

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第6556131号
(P6556131)

(45) 発行日 令和1年8月7日 (2019. 8. 7)

(24) 登録日 令和1年7月19日 (2019. 7. 19)

(51) Int. Cl.

F I

HO 3 H 7/01 (2006. 01)

HO 1 L 43/06 (2006. 01)

HO 3 H 7/01 Z

HO 1 L 43/06 P

請求項の数 14 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2016-534909 (P2016-534909)	(73) 特許権者	390035448
(86) (22) 出願日	平成26年10月31日 (2014. 10. 31)		フォルシュングスツェントルム・ユーリッ
(65) 公表番号	特表2017-512387 (P2017-512387A)		ヒ・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレン
(43) 公表日	平成29年5月18日 (2017. 5. 18)		クテル・ハフツング
(86) 国際出願番号	PCT/DE2014/000558		ドイツ連邦共和国、ユーリッヒ、ウイルヘ
(87) 国際公開番号	W02015/078426		ルムーヨーネンーストラーセ (番地なし)
(87) 国際公開日	平成27年6月4日 (2015. 6. 4)	(74) 代理人	100069556
審査請求日	平成29年9月26日 (2017. 9. 26)		弁理士 江崎 光史
(31) 優先権主張番号	102013018011. 2	(74) 代理人	100111486
(32) 優先日	平成25年11月29日 (2013. 11. 29)		弁理士 鍛冶澤 實
(33) 優先権主張国・地域又は機関	ドイツ (DE)	(74) 代理人	100173521
			弁理士 篠原 淳司
		(74) 代理人	100153419
			弁理士 清田 栄章

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ホール効果に基づく容量結合式ジャイレータ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

交流電流信号用のジャイレータであって、ホール効果材料と、このホール効果材料の面又は表面に対して直角の磁界をホール効果材料内に貫通させる手段と、このホール効果材料に交流電流（ I_1 ； I_2 ）を入力結合させる入力ポートと、この入力結合させた交流電流が発生するホール電圧に関する尺度である出力電圧（ U_2 ； U_1 ）を出力結合させる出力ポートとを備え、各ポートが、外部と接続された少なくとも二つの端子を有するジャイレータにおいて、

各ポートの少なくとも一つの端子が、ホール効果材料から電気絶縁された、ホール効果材料と共に一つのコンデンサを形成する一つの端子電極と接続され、

各端子電極がホール効果材料と共に形成するコンデンサの単位長当たりの局所的な容量（ $c(s)$ ）は、ジャイレータの所望の周波数（ ω ）の領域に磁気プラズマ共鳴による電位分布の不連続を生じさせない境界条件を与えるように適合され、当該の容量が、入力ポートと接続された端子電極から出力ポートと接続された端子電極にまで延びるホール効果材料の外周に沿って所定の値を上回らず、

当該の容量を有する当該のコンデンサが、端子電極の周縁と直に対向するホール効果材料の領域内に連続した電位推移を許容するホール効果材料周縁上の解（ $V(s)$ ）であって、ホール効果材料内部の連続した電位に関する解（ $V(r)$ ）を与えるホール効果材料周縁上の解（ $V(s)$ ）を与え、

入力ポートと接続された端子電極から出力ポートと接続された端子電極にまで延びるホ

ール効果材料の外周に沿って測定した、単位長当たりの局所的な容量 ($c(s)$) は、これらの端子電極の周縁領域の方がこれらの端子電極のそれ以外の領域よりも小さいことを特徴とするジャイレータ。

【請求項 2】

入力ポートの二つの端子が、それぞれ一つの端子電極と接続されており、これら二つの端子電極が、ホール効果材料から電気絶縁されるとともに、ホール効果材料と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成することを特徴とする請求項 1 に記載のジャイレータ。

【請求項 3】

出力ポートの二つの端子が、それぞれ一つの端子電極と接続されており、これら二つの端子電極が、ホール効果材料から電気絶縁されるとともに、ホール効果材料と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のジャイレータ。

10

【請求項 4】

ホール効果材料が、少なくとも二つの空間次元において、これらの空間次元の各々に沿って、二つの空間次元内を移動する少なくとも百万個の電子を含むような拡がりを持つことを特徴とする請求項 1 から 3 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 5】

ホール効果材料が、少なくとも二つの空間次元において、少なくとも 100 nm 、有利には、少なくとも 500 nm 、全く特に有利には、少なくとも $1\text{ }\mu\text{m}$ の拡がりを持つことを特徴とする請求項 1 から 4 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 6】

20

当該の容量の空間分布を端子電極の領域に渡って変化させるバイアス電界を少なくとも一つの端子電極とホール効果材料の間の絶縁領域に印加する手段が配備されていることを特徴とする請求項 1 から 5 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 7】

当該のコンデンサが、端子電極とホール効果材料の間の絶縁体として強誘電体又は非線形誘電体を含むことを特徴とする請求項 6 に記載のジャイレータ。

【請求項 8】

当該の端子電極は、ホール効果材料の外周に沿って、この周囲に沿って互いに逆の方向にそれぞれ一つの端子電極から隣の端子電極にまで進む行程の長さの違いが 10% 以内となるように互いに配置されていることを特徴とする請求項 1 から 7 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

30

【請求項 9】

当該のホール効果材料が穴を有し、それらの穴の面積全体がホール効果材料により覆われた面積の 9 倍までであることを特徴とする請求項 1 から 8 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 10】

当該のホール効果材料の外周は、端子電極の中の一つがホール効果材料と共に一つのコンデンサを形成する少なくとも一つの部分領域において、自己相似構造、特に、フラクタルな構造を有することを特徴とする請求項 1 から 9 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

40

【請求項 11】

全ての端子電極がそれぞれホール効果材料と共に形成するコンデンサの容量は高々 10% 互いに相違することを特徴とする請求項 1 から 10 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 12】

当該のホール効果材料が、少なくとも一つの外周に沿って、その外周の長さの少なくとも 2% 、有利には、 $50\% \sim 70\%$ において、少なくとも一つの端子電極と共に一つのコンデンサを形成することを特徴とする請求項 1 から 11 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 13】

50

少なくとも一つの端子電極が、ホール効果材料の複数の互いに電気絶縁された層と共に一つのコンデンサを形成することを特徴とする請求項 1 から 1 2 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【請求項 1 4】

当該のホール効果材料が量子ホール効果材料であることを特徴とする請求項 1 から 1 3 までのいずれか一つに記載のジャイレータ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、交流信号用のジャイレータに関する。

10

【背景技術】

【0 0 0 2】

ジャイレータは、出力電圧が入力電流に比例し、入力と出力を入れ換えると電圧の符号が変わる 2 ポート電気部品である。そのため、電流が交流電流である場合、その電流は、ジャイレータの何れのポートに電流が加えられるかに応じて同相又は逆相の交流電圧に変換される。それは、抵抗、コンデンサ、インダクタンス及び理想的な変圧器と並ぶ第 5 の線形部品として、一つの方向だけに交流電圧を通過させる（遮断する）2 ポート部品、或いは一つのポートの交流電圧を固定された回転方向における次のポートに通過（巡回）させる 3 ポート又は多ポート部品を実現するために必要である。

【0 0 0 3】

20

ジャイレータを流れる電流方向に応じて入力電流から出力電圧への変換を行なうために、マイクロ波領域において、外部磁界の影響下でのフェライト内のファラデー回転を利用している。そのためには、入力電流が発生する電磁波をフェライト内に拡げることが必要である。従って、フェライトは、その波長規模のサイズでなければならず、そのため、無線周波数又は音声周波数帯域の周波数に関しては実用的でない程大きくなる。マイクロ波領域以下の周波数では、フェライトは最早効率的にも動作しない。更に、如何なるジャイレータも、その物理的なサイズによって、多少とも狭い周波数帯で規定されている。

【0 0 0 4】

それに代わって、ジャイレータは、トランジスタとフィードバック演算増幅器から成る能動回路として実現することもできる。しかし、そのような回路は、エネルギー供給を必要とし、雑音も熱も発生させる。

30

【0 0 0 5】

特許文献 1 により、フェライト内のファラデー回転を平面ホール効果により置き換えた、より低い周波数用の受動式ジャイレータが周知である。その欠点は、ホール効果材料内への電流の入力結合とホール電圧のタップオフの両方が高い接触抵抗によって妨げられて、それがジャイレータの効率を阻害することである。

【0 0 0 6】

そのため、特許文献 2 では、ホール効果を利用すると同時に、接触抵抗による損失を防止するために、ホール効果材料を誘導方式により外部と結合させる試みが行なわれている。しかし、その製作は、平坦でない複雑な幾何学形状のために負担がかかり、その誘導方式による結合は、低い動作周波数のために、高透磁性材料を必要とする。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0 0 0 7】

【特許文献 1】米国特許公開第 2 , 6 4 9 , 5 7 4 号明細書

【特許文献 2】ドイツ特許出願第 1 0 2 0 1 3 0 0 6 3 7 7 . 9 号明細書

【非特許文献】

【0 0 0 8】

【非特許文献 1】J . Shekel , Proceedings of the I R E 4 1 (8) , 1 0 1 4 (1 9 5 3)

50

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

以上のことから、本発明の課題は、 $1 \sim 100 \text{ MHz}$ の範囲の低周波数において、これまでの従来技術に基づくジャイレータよりも効率的に動作するジャイレータを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本課題は、本発明による主請求項に基づくジャイレータによって解決される。別の有利な実施形態は、主請求項を参照する従属請求項から明らかとなる。

10

【0011】

本発明の範囲内において、交流信号用のジャイレータを開発した。このジャイレータは、ホール効果材料と、このホール効果材料の面又は表面に対して直角の磁界をホール効果材料内に貫通させる手段と、このホール効果材料内に交流電流(I_1 ; I_2)を入力結合させる少なくとも一つの入力ポートと、この入力結合させた交流電流が発生するホール電圧に関する尺度である出力電圧(U_1 ; U_2)を出力結合させる少なくとも一つの出力ポートとを有する。これらのポートの各々は、外部と接続された少なくとも二つの端子を有する。

【0012】

このホール効果材料は、例えば、ガリウム・砒化物のヘテロ構造、例えば、グラフェンなどの導電性の単分子膜/単一層、或いはそれ以外の二次元の導電性材料とすることができる。導電性である二つの次元における、その形状は、特に、円形又はほぼ円形とすることができる。しかし、それは、基本的に何らの制限を受けない。理想的には、物体において、一方の空間方向に、入力電流用に定義された電流方向が存在し、理想的には、それに対して直角の他方の空間方向に、ホール効果が引き起こす電荷分離を実施できるとの意味において、位相幾何学的な物体である。

20

【0013】

本発明では、各ポートの少なくとも一つの端子が、ホール効果材料から電気絶縁された、ホール効果材料と共に一つのコンデンサを形成する端子電極と接続される。即ち、交流電流は、ホール効果材料に容量方式により入力結合され、出力電圧は、ホール効果材料から容量方式により出力結合される。このコンデンサは、有利には、少なくとも 300 aF の容量、有利には、少なくとも 1 fF の容量を有する。

30

【0014】

一つのポートの一方の端子だけが端子電極と接続されている場合、他方の端子は、入力電流又は出力電圧に関する基準点を決めるために、例えば、ホール効果材料外で所定の電位と接続することができる。二つ以上のポートの中のそれぞれ一方の端子だけが端子電極と接続されている場合、特に、端子電極と接続されていない全ての端子をホール効果材料外で同じ所定の電位と接続することができる。そして、これらの端子は、任意選択により、相互接続することもできる。

【0015】

端子電極とホール効果材料の間の絶縁体は、例えば、真空、空隙又はホール効果材料上に被覆された、或いはホール効果材料の周りに被覆された絶縁層とすることができる。このホール効果材料は、完全に絶縁材料内に鑄込むこともできる。

40

【0016】

これらの端子電極は、ホール効果が大きくない金属、ドーピングした半導体又はそれ以外の導電材料から構成することができる。これらの端子と端子電極の間及びこれらの端子と外部の間の接続は、従来の電線により実現することができる。

【0017】

従来技術によるホール効果材料と入力及び出力ポートの電気結合時において、端子電極とホール効果材料の直接接触が、ホール効果材料内に効率に関して不利な局所的な電位分

50

布を強制的に生じさせる境界条件を与えることが知られていた。導電性の端子電極は、この電極がホール効果材料と直に接する範囲全体において、この局所的な電位を共通の値に強制的に設定する。この強制的な設定は、端子電極の周縁で急激に終了する。この周縁領域内では、ホール効果材料内の電位が不連続な急上昇を起こす。ホール効果材料がそのような材料として完全であり、約90度のホール角を有するとしても、この急上昇領域では、局所的にエネルギーが散逸する。

【0018】

本発明では、端子電極とホール効果材料がコンデンサの板として機能することによって、これら二つの板の中の一方向に生じる電荷が他方の板にそれに対応する偏極電荷を誘導する。このことは、静電気の一般的な法則に基づき起こり、それによると、連続した機能による一方の板に生じる電荷の他方の板に対する影響は、その電荷との距離に依存する。従って、ホール効果材料内の電位分布に関して端子電極に与える境界条件は、初めから不連続ではない。そのため、電位急上昇領域における、エネルギーが散逸する「ホットスポット」の発生を有利に軽減するか、或いは全く完全に防止することができる。

10

【0019】

このことは、特に、コンデンサが、端子電極の周縁と直に対向するホール効果材料の領域における連続的な電位推移を許容する、ホール効果材料内の電位の空間分布に関する境界条件を与える、本発明の特に有利な実施形態において言える。

【0020】

入力ポートの二つの端子の中の一つだけが、ホール効果材料と共に一つのコンデンサを形成する端子電極（入力電極）と接続されている場合でも、入力ポートに加えられる交流電流を定義されていない（「浮遊」）電位に有るホール効果材料に十分に入力結合させることができる。この交流電流は、入力電極とホール効果材料から成るコンデンサを周期的に充放電させる。この電流によって、ホール効果材料内には、起電力が発生し、その起電力が、電荷を分離させ、それにより電流方向及び磁界に対して直角にホール電圧を発生させる。この電荷移動は、出力ポートに属する端子電極（出力電極）と対向する領域にも作用する。それに対応する偏極電荷が、この出力電極に誘導され、そのため、その電位が変化する。これは、出力ポートにおいて、入力電流と同相の出力電圧として測定することができる。このためには、出力ポートの他方の端子がホール効果材料外の好適な基準点と接続されていれば、一つの出力電極で十分である。入力ポートと出力ポートを入れ換えた場合、出力電圧の符号が逆になり、そのため、それは入力電流に対して逆相となる。

20

30

【0021】

有利には、入力ポートの二つの端子がそれぞれ一つの端子電極（入力電極）と接続され、二つの入力電極は、ホール効果材料から電気絶縁されて、ホール効果材料と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成する。そして、二つの入力電極の間の交流電流は、ホール効果材料を流れるように駆動することができる。それによって、電流は、ホール効果材料を通る所定の方角を得て、この方角は、又もや電荷分離を引き起こす方角を決める。

【0022】

有利には、出力ポートの二つの端子がそれぞれ一つの端子電極（出力電極）と接続され、二つの出力電極は、ホール効果材料から電気絶縁されて、ホール効果材料と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成する。そして、出力ポートの二つの端子の間の出力電圧は、二つの出力電極の間で降下する、ホール効果材料内の電圧に対応する。この出力電圧は、外部基準点から独立しており、そのため有意な電圧である。

40

【0023】

特に、本発明の特に有利な実施構成では、二つの措置を互いに組み合わせることができる。その場合、全部で四つの端子電極がそれぞれホール効果材料と共に一つのコンデンサを形成する。そして、端子電極の中の二つが入力電極となり、二つが出力電極となる。

【0024】

基本的に、任意の数、特に、3、5又は6個のポートが可能である。三つのポートを備えたジャイレータは、例えば、一つの入力端子と一つの出力端子を互いに通電接続して、

50

第三のポートの一つの端子として解釈することによって、四つの端子電極を備えた前記の実施例から製作することができる。この端子は、任意選択により、アースすることもできる。三つのポートを備えたジャイレータの動作形態は、無損失の「理想的な」部品であるとの前提条件において、非特許文献 1 に記載されている。本発明によるジャイレータは、ホール効果材料のホール角 θ_H がほぼ 90° である場合に、この理想的な特性を持つことができる。

【0025】

3、5 又は 6 個のポートを備えたジャイレータは、例えば、サーキュレータとして用いることもできる。その場合、これらのポートは、一つのポートに加えられる入力電流が順番において次のポートで同相の出力電圧としてタップオフすることができるとともに、それに対して順番において前のポートで逆相の出力電圧としてタップオフすることができるよう、サイクリックな順序で配置することができる。

【0026】

本発明の特に有利な実施形態では、ホール効果材料が、少なくとも二つの空間次元において、これらの空間次元の各々に沿って、二つの空間次元内を移動する少なくとも百万個の電子を含むような拡がりを持つ。この臨界境界条件に到達した場合、ホール効果が、そのためジャイレータの作用が殆ど最高強度で出現する。この材料のサイズを更に拡大しても、僅かに比較的小さい上昇しか達成することができない。小さい構造は、大きな物体、例えば、円板よりも、ホール効果材料から製作することが技術的に難しい。それに対して、その製作に必要な高価なホール効果材料が、より少なくなる。

【0027】

例えば、ホール効果材料は、有利には、少なくとも二つの空間次元において、少なくとも 100 nm 、有利には、少なくとも 500 nm 、全く特に有利には、少なくとも $1\text{ }\mu\text{ m}$ の拡がりを持つことができる。少なくとも $1\text{ }\mu\text{ m}$ の大きさの真っ直ぐな構造は、技術的な要件が僅かに多い回折限界式リソグラフィにより製作することができるので、材料の節約と製作の複雑さの間の特に良好なトレードオフを提供する。

【0028】

本発明の特に有利な実施形態では、入力ポートと接続された端子電極（入力電極）から出力ポートと接続された端子電極（出力電極）にまで延びるホール効果材料の外周に沿って測定される、単位長当たりの局所的な容量は、端子電極の周縁領域の方が端子電極のそれ以外の領域よりも小さい。ホール効果材料の導電率 σ 、ホール効果材料の表面の垂線に対してホール角 θ_H だけ傾斜した単位ベクトル

【0029】

【数 1】

\vec{n}_θ

、動作周波数 ω 、単位長当たりの容量 $c(s)$ 、ホール効果材料内の電位 $V(s)$ 及び端子電極を介して作用する外部電位 $V_{ext}(s)$ の間には、端子電極の近傍において、外周上の場所に依存する次の境界条件が成り立つ。

【0030】

【数 2】

$$-\sigma \cdot (\vec{n}_\theta \cdot \vec{\nabla} V(s)) = i\omega c(s)(V_{ext}(s) - V(s))$$

如何なる領域の周波数 ω に関してこの境界条件が満たされ得るのかは、つまりは $c(s)$ の推移に依存する。ジャイレータの所望の動作周波数 ω の領域で最も良く適合する $c(s)$ は、例えば、パラメータ最適化又は変分計算によって算出することができる。

【0031】

$c(s)$ が十分に良好である場合、それが単独の有限の急上昇を有する場合でも（例えば、容量が部分毎に一定である場合でも）、 $\theta_H = 90^\circ$ の極端なケースが特に重要である。その場合、

【0032】

10

20

30

40

50

【数 3】

 \vec{n}_0

がホール効果材料の外周に対して接線方向に延びて、そのため、境界条件が以下の通り簡略化される。

【0033】

【数 4】

$$-\sigma \partial V(s) = i\omega c(s)(V_{ext}(s) - V(s))$$

この式は、正確に解釈すると境界条件を設定するだけでなく、それと同時にホール効果材料の周囲に沿った一次元座標を規定するスカラー変数 s の通常の閉じた微分方程式をも設定する。ホール効果材料内部の電位

10

【0034】

【数 5】

 $V(\vec{r})$

に関する解は、ほぼ周縁上の解 $V(s)$ によって与えられる。

【0035】

外部電位 V_{ext} が消失する均一なケースでは、この微分方程式は、場所に依存する質量が $c(s)$ に比例する一つの次元における時間に依存するディラック方程式と一致する。ホール効果材料の周囲に沿った解が連続するのは、境界条件が周期的な特性方程式である。即ち、 $V(0) = V(P)$ が成立しなければならず、ここで、 P は周囲の長さである。これらの解は、周囲の形状に依存せず、その長さだけに依存する。

20

【0036】

ここで、外部電位 V_{ext} がゼロと異なる不均一なケースの特殊な解だけを更に知らなければならない。この特殊な解に対して、均一なケースの任意の解を加算することによって、不均一なケースの全ての別の解がそれから得られる。そのため、特に、均一なケースの解は、不均一なケースの定性的な挙動を決定する。均一なケースの固有周波数は、不均一なケースでは、電位分布が不連続となり、エネルギーが散逸する「ホットスポット」が発生する極の位置と関連する。これらは、容量結合されたホール効果材料が磁気プラズマ共鳴を示すとともに、周波数スペクトルに関して等間隔に分布する周波数と一致する。

【0037】

即ち、ホール効果材料の所与の幾何学形状に関して、ジャイレータの動作周波数の最適な領域が存在するのではなく、それとは逆に、周波数スペクトルにおいて、ホール効果材料が磁気プラズマ共鳴を有し、従って、ジャイレータが最適に動作しなくなる、等間隔に分布する固有周波数の「防御フェンス」が存在する。

30

【0038】

これらの固有周波数から離れた所では、即ち、これらの固有周波数から、二つの固有周波数の間の間隔の少なくとも 20% の間隔を開けた所では、ホール効果材料内に不連続が発生しない、従って、エネルギーを散逸させる「ホットスポット」も発生しないとの意味において、この微分方程式の解が非常に良好となる。ホール効果材料が 90° のホール角

を有する量子ホール効果材料である極端なケースでは、二つのベクトルが常に互いに直角となるので、散逸するジュール熱全体の計算が、ホール効果材料内の各場所

40

【0039】

【数 6】

 \vec{r}

におけるスカラー積

【0040】

【数 7】

 $\vec{j}(\vec{r}) \cdot \nabla V(\vec{r})$

としてゼロとなる。一般的に二つのベクトルの間の角度はホール角 と等しい。

【0041】

これに関する前提条件は、 $c(s)$ が制限されること、即ち、入力電極から出力電極に

50

まで延びるホール効果材料の外周に沿って $c(s)$ が上回らない値が有ることである。微分方程式の解に関するノイマンの境界条件は、構造的に似た解に繋がるが、 $c(s)$ はホール効果材料の周縁に沿って無限の方に進まなければならない。その場合、この解は、周縁で特異となり、そのことは、大きな電位勾配

【0042】

【数8】

$\nabla V(\vec{r})$

に対応し、損失を含む「ホットスポット」を生じさせる。

【0043】

従って、有利には、入力ポートと接続された端子電極から出力ポートと接続された端子電極にまで延びるホール効果材料の外周に沿って、各端子電極がホール効果材料と共に形成するコンデンサの単位長当たりの局所的な容量が制限される。

【0044】

この長さ当たりの容量 $c(s)$ は、例えば、端子電極とホール効果材料との重なり合い及び/又は端子電極とホール効果材料の間の絶縁体の厚さ及び/又は誘電率を変更することによって変更できる。しかし、これは、本発明の別の特に有利な実施形態では、ジャイレータの稼動時間を変化させる可能性が有る。この実施形態では、少なくとも一つの端子電極とホール効果材料の間の絶縁領域に、端子電極の領域に渡って容量の空間分布を変化させるバイアス電界を印加する手段が配備される。そして、このコンデンサは、有利には、端子電極とホール効果材料の間の絶縁体として、強誘電体又は非線形誘電体を含む。

【0045】

本発明の別の特に有利な実施形態では、端子電極は、ホール効果材料の外周に沿って、この周囲に沿って互いに逆の方向に、端子電極から隣の端子電極にまで、長さの違いが10%以内である行程を進むように互いに配置される。そして、これらの端子電極は、ホール効果材料の外周に沿って均一に分布する。即ち、ホール効果材料が、例えば、円環又は円板として存在する場合、二つの入力電極が一つの入力ポートに属し、二つの出力電極が一つの出力ポートに属する、即ち、全部で四つの端子電極を備えたジャイレータでは、これらの端子電極は、円周に沿って、それぞれ90°互いにずらして置かれる。三つの端子電極を備えたジャイレータでは、これらの端子電極は、それぞれ120°互いにずらして置かれる。この対称条件が良好に満たされる程、ジャイレータの効率が高くなる。この条件は、円環、円板及びそれ以外の単純な構造だけではなく、ホール効果材料の全く不規則な非対称形状に対しても全く一般的に成り立つ。これらの構造は、本発明の別の有利な実施形態では、重量及び材料の節約のために穴を備えることができる。その場合、これらの穴の面積全体は、ホール効果材料で覆われた面積の9倍までとすることができる。

【0046】

本発明の別の特に有利な実施形態では、ホール効果材料の外周は、少なくとも端子電極がその材料と共に一つのコンデンサを形成する部分領域において、自己相似構造、特に、フラクタルな構造を有する。この長さ L が大きくなる程、より低い動作周波数が可能となる。まさに、無線及びオーディオ帯域のより低い周波数に関しては、これまで効果的なジャイレータは得られておらず、本発明は、ちょうどこの隙間を埋めるものである。自己相似構造、特に、フラクタルな構造は、トポロジ的には一つの物体とさえ看做することができる、長さ L が最大になると同時に材料使用量が最小となる構造の中の一つであり、そのため、その中には、所定の電流方向とホール効果により電荷を分離するための一つの方向が存在する。

【0047】

同様に、より低い動作周波数を達成するためには、端子電極とホール効果材料により形成されるコンデンサの容量を出来る限り大きくすることも有利である。そのために、例えば、端子電極をホール効果材料の平坦な領域と部分的に重ね合わせることができる、詳しくは、片側又は両側において、それぞれ好適な絶縁体により間隔を開けて重ね合わせることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 8 】

フラクタルな構造の代わりに、それ以外の大きく曲がった構造、例えば、薄膜コンデンサの金属電極用に用いられているような、交互配置構造を使用することもできる。

【 0 0 4 9 】

二つの入力電極と二つの出力電極を備えたジャイレータの特殊なケースでは、複素コンダクタンスの行列 Y_2 は、次の式によって与えられる。

【 0 0 5 0 】

【 数 9 】

$$Y_2(\omega) = \sigma \begin{pmatrix} iy_o(\omega) & y_e(\omega) \\ -y_e(\omega) & iy_o(\omega) \end{pmatrix} \quad 10$$

ここで、 $y_e(\omega)$ は周波数 ω の偶数関数であり、 $y_o(\omega)$ は奇数関数である。 σ は、ホール材料の導電率である。この対称的な形の行列 $Y_2(\omega)$ に関する必要な前提条件は、全ての端子電極がそれぞれホール効果材料と共に形成するコンデンサが同じ容量を有することである。従って、本発明の特に有利な実施形態では、全ての端子電極がそれぞれホール効果材料と共に形成するコンデンサの容量の互いに相違する割合は高々 10% である。

【 0 0 5 1 】

これらの端子電極がホール効果材料と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成する領域において、その容量が少なくとも部分毎に一定である場合、前に考察した一次元の微分方程式は、これらの部分の各々において、次の関数を与える。

20

【 0 0 5 2 】

【 数 1 0 】

$$y_o(\omega) = -\tan\left(\frac{c\omega W}{\sigma}\right)/2$$

$$y_e(\omega) = \left(\sec\left(\frac{c\omega W}{\sigma}\right) - 1\right)/2$$

ここで、 W は、単位長当たりの容量 c (s) が一定である部分の長さであり、 c は、この部分における c (s) の一定値である。

30

【 0 0 5 3 】

$Y_2(\omega)$ は、 $y_o(\omega) = 0$ の場合の理想的なジャイレータの行列である。これらのゼロ地点は、周波数内で周期的に生じ、それぞれ二つの磁気プラズマ共鳴周波数の間のちょうど真ん中に有る。それらは、ジャイレータの最適な動作周波数である。そこでは、 cW/σ は π の奇数倍である。

【 0 0 5 4 】

σ の値によって、ジャイレータのインピーダンスが設定されて、特に、ポートに接続する外部の機器又は部品に適合される。通常は、高周波数用途用の 50 Ω の標準インピーダンスの近傍にインピーダンスを持って行くために、 σ を上げるように努める。

【 0 0 5 5 】

40

三つのポートを備えたジャイレータ、特に、三つの端子電極を備えたジャイレータに関して、複素コンダクタンスの行列 $Y_3(\omega)$ は次の通り記述され、

【 0 0 5 6 】

【 数 1 1 】

$$Y_3(\omega) = \sigma \begin{pmatrix} iy_d(\omega) & y_l(\omega) & -y_l^*(\omega) \\ -y_l^*(\omega) & iy_d(\omega) & y_l(\omega) \\ y_l(\omega) & -y_l^*(\omega) & iy_d(\omega) \end{pmatrix}$$

ここで、

【 0 0 5 7 】

50

【数 1 2】

$$y_d(\omega) = \frac{-2 \sin\left(\frac{c \omega W}{\sigma}\right)}{1 + 2 \cos\left(\frac{c \omega W}{\sigma}\right)}$$

$$y_l(\omega) = \frac{1 - \exp\left(\frac{c \omega W}{\sigma}\right)}{1 + 2 \cos\left(\frac{c \omega W}{\sigma}\right)}$$

10

であり、アスタリスク（*）は、共役複素値を表す。三つのポートの間の理想的なジャイレータ作用は、 $y_d(\omega) = 0$ と同時に $y_l(\omega)$ が実数値となる周波数 ω において起こる。

【0058】

この対称的な形の行列 $Y_3(\omega)$ に関する前提条件は、三つのポートがそれぞれホール効果材料と共に総じて同じ容量を形成する端子電極と接続されることである。これは、例えば、三つのポートの中の一つのポートの一つの端子がそれぞれ端子電極と接続され、全ての三つの端子電極がホール効果材料と共に同じ容量を形成することによって達成することができる。しかし、全ての三つのポートに関する同じ容量は、四つの端子電極により実現することもでき、それらの中の二つの端子電極がそれぞれホール効果材料と共に形成する容量は別の二つの端子電極が形成する容量の半分である。そして、これらの半分の大きさの容量を形成する二つの端子電極は、互いに接続されて、同じポートに対応付けられる。

20

【0059】

端子電極と共に一つのコンデンサを形成する、ホール効果材料の外周の成分だけが、それぞれジャイレータの挙動に関して重要である。従って、本発明の特に有利な実施形態では、ホール効果材料は、少なくとも外周に沿って、この外周の長さの少なくとも2%、有利には、50%～70%において少なくとも一つの端子電極と共に一つのコンデンサを形成する。

【0060】

30

本発明の別の有利な実施形態では、少なくとも一つの端子電極がホール効果材料の複数の互いに電気絶縁された層と共に一つのコンデンサを形成する。ホール効果材料が、そのような複数の層の積層として、例えば、円板の形で存在する場合、ジャイレータ効果、即ち、出力電圧と入力電流の間の比例定数の大きさが有利に増大されるとともに、コンデンサの縁効果が低減される。

【0061】

本発明の特に有利な実施形態では、ホール効果材料は量子ホール効果材料である。その場合、材料内を流れる電流方向により電荷分離が傾けられるホール角 θ は、ほぼ90°である。このことは、例えば、砒素、アンチモン、ビスマス、錫（灰色錫）、グラファイト及びドーピングした半導体の薄膜層などの量子ホール効果を示さない幾つかのホール効果材料にも言える。多数の別の材料に関して、それらが同じくこの特性を持つようになる温度範囲が存在する。

40

【0062】

90°のホール角では、ホール効果材料の内部の連続した電位推移が、最早「ホットスポット」においてエネルギーを散逸させなくなる。同時に依然として受動的であり、そのため追加雑音を発生しない無損失のジャイレータは、特に有利には、散逸が望ましくない加熱を引き起こす低温度実験で用いることができる。この無雑音性は、特に、キュービット（Qubit）を用いた実験において有利である。しかし、本発明によるジャイレータが利用可能であることによって、基本的に100MHz以内の無線及びオーディオ周波数帯域における全ての用途が利益を得る。

50

【 0 0 6 3 】

理想的には、ホール効果材料は、出来る限り 90° に近いホール角 を有し、そのためには、出来る限り小さい磁界を必要とする。このホール特性は、完成部品のジャイレータを製造する別の処理工程の下で害を受けない。ホール効果材料が容易に構造化可能であり、機械的に処理可能であることと、この材料から成る複数の層を容易に並列接続して、コンデンサの容量を増大できることが有利である。

【 0 0 6 4 】

ジャイレータの挙動を調べるためのホール効果材料の外周に沿った境界条件の導出は、ホール効果材料の内部において、電流密度ベクトル

【 0 0 6 5 】

【 数 1 3 】

 $\vec{j}(\vec{r})$

が、以下の通り、少なくとも局所的に電界

【 0 0 6 6 】

【 数 1 4 】

 $\vec{E}(\vec{r})$

に対して線形的に比例することを出発点とする。

【 0 0 6 7 】

【 数 1 5 】

$$\vec{j}(\vec{r}) = -\sigma R_{\theta} \vec{E}(\vec{r})$$

$$\hat{u} \cdot \vec{j}(\vec{r}) = -\sigma \partial_{(R_{\theta}^{-1} \hat{u})} V(\vec{r})$$

ここで、

【 0 0 6 8 】

【 数 1 6 】

 \vec{r}

は、ホール効果材料の面内の二次元位置ベクトルである。 σ は、二次元におけるアンペア / ボルト単位の導電率である。 R_{θ} は、ホール効果材料を貫通する磁界に対して平行であるととも、二次元電子ガスが移動する面に対して直角である軸の周りに角度 θ だけベクトルを回転させる演算子である。

【 0 0 6 9 】

【 数 1 7 】

 \hat{u}

は、この面内の任意の単位ベクトルである。

【 0 0 7 0 】

【 数 1 8 】

 $\vec{E}(\vec{r})$

は、

【 0 0 7 1 】

【 数 1 9 】

 $V(\vec{r})$

の電位場の勾配である。関心を抱いている低い周波数では、ホール効果材料内部の電界を記述するには、静電気の法則で十分である。即ち、 V は、次のラプラス方程式を満たす。

【 0 0 7 2 】

【 数 2 0 】

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 0$$

本発明により規定される容量性の端子電極は、ホール効果材料の外周に沿って、この外周上の位置

【 0 0 7 3 】

【 数 2 1 】

 \vec{s}

の関数として、単位長当たりの局所的な容量

【 0 0 7 4 】

【 数 2 2 】

 $c(\vec{s})$

を導入する。これらの端子電極の領域において、

【 0 0 7 5 】

【 数 2 3 】

 $c(\vec{s})$

は有限であり、端子電極の間の隙間で、

【 0 0 7 6 】

【 数 2 4 】

 $c(\vec{s})$ はゼロに低下する。コンデンサの容量 C とそこに蓄積される電荷 Q の間には、一般的に次の関係式が成り立つ。

【 0 0 7 7 】

【 数 2 5 】

$$Q = C\Delta V = C(V_{ext} - V)$$

時間微分は、次の通り、電流密度に関する表現式を与える。

【 0 0 7 8 】

【 数 2 6 】

$$\hat{n} \cdot \vec{j}(\vec{s}) = \dot{Q}(\vec{s}) = c(\vec{s})(\dot{V}_{ext} - \dot{V}(\vec{s}))$$

電流密度に関して初めに作成した表現式を用いて、角周波数 ω に対して正弦形状の $V_e \times t$ と V の両方が時間に依存するとの仮定の下で、本発明によるジャイレータの挙動を記述する中心の境界条件が得られる。そのため、それらの動作は、静電気の基本法則から容易に導き出される。

【 0 0 7 9 】

以下において、図面に基づき本発明の対象を説明するが、それによって、本発明の対象は制限されない。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 8 0 】

【 図 1 】 本発明によるジャイレータの簡単な実施構成図

【 図 2 】 ジャイレータの稼動時間に対する端子電極 C とホール効果材料 H の間に形成されるコンデンサの容量の局所的な影響を図解した側面図

【 図 3 】 ホール効果材料 H がフラクタル構造を有する、本発明によるジャイレータの実施例の図

【 図 4 】 ホール効果材料 H がフラクタル構造を有する、本発明によるジャイレータの別の実施例の図

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 8 1 】

図 1 は、本発明によるジャイレータの簡単な実施構成を図示している。ここでは、ホール効果材料 H は円板として存在する。この円板の周囲に沿って、それぞれ 90° 互いにずらして、四つの金属製端子電極が配置されており、これらの電極は、ホール効果材料 H と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成する。二つの対向する入力電極 C_{1A} と C_{1B} によって、ホール効果材料 H を流れる交流電流 I_H が駆動される。図の平面に対して直角の磁界と関連したホール効果によって、電流方向に対して直角のホール電界 E_H が発生する。これは、電界方向に電荷を分離させる。対向する出力電極 C_{2A} と C_{2B} 上に、それに対

10

20

30

40

50

応する偏極電荷が誘導され、そのため、これら二つの出力電極の間に電位差が生じる。これは、出力電圧 U_2 としてタップオフすることができる。この出力電圧 U_2 は、入力電流 I_1 と同相である。

【0082】

出力電極 C_{2A} と C_{2B} の間でホール効果材料Hを流れる電流 I_2 が駆動された場合、同様に入力電極 C_{1A} と C_{1B} の間に出力電圧 U_1 が発生するが、符号が逆である。即ち、出力電圧 U_1 は、入力電流 I_2 に対して逆相である。

【0083】

図2は、端子電極Cとホール効果材料Hの間に形成されるコンデンサの容量がジャイレータの稼動時間に局所的に影響することを側面図で図解している。この端子電極Cは、誘電体Dによりホール効果材料Hに対して絶縁されている。この絶縁体Dは、強誘電体又は非線形誘電体であり、そのため、その誘電率は、その内部の電界Eに依存する($\epsilon = \epsilon(E)$)。ここで、二つの補助電極 F_1 と F_2 は、電圧源Sを介して電源供給され、これらの間に可変の電界が作り出される。この電界を用いて、誘電体Dの内部の誘電率を所望の値に設定することができる。

【0084】

図3は、ホール効果材料Hがフラクタル構造を有する本発明によるジャイレータの実施例を図示している。線と点で交互に囲まれた領域内では、(図3に表示されていない)誘電体により完全に取り囲まれたホール効果材料Hが、図1と同様に四つの端子電極 C_{1A} 、 C_{1B} 、 C_{2A} 及び C_{2B} と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成している。このフラクタル構造は、ホール効果材料が全体的により多くのスペースを必要とすること無く、ホール効果材料Hの外周を延長する。これは、外周の単位長当たりのホール効果材料の使用量が最小限となる形状である。

【0085】

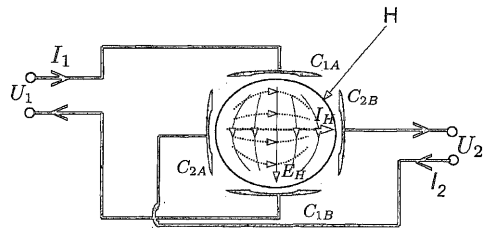
図4は、ホール効果材料Hがフラクタル構造を有する本発明によるジャイレータの別の実施例を図示している。この材料は、多数の小さい六角形から構成され、これらの六角形の間の境界抵抗は無視される。破線で囲まれた領域内では、ホール効果材料Hが、三つの端子電極 C_1 、 C_2 及び C_3 と共にそれぞれ一つのコンデンサを形成している。このホール効果材料の外周に沿った二つの互いに逆の方向において、一つの端子電極から二つの別の(隣の)端子電極までの行程はそれぞれ同じであり、そのようにして、例えば、 C_2 から C_1 までの行程は、 C_2 から C_3 までの行程と全く同じである。このホール効果材料Hの構造内の穴は、材料使用量を低減するが、この材料は、依然として全く位相幾何学的な物体である。

10

20

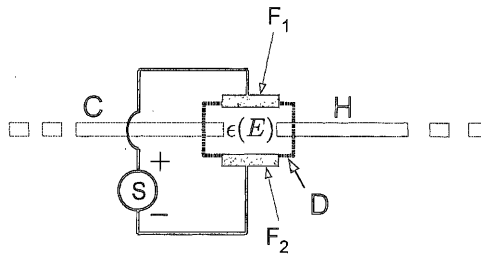
30

【図 1】



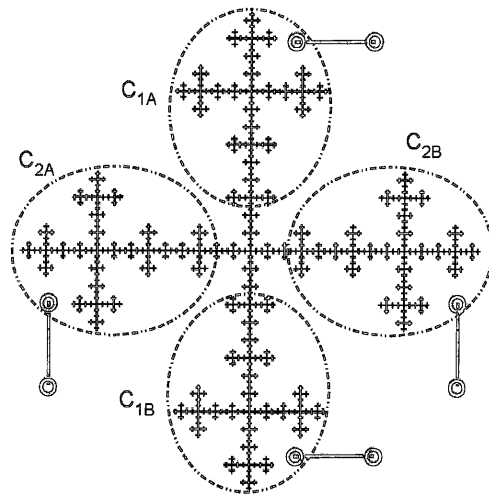
Figur 1

【図 2】



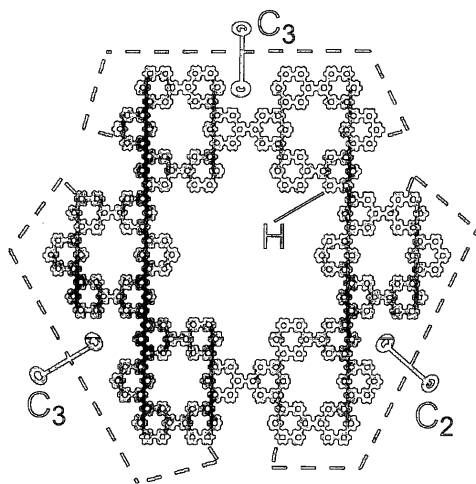
Figur 2

【図 3】



Figur 3

【図 4】



Figur 4

フロントページの続き

- (72)発明者 ディヴィンチェンツォ・ダヴィード
オランダ王国、6367 デアー・フーレンダール、デスタインストラート、14
(72)発明者 ヴィーオラ・ジョヴァンニ
ドイツ連邦共和国、52070 アーヘン、ローベンストラーセ、12

審査官 石田 昌敏

- (56)参考文献 米国特許第03214682(US, A)
特開平11-111566(JP, A)
特開平07-162055(JP, A)
特表2011-503841(JP, A)
米国特許出願公開第2009/0137066(US, A1)
特表2012-509593(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03H 1/00 - 7/13
H01L 43/00 - 43/14