

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第6553159号
(P6553159)

(45) 発行日 令和1年7月31日 (2019.7.31)

(24) 登録日 令和1年7月12日 (2019.7.12)

(51) Int.Cl.
GO 1 N 24/00 (2006.01)

F I
GO 1 N 24/00 5 6 0 F

請求項の数 22 外国語出願 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2017-239732 (P2017-239732)	(73) 特許権者	595068254
(22) 出願日	平成29年12月14日 (2017.12.14)		ブルーカー バイオスピン ゲゼルシャフ
(65) 公開番号	特開2018-100962 (P2018-100962A)		ト ミット ベシユレンクテル ハフツン
(43) 公開日	平成30年6月28日 (2018.6.28)		グ
審査請求日	平成30年2月22日 (2018.2.22)		Br u k e r B i o S p i n G m b H
(31) 優先権主張番号	16205779.8		ドイツ連邦共和国 ラインシュテッテン
(32) 優先日	平成28年12月21日 (2016.12.21)		ジルバーシュトライフェン (番地なし)
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (EP)	(74) 代理人	100125254
			弁理士 別役 重尚
		(74) 代理人	100118278
			弁理士 村松 聡
		(72) 発明者	ペーター ホーファー
			ドイツ連邦共和国 7 6 2 7 5 エットリ
			ンゲン アネッテ-フォン-ドロステ-ヒ
			ュルスホフ-ヴェーク 1 1
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 RF帯域における透過性および均一性を強化したEPR共振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

円筒形TE_{0,1,n}マイクロ波モード用のEPR共振器 (n は整数)であって、
1kHz未満のRFで5%未満のRF吸収を有する円筒形本体 (10)と、
第1の端部で軸方向に前記円筒形本体 (10)内の共振容積を画定する第1のプランジャ (11)と、
第2の端部で軸方向に前記円筒形本体 (10)内の前記共振容積を画定する第2のプランジャ (12)とを備え、
前記第2のプランジャ (12)は、EPR試料 (14)を前記EPR共振器に挿入するための開口部 (2, 13)を有し、
前記第1および前記第2のプランジャ (11, 12)の各々が、導電性フィラメント (3, 3')からなる渦巻状巻線 (1, 1')を含み、前記渦巻状巻線 (1, 1')の端部も隣り合う巻線も、電氣的閉ループの形成につながる可能性がある導電性接続をしないことを特徴とするEPR共振器。

【請求項 2】

前記整数である n は、1 ~ 4 の整数のうちの1つであることを特徴とする請求項1記載のEPR共振器。

【請求項 3】

前記渦巻状巻線の前記フィラメントの最小線径 D と、隣り合う巻線間の距離 δ との比 D/δ は、1よりも大きいことを特徴とする請求項1又は2記載のEPR共振器。

【請求項 4】

前記比 D/δ は 3 よりも大きいことを特徴とする請求項 3 記載の E P R 共振器。

【請求項 5】

前記比 D/δ は 10 よりも大きいことを特徴とする請求項 3 記載の E P R 共振器。

【請求項 6】

プランジャの軸方向長さとその内側ボア径との比は、1 以上であることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 7】

前記プランジャの軸方向長さとその内側ボア径との比は、3 よりも大きいことを特徴とする請求項 6 記載の E P R 共振器。

10

【請求項 8】

前記第 1 のプランジャ (1 1) および / または前記第 2 のプランジャ (1 2) は、少なくとも 2 つの層からなる、隣り合う層間が導電性接続がされることなく前記軸方向に配置された導電性渦巻状フィラメント (3 , 3 ') を備えることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 9】

前記導電性渦巻状フィラメント (3 , 3 ') の層の数は 30 であることを特徴とする請求項 8 記載の E P R 共振器。

【請求項 10】

前記第 2 のプランジャ (1 2) の前記開口部 (2 , 1 3) のサイズは、前記円筒形 T E_{01n} モードの遮断径よりも小さいことを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

20

【請求項 11】

前記第 1 のプランジャ (1 1) は、その作動位置にある前記試料 (1 4) の支持部 (1 7) のための開口部 (1 8) を有することを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 12】

前記第 1 のプランジャ (1 1) または前記第 2 のプランジャ (1 2) は、アンテナ (1 9) によってマイクロ波放射を伝達するための第 2 の開口部 (1 8 ') を有することを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

30

【請求項 13】

前記フィラメントの隣り合う巻線間の空間が絶縁体で充填されることを特徴とする請求項 1 乃至 12 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 14】

前記フィラメント (3 , 3 ') が絶縁体で被覆されることを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 15】

前記フィラメント (3 , 3 ') の前記線径 D は $5\ \mu\text{m} \sim 5\ \text{mm}$ の範囲にあることを特徴とする請求項 1 乃至 14 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 16】

前記フィラメント (3 , 3 ') の前記線径 D は $30\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{mm}$ の範囲にあることを特徴とする請求項 15 記載の E P R 共振器。

40

【請求項 17】

前記フィラメント (3 , 3 ') は、金属のみからなるワイヤからなることを特徴とする請求項 1 乃至 16 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 18】

前記フィラメント (3 , 3 ') は、A g 被覆銅、A u 被覆銅、黄銅、タングステン、A g、及び A u のうちの 1 つからなるワイヤからなることを特徴とする請求項 17 記載の E P R 共振器。

【請求項 19】

50

R F 場が前記 E P R 共振器の外側に配置された R F コイルによって発生され、かつ前記円筒形本体 (1 0) 内の前記共振容積の軸方向長さに対する前記 R F コイルの横方向寸法が 5 0 % ~ 2 0 0 % の範囲にあることを特徴とする請求項 1 乃至 1 8 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

【請求項 2 0】

前記円筒形本体 (1 0) 内の前記共振容積の軸方向長さに対する前記 R F コイルの横方向寸法が 1 0 0 % であることを特徴とする請求項 1 9 記載の E P R 共振器。

【請求項 2 1】

前記試料容積における前記 R F 場の均一性は、0 . 0 1 % ~ 1 0 % の範囲にあることを特徴とする請求項 1 乃至 2 0 のいずれか 1 項に記載の E P R 共振器。

10

【請求項 2 2】

前記試料容積における前記 R F 場の均一性は、0 . 1 % ~ 1 % の範囲にあることを特徴とする請求項 2 1 記載の E P R 共振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、円筒形 T E _{0 1 n} マイクロ波モード用の E P R (= 「電子常磁性共鳴」) 共振器 (n は整数、特に 1 ~ 4 の整数) であって、

1 k H z 未満の R F で 5 % 未満の R F 吸収を有する円筒形本体と、

第 1 の端部で軸方向に円筒形本体内の共振容積を画定する第 1 のブランジャと、

20

第 2 の端部で軸方向に円筒形本体内の共振容積を画定する第 2 のブランジャとを備え、

第 2 のブランジャは、E P R 試料を E P R 共振器に挿入するための開口部を有する E P R 共振器に関する。

【0 0 0 2】

このタイプの装置は、特許文献 1 または特許文献 2 により公知である。

【背景技術】

【0 0 0 3】

高感度タイプ、中感度タイプ、及び低感度タイプのいずれかを実施する標準 C W 型高速走査 E P R 分光法は、マイクロ波空洞共振器内に含まれる研究対象の材料 (すなわち、E P R 試料) に R F 静磁場およびマイクロ波静磁場の同時印加を必要とする。E P R 分光法の感度は、測定された E P R スペクトルの信号雑音比に影響される。

30

【0 0 0 4】

1 G H z を上回る周波数を有するマイクロ波場は、その共振モードのうちの 1 つを使用した際に、その共振エネルギーが伝送線路およびマイクロ波空洞共振器の金属壁に閉じ込められた場合、「内部 (にある) 」と呼ばれる。E P R 共振器の設計および技術に関して、この閉じ込めの程度に応じて、高感度、中感度または低感度の実施の線引きが行われる。

【0 0 0 5】

高感度の C W 型 E P R 用途向けに適合させる (すなわち、所定のマイクロ波電力供給単位に対して最大 E P R 信号振幅を得る) ため、マイクロ波共振器は、最適な E P R 試料容積 (すなわち、E P R スピンの数が減ることによる感度の低下を招いてしまうくらいに小さい試料容積ではなく、かつ E P R 空洞共振器の Q 値の減少により E P R 信号が低下することによって感度が中度または低度となるくらいに大きい試料容積でもない) を考慮して設計することが望ましい。さらに、マイクロ波空洞共振器は、様々な漏れメカニズムによる空洞共振器の外部への、その共振エネルギーの損失を 4 0 d B 未満とするべきである。

40

【0 0 0 6】

周波数が k H z から M H z までの R F 場は、マイクロ波空洞共振器の外側に配置されたコイルが発生させたものであり、且つそのエネルギーがマイクロ波空洞共振器において共振も閉じ込めもされていない場合、「外部 (にある) 」と呼ばれる。理想的には、マイクロ波空洞共振器の金属壁は、外部 R F 場と相互作用すべきではない。残念ながら、そのよ

50

うな相互作用は R F 渦電流の形で存在し、E P R 試料を横切る外部 R F 場のいくつかのパラメータ、すなわち、振幅 (R F 「透過性」とも呼ばれる)、位相および均一性に直接影響する。

【 0 0 0 7 】

さらに、高感度 E P R 分光法においても同様に重要なことに、E P R マイクロ波空洞共振器の金属壁内の R F 渦電流は、マイクロ波空洞共振器のジュール熱および振動のような副次的な影響をも生じさせる。ここで、後者の振動は R F 渦電流と静磁場との相互作用によって生じる。

【 0 0 0 8 】

R F 渦電流の存在によって引き起こされるこれらの影響はすべて、E P R 実験の分光データに悪影響を及ぼす。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 9 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 5 3 4 5 2 0 3 号明細書

【 特許文献 2 】 独国特許第 4 1 2 5 6 5 5 号明細書

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 0 】

現時点での技術水準は、E P R 試料に最も近接する部分の空洞共振器の壁に対する局所的な R F 透過性のみに頼っており、他方、E P R 試料位置における R F 場の均一性の問題全体は、まだ深刻に考慮されていないままである。

【 0 0 1 1 】

現在のところ、高感度用途向けの E P R マイクロ波空洞共振器は、電氣的に相互接続されるサブコンポーネントのアセンブリからなることがしばしばである。これらのサブコンポーネントは、共振マイクロ波場をほとんど透過させないように設計された金属壁によって囲まれた共振器容積を画定する。円筒対称性を有する特定のマイクロ波共振モード ($T E_{0,1,n}$ 、ここで n は 1 ~ 3 の間で選択される整数である) を選択することにより、高感度共振器は、円筒形状を有するサブコンポーネント、すなわち、2つのブランジャによってその軸方向端部を区切られた「本体」(本体は、円筒形の空洞共振器の半径を画定する) と呼ばれる 1 つの円筒形本体を有するように設計できる。これにより、ブランジャ間の内部空間により空洞共振器の長さが画定される。少なくとも 1 つのブランジャは、試料または他の E P R 専用ツール (例えば、デュワー、試料ホルダ) を共振器容積内に入れるための開口部を有する。

【 0 0 1 2 】

従来技術の高感度円筒 C W 型 E P R 空洞共振器は、R F 渦電流の問題に対する工学的な解決策として、

a) 共振器の円筒形本体は、誘電体で被覆された巻線型導電性構造で作られ、巻線が軸方向に延びてソレノイドを形成することと、

b) 共振器の円筒形本体は、1つ以上のメタライゼーション薄層のための支持部として使用される誘電体で作られ、場合によってはメタライゼーション層の溝が付いていることと、

を備える。

【 0 0 1 3 】

上記の 2 つの構成では、E P R 空洞共振器本体の修正のみが行われる。空洞共振器をその軸方向端部で画定するブランジャは、通常、(溝が設けられてない) 中実金属または金属化誘電体から作られる。従来技術のブランジャは、少なくとも円筒形 $T E_{0,1,n}$ マイクロ波共振モードでは、R F 渦電流の抑制に最適化されていない。さらに、E P R 空洞共振器をマイクロ波ブリッジに接続し、空洞共振器本体の側方に配置された低損失の金属製の伝送線路 (導波管または同軸ケーブル) は全て、R F 渦電流に寄与する可能性がある。

10

20

30

40

50

【0014】

結論として、上記従来技術の解決策は、特に空洞共振器本体の壁における、RF渦電流の形成の緩和に部分的かつ局所的にしか成功していない。この部分的な手法は、RF均一性、空洞共振器の熱負荷および機械的振動が問題にならない限りにおいて、少なくとも着目する領域の周り（すなわち、空洞共振器の中心に配置されたEPR試料容積）では、EPR空洞共振器の十分なRF透過性の取得方法として機能しうることがわかっている。例えば、外部RF場の発生源のサイズが、より大きなEPR試料に必要とされるようなEPR空洞共振器と同様またはそれよりも大きい場合や、より大きなEPR試料容積におけるRF場の均一性を保たなければならない場合は、先行技術の解決策は十分ではない。加えて、EPRを高感度に行う場合、RF場およびマイクロ波場の電力が増加する。従って、RF渦電流と強い静磁場との相互作用によって生じる空洞共振器の熱負荷および/または振動が重要なパラメータとなる。

10

【0015】

[具体的な背景技術]

上に引用した特許文献1および特許文献2は、「電子スピン共鳴分光法のための共振器構成」を開示し、巻線（ソレノイド）設計の本体を有する円筒形TE₀₁₂ EPR共振器を含む。ここでは、上で述べたように：

a) マイクロ波TE₀₁₂円筒形空洞共振器を閉鎖し、その軸方向の長さを規定するために使用される、上下2つの軸方向ブランジャが、中実金属で作られている。

【0016】

b) マイクロ波結合のために使用されるアンテナは、共振器の軸に対して横方向かつ垂直に配置されるので、巻線ソレノイド本体に穴が必要となる。さらに同軸ケーブルはこの穴にはんだ付けされ、副次的な作用として、EPR空洞共振器の壁の数巻きのソレノイド間に電氣的接続を形成する。このマイクロ波結合構成は、ソレノイド本体（空洞共振器の壁）の巻線数巻きを電氣的に閉じさせ、従って、RF渦電流を発生させやすい。この構成では、同軸ケーブルのシールドをEPR空洞共振器本体と電氣的に接続することにより、閉ループが形成され、それによってRF渦電流にも大きく影響する。

20

【0017】

特に、特許文献1および特許文献2は、図6において、円筒形巻線本体、両方ともすべて金属製の第1のブランジャおよび第2のブランジャを示している。ブランジャは金属製であるため、RF透過性はない。本体は巻線であるため、外部RF場はEPR試料容積をマイクロ波空洞共振器の中心で局所的に横切ることができる。

30

【0018】

本発明は、上述した既存の方法および装置の1つ以上の欠点および矛盾点を実質的に克服する方法を説明する。

【0019】

本発明の1つの主な目的は、高感度EPR共振器の概念を提案することであり、マイクロ波共振器におけるRF場の均一性、空洞共振器の熱負荷またはRF周波数振動に対するRF渦電流効果を緩和する。現時点での技術水準におけるEPR共振器と比較して、特に高速走査EPR実験では、全体的なRF透過性、RF均一性、RF渦電流によって引き起こされる加熱および振動の改善を有することが望ましい。従って、解決すべき課題は、ほとんどすべてのRF渦電流、すなわち、空洞共振器およびマイクロ波伝送線路のすべての金属壁面において誘導されるだけでなく、任意の種類のRFループにおいて誘導される、RF渦電流の形成を緩和することである。

40

【0020】

本発明の別の目的は、マイクロ波空洞共振器のすべての部品について、マイクロ波共振モード（円筒形TE_{01n}モード、nは1～4の整数）と適切な巻線技術とを最適に組み合わせたEPR共振器を提案して、外部RF場との電磁相互作用を低減することである。

【課題を解決するための手段】

【0021】

50

本発明によれば、これらの目的は、上述の装置を修正して、第1および第2のブランジャの各々が、導電性フィラメントからなる渦巻状巻線を含み、渦巻状巻線の端部も隣り合う巻線も、電氣的閉ループの形成につながる可能性がある導電性接続をしないようにすることにより達成される。

【発明の効果】

【0022】

本発明で説明する渦巻状巻線ブランジャの主な利点は、円筒形 TE_{01n} マイクロ波モードの場合、 TE_{01n} マイクロ波モードの周波数よりも低い周波数で渦電流を生成することなく、現時点での技術水準におけるブランジャと同等の機能を提供することである。

【0023】

10

[発明の好ましい実施変形]

本発明の好ましい実施形態では、渦巻状巻線のフィラメントの最小線径 D と、隣り合う巻線間の距離 δ との比 D/δ は、 $1:1$ よりも大きく、特に $3:1$ よりも大きく、好ましくは $10:1$ よりも大きい。上記の比により、特許請求の範囲に記載のように、ブランジャの容積を通り抜けるマイクロ波場の漏れが低減される。

【0024】

本発明のさらなる実施形態では、ブランジャの軸方向長さとその内側ボア径との比は、 1 以上であり、特に 3 よりも大きい。上記の値により、EPR共振器容積に試料やさらなる挿入物を入れるのに必要な接近手段が確保されると共に、特許請求の範囲に記載のブランジャのボアを通り抜けるマイクロ波場の漏れが低減される。

20

【0025】

本発明の別の実施形態では、第1のブランジャおよび/または第2のブランジャは、少なくとも2つの層、特に約30層からなる、隣り合う層間が導電性接続がされることなく軸方向に配置された導電性渦巻状フィラメントを備える。このように多層とすることにより、マイクロ波場の漏れがさらに低減される。

【0026】

本発明のさらに別の実施形態では、第2のブランジャの開口部のサイズは、円筒形 TE_{01n} モードの遮断径よりも小さい。遮断径よりも小さくなるかかるブランジャ開口部を選択することにより、マイクロ波場の漏れが低減される。

【0027】

30

本発明のさらなる実施形態では、第1のブランジャは、その作動位置にある試料の支持部のための開口部を有する。これにより、試料を共振器内で機械的に安定させ、調整することができる。

【0028】

本発明の別の実施形態では、第1のブランジャまたは第2のブランジャは、アンテナによってマイクロ波放射を伝達するための第2の開口部を有する。これにより、電氣的閉ループを形成することなくブランジャを通過するマイクロ波放射伝達に同軸線を使用できる。RF渦電流への、伝送線路およびアンテナ単体からの寄与を最小限に抑えられる。

【0029】

本発明のある種類の実施形態では、フィラメントの隣り合う巻線間の空間は絶縁体で充填される。絶縁体によって、ブランジャの機械的安定性が改善され、電気伝導が回避される。

40

【0030】

本発明のさらなる種類の実施形態は、フィラメントが絶縁体で被覆されていることを特徴とする。フィラメントの絶縁被覆によって、マイクロ波およびEPR目的のための電気絶縁の品質が改善される。

【0031】

本発明によるEPR共振器のさらに好ましい実施形態では、フィラメントの線径 D は $5\mu m \sim 5mm$ の範囲、特に $30\mu m \sim 1mm$ の範囲にある。かかる線径 D を選択することにより、フィラメントのマイクロ波不透過性およびRF透過性を最適化することができる

50

。

【0032】

本発明の実際の用途において、フィラメントは、金属のみからなるワイヤ、好ましくは、AgまたはAu被覆銅、黄銅もしくはタングステン、またはAgまたはAuワイヤからなる。金属のみからなるワイヤを用いることによって、フィラメントの渦電流に関する特性は、巻線構造の長さに沿って均一に分布すると共に、AgまたはAuの金属被覆がEPRバックグラウンド信号を小さくする。

【0033】

さらに有利な実施形態は、RF場がEPR共振器の外側に配置されたRFコイルによって発生され、かつ円筒形本体内の共振容積の軸方向長さに対するRFコイルの横方向寸法が50%～200%の範囲にあり、好ましくは約100%であることを特徴とする。この構成により、共振器内がより広く均一なRF場容積が得られ、ひいては感度がより高くなる。

10

【0034】

本発明によるEPR共振器の大部分の実装では、試料容積におけるRF場の均一性は、0.01%～10%の範囲にあり、特に0.1%～1%の範囲にある。選択された均質性によって、この構成の分解能がさらに最適化される。

【0035】

本発明のこれらおよび他の目的および利点は、添付の図面と併せて、本発明の現在好ましい実施形態例の以下の詳細な説明を注意深く検討することによって、よりよく理解され、認識され得る。

20

【0036】

本発明の上記および他の特徴および利点を当業者に対してより明確にするために、添付の図面を参照しながら、本発明の好適な実施形態を詳細に説明する。ここで、同じ番号は同じ要素を表す。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】中央に開口部を有する第1および第2のブランジャにおける導電性フィラメントからなる渦巻状巻線構造の一実施形態を概略的に示す図である。

【図2】中央に開口部を持たない別の実施形態を示す図である。

30

【図3a】円形の断面を有する導電性フィラメントからなる渦巻状巻線の2つの層を示す図である。

【図3b】矩形の断面を有する導電性フィラメントからなる渦巻状巻線の2つの層を示す図である。

【図4】円形の断面を有する金属のみからなる導電性フィラメントの一実施形態の断面図である。

【図5】矩形の断面を有する金属のみからなる導電性フィラメントの一実施形態の断面図である。

【図6】本発明によるEPR共振器の第1の実施形態の概略的な断面図である。

【図7】本発明によるEPR共振器の第2の実施形態を示す図である。

40

【図8】本発明によるEPR共振器の第3の実施形態を示す図である。

【図9】EPR共振器全体を覆う磁場を発生するRFコイルによって囲まれた本発明によるEPR共振器のさらなる実施形態を示す図である。

【図10】中心に試料を有し、TE_{01n}モードの共振マイクロ波場の磁力線を記載した、本発明によるEPR共振器の概略的な断面図である。

【図11】共振マイクロ波場の電気力線を記載した、EPR共振器の概略的な断面図である。

【図12】異なる線径Dのフィラメントについて、EPR空洞共振器によってRFコイルに供給される一定量のRF電力に対して計算した、追加的なRF電力吸収の特性曲線を示す図である。

50

【図 1 3】1つの巻線ソレノイド（本体）と、ソレノイドの内側のその端部に配置された開口部を有する2つのワイヤ渦巻状巻線（プランジャ）との3つの部分からなる、本発明による完全にRFを透過する TE_{01n} EPR共振器の切り欠き斜視断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0038】

現時点での技術水準は、EPR試料に最も近接する部分の空洞共振器の壁に対する局所的なRF透過性のみに対応しており、他方、EPR試料位置におけるRF場の均一性の問題全体は、まだ深刻に考慮されていないままである。このため、従来技術のEPR共振器と比較して、特に高速走査EPR実験では、全体的にRF透過性を有し、RF均一性が改善され、さらにRF渦電流によって引き起こされる加熱および振動が低減することが望ましい。従って、本発明で解決される課題は、空洞共振器内のほとんどすべてのRF渦電流、すなわち、空洞共振器およびマイクロ波伝送線路のすべての金属壁面において誘導されるRF渦電流だけでなく、任意の種類のRFループにおいて誘導されるRF渦電流を緩和することである。

10

【0039】

従って、本発明は、外部RF場との電磁相互作用を低減するために、マイクロ波共振モード（すなわち、円筒形 TE_{01n} モード、ここで n は1～4の整数）とマイクロ波空洞共振器の各部品に対する適切な巻線技術とを最適に組み合わせたEPR共振器の概念に帰着する。以下、実施例により本発明をさらに詳細に説明し、考察する。

【0040】

20

本発明によるEPR共振器のすべての実施形態は、最も直近の先行技術における一般的な装置と同様、円筒形 TE_{01n} モードでの使用のために設計されている。ここで n は特に1～4の整数である。このようなEPR共振器はそれぞれ、

1kHz未満のRFで5%未満のRF吸収を有する円筒形本体10と、

第1の端部で軸方向に円筒形本体10内の共振容積を画定する第1のプランジャ11と、

第2の端部で軸方向に円筒形本体10内の共振容積を画定する第2のプランジャ12を備え、

第2のプランジャ12は、EPR試料14をEPR共振器に挿入するための開口部2, 13を有する。

30

【0041】

本発明によるEPR共振器は、第1および第2のプランジャ11, 12の各々が、導電性フィラメント3, 3'からなる渦巻状巻線1, 1'を備え、渦巻状巻線1, 1'はそれらの端部および隣り合う巻線のいずれにおいても、電氣的閉ループの形成につながる可能性がある導電性接続をしないことを特徴とする。

【0042】

第1のプランジャ11および/または第2のプランジャ12は、少なくとも2つの層、特に約30層からなる、隣り合う層間が導電性接続されることなく軸方向に配置された導電性渦巻状フィラメント3, 3'を備える。

【0043】

40

第2のプランジャ12の開口部2, 13のサイズは、円筒形 TE_{01n} モードの遮断径よりも小さくするべきである。

【0044】

フィラメントの隣り合う巻線間の空間は絶縁体で充填してもよい。さらに、フィラメント3, 3'は絶縁体で被覆してもよい。フィラメント3, 3'は、通常、金属のみからなるワイヤ、好ましくは、AgまたはAu被覆銅、黄銅もしくはタングステン、またはAgまたはAuワイヤからなる。

【0045】

本発明の最も実用的な実施形態では、RF場がEPR共振器の外側に配置されたRFコイルによって発生され、かつ円筒形本体10内の共振容積の軸方向長さに対するRFコイ

50

ルの横方向寸法が 50% ~ 200% の範囲にあり、好ましくは約 100% である。

【0046】

試料容積における RF 場の均一性は、0.01% ~ 10% の範囲にあり、特に 0.1% ~ 1% の範囲にある。

【0047】

図 1 および図 2 は、第 1 および第 2 のブランジャの構造を示す図であって、図 1 は開口部 2 を備えた構造、図 2 は開口なしの構造を示す。ブランジャは、導電性フィラメント 3, 3' からなる渦巻状巻線 1, 1' を備える。渦巻状フィラメントの巻線は、それらの端部及び隣り合う巻線のいずれにおいても、互いに電氣的に接触しない。

【0048】

図 3 a および図 3 b は、フィラメント 3, 3' からなる渦巻状巻線の 2 つの層を断面で示している。巻線の隣り合う部分間の間隔は δ で示され、同じ方向のフィラメントの線径は D で示される。一般に、望ましいマイクロ波の不透過性を達成するためには、 δ / D は 3 から 10 の範囲内でなければならない (ブランジャにおける穴の直径とその軸方向の長さに対する比についても同じである)。この規則は、フィラメント間の誘電材料 (空気を含む) 内の磁場のエバネセント伝播 (減衰) を仮定することによって得られる。フィラメント線径 D は、後で図 12 に示すように、異なる遮断 RF 吸収周波数に EPR 共振器を適合させるために使用することができる。異なる層のフィラメント間の距離は少なくとも $\delta / 2$ と同じ大きさでなければならない。

【0049】

フィラメントは、絶縁体 4, 4' によって電氣的に絶縁され、機械的に安定にされる。フィラメント自体の電気絶縁被覆によって、絶縁がさらに改善され、フィラメントの巻線間の偶発的な電気接触の危険性が低減される。

【0050】

図 4 および図 5 は、異なる構造を有する、使用されるフィラメントを示す。特に、図 4 および図 5 では、金属のみからなるフィラメント 5, 5' を示す。

【0051】

図 6 は、本発明による EPR 共振器の第 1 の実施形態を示す。円筒形本体 10 は、第 1 のブランジャ 11 と、開口部 13 を有する第 2 のブランジャ 12 とによって画定されている。この開口部により、試料 14 を共振器に挿入できる。誘電体試料管 16 は、試料 14 をその作動位置に保持する。誘電体試料管 16 は、試料 14 と共に共振器に挿入でき、また共振器から取り出すことができる。放射素子 15 (ループまたはアンテナ) で終端された同軸線により、マイクロ波を共振器に導入することができる。

【0052】

第 1 のブランジャ 11 に、その作動位置にある試料 14 の支持部 17 用の開口部 18 があってもよい。本発明のさらなる実施形態では、第 1 のブランジャ 11 または第 2 のブランジャ 12 は、アンテナ 19 によってマイクロ波放射を伝達するための第 2 の開口部 18' を有していてもよい。

【0053】

図 7 は、本発明による EPR 共振器の第 2 の実施形態を示す。図 6 とは異なり、第 1 のブランジャ 11 も開口部 18 を有する。この場合、試料 14 は、第 1 のブランジャ 11 を横断する誘電体試料ホルダである支持部 17 によって支持される。

【0054】

図 8 は、本発明による EPR 共振器の第 3 の実施形態を示す。マイクロ波は、第 2 のブランジャ 12 の第 2 の開口部 18' を介してアンテナ 19 によって共振器に結合される。あるいは、マイクロ波は、開口部 13 および 18 を介して共振器に結合することもできる。

【0055】

図 9 は、RF コイル 31, 32 によって囲まれた EPR 共振器 30 を示し、RF コイル 31, 32 は、例えば、EPR 共振器の軸方向長さよりも 150% 大きい。RF コイルは

10

20

30

40

50

、E P R共振器全体を覆う磁場を発生する。

【0056】

図10は、中心に試料を有し、共振マイクロ波場の磁力線を記載した、円筒形E P R共振器の断面を示す。

【0057】

図11は、共振マイクロ波場の電気力線を記載した、図10の円筒形E P R共振器の断面を示す。マイクロ波電磁場は、マクスウェル方程式に従って共存する。図11から、ブランジャの渦巻状構造は、本発明によって要求されるように、電氣的マイクロ波共振モードの対称性を反映していることがわかる。渦巻状巻線の隣り合う巻線間が少しでも電氣的に接触すると、共振マイクロ波モードの閉じ込めを妨げる共鳴構造が生じうる。

10

【0058】

ブランジャは、電磁信号を受信または送信するためには使用されないことに留意されたい。

【0059】

図12は、異なる線径Dのフィラメントについて、E P R空洞共振器によってR Fコイルに供給される一定量のR F電力に対して計算した、追加的なR F電力吸収の特性曲線を示す。スケーリング限界の規定は次のとおりである：0%はR Fコイル間の空気（共振器は存在しない）を意味し、上限は100%を超えることができる（相対測定）ため、規定されていない。約2.5mmの線径Dにおいて、外部R F場の遮断周波数は約1kHzである。線径Dが小さいほど遮断周波数が高くなり、例えば、0.5mmの場合は20kHz、10μmの場合は150kHzである。

20

【0060】

最後に、図13は、1つの巻線ソレノイド（本体10）と、ソレノイドの内側のその端部に配置された開口部13、18を有する2つのワイヤ渦巻状巻線ブランジャ11、12との3つの部分からなる、完全にR Fを透過するTE_{01n} E P R共振器の切り欠き斜視断面図を示す。各ブランジャ11、12は、隣り合う層間が導電性接続することなく、独立した渦巻状フラットワイヤコイルのスタックとして形成される。ブランジャ11、12の内側ボアは、E P R共振空洞共振器の内部空間にE P R試料を挿入する接近手段を提供する。

【0061】

30

本発明のいくつかの特徴のみを本明細書に図示し説明したが、多くの修正および変更が当業者には想起されるはずである。従って、添付の特許請求の範囲は、本発明の真の趣旨に含まれるすべてのそのような修正および変更を包含することが意図されていることを理解されたい。

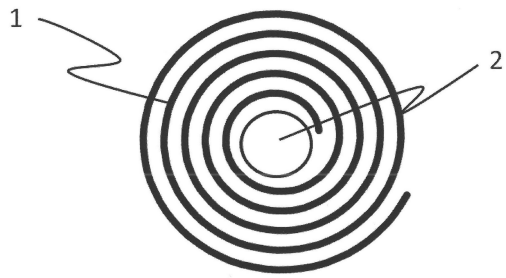
【符号の説明】

【0062】

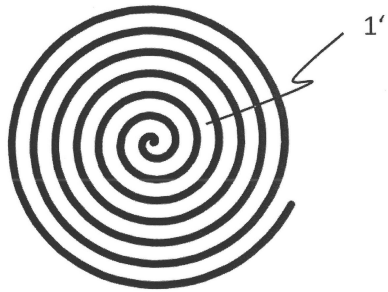
- 1, 1' 渦巻状巻線
- 2, 13 開口部
- 3, 3' 導電性フィラメント
- 10 円筒形本体
- 11 第1のブランジャ
- 12 第2のブランジャ
- 14 E P R試料

40

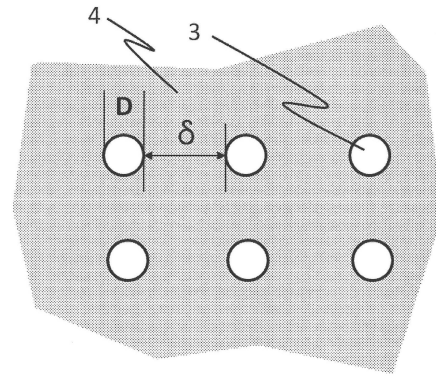
【図 1】



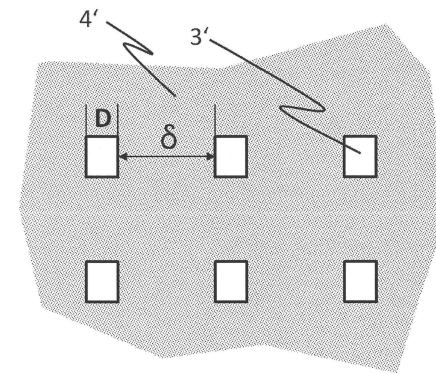
【図 2】



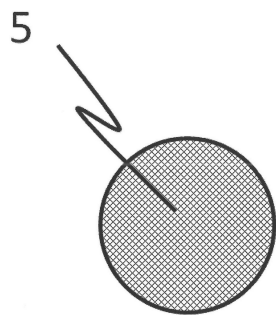
【図 3 a】



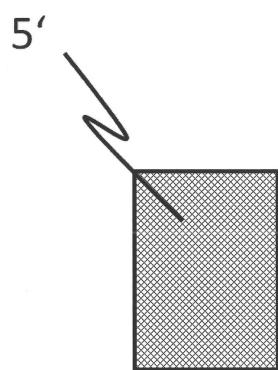
【図 3 b】



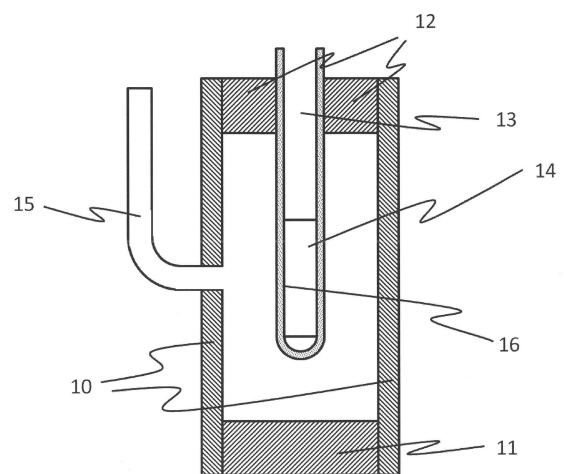
【図 4】



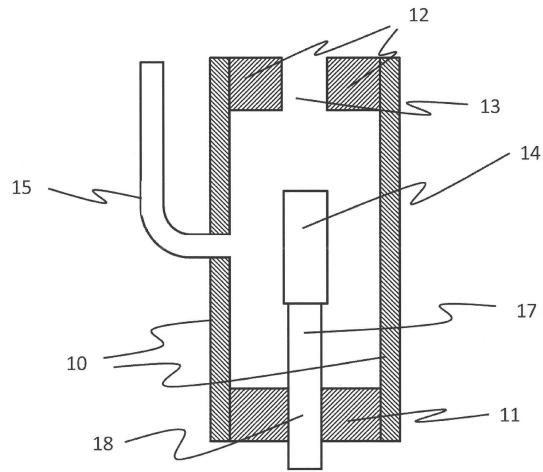
【図 5】



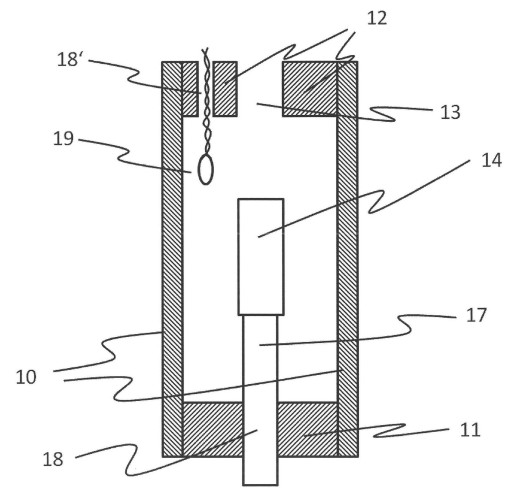
【図 6】



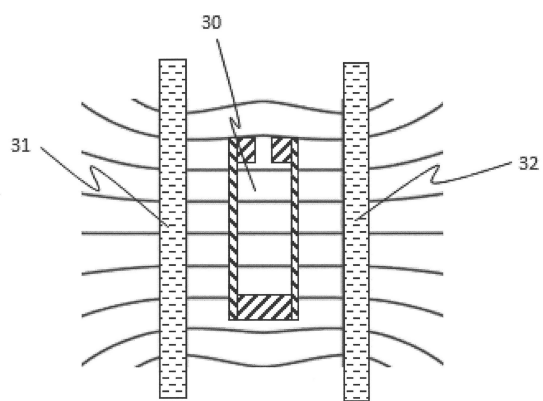
【図 7】



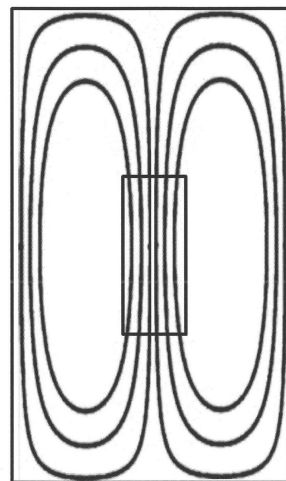
【図 8】



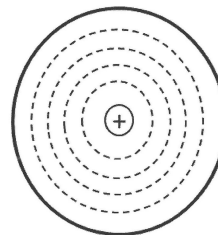
【図 9】



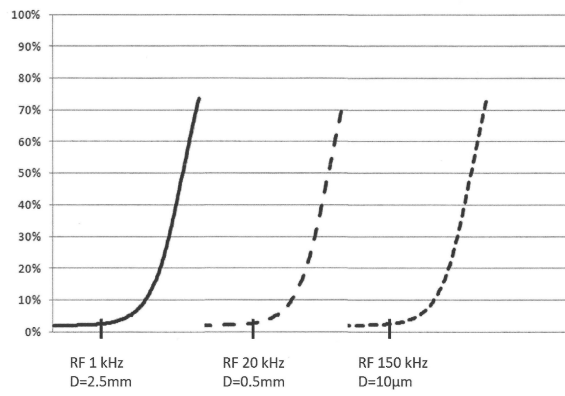
【図 10】



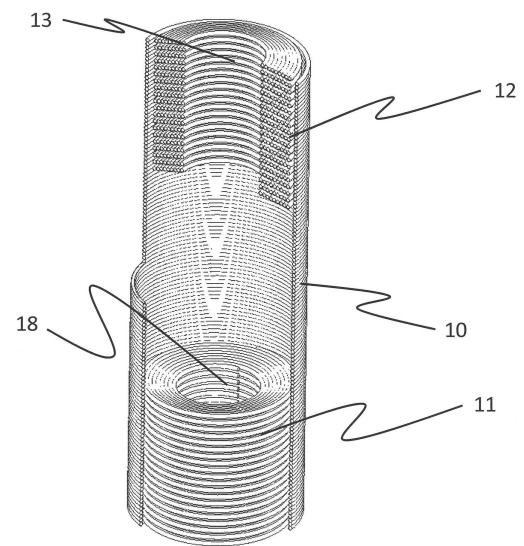
【図 11】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

(72)発明者 アイオン プリセカル

ドイツ連邦共和国 7 6 2 2 7 カールスルーエ マックス - ベックマン - シュトラーセ 2 9

審査官 田中 秀直

(56)参考文献 特公昭5 1 - 0 0 7 3 9 0 (J P , B 1)

米国特許第0 5 2 1 2 4 4 9 (U S , A)

特開2 0 1 6 - 1 7 6 9 3 2 (J P , A)

米国特許出願公開第2 0 1 6 / 0 2 7 4 2 0 0 (U S , A 1)

特開昭6 1 - 2 8 4 6 5 0 (J P , A)

米国特許第0 4 7 9 1 3 9 2 (U S , A)

特表平1 1 - 5 1 1 9 8 7 (J P , A)

特開昭6 3 - 0 4 2 4 5 6 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 N 2 4 / 0 0 - 2 4 / 1 4

G 0 1 R 3 3 / 2 8 - 3 3 / 6 4