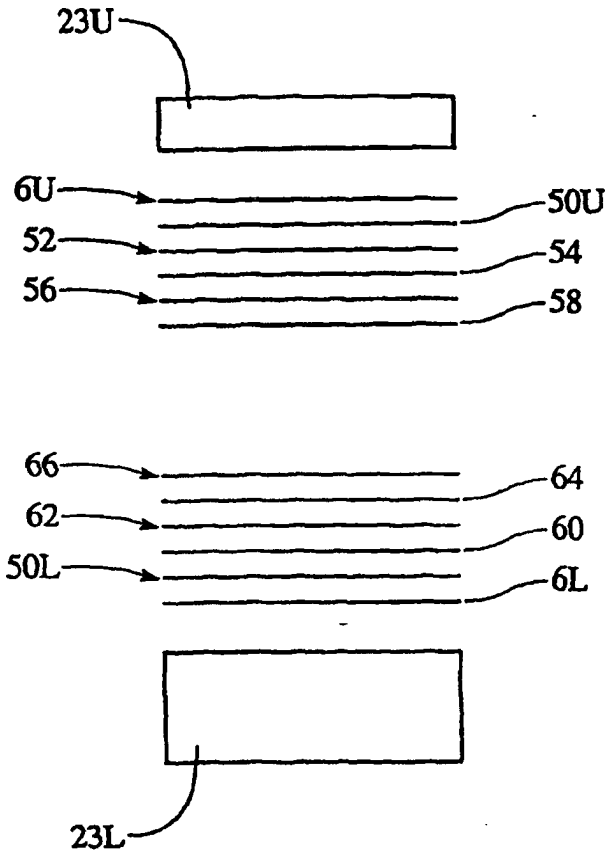

Fig. 2

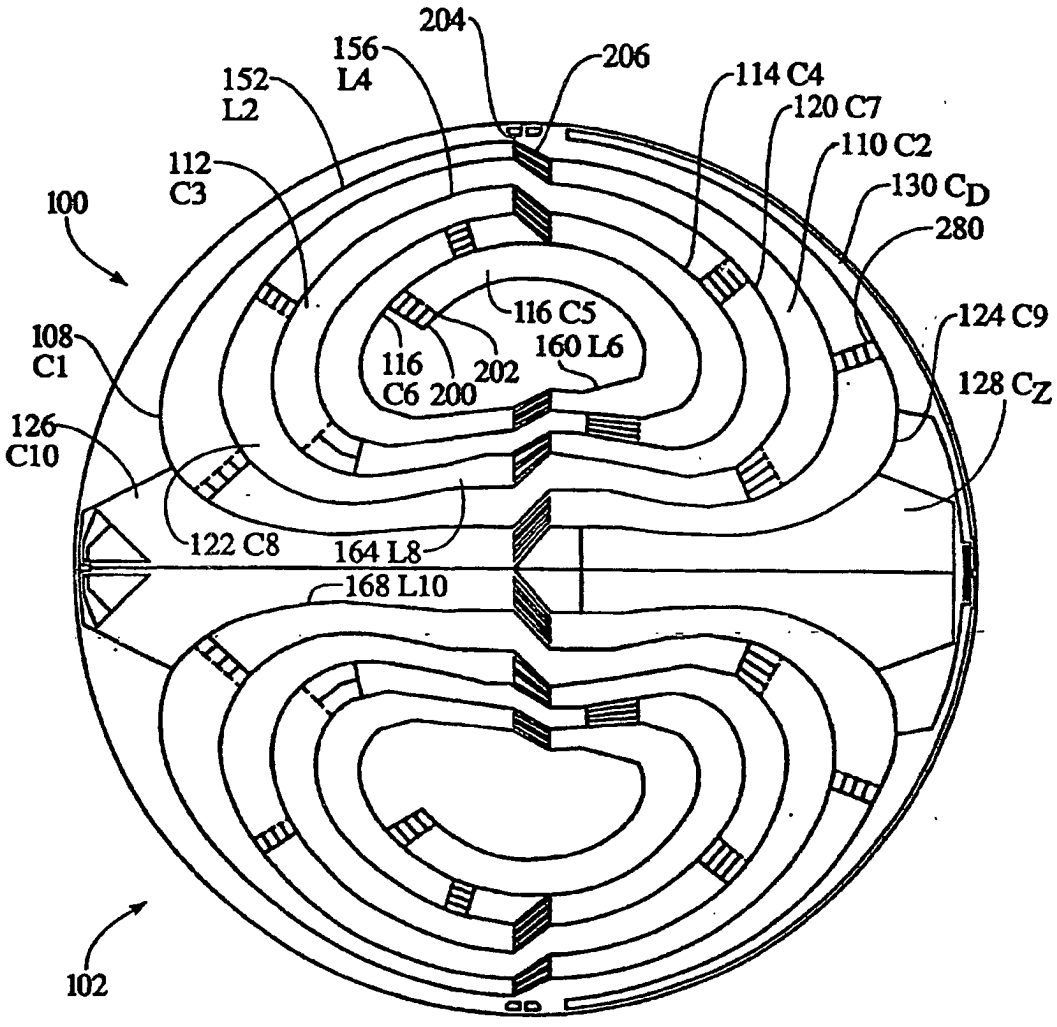
204
156
L4
206
152
L2
114 C4
120 C7
110 C2
112
C3
130 C_D
100
280
116 C5
124 C9
108
C1
160 L6
116
C6
200
202
128 C_Z
126
C10
122 C8
164 L8
168 L10
102

Fig. 3

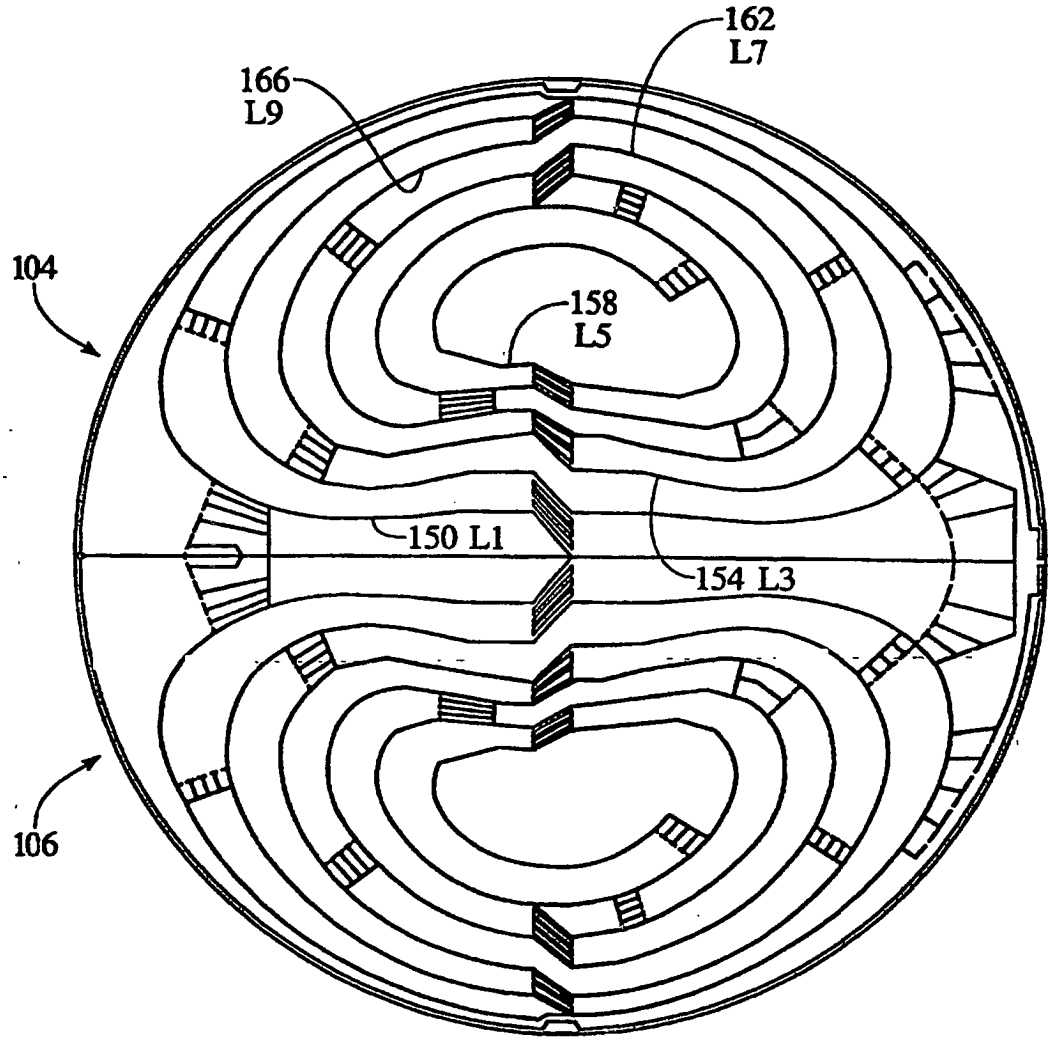

Fig. 4

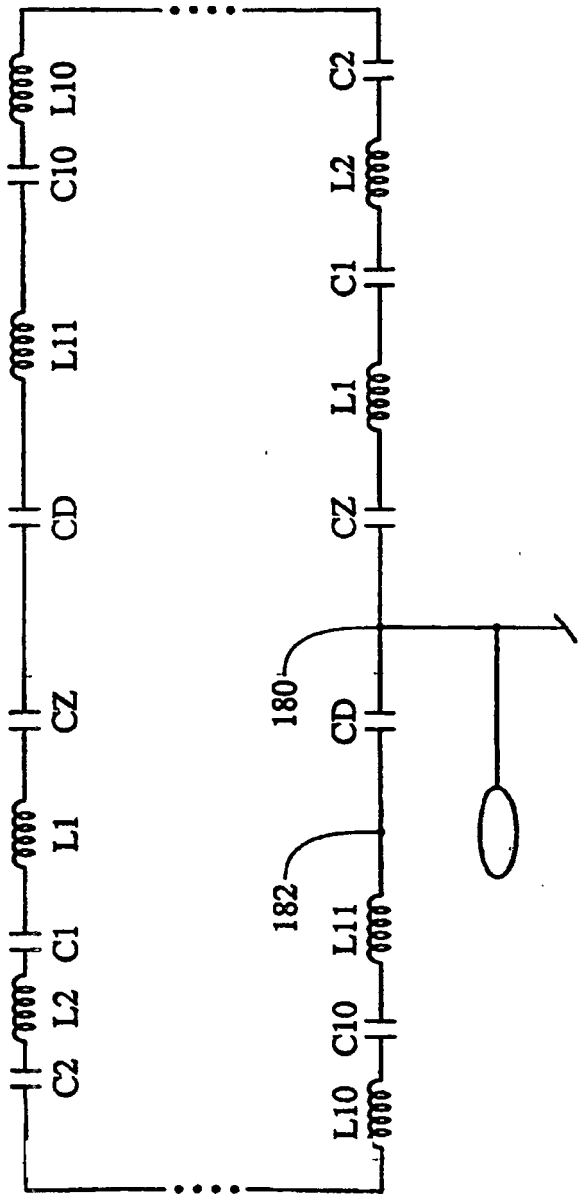

Fig. 5

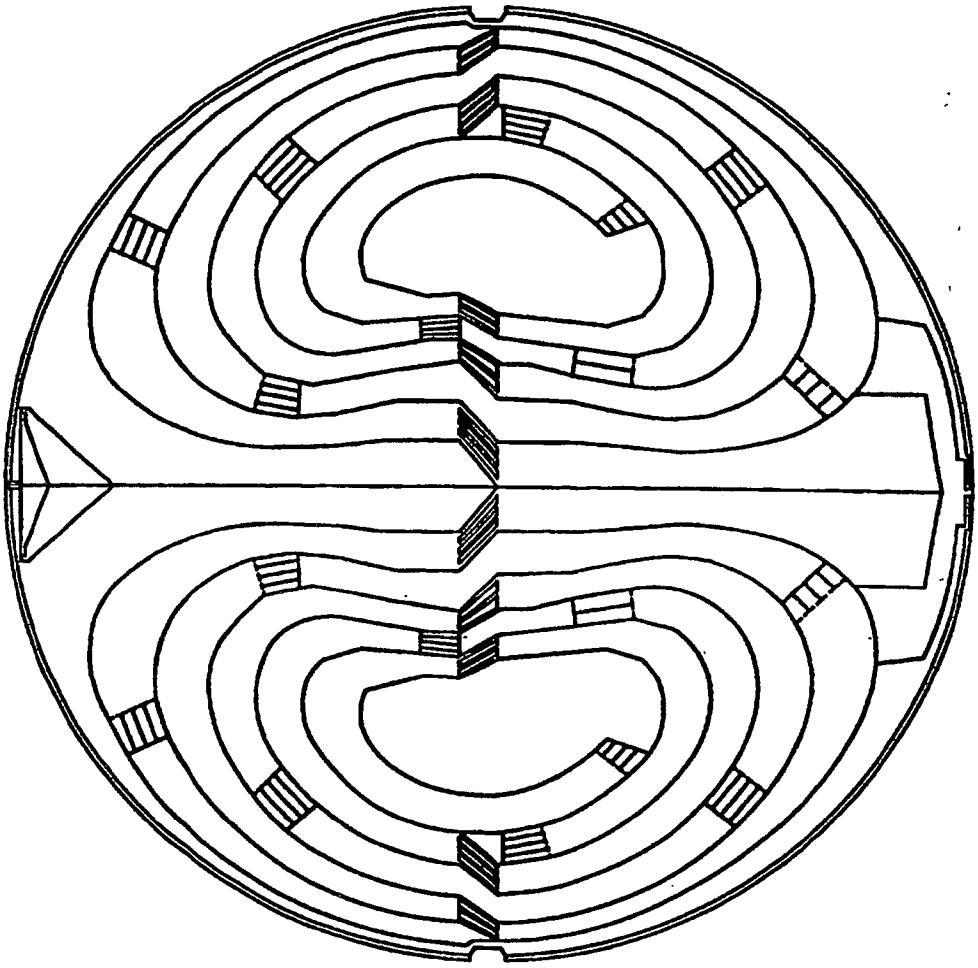

Fig. 6

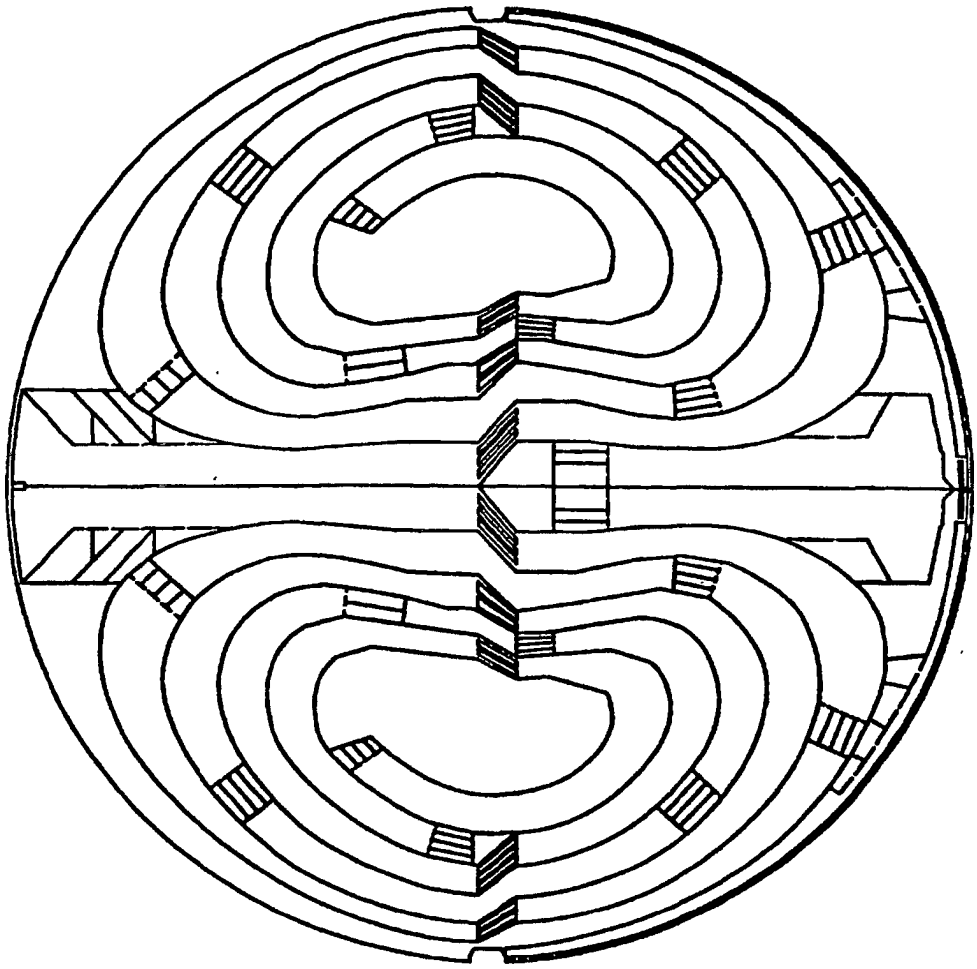

Fig. 7