(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 555 009**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **84 17204**

(51) Int Cl⁴ : H 05 H 13/00; A 61 B 5/05.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 12 novembre 1984.

(30) Priorité : IL, 13 novembre 1983, n° 70211.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 20 du 17 mai 1985.

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(71) Demandeur(s) : *Société dite : ELSCINT LTD.* — IL.

(72) Inventeur(s) : S. G. Lipson et Zvi Kamil.

(73) Titulaire(s) :

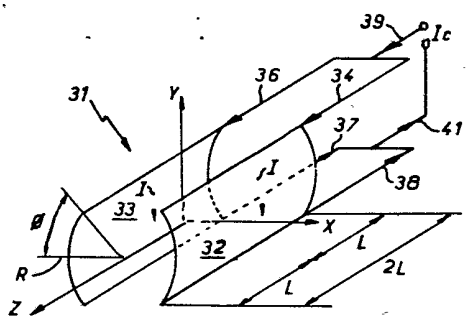
(74) Mandataire(s) : Cabinet Bonnet-Thirion et G. Foldés.

(54) Dispositif de génération de champ magnétique de gradient.

(57) L'invention concerne les techniques de résonance magnétique nucléaire.

Un dispositif de génération de champ magnétique de gradient destiné à un système d'imagerie par RMN comprend notamment une paire de segments cylindriques creux 32, 33 disposés de façon opposée et conducteurs du courant électrique. Ces segments sont traversés par des courants circulant dans la même direction et ils sont orientés de façon à produire un gradient magnétique $\nabla_X = \delta BZ/\delta X$.

Application à l'imagerie médicale.



FR 2 555 009 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

La présente invention concerne l'imagerie utilisant la résonance magnétique nucléaire (RMN), et elle porte plus particulièrement sur des dispositifs et des procédés destinés à produire des champs de gradient pour des systèmes d'imagerie par RMN.

On a utilisé pour la première fois vers 1973 des gradients de champ linéaires avec le matériel de RMN pour "localiser" la réponse de fréquence de résonance. Ce moyen a permis de reconstituer des images à partir de réponses de précession libre produites en soumettant temporairement à des champs radiofréquences tournants des objets situés dans des champs magnétiques statiques intenses. Depuis lors, les techniciens travaillant dans ce domaine ont tenté de trouver des configurations de bobines qui procurent les champs de gradient les plus stables, homogènes, orthogonaux et linéaires.

Les champs de gradients doivent, entre autres, être établis et interrompus en de courtes durées, et il est donc souhaitable que les inductances associées soient relativement faibles.

Les bobines de génération de gradient de l'art antérieur comprennent, entre autres, quatre conducteurs théoriquement infinis et mutuellement espacés de façon équidistante dans chacun des quatre quadrants du plan défini par la direction du champ statique et la direction du gradient. Les conducteurs sont normaux à ce plan. Un gradient ∇_X est ainsi généré par des conducteurs normaux au plan XZ. Bien entendu, en pratique les conducteurs des bobines de gradient sont finis et on a décrit valablement les bobines par leurs formes finies, telles que des formes "trapézoïdales", "rectangulaires", "en selle", etc.

Pour maintenir l'inductance faible, les bobines de gradient de l'art antérieur ont comporté un nombre de spires relativement faible. Le faible nombre de spires a évidemment pour effet de réduire l'intensité du champ ma-

gnétique de gradient. L'utilisation de telles bobines a malheureusement un effet défavorable sur la précession, et ceci affecte défavorablement les signaux de précession libre détectés. De plus, les bobines ont par nature une certaine résistance et elles produisent donc de la chaleur qui est de l'énergie gaspillée. En plus de la chaleur produite par les résistances, il existe des pertes par courants de Foucault dans les bobines, qui augmentent la puissance consommée. Les bobines de génération de gradient de l'art antérieur affectent donc défavorablement les signaux de précession libre, tout en les localisant. Les bobines de gradient introduisent également des pertes d'énergie.

La linéarité et l'orthogonalité du champ produit par une bobine sont fonction de la configuration géométrique du système et dépendent, entre autres, de détails tels que la position géométrique de chacune des spires par rapport aux autres. Il est difficile d'obtenir avec les bobines de gradient de l'art antérieur des relations géométriques qui assurent la linéarité et l'orthogonalité. Il existe donc à l'heure actuelle un besoin réel concernant des dispositifs améliorés de génération de champs de gradient.

Un aspect général de l'invention procure un dispositif de génération de champs de gradient utile pour générer des champs de gradient dans des systèmes d'imagerie à RMN, et ce dispositif de génération de champs de gradient comprend:

- une paire de segments d'un cylindre creux, disposés de façon opposée et conducteurs du courant électrique,
- ces segments étant espacés de façon pratiquement équidistante par rapport à un axe longitudinal commun,
- des moyens destinés à faire circuler un courant dans la même direction dans chacune des paires de segments, la direction du courant créant des champs magnétiques pa-

rallèles à l'axe longitudinal, et le champ combiné de la paire de segments étant égal à zéro en tous les points d'un premier plan qui est le plan de symétrie par rapport auquel un segment est symétrique de l'autre,

- ce champ combiné variant de façon pratiquement linéaire dans un second plan qui contient l'axe longitudinal, qui est normal au premier plan et qui divise longitudinalement en deux parties égales la paire de segments, et
- le champ combiné présente un maximum positif à l'endroit auquel le second plan divise en deux parties égales le premier des segments de la paire, et présente un maximum négatif à l'endroit auquel le second plan divise en deux parties égales le second des segments de la paire.

Selon une caractéristique de l'invention, il existe des moyens destinés à faire varier uniformément le champ de gradient, en faisant varier les longueurs des segments par rapport à la distance entre les segments et l'axe et/ou les étendues angulaires des segments.

Selon une autre caractéristique de l'invention, il existe des moyens destinés à commander une augmentation de la densité de courant aux extrémités des segments.

Selon encore une autre caractéristique de l'invention, il existe des moyens destinés à commander les gradients le long d'axes perpendiculaires à l'axe longitudinal, pour contribuer à assurer l'uniformité des gradients.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux compris à la lecture de la description qui va suivre de modes de réalisation et en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

Les figures 1 et 2 montrent des exemples de dispositifs de génération de champs de gradient de l'art antérieur,

La figure 3 est une représentation schématique d'un

mode de réalisation de l'invention,

La figure 4 est une représentation d'un procédé d'analyse mathématique du dispositif de l'invention,

Les figures 5 et 6 sont des représentations de modes de réalisation supplémentaires de l'invention, et

La figure 7 montre les connexions entre différents éléments du dispositif de la figure 6.

Dans le passé, on a généré des champs de gradient au moyen de dispositifs comprenant les dispositifs représentés schématiquement sur les figures 1 et 2. Sur les deux figures, les fils acheminant le courant qui produisent les champs magnétiques sont représentés en relation avec des axes orthogonaux X, Y et Z. On utilise les axes à titre d'aide pour les explications données ici, et pour faire la liaison entre les dispositifs de génération de champs de gradient et des systèmes d'imagerie par RMN. Le plan de symétrie mentionné précédemment est le plan YZ. Dans de tels systèmes, le champ magnétique statique est généralement parallèle à l'axe Z et est en fait centré sur cet axe. Le dispositif de l'invention qui est décrit ici produit des gradients dans la direction X et dans la direction Y. Les représentations et les descriptions qui figurent ici portent en réalité sur des gradients dans la direction X, mais elles s'appliquent tout aussi bien à des gradients dans la direction Y. Il suffit de faire tourner les dispositifs de 90°.

Un dispositif de génération de champs de gradient 11 de l'art antérieur, représenté sur la figure 1, utilise quatre fils théoriquement infinis, 12, 13, 14 et 16, disposés aux quatre points d'un rectangle imaginaire dont le centre est le point "O" du système de coordonnées orthogonal.

Le courant est dirigé dans la même direction dans chacun des fils, comme le montrent les flèches. Par conséquent, les champs magnétiques générés sont égaux à zéro dans les plans XY et YZ. Le champ présente un gradient dans la

direction X dans le plan XZ (et dans des plans qui lui sont parallèles.

En résumé, le gradient est : $\nabla_X = \frac{\partial Bz}{\partial X}$

Les fils qui sont utilisés en réalité ne sont pas infinis. On utilise à la place dans les dispositifs de l'art antérieur des configurations telles que celle représentée sur la figure 2. Le dispositif 17 de la figure 2 correspond à ce qu'on appelle souvent une configuration "en selle". On notera qu'il est similaire à de nombreux égards au dispositif de la figure 1. Il y a quatre fils 18, 19, 21 et 22 dirigés vers le plan XZ, chacun d'eux acheminant un courant dans la même direction, comme l'indiquent les flèches. Les fils 18 et 22 sont reliés par des fils 23 et 24, tandis que les fils 19 et 21 sont reliés par des fils 26 et 27. Les boucles qui sont respectivement constituées par les fils 18, 23, 22, 24 et 19, 26, 21, 27 sont connectées en parallèle à une source de courant constant Ic par un conducteur 28 acheminant le courant de la source vers le dispositif, et par un conducteur 29 ramenant le courant vers la source. Ici encore, le gradient qui est produit est : $\nabla_X = \frac{\partial Bz}{\partial X}$

Ces dispositifs de l'art antérieur utilisent des bobines, avec les problèmes qui leur sont propres et qui ont été envisagés ci-dessus.

On trouvera des exposés portant sur les bobines de gradient qui décrivent ces configurations de bobines, ainsi que d'autres, dans un article intitulé "Magnetic Field Gradient Coils for NMR Imaging" par V. Bangert et P. Mansfield paru aux pages 235 et suivantes de la revue Journal of Physics E. (Scientific Instruments) Vol. 15, 1982 et aux pages 263 et suivantes d'un livre intitulé "NMR Imaging in Biomedicine" par P. Mansfield et P.G.Morris,

publié en 1982 par Academic Press.

Le système 31 de l'invention représenté sur la figure 3 utilise des plaques courbes 32 et 33 à la place des fils ou des bobines de l'art antérieur pour acheminer le courant I produisant les champs. Les plaques 32 et 33 sont de préférence des segments d'un cylindre creux. Le courant circule des parties supérieures vers les parties inférieures de ces segments pour produire des champs opposés. La répartition du courant et donc l'uniformité du champ ne sont pas affectées par la configuration géométrique des bobines de génération de champs, du fait qu'il n'y a pas de bobines. A la place, la source de courant Ic est connectée en parallèle par des conducteurs 34 et 36 aux parties supérieures des plaques respectives 22 et 33.

Les parties inférieures des plaques sont connectées en parallèle par l'intermédiaire de conducteurs 37 et 38. Les conducteurs de couplage en parallèle sont connectés à la source de courant par des conducteurs 39 et 41. Le courant dans la plaque est extrêmement uniforme lorsqu'on le compare au courant dans des bobines.

On utilise les caractéristiques physiques qui sont variables, c'est-à-dire la longueur 2L et l'étendue angulaire 2Ø des plaques, pour contribuer à maximiser la symétrie, la linéarité et l'uniformité du champ de gradient. On peut analyser mathématiquement les plaques en considérant une bande d'une plaque de hauteur dl et de longueur 2L située dans le système orthogonal X, Y et Z. On calcule le champ en un point P (X, Y, Z) en utilisant la loi de Biot et Savart, et la règle d'intégration de Simpson. Le champ est de façon générale :

$$dBz = \frac{\mu_o \, I \, dl \cos\theta}{4\pi r} \left[\frac{L-z}{\sqrt{(L-z)^2+r^2}} + \frac{L+z}{\sqrt{(L-z)^2+r^2}} \right]$$

dans cette expression :

μ_o est la perméabilité de l'air

I est la densité de courant dans la bande
z est la position linéaire du champ Bz
L est la moitié de la longueur de la bande
r est la distance radiale de P par rapport à la bande, et
θ est la distance angulaire de Z par rapport à l'axe X.

On notera que seul le champ magnétique Bz intervient du fait que les champs By et Bx sont normaux au champ Bz appliqué, et ces champs ont donc seulement des effets du second ordre.

On obtient le champ Bz complet en intégrant dBz sur le segment complet, après avoir introduit dans l'équation les valeurs de θ et r. Il faut noter que l'invention n'est nullement limitée à la méthode d'intégration qui est suggérée. On a trouvé qu'on obtenait l'uniformité maximale du gradient lorsque l'angle θ était d'environ $\pi/3$. On a en outre trouvé que lorsque L=2R (en désignant par R le rayon du cylindre), le segment est suffisamment long pour assurer l'uniformité.

Des moyens sont prévus pour permettre de raccourcir les segments cylindriques et/ou d'améliorer l'uniformité du champ. Plus précisément, il existe des moyens destinés à augmenter la densité de courant vers les extrémités des segments. Dans le mode de réalisation préféré, 43, de la figure 5, chacun des segments 32 et 33 est divisé en quatre sections. Le segment 32 est ainsi divisé en sections 34, 46, 47 et 48. Chaque section est isolée de la section adjacente. Les sections extérieures 48 et 44 sont plus courtes que les sections intérieures, de façon à avoir $L1 = L4 < L2 = L3$, grâce à quoi chaque section achemine le même courant (connexion en série) mais a une densité de courant différente. Dans un mode de réalisation préféré, $L1/L3 = 7/9$ avec $L = 1,6R$.

On a trouvé que l'uniformité des gradients dans les directions X et Y est affectée par des variations de la

valeur de Ø. Des valeurs de Ø allant jusqu'à 1,08 radian donnent une bonne uniformité dans la direction X, tandis que des valeurs de 0 à environ 1,21 radian donnent une bonne uniformité dans la direction Y.

Il existe des moyens destinés à minimiser la sensibilité de l'uniformité des champs produits par les segments divisés en sections de la figure 5, vis-à-vis des variations de la valeur de Ø . Plus précisément, on parvient à une bonne uniformité aussi bien dans la direction X que dans la direction Y, même avec une certaine variation de la valeur de Ø, en utilisant le dispositif 51 de la figure 6. Dans ce dispositif, des segments longitudinaux 53 et 54 acheminant un courant sont ajoutés au dispositif 43 de la figure 5. Les segments 53 et 54 s'étendent parallèlement à l'axe Z, de part et d'autre du plan XZ. Ceci affecte de façon inverse les gradients dans les directions X et Y et compense donc les effets des variations de Ø sur l'uniformité des gradients de champs dans les directions X et Y.

Les sections 53 et 54 sont isolées par rapport aux autres sections des segments et elles sont connectées en série avec elles. Les connexions entre les segments sont représentées sur la figure 7. On notera que les trois sections situées dans chaque quadrant, comme le montre la figure 6, forment effectivement des bobines à trois spires. Le courant qui entre par le conducteur 55 traverse le segment 47 en direction du conducteur 56. Le conducteur 56 dirige le courant vers le segment 48. Le courant traverse le segment 48 vers le conducteur 57 qui conduit au segment 54 et de là au conducteur 58.

Dans un mode de réalisation préféré, les segments 53 et 54 se sont avérés le plus efficaces lorsque $Ø_4$ était égal à 0,20 radian et Ø était égal à 1,21 radian .

Pendant l'utilisation, les dispositifs de génération de champs de gradient procurent d'excellentes proprié-

tés d'uniformité, de linéarité et d'orthogonalité pour les champs de gradient, par l'utilisation de plaques conductrices courbes à la place de bobines de fil enroulé. Il est avantageux d'utiliser des conducteurs ayant une capacité d'acheminement de courant élevée pour connecter les plaques à la source de courant.

Il va de soi que de nombreuses modifications peuvent être apportées aux dispositifs et aux procédés décrits et représentés, sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de génération de champs de gradient caractérisé en ce qu'il comprend : une paire de segments (32, 33) d'un cylindre creux, disposés de façon opposée et conducteurs du courant électrique ; et en ce que ces segments (32, 33) sont espacés de façon pratiquement équidistante d'un axe longitudinal commun (Z) ; des moyens (34, 36, 37, 38, 39, 41) sont prévus pour faire circuler un courant dans la même direction dans chacun des segments; la direction du courant est telle que le courant produit autour de chacun des segments un champ magnétique qui est parallèle à l'axe longitudinal (Z); le champ combiné autour de chacun des segments (32, 33) de la paire est égal à zéro en tous points d'un premier plan qui est le plan de symétrie par rapport auquel l'un des segments de la paire de segments est symétrique de l'autre segment de la paire; le champ combiné varie de façon pratiquement linéaire dans un second plan qui contient l'axe longitudinal, qui est normal au premier plan et qui divise longitudinalement la paire de segments (32, 33) en deux parties égales; et le champ magnétique présente un maximum positif à l'endroit auquel le second plan divise en deux parties égales le premier des segments de la paire de segments (32, 33) et présente un maximum négatif à l'endroit auquel le second plan divise en deux parties égales l'autre segment de la paire de segments (32, 33).

2. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (44, 46, 47, 48) destinés à faire varier l'uniformité du champ de gradient.

3. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens destinés à faire varier les longueurs des segments conducteurs de courant (32, 33) en fonction de la distance des segments par rapport à l'axe longitudinal commun.

4. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens destinés à faire varier l'étendue angulaire (Ø) de la paire de segments conducteurs de courant (32, 33).

5. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens destinés à faire varier les longueurs des segments (32, 33) en fonction de la distance de ces segments par rapport à l'axe longitudinal commun.

6. Dispositif de génération de champ de gradient selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens destinés à définir la densité de courant aux extrémités des segments (32, 33).

7. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens destinés à diviser les segments (32, 33) en sections (44, 46, 47, 48), ces sections comprenant des sections extérieures (44, 48) aux extrémités des segments et des sections intérieures (46, 47), et les sections extérieures étant plus petites que les sections intérieures; des moyens pour isoler les sections les unes des autres ; et des moyens pour connecter les sections en série.

8. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 7, caractérisé en ce que chaque segment (32, 33) est divisé en quatre sections (44, 46, 47, 48) et les deux sections extérieures (44, 48) sont plus petites que les deux sections intérieures (46, 47).

9. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 8, caractérisé en ce que le rapport entre la longueur des sections extérieures (44, 48) et la longueur des sections intérieures est égale à sept-neuvièmes, et en ce que la longueur totale des segments (32, 33) est égale à 1,6 fois la distance entre les segments et l'axe lon-

gitudinal.

10. Dispositif de génération de gradient selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (53, 54) destinés à minimiser la sensibilité du dispositif de génération de champ vis-à-vis de variations de l'étendue angulaire ($\emptyset$) des segments (32, 33).

11. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comprend un segment secondaire (53, 54) fixé à chacun des segments et isolé par rapport au segment correspondant, ce segment secondaire étant situé au niveau de la région longitudinale médiane des segments et s'étendant pratiquement sur toute la longueur de chacun des segments (32, 33).

12. Dispositif de génération de champ de gradient selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'étendue angulaire ($\emptyset_4$) des segments secondaires est égale à 0,20 radian lorsque l'étendue angulaire ($\emptyset$) de chacun des segments de la paire est de 1,21 radian.

13. Dispositif de génération de champ de gradient selon l'une quelconque des revendications 11 ou 12, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens destinés à connecter les segments secondaires (53, 54) en série avec les sections (44, 46, 47, 48) du segment auquel le segment secondaire est fixé.

14. Dispositif de génération de champ de gradient selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, caractérisé en ce qu'il est placé dans un système orthogonal dans lequel le plan de symétrie est le plan YZ et le second plan est le plan XZ, et le gradient affecte un champ magnétique BZ et est représenté par $\nabla_X = \partial BZ / \partial X$.

FIG. 1

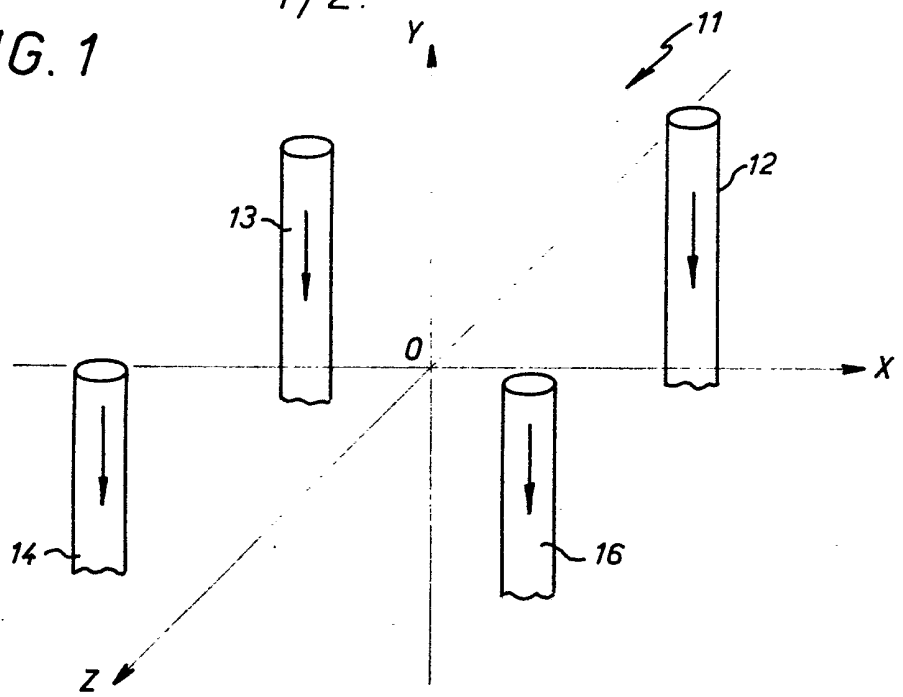


FIG. 2

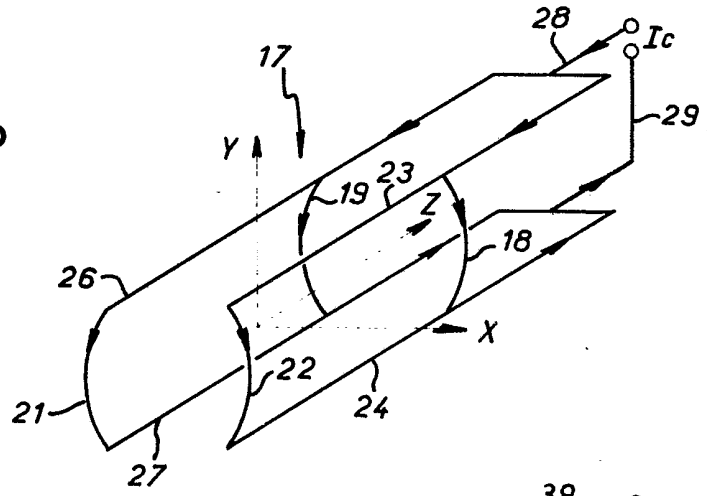


FIG. 3

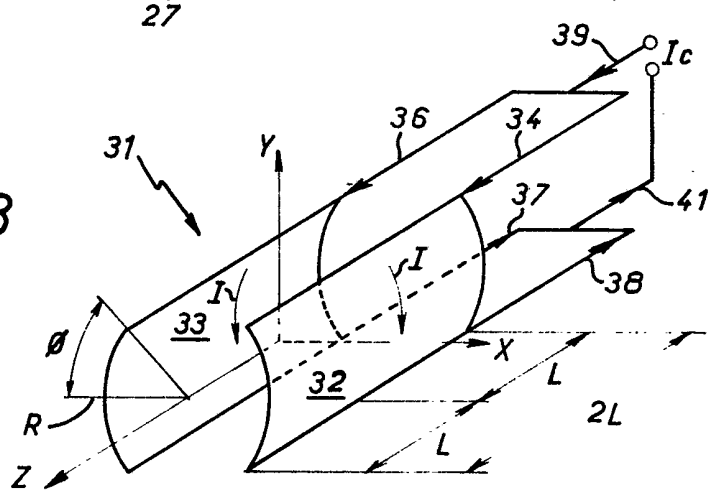


FIG. 4

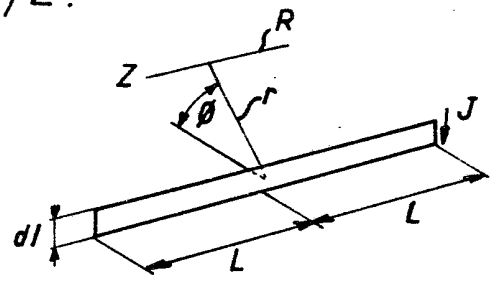


FIG. 5

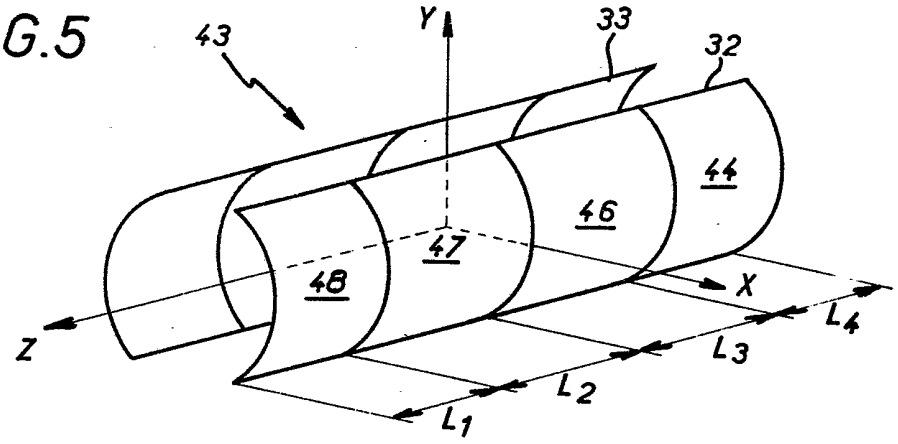


FIG. 6

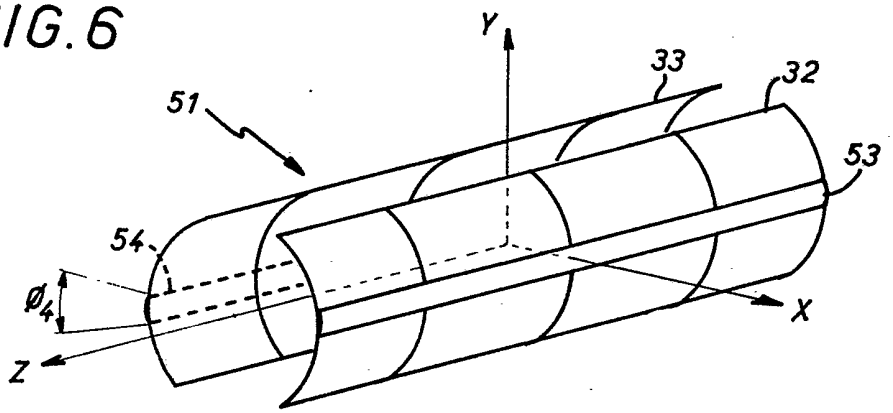


FIG. 7

