

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5437085号
(P5437085)

(45) 発行日 平成26年3月12日(2014.3.12)

(24) 登録日 平成25年12月20日(2013.12.20)

(51) Int.Cl.

G O 1 R 33/032 (2006.01)

F I

G O 1 R 33/032

請求項の数 9 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2010-1526 (P2010-1526)	(73) 特許権者	000137694
(22) 出願日	平成22年1月6日(2010.1.6)		株式会社ミットヨ
(65) 公開番号	特開2011-141172 (P2011-141172A)		神奈川県川崎市高津区坂戸一丁目20番1号
(43) 公開日	平成23年7月21日(2011.7.21)	(74) 代理人	100080458
審査請求日	平成24年12月3日(2012.12.3)		弁理士 高矢 諭
		(74) 代理人	100076129
			弁理士 松山 圭佑
		(74) 代理人	100089015
			弁理士 牧野 剛博
		(72) 発明者	三木 豊
			神奈川県川崎市高津区坂戸1丁目20番1号 株式会社ミットヨ内
		審査官	荒井 誠

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ型磁界センサ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源と、該光源の光を導光する光ファイバと、該光ファイバから出射された光を直線偏光させる偏光子と、該直線偏光された光を外部磁界の強さにより偏光回転させる第1ファラデー回転子と、該偏光回転された光に基づいて光電変換して電気信号として出力する受光器と、該電気信号を処理して前記外部磁界の強さを出力電圧値として出力する処理部と、を有する光ファイバ型磁界センサであって、

前記偏光子の偏光軸に対する前記第1ファラデー回転子から出射される光の偏光回転角に、 $90n$ (n ; 整数) 度ではない一定の偏光回転角を更に与える偏光回転手段と、

該一定の偏光回転角が与えられることで、前記受光器に導光される光の光量を減衰させる減衰手段と、

を備え、

前記光源が複数の波長の光を前記光ファイバに導光させ、該光ファイバから出射された光を各波長に分光し、各波長毎に前記第1ファラデー回転子をそれぞれ用いることを特徴とする光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 2】

前記一定の偏光回転角は、 $45度 + 90m$ (m ; 整数) 度とされていることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 3】

前記偏光回転手段は、前記第1ファラデー回転子にバイアス磁界を印加する永久磁石を

10

20

備えることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 4】

前記偏光回転手段は、前記第 1 ファラデー回転子とは別の第 2 ファラデー回転子と、該第 2 ファラデー回転子にバイアス磁界を印加する永久磁石と、を備えることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 5】

前記永久磁石の外周に、該永久磁石による前記第 1 ファラデー回転子への影響を低減する磁気シールドが設けられていることを特徴とする請求項 4 に記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 6】

前記減衰手段が前記第 1 ファラデー回転子若しくは第 2 ファラデー回転子により偏光回転された光を反射するミラーを備え、該ミラーで反射された光を前記偏光子に入射させる反射型とされていることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 7】

前記減衰手段が前記偏光子とは偏光軸の角度が異なるように配置される検光子を有する透過型とされていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 8】

前記光ファイバから出射された光は 1 個以上のダイクロイックミラーで前記各波長に分光されることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれかに記載の光ファイバ型磁界センサ。

【請求項 9】

前記処理部は、前記電気信号を自乗する自乗手段を有することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれかに記載の光ファイバ型磁界センサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光源と、該光源の光を導光する光ファイバと、該光ファイバから出射された光を直線偏光させる偏光子と、該直線偏光された光を外部磁界の強さにより偏光回転させる第 1 ファラデー回転子と、該偏光回転された光に基づいて光電変換して電気信号として出力する受光器と、該電気信号を処理して前記外部磁界の強さを出力電圧値として出力する処理部と、を有する光ファイバ型磁界センサに係り、特に、磁界の方向を判別可能とする光ファイバ型磁界センサに関する。

【背景技術】

【0002】

YIG (イットリウム・鉄・ガーネット) 結晶などのファラデー効果を有する結晶 (ファラデー回転子と称する) に直線偏光された光を通し、その光の伝播方向に磁界を与えると、外部磁界の強さに比例してその光の偏光方向の回転 (偏光回転と称する) が生じる。

【0003】

ファラデー効果については、式 (1) が成り立つ。

$$\phi = V \times H \times L \quad (1)$$

【0004】

符号 ϕ はファラデー回転角 (光の偏光回転角) である。符号 V はベルデ定数であり、ファラデー回転子の材質によって変化する。符号 H は光の伝播方向 (磁界検出軸方向 O) の外部磁界の強さを示す。符号 L はファラデー回転子の磁界検出軸方向 O の長さである。

【0005】

ここで、(直線偏光された) 光の偏光回転は、外部磁界の光の伝播方向 (磁界検出軸方向 O) における成分が存在するときに発生する。詳しく説明すると、ファラデー効果では、外部磁界の向きと光の進む向きが同じときは、光の進む向きに対して右ねじが回転する方向に光が偏光回転する。磁界の向きと光の進む向きが逆のときは、光の進む向きに対して左ねじが回転する方向に光が偏光回転する。

【 0 0 0 6 】

特許文献 1 には、前記ファラデー回転子を用いた光ファイバ型磁界センサが提案されている。図 8 (A) を用いて、この光ファイバ型磁界センサ 1 の磁界プローブ 3 0 を説明する。

【 0 0 0 7 】

磁界プローブ 3 0 において、図示せぬ光源からの光は入射側光ファイバ 1 4 で導光される。導光された光は、レンズ 3 2 でコリメートされ、偏光子 3 4 と (第 1) ファラデー回転子 3 6 とを通過して、ミラー 4 2 で垂直反射される。(第 1) ファラデー回転子 3 6 では外部磁界の強さに応じて (直線偏光された) 光の偏光方向の回転角 (偏光回転角と称する) が大きくなる。このことから、偏光子 3 4 の透過軸 (偏光軸と称する) に対するミラー 4 2 で反射して入射側光ファイバ 1 4 内へ戻る光の偏光回転角 (方位角と称する) が大きくなる。このため、当該入射側光ファイバ 1 4 内へ戻る光量 (光ファイバ帰還光量若しくは受光量と称する) は、前記方位角の大きさに従って変化する。即ち、その光ファイバ帰還光量を光電変換することで、外部磁界の強さを判別することができる。

10

【 0 0 0 8 】

光ファイバ型磁界センサ 1 の磁界プローブ 3 0 は反射型であるが、特許文献 1 では、図 9 (A) に示す透過型の磁界プローブ 8 0 についても提案している。磁界プローブ 8 0 では、ミラー 4 2 の代わりに、(第 1) ファラデー回転子 8 6 を通過した光を通過させる検光子 9 4 と、検光子 9 4 を通過した光を集光するレンズ 9 6 と、を備える。そして、レンズ 9 6 で集光された光は図示せぬ受光器まで出射側光ファイバ 6 8 で導光される。検光子 9 4 は、その偏光軸と偏光子 8 4 の偏光軸とが平行若しくは直交とされている。

20

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 9 】

【 特許文献 1 】 特開平 3 - 2 2 5 9 5 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 0 】

特許文献 1 の光ファイバ帰還光量は、反射型の磁界プローブ 3 0 で図 8 (B)、透過型の磁界プローブ 8 0 で図 9 (B) のそれぞれに示される。反射型の磁界プローブ 3 0 についてまず説明する。

30

【 0 0 1 1 】

光ファイバ帰還光量 (受光量) は、方位角が 0 度 (状態 C 2) において得られる値を最大値 (1 で規格化) として求めることができる。しかし、外部磁界の強さが同じで方向が異なるとき、即ち、状態 C 1 と状態 C 3 では受光量が同一となり、受光量からは方位角の判別ができない。

【 0 0 1 2 】

同様に、透過型の磁界プローブ 8 0 では、偏光子 8 4 の偏光軸と検光子 9 4 の偏光軸とが平行の場合には、黒丸印で示すように、受光量は、方位角が 0 度 (状態 D 2) において得られる値を最大値 (1 で規格化) として求めることができる。このため、外部磁界の強さが同じで方向が異なるとき、即ち、状態 D 1 と状態 D 3 では受光量が同一となり、受光量からは方位角の判別ができない。偏光子 8 4 の偏光軸と検光子 9 4 の偏光軸とが直交する場合にも、黒三角印で示すように、受光量は、方位角が 9 0 度 (状態 D 5) において得られる値を最小値 0 として求めることができる。このため、外部磁界の強さが同じで方向が異なるとき、即ち、状態 D 4 と状態 D 6 では受光量が同一となり、受光量からは方位角の判別ができない。

40

【 0 0 1 3 】

即ち、特許文献 1 で示される磁界プローブ 3 0、8 0 では、磁界の強さの判別を可能としても、磁界の向きを判別することができなかった。このため、磁界の向きが必要とされる磁界分布測定などに使用することが不可能であった。

50

【 0 0 1 4 】

本発明は、前記問題点を解決するべくなされたもので、複雑な構成をとることなく磁界の向きが判別可能な光ファイバ型磁界センサを提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 5 】

本願の請求項 1 に係る発明は、光源と、該光源の光を導光する光ファイバと、該光ファイバから出射された光を直線偏光させる偏光子と、該直線偏光された光を外部磁界の強さにより偏光回転させる第 1 ファラデー回転子と、該偏光回転された光に基づいて光電変換して電気信号として出力する受光器と、該電気信号を処理して前記外部磁界の強さを出力電圧値として出力する処理部と、を有する光ファイバ型磁界センサであって、前記偏光子の偏光軸に対する前記第 1 ファラデー回転子から出射される光の偏光回転角に、 $90n$ (n ; 整数) 度ではない一定の偏光回転角を更に与える偏光回転手段と、該一定の偏光回転角が与えられることで、前記受光器に導光される光の光量を減衰させる減衰手段と、を備え、前記光源が複数の波長の光を前記光ファイバに導光させ、該光ファイバから出射された光を各波長に分光し、各波長毎に前記第 1 ファラデー回転子をそれぞれ用いたことにより、前記課題を解決したものである。

10

【 0 0 1 6 】

本願の請求項 2 に係る発明は、前記一定の偏光回転角を、 $45度 + 90m$ (m ; 整数) 度としたものである。

【 0 0 1 7 】

20

本願の請求項 3 に係る発明は、前記偏光回転手段が、前記第 1 ファラデー回転子にバイアス磁界を印加する永久磁石を備えるようにしたものである。

【 0 0 1 8 】

本願の請求項 4 に係る発明は、前記偏光回転手段が、前記第 1 ファラデー回転子とは別の第 2 ファラデー回転子と、該第 2 ファラデー回転子にバイアス磁界を印加する永久磁石と、を備えるようにしたものである。

【 0 0 1 9 】

本願の請求項 5 に係る発明は、前記永久磁石の外周に、該永久磁石による前記第 1 ファラデー回転子への影響を低減する磁気シールドが設けられるようにしたものである。

【 0 0 2 0 】

30

本願の請求項 6 に係る発明は、前記減衰手段が前記第 1 ファラデー回転子若しくは第 2 ファラデー回転子により偏光回転された光を反射するミラーを備え、該ミラーで反射された光が前記偏光子に入射する反射型としたものである。

【 0 0 2 1 】

本願の請求項 7 に係る発明は、前記減衰手段が前記偏光子とは偏光軸の角度が異なるように配置される検光子を有する透過型としたものである。

【 0 0 2 3 】

本願の請求項 8 に係る発明は、前記光ファイバから出射された光を 1 個以上のダイクロイックミラーで前記各波長に分光するようにしたものである。

【 0 0 2 4 】

40

本願の請求項 9 に係る発明は、前記処理部が、前記電気信号を自乗する自乗手段を有するようにしたものである。

【発明の効果】

【 0 0 2 5 】

本発明によれば、複雑な構成をとることなく、光ファイバ型磁界センサでありながら磁界の向きが判別可能となる。なお、光ファイバを用いることで、伝送路が長い際の信号品質劣化を防止し、高い耐環境性を実現することができる。このため、本発明により、厳しい環境で、より正確で詳細な磁界測定が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 6 】

50

- 【図 1】本発明の第 1 比較例に係る光ファイバ型磁界センサの全体模式図
【図 2】同じく磁界プローブ (A) とそのバリエーション (B) の拡大模式図
【図 3】偏光子の偏光軸と透過光量との関係を説明する模式図
【図 4】本発明の第 1 比較例に係る受光器以降の信号の様子を表す模式図
【図 5】本発明の実施形態に係る光ファイバ型磁界センサの光学部を示す模式図
【図 6】同じく磁界プローブの拡大模式図
【図 7】本発明の第 2 比較例に係る光ファイバ型磁界センサの磁界プローブの拡大模式図
【図 8】従来の光ファイバ型磁界センサの反射型の磁界プローブを説明するための模式図
【図 9】従来の光ファイバ型磁界センサの透過型の磁界プローブを説明するための模式図
【発明を実施するための形態】

10

【0027】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態の一例を詳細に説明する。

【0028】

最初に、第 1 比較例に係る光ファイバ型磁界センサの概略について、図 1、図 2 (A) を用いて説明する。

【0029】

光ファイバ型磁界センサ 100 は、図 1、図 2 (A) に示す如く、光源 104 と、光源 104 の光を導光する入射側光ファイバ (光ファイバ) 114 と、入射側光ファイバ 114 から出射された光を直線偏光させる偏光子 134 と、直線偏光された光を外部磁界の強さにより偏光回転させる第 1 ファラデー回転子 136 と、偏光回転された光に基づいて光電変換して電気信号として出力する受光器 120 と、電気信号を処理して外部磁界の強さを出力電圧値として出力する処理部 150 と、を有する。

20

【0030】

そして、光ファイバ型磁界センサ 100 は、図 1、図 2 (A) に示す如く、偏光子 134 の偏光軸に対する第 1 ファラデー回転子 136 から出射される光の偏光回転角に、 $90n$ (n ; 整数) 度ではない一定の偏光回転角 (例えば 45 度) を更に与える第 2 ファラデー回転子 138 及びリング状の永久磁石 140 (偏光回転手段) と、ミラー 142 と、を備えている。なお、ミラー 142 は、第 2 ファラデー回転子 138 により偏光回転された光を反射し、偏光子 134 に入射させる。そのため、ミラー 142 および偏光子 134 は、第 2 ファラデー回転子 138 により一定の偏光回転角 (例えば 45 度) が与えられることで、受光器 120 に導光される光の光量を減衰させる減衰手段として機能する。

30

【0031】

以下、光ファイバ型磁界センサ 100 の構成を図 1、図 2 (A) に基づいてより詳細に説明していく。

【0032】

光ファイバ型磁界センサ 100 は、図 1 に示す如く、光学部 102 と処理部 150 とを有する。光学部 102 は、図 1 に示す如く、光源 104 と、入射側光ファイバ 114 と、光ファイバカプラ 116 と、出射側光ファイバ 118 と、受光器 120 と、反射型の磁界プローブ 130 と、を備えている。

【0033】

40

図 1 に示す如く、光源 104 は、レーザダイオードや LED などを有している。入射側光ファイバ 114 は、光源 104 に接続され、光源 104 の光を磁界プローブ 130 まで導光する。なお、磁界プローブ 130 に導かれる光の一部は、図示しない別の検出器により光電変換されて、その出力がモニターされる形態も実施例の 1 つとする。そのモニターされる出力によって、受光回路 154 で受光器 120 から出力される電気信号が規格化された電圧値とされる。光ファイバカプラ 116 は、入射側光ファイバ 114 と出射側光ファイバ 118 とを熔融接合させたもので、磁界プローブ 130 から入射側光ファイバ 114 に戻ってきた光を出射側光ファイバ 118 へ分岐する。出射側光ファイバ 118 は、受光器 120 に接続されている。受光器 120 では、出射側光ファイバ 118 を通過してきた光を光電変換して電気信号として処理部 150 に出力する。なお、入射側光ファイバ 1

50

14と出射側光ファイバ118とは、シングルモードファイバやマルチモードファイバや偏波面保存型光ファイバなどを用いることができる。

【0034】

磁界プローブ130は、図2(A)に示す如く、レンズ132と偏光子134と第1ファラデー回転子136と第2ファラデー回転子138と永久磁石140とミラー142とを備える。

【0035】

図2(A)に示す如く、レンズ132は、入射側光ファイバ114で導いた光をコリメートして偏光子134に入射させる。偏光子134は、入射側光ファイバ114から出射されてコリメートされた光を直線偏光させる。第1ファラデー回転子136は、磁界測定軸方向Oにおける外部磁界の強さにより直線偏光された光(単に直線偏光とも称する)を偏光回転させる。第2ファラデー回転子138は、第1ファラデー回転子136とは別に第1ファラデー回転子136の後段に配置されている。第2ファラデー回転子138の外周には、リング状の永久磁石140が配置されている。この永久磁石140は第2ファラデー回転子138にバイアス磁界を印加することで、第2ファラデー回転子138は第1ファラデー回転子136から出射される光の偏光回転角に22.5度の偏光回転角を更に与える。

【0036】

図2(A)に示す如く、磁界プローブ130の終端に、ミラー142が配置されている。ミラー142により、第2ファラデー回転子138で偏光回転された光は垂直反射される。ミラー142で反射された光には再び第2ファラデー回転子138で22.5度の偏光回転角が与えられる。即ち、偏光子134の偏光軸に対する第1ファラデー回転子136から出射される光の偏光回転角に、第2ファラデー回転子138により45度の一定の偏光回転角が更に与えられる。そして、ミラー142で反射された光は偏光子134に入射する。なお、第1、第2ファラデー回転子136、138とも、ファラデー効果を有する材質(主にYIG結晶など)を用いることができる。その際にベルデ定数の大きいYIG結晶が、より好ましい。

【0037】

ここで、第2ファラデー回転子138が、偏光子134の偏光軸に対する第1ファラデー回転子136から出射される光の偏光回転角に、45度の一定の偏光回転角を更に与えることについて、図3を用いて説明する。ただし、ここでは説明のため、偏光子134での偏光軸方向成分の光は100%透過するものとする(偏光方向によるロス以外は無視する)。

【0038】

図3において、偏光子134の偏光軸Yと直線偏光A1とが平行(偏光軸Yに対する直線偏光の偏光回転角(方位角と称する)が0度)のときには、偏光子134に対して直線偏光A1は100%透過していく。しかし、偏光軸Yと直線偏光A3とが直交する(方位角90度)ときには、偏光子134に対して直線偏光A3は全く透過しない(0%透過)。この中間である、偏光軸Yと直線偏光A2とが45度(方位角45度)のときには、偏光子134に対して直線偏光A2は70.7%($\cos 45^\circ = 0.707$ より)透過していくこととなる。即ち、本比較例では、外部磁界が存在しなくても、偏光子134による直線偏光に第2ファラデー回転子138で偏光回転角45度を付与することとなる。このため、外部磁界が存在しなくても、偏光子134を介して入射側光ファイバ114に戻る光量は、偏光子134から出射した直線偏光の光量の70.7%だけとなる。

【0039】

なお、図2(B)に示す如く、永久磁石140による第1ファラデー回転子136への影響を低減するために、永久磁石140の外周に磁気シールド144を設けてもよい。磁気シールド144は、図2(B)に示す如く、例えば第2ファラデー回転子138と永久磁石140とミラー142の外周を覆い、光の通過する部分のみに開口を有するように構成することができる。磁気シールド144としては、例えばパーマロイなどを使用できる

10

20

30

40

50

。なお、磁気シールドを設けずに、永久磁石 140 が第 1 ファラデー回転子 136 に磁気的な影響を与えないように、永久磁石 140 と第 1 ファラデー回転子 136 との距離を十分離すように配置してもよい。

【0040】

処理部 150 は、図 1 に示す如く、発光回路 152 と受光回路 154 と自乗手段である自乗回路 156 とオフセット手段であるオフセット回路 158 とを備える。

【0041】

図 1 に示す如く、発光回路 152 は、光源 104 に安定した発光をさせる。受光回路 154 は、受光器 120 から出力された電気信号を規格化された電圧値として自乗回路 156 に出力する。自乗回路 156 は、受光回路 154 から出力された電圧値を自乗して出力する。このとき、自乗回路 156 で出力される自乗電圧値は、規格化された電圧値が規格値に対して 70.7% の値のときに、 $0.5 (= 0.707^2)$; 規格化された自乗電圧値に対して 50% の値) となる。オフセット回路 158 は、自乗電圧値の 0.5 をオフセットして、ゲイン調整を行い、必要に応じてプラスマイナスの符号を反転させて、出力電圧値 V_{out} を出力する。

【0042】

次に、本比較例における光ファイバ型磁界センサ 100 の動作について、主に図 1 を用いて説明する。

【0043】

発光回路 152 により光源 104 から光が出射される。光源 104 から出射された光は入射側光ファイバ 114 で導光される。

【0044】

導光された光は、入射側光ファイバ 114 から出射され、レンズ 132 でコリメートされる。コリメートされた光は、偏光子 134 に入射し、直線偏光とされる。直線偏光された光は、第 1 ファラデー回転子 136 で外部磁界の強さにより偏光回転される。偏光回転された光は、第 2 ファラデー回転子 138 で更に 22.5 度で偏光回転される。そして、光は、ミラー 142 で垂直反射され、再び、第 2 ファラデー回転子 138 で更に 22.5 度で偏光回転される。即ち、第 2 ファラデー回転子 138 で合計 45 度の一定の偏光回転角が与えられる。また、第 1 ファラデー回転子 136 でも外部磁界の強さで、第 2 ファラデー回転子 138 を通過した光を更に偏光回転させる。その光は、偏光子 134 に入射して、偏光子 134 の偏光軸に対する方位角に従い、減衰して透過する。

【0045】

減衰した光はレンズ 132 で再び入射側光ファイバ 114 に戻る。そして、その戻り光は、光ファイバカプラ 116 を介して、出射側光ファイバ 118 で受光器 120 に導かれる。

【0046】

受光器 120 では、戻り光の光量 (光ファイバ帰還光量) に比例して光電変換して電気信号を出力する。この電気信号は受光回路 154 で規格化された電圧値として出力される。この電圧値の一例を図 4 (A) に示す。この電圧値は、偏光子 134 による減衰特性から、正弦波特性で示される曲線 (SIN 波) 上の値として示される。そして、外部磁界がない場合 A3 にも、第 2 ファラデー回転子 138 (及び永久磁石 140) で光に一定の偏光回転角として 45 度が与えられている。このため、外部磁界がない状態 A3 の方位角 45 度では電圧値は極大値や極小値とはならず、電圧値は 0.707 となる。外部磁界がマイナスである場合 A2 には、方位角は 45 度より小さくなる。このため、電圧値が 0.707 よりも大きな値となる。逆に、外部磁界がプラスである場合 A4 には、方位角は 45 度より大きくなる。このため、電圧値が 0.707 よりも小さな値となる。

【0047】

即ち、偏光子 134 の偏光軸に対する第 1 ファラデー回転子 136 から出射される光の偏光回転角に、 $90n$ (n ; 整数) 度ではない一定の偏光回転角が与えられていることで、外部磁界のプラスマイナス、即ち外部磁界の向きを受光量に比例する電圧値から容易に

10

20

30

40

50

判別することができる。

【 0 0 4 8 】

受光回路 1 5 4 から出力される電圧値は、自乗回路 1 5 6 で自乗される。即ち、自乗回路 1 5 6 から出力される自乗電圧値は、一例として図 4 (B) のように示すことができる。即ち、外部磁界がない状態 A 3 の電圧値 0 . 7 0 7 は、自乗電圧値 0 . 5 となる。同時に、正弦波特性で示された曲線は、自乗電圧値 0 . 5 を中心とする範囲 B においては、極めて直線に近づけることができる。即ち、方位角 4 5 度を中心として範囲 B の間では、自乗電圧値に比例して方位角を求めることができる。つまり、外部磁界の向きを含めて、外部磁界の強さを複雑な構成をとることなく正確に求めることができる。

【 0 0 4 9 】

自乗回路 1 5 6 の出力はオフセット回路 1 5 8 で、符号合わせ、オフセット調整、及びゲイン調整される。即ち、オフセット回路 1 5 8 から出力される出力電圧値 V_{out} は、一例として図 4 (C) のように示すことができる。このため、外部磁界の向きを含めて、外部磁界の強さを簡単な構成で、容易にかつ正確に求めることができる。

【 0 0 5 0 】

本比較例では、処理部 1 5 0 の簡素化による、低価格化および高速応答化が可能である。具体的には、出力電圧値 V_{out} をアナログ出力とする本比較例の場合には、処理部 1 5 0 を全てアナログ回路で構成できるので、デジタル回路が不要となる。このため、第 1、第 2 ファラデー回転子 1 3 6、1 3 8 が用いられても低コスト化を実現することが可能である。同時に、アナログ回路だけであれば、デジタル回路で用いられるサンプリングレートに制約されないので、アナログ演算により高速応答化が図れる。即ち、本比較例は、高速に変動する磁界の測定や、磁界プローブ 1 3 0 を高速移動させての磁界分布の動的測定 (ダイナミックな測定) に対応することができる。

【 0 0 5 1 】

また、本比較例では、永久磁石 1 4 0 を用いて第 2 ファラデー回転子 1 3 8 にバイアス磁界を印加しているので、磁界プローブ 1 3 0 に入射側光ファイバ 1 1 4 以外に外部から配線する必要がない。そのため、磁界プローブ 1 3 0 の配置の自由度が大きく、且つ第 2 ファラデー回転子 1 3 8 を外部から制御することなく安定して行うことができる。

【 0 0 5 2 】

また、本比較例では、ミラー 1 4 2 を用いて光を反射させることで、それぞれ第 1、第 2 ファラデー回転子 1 3 6、1 3 8 の磁界測定軸方向 O に光を往復させている。このため、第 1、第 2 ファラデー回転子 1 3 6、1 3 8 の磁界測定軸方向 O の長さを短くすることができるので、磁界プローブ 1 3 0 を小型とすることができる。また、ミラー 1 4 2 が機能的には磁界プローブ 1 3 0 の終端部材なので、ミラー 1 4 2 の外側に光ファイバなどの部材が配置されずに、磁界プローブ 1 3 0 の設置が容易である。

【 0 0 5 3 】

即ち、本比較例では、複雑な構成をとることなく、光ファイバ型磁界センサでありながら磁界の向きが判別可能となる。なお、光ファイバを用いることで、電気信号を用いる場合に比べて特に電気ノイズの影響を受けずに伝送ロスを低減できるので、伝送路が長い際の信号品質劣化を防止し、高い耐環境性を実現することができる。このため、本比較例により、厳しい環境で、より正確で詳細な磁界測定が可能となる。

【 0 0 5 4 】

本比較例においては、第 2 ファラデー回転子 1 3 8 を用いて、永久磁石 1 4 0 による第 1 ファラデー回転子 1 3 6 への影響を与えないようにすることが望ましいとしていたが、第 2 ファラデー回転子を用いずに、第 1 ファラデー回転子に永久磁石でバイアス磁界を印加して、第 1 ファラデー回転子で一定の偏光回転角を与えるようにし、外部磁界がこれに重畳されるようにしてもよい。

【 0 0 5 5 】

また、本比較例においては、光ファイバカプラ 1 1 6 を用いたが、例えば光ファイバ型ではないビームスプリッタを用いてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 6 】

また、本比較例においては、処理部 1 5 0 に、自乗手段として自乗回路 1 5 6、オフセット手段としてオフセット回路 1 5 8 を備えていたが、回路という形ではなく、受光回路の出力を A / D 変換してソフトウェア的に演算処理することで自乗手段やオフセット手段を実現しても良い。

【 0 0 5 7 】

また、本比較例においては、第 1 ファラデー回転子 1 3 6 の後段に第 2 ファラデー回転子 1 3 8 が配置され、第 2 ファラデー回転子 1 3 8 の外周に永久磁石 1 4 0 が配置されていたが、第 2 ファラデー回転子が第 1 ファラデー回転子の前段に配置されていてもよい。また、永久磁石は磁界検出軸方向 O で第 2 ファラデー回転子から離れて配置されていてもよいし、永久磁石の形状がリング状でなくてもよい。

10

【 0 0 5 8 】

次に、本発明の実施形態について、図 5、図 6 を用いて説明する。

【 0 0 5 9 】

本実施形態は、第 1 比較例の反射型の磁界プローブ 1 3 0 を多軸化したものである。その概略構成は、図 5、図 6 に示す如く、光源 2 0 4 が複数の波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の光を入射側光ファイバ（光ファイバ）2 1 4 に導光させ、入射側光ファイバ 2 1 4 から出射された光を各波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ に分光し、各波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 毎に第 1 ファラデー回転子 2 3 6 X ~ 2 3 6 Z をそれぞれ用いている。その際に入射側光ファイバ 2 1 4 から出射された光は 2 個のダイクロイックミラー 2 3 3 Y、2 3 3 Z で各波長に分光されている。具体的な構成を以下に説明する。なお、多軸化に係る部分以外については、適宜説明を省略する。

20

【 0 0 6 0 】

光源 2 0 4 は、図 5 に示す如く、例えば 3 個の LED 2 0 6 X ~ 2 0 6 Z と、4 個のレンズ 2 0 8 X ~ 2 0 8 Z、2 1 2 と、1 個のミラー 2 1 0 X と 2 個のダイクロイックミラー 2 1 0 Y、2 1 0 Z と、を備えている。3 個の LED 2 0 6 X ~ 2 0 6 Z は、それぞれ波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ が異なる光を発光する。LED 2 0 6 X ~ 2 0 6 Z から出射された光は、それぞれレンズ 2 0 8 X ~ 2 0 8 Z でコリメートされる。コリメートされた光は、ミラー 2 1 0 X 及びダイクロイックミラー 2 1 0 Y、2 1 0 Z で反射され、レンズ 2 1 2 に入射する。レンズ 2 1 2 によって、それぞれ波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ が異なる光は、1 本の入射側光ファイバ 2 1 4 により磁界プローブ 2 3 0 に導光される。

30

【 0 0 6 1 】

磁界プローブ 2 3 0 は、図 6 に示す如く、レンズ 2 3 2 のみを共通にして、3 個のプローブ先端部 2 3 5 X ~ 2 3 5 Z を備えている。プローブ先端部 2 3 5 X ~ 2 3 5 Z は、それぞれ、ミラー 2 3 3 X 若しくはダイクロイックミラー 2 3 3 Y、2 3 3 Z と偏光子 2 3 4 X ~ 2 3 4 Z と、第 1 ファラデー回転子 2 3 6 X ~ 2 3 6 Z と、第 2 ファラデー回転子 2 3 8 X ~ 2 3 8 Z と、永久磁石 2 4 0 X ~ 2 4 0 Z と、ミラー 2 4 2 X ~ 2 4 2 Z と、を備える。

【 0 0 6 2 】

入射側光ファイバ 2 1 4 から出射された光は、図 6 に示す如く、レンズ 2 3 2 でコリメートされる。コリメートされた光はダイクロイックミラー 2 3 3 Z に入射する。ここで、ダイクロイックミラー 2 3 3 Z は、波長 λ_1 、 λ_2 の光を反射させ、波長 λ_3 の光を透過させる。ダイクロイックミラー 2 3 3 Z で反射された光は、ダイクロイックミラー 2 3 3 Y に入射する。ダイクロイックミラー 2 3 3 Y は、波長 λ_1 の光を透過させ、波長 λ_2 の光を反射させる。ダイクロイックミラー 2 3 3 Y を透過した光は、ミラー 2 3 3 X で反射される。ミラー 2 3 3 X 及びダイクロイックミラー 2 3 3 Y、2 3 3 Z で分光された光はそれぞれ、偏光子 2 3 4 X ~ 2 3 4 Z、第 1 ファラデー回転子 2 3 6 X ~ 2 3 6 Z、及び第 2 ファラデー回転子 2 3 8 X ~ 2 3 8 Z を介して、ミラー 2 4 2 X ~ 2 4 2 Z に入射する。ミラー 2 4 2 X ~ 2 4 2 Z で反射された光はそれぞれ、ミラー 2 3 3 X 及びダイクロイックミラー 2 3 3 Y、2 3 3 Z を介して、入射側光ファイバ 2 1 4 に導光される。磁界プローブ 2 3 0 のこれ以外の構成と動作は第 1 比較例と同様なので、説明を省略する。

40

50

【0063】

受光器220は、図5に示す如く、レンズ222と、ミラー224X及びダイクロイックミラー224Y、224Zと、光電式センサ226X～226Zと、を備える。出射側光ファイバ218から出射された光はレンズ222でコリメートされ、ダイクロイックミラー224Y、224Zで、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 毎に分光されて、各光電式センサ226X～226Zで受光される。光電式センサ226X～226Zで受光された光は光電変換され、電気信号として処理部に出力される。処理部は、第1比較例と同様の構成であり、同様の動作を行うので、その説明は省略する。処理部は、波長の数だけ並列に備えてもよいし、異なる波長毎に適宜兼用化してもよい。

【0064】

10

このように、各波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 毎にプローブ先端部235X～235Zを備えて、各プローブ先端部235X～235Zの磁界測定軸方向 $O_x \sim O_z$ を例えば互いに直交させるように配置することで、3次元の磁界の強さを測定することが可能になる。即ち、各軸で得られた出力電圧値 V_{out} をベクトル合成することで磁界の向きと大きさを求めることができる。

【0065】

なお、多軸化に際しては、反射型の磁界プローブ230を用いているので、プローブ先端部235X～235Zの配置が容易である。同時に、2個のダイクロイックミラー233Y、233Zを用いていることで、磁界プローブ230を相乗的にコンパクトにまとめることができる。なお、受光器220においても2個のダイクロイックミラー224Y、224Zが用いられているので、受光器220もコンパクトにまとめることができる。

20

【0066】

本実施形態においては、3つの波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ で3軸方向の磁界の強さを求めたが、本発明はこれに限定されず、更に多くの数の軸に対しても適用可能である。光ファイバを用いる限りにおいて、波長の多重化は容易で、かつ光ファイバ自体は1本で済み、更に磁界プローブになんら電気信号を這わす必要がない。このため、数の多い多軸化であっても容易に磁界プローブの構成が可能で、たとえ磁界プローブ230が光源204と受光器220とから遠く離れて配置されても、各軸で磁界の強さを安定して求めることができる。

【0067】

なお、本実施形態においては、入射側光ファイバ214から出射された光が、2個のダイクロイックミラー233Y、233Zで各波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ に分光されていたが、本発明はこれに限定されない。別の波長選択性のある光学素子をダイクロイックミラーの代わりに用いてもよい。

30

【0068】

次に、第2比較例について、図7を用いて説明する。

【0069】

本比較例は、第1比較例とは異なり、透過型の磁界プローブ330を用いている。即ち、第2ファラデー回転子138と永久磁石140とミラー142および偏光子134（反射光が戻るとき）の代わりに、検光子344を用いている。検光子344は、偏光子334とは偏光軸の角度が異なるように配置されている（例えば45度）。そして、検光子344を通過した光は、レンズ346により集光され、直接に出射側光ファイバ318に入射されている。即ち、検光子344は、偏光子334の偏光軸から45度異なる偏光軸（45度の偏光回転角の付与）で、偏光子334の代わりに第1ファラデー回転子336から出射される光を通過させる。このため、第1実施例と比べると、検光子344が、偏光子334の偏光軸に対する第1ファラデー回転子336から出射される光の偏光回転角に、 $90n$ （ n ；整数）度ではない一定の偏光回転角（例えば45度）を更に与えたような格好になっている。同時に、検光子344は、一定の偏光回転角（例えば45度）を与えることで、受光器に導光される光の光量を減衰させている。つまり、本比較例では、検光子344が、偏光子334とは偏光軸の角度が45度異なるように配置されることで、第1比較例における偏光回転手段と同様に機能している。同時に、偏光回転手段としての検

40

50

光子 3 4 4 が減衰手段としても機能している（偏光回転手段と減衰手段との兼用化）。

【 0 0 7 0 】

このため、第 1 比較例で説明した光ファイバ型磁界センサ 1 0 0 と同様の動作が可能である。更に、本比較例では、ファラデー回転子 3 3 6 を 1 個だけしか使用しないので、第 1 比較例に比べてコストダウンが可能である。更に、永久磁石も使用しないので、永久磁石による第 1 ファラデー回転子 3 3 6 への影響を考慮せずに、磁界プローブ 3 3 0 を構成・配置することができる。

【 0 0 7 1 】

また、本比較例の透過型の磁界プローブ 3 3 0 を用いて、実施形態で示した多軸化を行ってもよい。

10

【 0 0 7 2 】

本発明について上記実施形態等を上げて説明したが、本発明は上記実施形態等に限定されるものではない。即ち、本発明の要旨を逸脱しない範囲においての改良並びに設計の変更が可能なことはいうまでもない。

【 0 0 7 3 】

上記実施形態においては、一定の偏光回転角が 4 5 度であったが、本発明はこれに限定されない。一定の偏光回転角が 4 5 度のときは、磁界の向きがいずれであっても、直線近似すると磁界の強さを同等の広い範囲で正確に求めることができる（例えば図 4（B）では、方位角でそれぞれ $B/2$ の範囲）。このため、一定の偏光回転角が $45 + 90m$ （ m ；整数）度であることが望ましいが、 $90n$ （ n ；整数）度でない角度であればよい。その場合には、受光量において外部磁界のない状態は正弦波特性で示される曲線上の極大値や極小値とならない。このため、外部磁界の向きが変わることで受光量（電圧値、自乗電圧値、若しくは出力電圧値）が変化するため、磁界の向きを判別することができる。

20

【 0 0 7 4 】

また、上記実施形態においては、偏光子や検光子としては偏光板を想定していたが、本発明はこれに限定されない。例えば、偏光ビームスプリッタや、複屈折性結晶（方解石など）でも良い。

【 0 0 7 5 】

また、上記実施形態においては、光源としてレーザダイオード、LED を用いていたが、それ以外のものでもよい。ただし、ファラデー回転子の材質に対して透明な光波長を発するものが好ましい。例えば、YIG 結晶に対しては、波長約 $1 \mu m$ の光源であることが好ましい。

30

【 0 0 7 6 】

また、上記実施形態においては、処理部が電気信号を自乗する自乗手段を有していたが、本発明はこれに限定されず、自乗手段を有さなくてもよい。

【符号の説明】

【 0 0 7 7 】

1、1 0 0、2 0 0 ... 光ファイバ型磁界センサ
 1 4、6 4、1 1 4、2 1 4、3 1 4 ... 入射側光ファイバ
 3 0、8 0、1 3 0、2 3 0、3 3 0 ... 磁界プローブ
 3 2、8 2、9 6、1 3 2、2 0 8 X、2 0 8 Y、2 0 8 Z、2 1 2、2 2 2、2 3 2
 、3 3 2、3 4 6 ... レンズ
 3 4、8 4、1 3 4、2 3 4 X、2 3 4 Y、2 3 4 Z、3 3 4 ... 偏光子
 3 6、8 6、1 3 6、2 3 6 X、2 3 6 Y、2 3 6 Z、3 3 6 ... 第 1 ファラデー回転子
 4 2、1 4 2、2 1 0 X、2 2 4 X、2 3 3 X、2 4 2 X、2 4 2 Y、2 4 2 Z ... ミラ

40

6 8、1 1 8、2 1 8、3 1 8 ... 出射側光ファイバ

9 4、3 4 4 ... 検光子

1 0 2、2 0 2 ... 光学部

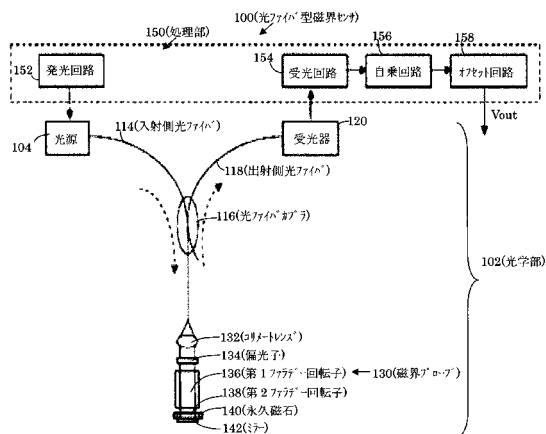
1 0 4、2 0 4 ... 光源

50

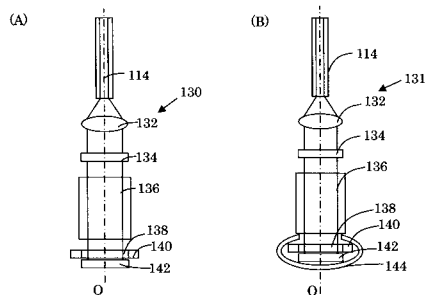
- 1 1 6、2 1 6 ... 光ファイバケーブル
 1 2 0、2 2 0、2 2 6 X、2 2 6 Y、2 2 6 Z ... 受光器（光電式センサ）
 1 3 8、2 3 8 X、2 3 8 Y、2 3 8 Z ... 第2ファラデー回転子
 1 4 0、2 4 0 X、2 4 0 Y、2 4 0 Z ... 永久磁石
 1 4 4 ... 磁気シールド
 1 5 0 ... 処理部
 1 5 2 ... 発光回路
 1 5 4 ... 受光回路
 1 5 6 ... 自乗回路
 1 5 8 ... オフセット回路
 2 0 6 X、2 0 6 Y、2 0 6 Z ... LED
 2 1 0 Y、2 1 0 Z、2 2 4 Y、2 2 4 Z、2 3 3 Y、2 3 3 Z ... ダイクロイックミラ
 2 3 5 X、2 3 5 Y、2 3 5 Z ... プローブ先端部

10

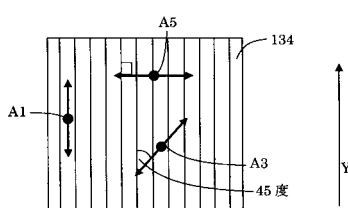
【図1】



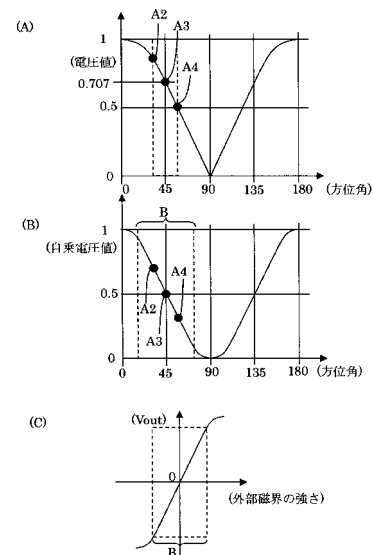
【図2】



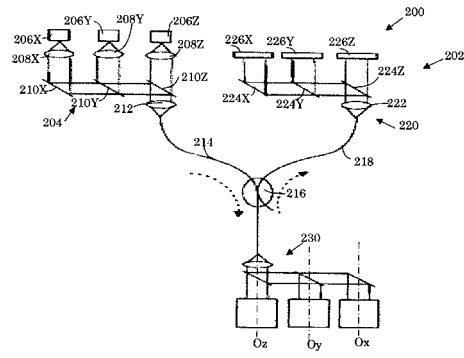
【図3】



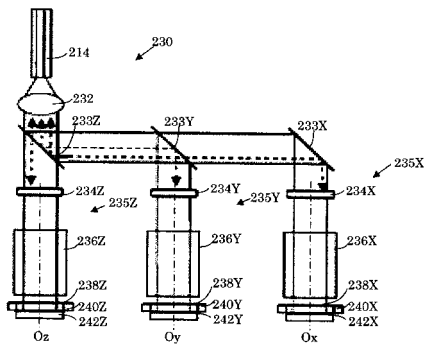
【図4】



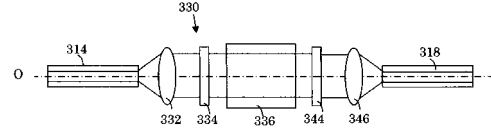
【図 5】



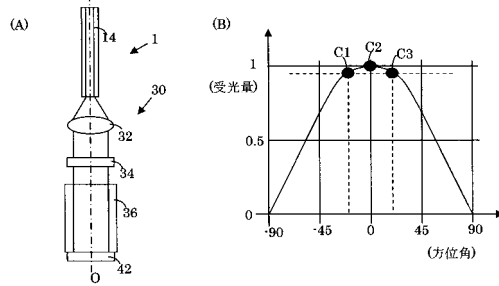
【図 6】



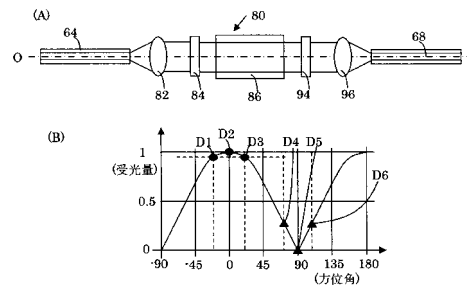
【図 7】



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平05 - 196707 (JP, A)
特開平02 - 028574 (JP, A)
特開平08 - 248108 (JP, A)
特開2006 - 242861 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 33/032
G01R 29/08 - 29/14
G01R 15/24
G01R 19/00