

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-215225

(P2017-215225A)

(43) 公開日 平成29年12月7日(2017.12.7)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)  
**GO 1 R 33/26 (2006.01)** GO 1 R 33/26 2 GO 1 7  
**GO 1 R 33/032 (2006.01)** GO 1 R 33/032

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2016-109806 (P2016-109806)	(71) 出願人	000002369
(22) 出願日	平成28年6月1日 (2016.6.1)		セイコーエプソン株式会社
			東京都新宿区新宿四丁目1番6号
		(74) 代理人	100116665
			弁理士 渡辺 和昭
		(74) 代理人	100164633
			弁理士 西田 圭介
		(74) 代理人	100179475
			弁理士 仲井 智至
		(72) 発明者	高橋 智
			長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		(72) 発明者	長坂 公夫
			長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		Fターム(参考)	2G017 AA02 AB02 AB06 AC01 AD15

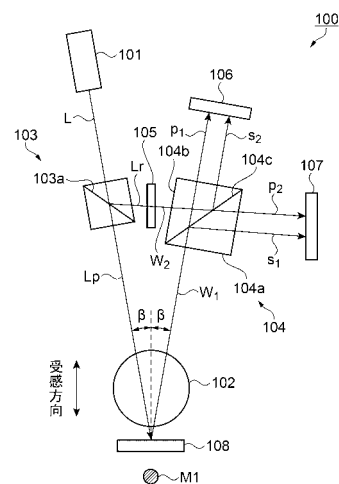
(54) 【発明の名称】 磁場計測装置

## (57) 【要約】

【課題】プローブ光の光学ノイズを低減して、精度よく磁場を測定可能な磁場計測装置を提供すること。

【解決手段】磁場計測装置100は、光照射手段としてのレーザー光照射装置101と、ガスセル102と、入射した直線偏光をプローブ光Lpと参照光Lrとに分岐する第1光学手段としての無偏光ビームスプリッター103と、第2光学手段としての偏光ビームスプリッター104と、参照光の強度を、ガスセル102を透過した後のプローブ光の強度と同等とする第3光学手段としての光学フィルター105と、を備え、偏光ビームスプリッター104の第1面104aに入射したプローブ光Lpを第1検出部としてのPD106と第2検出部としてのPD107とに分岐して入射させると共に、第2面104bから入射した参照光LrをPD106とPD107とに分岐して入射させる。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

直線偏光を照射する光照射手段と、  
入射した光によって励起されるアルカリ金属原子が充填されるガスセルと、  
前記光照射手段と前記ガスセルとの間の光軸上に配置され、入射した前記直線偏光をプローブ光と参照光とに分岐する第 1 光学手段と、  
入射した光の強度を検出する第 1 検出部及び第 2 検出部と、  
前記ガスセルを透過した前記プローブ光が入射する第 1 面と、前記参照光が入射する第 2 面とを有する第 2 光学手段と、  
前記第 2 光学手段の前記第 2 面に入射する前記参照光の強度を、前記ガスセルを透過した後の前記プローブ光の強度と同等とする第 3 光学手段と、を備え、  
前記第 2 光学手段は、前記第 1 面に入射した前記プローブ光を前記第 1 検出部と前記第 2 検出部とに分岐して入射させると共に、前記第 2 面から入射した前記参照光を前記第 1 検出部と前記第 2 検出部とに分岐して入射させることを特徴とする磁場計測装置。

10

## 【請求項 2】

前記ガスセルを透過した前記プローブ光を反射して再び前記ガスセルに入射させるミラーをさらに備えたことを特徴とする請求項 1 に記載の磁場計測装置。

## 【請求項 3】

前記プローブ光が前記ガスセルを 1 回透過した後に、前記第 1 面に入射するように、前記ガスセルに対して前記第 2 光学手段が配置されていることを特徴とする請求項 1 に記載の磁場計測装置。

20

## 【請求項 4】

前記第 3 光学手段を透過した後の前記参照光を反射して前記第 2 光学手段の前記第 2 面に導くミラーをさらに備えたことを特徴とする請求項 3 に記載の磁場計測装置。

## 【請求項 5】

前記第 1 光学手段は、無偏光ビームスプリッターであることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の磁場計測装置。

## 【請求項 6】

前記第 2 光学手段は、偏光ビームスプリッターであることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の磁場計測装置。

30

## 【請求項 7】

前記第 3 光学手段は、光の透過率を変更可能な光学フィルターであることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の磁場計測装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、磁場計測装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

上記磁場計測装置として、微小な磁場を測定可能な光ポンピング磁力計が開示されている（特許文献 1）。

40

## 【0003】

上記特許文献 1 の光ポンピング磁力計は、セル内に封入されたガス状態の原子群に、ポンプ光を照射して原子群を構成する原子のスピン向きを揃える。原子のスピン向きが揃った原子群にプローブ光としての直線偏光を照射する。測定対象としての例えば人体から発せられる磁場の強度によって上記原子のスピン向きが変化する。照射された直線偏光は上記原子のスピンの影響を受けて偏光回転角が変化することから、偏光回転角を検出することによって、当該磁場の強度を測定可能としたものである。

## 【0004】

上記特許文献 1 の光ポンピング磁力計では、セル内を透過してきた後のプローブ光を反

50

射させる少なくとも1つの反射ミラーを備え、セルを少なくとも2回以上横断してきたプローブ光の偏光回転角度を検出することから、高感度な磁場検出が可能であるとしている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2009-236599号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

10

上記特許文献1の光ポンピング磁力計は、高感度であるがゆえに、磁場の測定を阻害するノイズを取り除く必要がある。当該ノイズとして、地磁気などの外部磁気ノイズが挙げられる。

【0007】

上記光ポンピング磁力計では、外部磁気ノイズの影響を低減するために、磁気シールド内にセルを配置すると共に、磁気シールド内部の残留磁気を打ち消すためのヘルムホルツコイルを備えている。

【0008】

しかしながら、当該ノイズとして、外部磁気ノイズの他に、プローブ光が放出された空間における空気の振動などによる直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズが挙げられる。

20

上記光ポンピング磁力計では、該光学ノイズに対する対策が施されていないという課題があった。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、上述の課題の少なくとも一部を解決するためになされたものであり、以下の形態または適用例として実現することが可能である。

【0010】

〔適用例〕本適用例に係る磁場計測装置は、直線偏光を照射する光照射手段と、入射した光によって励起されるアルカリ金属原子が充填されるガスセルと、前記光照射手段と前記ガスセルとの間の光軸上に配置され、入射した前記直線偏光をプローブ光と参照光とに分岐する第1光学手段と、入射した光の強度を検出する第1検出部及び第2検出部と、前記ガスセルを透過した前記プローブ光が入射する第1面と、前記参照光が入射する第2面とを有する第2光学手段と、前記第2光学手段の前記第2面に入射する前記参照光の強度を、前記ガスセルを透過した後の前記プローブ光の強度と同等とする第3光学手段と、を備え、前記第2光学手段は、前記第1面に入射した前記プローブ光を前記第1検出部と前記第2検出部とに分岐して入射させると共に、前記第2面から入射した前記参照光を前記第1検出部と前記第2検出部とに分岐して入射させることを特徴とする。

30

【0011】

本適用例によれば、第3光学手段により、ガスセルを透過したプローブ光の強度と参照光の強度とを同等とする。そして、強度が同等となった参照光を第2光学手段により第1検出部と第2検出部とに分岐して入射させる。第1検出部と第2検出部とには、第2光学手段により分岐されたプローブ光と参照光とがそれぞれ入射することから、プローブ光に含まれる直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズを参照光によって打ち消すことができる。つまり、プローブ光に含まれる直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズを低減して、精度よく磁場測定が可能な磁場計測装置を提供することができる。

40

【0012】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記ガスセルを透過した前記プローブ光を反射して再び前記ガスセルに入射させるミラーをさらに備えることが好ましい。

この構成によれば、プローブ光はミラーによって反射して少なくとも2回ガスセルを透過することになるので、高感度な磁場計測装置を提供することができる。また、ミラーを

50

非磁性とすれば、磁場源とガスセルとの間にミラーを配置しても、磁場源の磁場計測に影響を及ぼさない。

【0013】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記プローブ光が前記ガスセルを1回透過した後に、前記第1面に入射するように、前記ガスセルに対して前記第2光学手段が配置されているとしてもよい。

この構成によれば、光照射手段、第1光学手段、ガスセル、第2光学手段を同一の光学軸上において直線的に配置することができるため、ガスセルを含めた各手段の相対的な位置を容易に位置決めすることができる。言い換えれば、装置構成を簡素化することが可能である。

【0014】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記第3光学手段を透過した後の前記参照光を反射して前記第2光学手段の前記第2面に導くミラーをさらに備えたことを特徴とする。

この構成によれば、同一の光学軸上において、ガスセルを挟んで第1光学手段と第2光学手段とを離間させて配置しても、ミラーによって参照光を反射させて第2光学手段の第2面に導くことができる。言い換えれば、同一の光学軸上における第1光学手段と第2光学手段との位置決めを容易とすることができる。

【0015】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記第1光学手段は、無偏光ビームスプリッターであることが好ましい。

この構成によれば、無偏光ビームスプリッターによって入射した直線偏光をプローブ光と参照光とにそれぞれ同じ強度で分岐することができる。

【0016】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記第2光学手段は、偏光ビームスプリッターであることが好ましい。

この構成によれば、偏光ビームスプリッターの第1面に入射した直線偏光であるプローブ光を第1検出部と第2検出部とに分岐して入射させると共に、第1面に隣り合う第2面に入射した同じく直線偏光である参照光を第1検出部と第2検出部とに分岐して入射させることができる。

【0017】

上記適用例に記載の磁場計測装置において、前記第3光学手段は、光の透過率を変更可能な光学フィルターであることが好ましい。

この構成によれば、光学フィルターに入射した参照光の強度を、ガスセルを透過した後のプローブ光の強度と同等となるように調整して透過させることができる。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】第1実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図。

【図2】原子スピンのアライメント状態を示す図。

【図3】直線偏光の偏光面の回転を示す図。

【図4】第2実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図。

【図5】第3実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図。

【図6】変形例の磁場計測装置の構成を示す概略図。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、本発明を具体化した実施形態について図面に従って説明する。なお、使用する図面は、説明する部分が認識可能な状態となるように、適宜拡大または縮小して表示している。

【0020】

(第1実施形態)

10

20

30

40

50

### < 磁場計測装置 >

本実施形態の光ポンピング方式の磁場計測装置について、図1を参照して説明する。図1は第1実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図である。

図1に示すように、本実施形態の磁場計測装置100は、直線偏光を照射する光照射手段としてのレーザー光照射装置101と、ガスセル102と、第1光学手段としての無偏光ビームスプリッター103と、第2光学手段としての偏光ビームスプリッター104と、第3光学手段としての光学フィルター105と、入射した光の強度を検出する第1検出部としてのフォトディテクタ(PD)106と、同じく入射した光の強度を検出する第2検出部としてのフォトディテクタ(PD)107と、ミラー108と、を備えている。磁場源M1は、例えば人体のうち脳や心臓などの臓器であって、ミラー108を挟んでガスセル102の近傍に配置される。

10

#### 【0021】

ガスセル102は、光を透過可能な透明な例えばガラスなどの容器であって、入射した光によって励起(ポンピング)されるアルカリ金属原子がガスセル102の内部に気体の状態で封入されている。アルカリ金属原子としては、カリウム(K)、セシウム(Cs)、ルビジウム(Rb)などが挙げられ、本実施形態では、他のアルカリ金属原子よりも融点が低く、融点がおおよそ29℃のセシウムが用いられている。なお、図1ではガスセル102の形状を球状として表したが、ガスセル102の形状はこれに限定されるものでなく、例えば直方体であってもよい。

#### 【0022】

レーザー光照射装置101は、アルカリ金属原子(セシウム)を励起可能な波長範囲の直線偏光であるレーザー光Lをガスセル102に向かって照射可能となっている。具体的には、アルカリ金属原子におけるD1線の超微細構造量子数Fが $F - 1 = F'$ の状態に遷移するように、レーザー光Lを調整する。

20

#### 【0023】

レーザー光照射装置101とガスセル102との間の光軸上に配置された無偏光ビームスプリッター103は、例えば2つの直角プリズムが接合されたものであって、入射したレーザー光Lをプローブ光Lpと参照光Lrとに分岐するプリズム界面103aを有している。プリズム界面103aには、例えば屈折率が異なる誘電体膜が積層された誘電体多層膜が形成されており、プリズム界面103aに入射して誘電体多層膜を透過した光がプローブ光Lpとなり、プリズム界面103aに入射して誘電体多層膜により反射した光が参照光Lrとなる。無偏光ビームスプリッター103において、透過光であるプローブ光Lpの強度、及び反射光である参照光Lrの強度は、入射光であるレーザー光Lの強度に対して半分となっている。言い換えれば、入射したレーザー光Lの強度に対して、プローブ光Lp及び参照光Lrの強度がレーザー光Lの波長範囲においてそれぞれ半分となるように、プリズム界面103aに誘電体多層膜が形成されている。プリズム界面103aに形成される光学的な膜は、誘電体多層膜に限定されず、光透過性及び光反射性を兼ね備えた金属膜や、誘電体多層膜と該金属膜とが組み合わされたものであってもよい。

30

#### 【0024】

プローブ光Lpは、ガスセル102に入射して透過し、ガスセル102と磁場源M1との間に配置されたミラー108によって反射され、再びガスセル102に入射する。ミラー108は、例えば、アルミニウム(Al)や銀(Ag)、あるいはこれらの合金などの非磁性金属材料からなる。ミラー108が非磁性であることから、ガスセル102と磁場源M1との間にミラー108が配置されても、磁場源M1の磁場計測に影響を及ぼさない。

40

#### 【0025】

ミラー108で反射して再びガスセル102を透過したプローブ光Lpは偏光ビームスプリッター104に入射する。偏光ビームスプリッター104は、例えば2つの直角プリズムが接合されたものであって、プローブ光Lpが入射する第1面104aと、第1面104aに隣り合い、参照光Lrが入射する第2面104bと、直角プリズム同士の接合面

50

であるプリズム界面 104c とを有している。プリズム界面 104c には、入射した直線偏光を後述する p 波と s 波とに分離する分離膜が設けられている。該分離膜は、例えば屈折率が異なる誘電体多層膜や、誘電体多層膜と光透過性及び光反射性を兼ね備えた金属膜とを組み合わせたものが挙げられる。

#### 【0026】

直線偏光であるプローブ光  $L_p$  が、第 1 面 104a からプリズム界面 104c に所定の偏光面方向で入射するように、ガスセル 102 に対して偏光ビームスプリッター 104 が配置されている。偏光ビームスプリッター 104 に入射したプローブ光  $L_p$  は、偏光ビームスプリッター 104 を透過する p 波 (p 偏光成分) と、プリズム界面 104c で反射する s 波 (s 偏光成分) とに分岐する。p 波及び s 波も直線偏光であって、p 波の直線偏光面は、プリズム界面 104c の入射面と平行となっている。s 波の直線偏光面は、p 波の直線偏光面と直交している。

10

#### 【0027】

同じく直線偏光である参照光  $L_r$  が、第 2 面 104b からプリズム界面 104c に所定の偏光面方向で入射するように、偏光ビームスプリッター 104 に対して無偏光ビームスプリッター 103 が配置されている。偏光ビームスプリッター 104 に入射した参照光  $L_r$  もまた、偏光ビームスプリッター 104 を透過する p 波と、プリズム界面 104c で反射する s 波とに分岐する。

#### 【0028】

以降の説明のため、偏光ビームスプリッター 104 によって分岐されたプローブ光  $L_p$  の p 波を  $p_1$  波と呼び、s 波を  $s_1$  波と呼ぶ。また、偏光ビームスプリッター 104 によって分岐された参照光  $L_r$  の p 波を  $p_2$  波と呼び、s 波を  $s_2$  波と呼ぶ。

20

#### 【0029】

偏光ビームスプリッター 104 に対して、 $p_1$  波と  $s_2$  波とが入射する位置に PD 106 が配置される。また、偏光ビームスプリッター 104 に対して、 $p_2$  波と  $s_1$  波とが入射する位置に PD 107 が配置される。つまり、PD 106 には、偏光ビームスプリッター 104 におけるプローブ光  $L_p$  の透過光である  $p_1$  波と、偏光ビームスプリッター 104 における参照光  $L_r$  の反射光である  $s_2$  波とが入射する。PD 107 には、偏光ビームスプリッター 104 における参照光  $L_r$  の透過光である  $p_2$  波と、偏光ビームスプリッター 104 におけるプローブ光  $L_p$  の反射光である  $s_1$  波とが入射する。

30

#### 【0030】

ガスセル 102 を透過してミラー 108 で反射し再びガスセル 102 を透過したプローブ光  $L_p$  の強度は、ガスセル 102 を少なくとも 2 回透過することにより、無偏光ビームスプリッター 103 を透過した時点に比べて低下する。それゆえに、本実施形態では、偏光ビームスプリッター 104 の第 1 面 104a に入射するプローブ光  $L_p$  の強度  $W_1$  と、偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104b に入射する参照光  $L_r$  の強度  $W_2$  とが同等となるように、無偏光ビームスプリッター 103 の参照光  $L_r$  の射出側と、偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104b との間に、参照光  $L_r$  の強度を低下させる光学フィルター 105 が設けられている。

#### 【0031】

光学フィルター 105 としては、例えば ND (Neutral Density) フィルター (減光フィルター) などを挙げることができる。

40

#### 【0032】

無偏光ビームスプリッター 103 を配置して参照光  $L_r$  を発生させる点と、発生させた参照光  $L_r$  の強度を低下させる光学フィルター 105 を設ける点とについての技術的な説明については後述する。

#### 【0033】

本実施形態の磁場計測装置 100 は、上述したように、光ポンピング方式の磁場計測装置であって、プローブ光  $L_p$  が、ガスセル 102 に封入されたアルカリ金属原子を励起させるポンプ光を兼ねるものである。

50

## 【 0 0 3 4 】

また、ミラー 1 0 8 を設けることにより、プローブ光 L p が少なくとも 2 回ガスセル 1 0 2 を透過するため、ミラー 1 0 8 を設けない場合（後述する第 2 実施形態にて説明）に比べて、高感度な磁場計測装置 1 0 0 を実現できる。

## 【 0 0 3 5 】

なお、図 1 には図示していないが、磁場計測装置 1 0 0 は、レーザー光照射装置 1 0 1 とガスセル 1 0 2 との間のレーザー光 L の光軸上に、第 1 光学手段の一例である無偏光ビームスプリッター 1 0 3 を適正な位置に配置するための第 1 位置決め手段と、ガスセル 1 0 2 と P D 1 0 6 との間のプローブ光 L p の光軸上に第 2 光学手段の一例である偏光ビームスプリッター 1 0 4 を適正な位置に配置するための第 2 位置決め手段とを備えることが好ましい。

10

## 【 0 0 3 6 】

< 磁場測定の原理 >

本実施形態の磁場測定の原理について、図 1 ~ 図 3 を参照して説明する。図 2 は原子スピンのアライメント状態を示す図、図 3 は直線偏光の偏光面の回転を示す図である。

## 【 0 0 3 7 】

図 1 のレーザー光照射装置 1 0 1 と無偏光ビームスプリッター 1 0 3 との間の光軸に沿った方向から見て、図 2 に示すように偏光面が 4 5 度（ $\pi/4$  ラジアン）回転した状態で直線偏光が照射されるようにレーザー光照射装置 1 0 1 が設置される。これにより、無偏光ビームスプリッター 1 0 3 によって分岐されたプローブ光 L p の偏光面もまた光軸に沿った方向から見て 4 5 度回転した状態でガスセル 1 0 2 に入射する。

20

## 【 0 0 3 8 】

ガスセル 1 0 2 に封入されたガス状のアルカリ金属原子は、ポンプ光を兼ねるプローブ光 L p が照射されることにより励起され、原子スピンのほぼ反平行（逆方向）に向いたアルカリ金属原子がほぼ同数混在する状態となる。この状態はアライメントと呼ばれ、原子スピンは、図 2 に示すように一方の端が連結された 2 つの楕円に似た形状となる。図 1 において磁場源 M 1 がない、すなわち磁場が印加されない場合は、図 2 に示すように、直線偏光であるプローブ光 L p の振動方向と、原子スピンのアライメント方位とが一致する。

## 【 0 0 3 9 】

上述したように、ガスセル 1 0 2 を透過したプローブ光 L p は、偏光ビームスプリッター 1 0 4 によって  $p_1$  波と  $s_1$  波とに分岐される。プローブ光 L p の強度を A、 $p_1$  波の振幅を P、 $s_1$  波の振幅を S、さらに  $s_1$  波の強度  $S^2$  と  $p_1$  波の強度  $P^2$  との差を V とすると、磁場が印加されないゼロ磁場の場合、プローブ光 L p の偏光面が回転しないことから、このときの P、S、V は、以下の数式（1）～数式（3）で示される。

30

## 【 0 0 4 0 】

## 【 数 1 】

$$P = A \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = A \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \dots (1)$$

40

## 【 0 0 4 1 】

## 【 数 2 】

$$S = A \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = A \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \dots (2)$$

## 【 0 0 4 2 】

【数 3】

$$V = S^2 - P^2 = 0 \dots (3)$$

つまり、磁場が印加されない場合、 $s_1$ 波の強度  $S^2$  と、 $p_1$ 波の強度  $P^2$  との差  $V$  は、「0」となる。

【0043】

次に、磁場源  $M_1$  が配置され、ガスセル 102 に磁場が印加されると、ガスセル 102 中のアルカリ金属原子の原子スピンの影響を受け、磁場方向を回転軸として回転する歳差運動を始めることからアライメント方位が変化する。このとき、原子スピンのアライメント方位は、プローブ光  $L_p$  の光ポンピングの作用と、光ポンピングの緩和の作用とが働いて方位が一定な定常状態となる。ガスセル 102 に入射した直線偏光であるプローブ光  $L_p$  は、原子スピンのアライメントの影響を受け、印加された磁場の強度に応じて偏光面が回転してガスセル 102 から射出される。

10

【0044】

例えば、図 3 に示すように、プローブ光  $L_p$  の偏光面（図 3 に破線で示した）の角度が、45 度から反時計回りに +（反時計回りを「+」とする）回転した場合（図 3 で実線で示した）を想定すると、このときの  $P$ 、 $S$  は以下の数式（4）、数式（5）によって導かれる。

【0045】

20

【数 4】

$$P = A \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \dots (4)$$

【0046】

【数 5】

$$S = A \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \dots (5)$$

30

【0047】

数式（4）を展開すれば以下の数式（6）となり、数式（5）を展開すれば以下の数式（7）となる。

【0048】

【数 6】

$$P = A \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = A \left( \cos \frac{\pi}{4} \cos \theta - \sin \frac{\pi}{4} \sin \theta \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} A (\cos \theta - \sin \theta) \dots (6)$$

40

【0049】

【数 7】

$$S = A \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = A \left( \sin \frac{\pi}{4} \cos \theta + \cos \frac{\pi}{4} \sin \theta \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} A (\cos \theta + \sin \theta) \dots (7)$$

【0050】

したがって、このときの  $V$  は以下の数式（8）で示される。

【0051】



【数 8】

$$\begin{aligned}
 V = S^2 - P^2 &= \left\{ \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} A (\cos \theta + \sin \theta) \right\}^2 - \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} A (\cos \theta - \sin \theta) \right\}^2 \right\} \\
 &= \frac{1}{2} A^2 (\cos \theta + \sin \theta)^2 - \frac{1}{2} A^2 (\cos \theta - \sin \theta)^2 \\
 &= \frac{1}{2} A^2 \left\{ (\cos^2 \theta + 2 \cos \theta \sin \theta + \sin^2 \theta) \right. \\
 &\quad \left. - (\cos^2 \theta - 2 \cos \theta \sin \theta + \sin^2 \theta) \right\} \dots (8) \\
 &= \frac{1}{2} A^2 (4 \cos \theta \sin \theta) \\
 &= 2 A^2 (\cos \theta \sin \theta) \\
 &= A^2 \sin 2\theta
 \end{aligned}$$

【0052】

20

次に、上記のように、プローブ光 L p の偏光面が + 回転した場合に対して、印加される磁場の向きが逆方向になると、プローブ光 L p の偏光面は時計回りに - 回転することになる。よって、このときの P, S, V は以下の数式 (9) ~ 数式 (11) で示される。

【0053】

【数 9】

$$P = A \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \dots (9)$$

【0054】

30

【数 10】

$$S = A \sin\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \dots (10)$$

【0055】

【数 11】

$$V = S^2 - P^2 = -A^2 \sin 2\theta \dots (11)$$

40

つまり、プローブ光 L p が偏光ビームスプリッター 104 により分岐され、PD 107 に入射した  $s_1$  波の強度  $S^2$  と PD 106 に入射した  $p_1$  波の強度  $P^2$  との差 V を求めることで、プローブ光 L p の偏光面の回転角度 が正弦値として示される。回転角度 は磁場の強度に比例することから磁場の強度が導かれる。

【0056】

上述した磁場測定の原理では、レーザー光 L の照射方向に磁場方向が向いていることを前提としている。一方で、図 1 に示した磁場計測装置 100 は、ガスセル 102 を透過したプローブ光 L p を反射するミラー 108 を備えている。ガスセル 102 を透過したプロ

50

ーブ光  $L_p$  はミラー 108 の法線に対して入射角  $\theta$  でミラー 108 に入射する。ミラー 108 で反射したプローブ光  $L_p$  はミラー 108 の法線に対して反射角  $\theta$  で反射する。実際には、入射角  $\theta$  及び反射角  $\theta$  が 3 度 ~ 10 度の範囲内となるように、各構成が配置されている。

したがって、本実施形態の磁場計測装置 100 においては、レーザー光  $L$  の照射方向と磁場方向とが厳密には合致していないが、入射角  $\theta$  及び反射角  $\theta$  が小さい角度となっているので、磁場計測装置 100 における磁場の受感方向をミラー 108 の法線方向（図 1 に矢印で示す方向）としている。

#### 【0057】

微小な磁場の強度を測定可能な光ポンピング方式の磁場計測装置 100 は、地磁気や周辺環境から発する磁場などの外部磁場（外部磁場ノイズ）の影響を取り除いて磁場の測定を行うことが好ましい。本実施形態では、図 1 に示していないものの、磁場計測装置 100 は、外部磁場の影響を受け難くした磁気シールドルーム内に配置される。あるいは、磁場計測装置 100 のうち少なくともガスセル 102 が均一な磁場環境に配置される。均一な磁場環境を生じさせる手段として例えばヘルムホルツコイルなどが用いられ、外部磁場を打ち消す磁場を発生させたヘルムホルツコイルの中心にガスセル 102 を配置する方法が挙げられる。

#### 【0058】

一方で、磁場の測定に影響を及ぼすのは外部磁場だけでない。例えば、レーザー光  $L$  は、偏光保持光ファイバーを用いてレーザー発振器からレーザー光照射装置 101 の射出口に導かれて照射される。レーザー光  $L$  には、偏光保持光ファイバーの振動や、レーザー光  $L$  が照射された空間における空気の振動などによる直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズが含まれるおそれがある。とりわけ、偏光保持光ファイバーの振動を防止するために、偏光保持光ファイバーの筐体に対する固定を強化すると、固定された筐体からの振動を受け易くなったり、周囲の温度変化に影響されて膨張収縮し易くなったりして、新たな直線偏光回転ノイズを発生させてしまうという課題があった。

#### 【0059】

本実施形態の磁場計測装置 100 は、上記光学ノイズの影響を低減するために、レーザー光  $L$  をプローブ光  $L_p$  と参照光  $L_r$  とに分岐する無偏光ビームスプリッター 103 と、ガスセル 102 を透過した後のプローブ光  $L_p$  の強度に対して参照光  $L_r$  の強度を同等とするための光学フィルター 105 と、を備え、光学フィルター 105 を透過した後の参照光  $L_r$  を偏光ビームスプリッター 104 に入射させて  $p_2$  波と  $s_2$  波とに分岐させ、 $s_2$  波を PD 106 に入射させ、 $p_2$  波を PD 107 に入射させる構成としている。以降、上記光学ノイズを低減する方法について、数式を示して具体的に説明する。

#### 【0060】

ここでは、外部磁場（外部磁場ノイズ）の影響が取り除かれて、上記光学ノイズが存在する状態を前提として説明する。先に説明した磁場測定の原理において、図 3 に示したは、上記光学ノイズが存在する状態では、磁場源 M1 の磁場により偏光面が回転した回転角度  $\theta$ （以降、本来の回転角度と呼ぶ）と、レーザー光  $L$ （プローブ光  $L_p$ ）の直線偏光回転ノイズにより偏光面が回転した回転角度  $\theta'$ （以降、直線偏光回転ノイズの回転角度と呼ぶ）とを含んでいることになる。回転角度  $\theta$  及び回転角度  $\theta'$  はそれぞれ回転方向に起因して +（プラス）と -（マイナス）とがある。したがって、回転方向を考慮すると、回転角度  $\theta$  と回転角度  $\theta'$  の組み合わせは 4 つ存在する。

#### 【0061】

本来の回転角度を  $\theta$ 、直線偏光回転ノイズの回転角度を  $\theta'$  とすると、図 3 に示したは、 $\theta = \theta' + \theta$  となる。ガスセル 102 を透過した後のプローブ光  $L_p$  の強度を  $W_1$  とし、光学フィルター 105 を透過した後の参照光  $L_r$  の強度を  $W_2$  とすると、 $W_1 = W_2 = W$  となっている。したがって、これを磁場測定の原理における数式（4）、数式（5）に当てはめることで、偏光ビームスプリッター 104 のプローブ光  $L_p$  の透過光（透過成分）である  $p_1$  波の強度を  $P_1^2$  とし、偏光ビームスプリッター 104 のプローブ光  $L_p$  の反

10

20

30

40

50

射光（反射成分）である  $s_1$  波の強度を  $S_1^2$  とすると、 $P_1^2$ 、 $S_1^2$  は、以下の数式（１２）、数式（１３）によって導かれる。

【００６２】

【数１２】

$$\left. \begin{aligned} P_1^2 &= \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} W [\cos(\alpha + \omega) - \sin(\alpha + \omega)] \right\}^2 \\ &= \frac{1}{2} W^2 [\cos^2(\alpha + \omega) - 2\cos(\alpha + \omega)\sin(\alpha + \omega) + \sin^2(\alpha + \omega)] \\ &= \frac{1}{2} W^2 [1 - 2\cos(\alpha + \omega)\sin(\alpha + \omega)] \end{aligned} \right\} \cdots (12) \quad 10$$

【００６３】

【数１３】

$$\left. \begin{aligned} S_1^2 &= \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} W [\cos(\alpha + \omega) + \sin(\alpha + \omega)] \right\}^2 \\ &= \frac{1}{2} W^2 [\cos^2(\alpha + \omega) + 2\cos(\alpha + \omega)\sin(\alpha + \omega) + \sin^2(\alpha + \omega)] \\ &= \frac{1}{2} W^2 [1 + 2\cos(\alpha + \omega)\sin(\alpha + \omega)] \end{aligned} \right\} \cdots (13) \quad 20$$

【００６４】

同じく、偏光ビームスプリッター１０４の参照光  $L_r$  の透過光（透過成分）である  $p_2$  波の強度を  $P_2^2$  とし、偏光ビームスプリッター１０４の参照光  $L_r$  の反射光（反射成分）である  $s_2$  波の強度を  $S_2^2$  とすると、 $p_2$  波及び  $s_2$  波は磁場源  $M_1$  の磁場の影響を受けずに、直線偏光回転ノイズの影響を受けることから、 $P_2^2$ 、 $S_2^2$  は、以下の数式（１４）、数式（１５）によって導かれる。

【００６５】

【数１４】

$$\left. \begin{aligned} P_2^2 &= \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos \omega - \sin \omega) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{2} W^2 (\cos^2 \omega - 2\cos \omega \sin \omega + \sin^2 \omega) \\ &= \frac{1}{2} W^2 (1 - 2\cos \omega \sin \omega) \end{aligned} \right\} \cdots (14) \quad 40$$

【００６６】

【数 1 5】

$$\left. \begin{aligned}
 S_2^2 &= \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos \omega + \sin \omega) \right\}^2 \\
 &= \frac{1}{2} W^2 (\cos^2 \omega + 2 \cos \omega \sin \omega + \sin^2 \omega) \\
 &= \frac{1}{2} W^2 (1 + 2 \cos \omega \sin \omega)
 \end{aligned} \right\} \cdots (15)$$

10

【0 0 6 7】

図 1 に示すように、PD 1 0 6 には、 $p_1$  波と  $s_2$  波とが入射することから、PD 1 0 6 に入射する直線偏光の強度を  $P_3^2$  とすると、 $P_3^2 = P_1^2 + S_2^2$  となる。また、PD 1 0 7 には、 $s_1$  波と  $p_2$  波が入射することから、PD 1 0 7 に入射する直線偏光の強度を  $S_3^2$  とすると、 $S_3^2 = S_1^2 + P_2^2$  となる。すなわち、 $P_3^2$ 、 $S_3^2$  は、以下の数式 (1 6)、数式 (1 7) によって導かれる。

【0 0 6 8】

【数 1 6】

$$P_3^2 = P_1^2 + S_2^2 = W^2 \left[ 1 - \cos(\alpha + \omega) \sin(\alpha + \omega) + \cos \omega \sin \omega \right] \cdots (16)$$

20

【0 0 6 9】

【数 1 7】

$$S_3^2 = P_2^2 + S_1^2 = W^2 \left[ 1 + \cos(\alpha + \omega) \sin(\alpha + \omega) - \cos \omega \sin \omega \right] \cdots (17)$$

【0 0 7 0】

したがって、この場合の  $S_3^2$  と  $P_3^2$  との差を  $V_1$  とすると、 $V_1$  は以下の数式 (1 8) によって導かれる。

【0 0 7 1】

【数 1 8】

$$\left. \begin{aligned}
 V_1 = S_3^2 - P_3^2 &= 2W^2 \left\{ \cos(\alpha + \omega) \sin(\alpha + \omega) - \cos \omega \sin \omega \right\} \\
 &= 2W^2 \left\{ \frac{1}{2} [\sin(2\alpha + 2\omega) - \sin 2\omega] \right\} \\
 &= 2W^2 \left\{ \frac{1}{2} [\sin(2\alpha + 2\omega) + \sin(-2\omega)] \right\} \\
 &= 2W^2 \left\{ \frac{1}{2} [2\sin \alpha \cos(\alpha + 2\omega)] \right\} \\
 &= 2W^2 \left\{ \sin \alpha \cos(\alpha + 2\omega) \right\}
 \end{aligned} \right\} \cdots (18)$$

40

【0 0 7 2】

50

回転角度 は、非常に小さな値であり 2 であることから、 0 とすることができ  
る。したがって、上記数式 ( 1 8 ) に 0 を当てはめると以下の数式 ( 1 9 ) となる。

【 0 0 7 3 】

【 数 1 9 】

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= 2W^2(\sin\alpha \cos\alpha) \\ &= W^2 \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

10

【 0 0 7 4 】

ガスセル 1 0 2 を透過しない参照光 L r を偏光ビームスプリッター 1 0 4 に入射させて分岐し、分岐した s<sub>2</sub> 波を P D 1 0 6 へ入射させ、分岐した p<sub>2</sub> 波を P D 1 0 7 に入射させることで、P D 1 0 6 と P D 1 0 7 とに入射した直線偏光の強度の差 V<sub>1</sub> を求めると、V<sub>1</sub> は本来の回転角度 の正弦値として得られる。つまり、直線偏光回転ノイズの回転角度の影響が除かれ、本来の回転角度 に基づく磁場の測定が可能となる。

【 0 0 7 5 】

上記第 1 実施形態の磁場計測装置 1 0 0 は、レーザー光照射装置 1 0 1 から照射されたレーザー光 L をプローブ光 L p と参照光 L r とに分岐する無偏光ビームスプリッター 1 0 3 と、ガスセル 1 0 2 を透過したプローブ光 L p の強度に対して参照光 L r の強度を同等とする光学フィルター 1 0 5 とを備えている。このような磁場計測装置 1 0 0 によれば、ガスセル 1 0 2 を透過したプローブ光 L p を偏光ビームスプリッター 1 0 4 に入射させて分岐し、分岐した p<sub>1</sub> 波を P D 1 0 6 へ入射させ、分岐した s<sub>1</sub> 波を P D 1 0 7 に入射させる。また、ガスセル 1 0 2 を透過しない参照光 L r を偏光ビームスプリッター 1 0 4 に入射させて分岐し、分岐した s<sub>2</sub> 波を P D 1 0 6 へ入射させ、分岐した p<sub>2</sub> 波を P D 1 0 7 に入射させる。P D 1 0 6 と P D 1 0 7 とに入射した直線偏光の強度の差 V<sub>1</sub> を求めると、直線偏光であるプローブ光 L p に直線偏光回転ノイズが含まれていても、V<sub>1</sub> は本来の回転角度 の正弦値として得られる。つまり、直線偏光回転ノイズの回転角度 の影響が除かれ、本来の回転角度 に基づく磁場の測定が可能となり、直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズを低減して、精度よく磁場源 M 1 の磁場を測定することができる。

20

30

【 0 0 7 6 】

( 第 2 実施形態 )

次に、第 2 実施形態の磁場計測装置について、図 4 を参照して説明する。図 4 は第 2 実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図である。第 2 実施形態の磁場計測装置は、上記第 1 実施形態の磁場計測装置 1 0 0 に対して、プローブ光 L p がガスセル 1 0 2 を 1 回透過した後、第 2 光学手段である偏光ビームスプリッター 1 0 4 に入射する構成としたものである。したがって、上記第 1 実施形態の磁場計測装置 1 0 0 と同じ構成には同じ符号を付して詳細な説明は省略する。

【 0 0 7 7 】

図 4 に示すように、本実施形態の磁場計測装置 1 5 0 は、直線偏光を照射する光照射手段としてのレーザー光照射装置 1 0 1 と、ガスセル 1 0 2 と、第 1 光学手段としての無偏光ビームスプリッター 1 0 3 と、第 2 光学手段としての偏光ビームスプリッター 1 0 4 と、第 3 光学手段としての光学フィルター 1 0 5 と、第 1 検出部としての P D 1 0 6 と、第 2 検出部としての P D 1 0 7 と、2 つの非磁性のミラー 1 5 1 , 1 5 2 と、を備えている。

40

【 0 0 7 8 】

レーザー光照射装置 1 0 1 と磁場源 M 1 とを結ぶ光軸上 ( 直線上 ) に、無偏光ビームスプリッター 1 0 3 、ガスセル 1 0 2 、偏光ビームスプリッター 1 0 4 がこの順で並ぶように配置されている。

【 0 0 7 9 】

50

レーザー光照射装置 101 から照射されたレーザー光 L は、無偏光ビームスプリッター 103 のプリズム界面 103a に入射し、光軸に沿って無偏光ビームスプリッター 103 を透過するプローブ光  $L_p$  と、プリズム界面 103a で光軸に対して直交する方向に反射する参照光  $L_r$  とに分岐される。

【0080】

無偏光ビームスプリッター 103 を透過したプローブ光  $L_p$  は、ガスセル 102 に入射し、ガスセル 102 を 1 回透過した後に、偏光ビームスプリッター 104 の第 1 面 104a に入射する。一方、無偏光ビームスプリッター 103 で反射した参照光  $L_r$  は、光学フィルター 105 を透過した後に、ミラー 151 とミラー 152 とによって反射して、偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104b に入射する。

【0081】

第 1 面 104a からプリズム界面 104c に入射した直線偏光であるプローブ光  $L_p$  は、偏光ビームスプリッター 104 を光軸に沿って透過する  $p_1$  波と、プリズム界面 104c で反射する  $s_1$  波とに分岐される。 $p_1$  波は、光軸に沿って進行して PD 106 に入射する。 $s_1$  波は、プリズム界面 104c で光軸に対して直交する方向に反射して PD 107 に入射する。

【0082】

第 2 面 104b からプリズム界面 104c に入射した直線偏光である参照光  $L_r$  は、光軸に対して直交する方向に偏光ビームスプリッター 104 を透過する  $p_2$  波と、プリズム界面 104c で光軸に沿った方向に反射する  $s_2$  波とに分岐される。 $p_2$  波は、光軸に直交する方向に沿って進行して PD 107 に入射する。 $s_2$  波は、プリズム界面 104c で光軸に沿った方向に反射して PD 106 に入射する。すなわち、PD 106 には、 $p_1$  波と  $s_2$  波とが入射し、PD 107 には  $s_1$  波と  $p_2$  波とが入射する。

【0083】

本実施形態の磁場計測装置 150 では、ガスセル 102 に対するレーザー光 L の照射方向と、磁場源 M1 の磁場方向とが合致しており、上述した磁場測定の原理を的確に当てはめることができる。また、ガスセル 102 を透過しない参照光  $L_r$  を偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104b から入射させて  $p_2$  波と  $s_2$  波とに分岐させて、 $s_2$  波を PD 106 に入射させ、 $p_2$  波を PD 107 に入射させる。したがって、上記第 1 実施形態と同様に、プローブ光  $L_p$  に含まれる直線偏光回転ノイズを除いて、本来のプローブ光  $L_p$  の回転角度に基づいて、磁場源 M1 の磁場強度を精度よく測定することができる。なお、偏光ビームスプリッター 104 に入射する参照光  $L_r$  の強度は、参照光  $L_r$  が光学フィルター 105 を透過することで、ガスセル 102 を透過した後に偏光ビームスプリッター 104 に入射するプローブ光  $L_p$  の強度と同等となるように調整される。

【0084】

上記第 1 実施形態の磁場計測装置 100 では、プローブ光  $L_p$  がガスセル 102 を少なくとも 2 回透過する構成とすることで、本実施形態の磁場計測装置 150 よりも高感度に磁場源 M1 の磁場強度を測定可能である。一方で、上記第 1 実施形態の磁場計測装置 100 において、無偏光ビームスプリッター 103 により分岐された参照光  $L_r$  を的確に偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104b に入射させるには、無偏光ビームスプリッター 103 と偏光ビームスプリッター 104 との相対的な位置を精度よく調整する必要がある。これに対して、本実施形態の磁場計測装置 150 は、ガスセル 102 を挟んで無偏光ビームスプリッター 103 と偏光ビームスプリッター 104 とを直線上に配置すればよいことから、相対的な位置の調整が容易である。

【0085】

上記第 1 実施形態の磁場計測装置 100 は、ガスセル 102 に対して、磁場源 M1 を近くに配置することができる点において、磁場強度の測定上、本実施形態の磁場計測装置 150 よりも優れている。本実施形態の磁場計測装置 150 では、ガスセル 102 と磁場源 M1 との間に、偏光ビームスプリッター 104 と、PD 106 とが配置されることから、磁場強度の測定に影響を及ぼさないように、PD 106 は非磁性であることが好ましい。

10

20

30

40

50

## 【0086】

また、本実施形態の磁場計測装置150において、光学フィルターの符号は、上記第1実施形態の磁場計測装置100と同じ符号105を用いたが、実際には、上記第1実施形態の磁場計測装置100では、プローブ光 $L_p$ がガスセル102を少なくとも2回透過することから、ガスセル102を透過した後のプローブ光 $L_p$ の強度は、本実施形態の磁場計測装置150に比べて上記第1実施形態の磁場計測装置100の方が低下する。したがって、第2光学手段としての偏光ビームスプリッター104にプローブ光 $L_p$ と参照光 $L_r$ とを強度が同等な状態で入射させるには、第3光学手段としての光学フィルター105は、光の透過率を変化させることが可能な構成であることが好ましい。

## 【0087】

10

## (第3実施形態)

次に、第3実施形態の磁場計測装置について、図5を参照して説明する。図5は第3実施形態の磁場計測装置の構成を示す概略図である。第3実施形態の磁場計測装置は、上記第1実施形態の磁場計測装置100と同じ構成を有するものであるが、無偏光ビームスプリッター103と偏光ビームスプリッター104との相対的な位置関係を異ならせたものである。したがって、上記第1実施形態の磁場計測装置100と同じ構成には同じ符号を付して、詳細な説明は省略する。

## 【0088】

図5に示すように、本実施形態の磁場計測装置100Bは、直線偏光を照射する光照射手段としてのレーザー光照射装置101と、ガスセル102と、第1光学手段としての無偏光ビームスプリッター103と、第2光学手段としての偏光ビームスプリッター104と、第3光学手段としての光学フィルター105と、入射した光の強度を検出する第1検出部としてのフォトディテクタ(PD)106と、同じく入射した光の強度を検出する第2検出部としてのフォトディテクタ(PD)107と、ミラー108と、を備えている。

20

## 【0089】

レーザー光照射装置101から照射され、無偏光ビームスプリッター103に入射したレーザー光 $L$ は、プローブ光 $L_p$ と参照光 $L_r$ とに分岐される。無偏光ビームスプリッター103を透過したプローブ光 $L_p$ は、受感方向に対して入射角度 $\theta$ でガスセル102に入射する。磁場源M1とガスセル102との間にミラー108が配置されていることから、ガスセル102を透過したプローブ光 $L_p$ は、ミラー108によって反射され、再びガスセル102に入射する。すなわち、プローブ光 $L_p$ は、ガスセル102を2回透過する。

30

## 【0090】

ガスセル102を2回透過したプローブ光 $L_p$ は、偏光ビームスプリッター104に入射する。偏光ビームスプリッター104に入射したプローブ光 $L_p$ は、 $p_1$ 波と $s_1$ 波とに分岐され、 $p_1$ 波は偏光ビームスプリッター104を透過してPD106に入射する。 $s_1$ 波は偏光ビームスプリッター104のプリズム界面104cで反射されてPD107に入射する。

## 【0091】

一方、無偏光ビームスプリッター103のプリズム界面103aで反射した参照光 $L_r$ は、光学フィルター105を透過した後に、偏光ビームスプリッター104の第2面104bに入射する。光学フィルター105を透過した参照光 $L_r$ の強度 $W_2$ は、偏光ビームスプリッター104の第1面104aに入射する直前のプローブ光 $L_p$ の強度 $W_1$ とほぼ同等となっている。

40

## 【0092】

偏光ビームスプリッター104に入射した参照光 $L_r$ は、偏光ビームスプリッター104を透過する $p_2$ 波と、偏光ビームスプリッター104のプリズム界面104cで反射した $s_2$ 波とに分岐される。 $p_2$ 波はPD107に入射し、 $s_2$ 波はPD106に入射する。

## 【0093】

本実施形態では、PD106に入射する $p_1$ 波の光軸と $s_2$ 波の光軸とが同じであると共

50

に、 $p_1$ 波の位相と $s_2$ 波の位相とが同じになっている。また、PD 107に入射する $p_2$ 波の光軸と $s_1$ 波の光軸とが同じであると共に、 $p_2$ 波の位相と $s_1$ 波の位相とが同じになっている。言い換えれば、PD 106に入射する $p_1$ 波と $s_2$ 波とにおいて、その光軸と位相とが同じになるように、またPD 107に入射する $p_2$ 波と $s_1$ 波とにおいて、その光軸と位相とが同じになるように、無偏光ビームスプリッター103と偏光ビームスプリッター104とがレーザー光L（プローブ光Lp）の光軸上に配置されている。

【0094】

次に、このような磁場計測装置100Bにおけるレーザー光Lが照射された空間の空気の振動などによる直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズの低減方法について、数式(20)～数式(27)を参照して説明する。

10

【0095】

上記第1実施形態で説明したように、磁場測定における本来の回転角度を $\alpha$ とし、直線偏光回転ノイズの回転角度を $\omega$ とすると、図3に示した $\theta = \alpha + \omega$ となる。これを上記第1実施形態で説明した磁場測定の原理における数式(6)、数式(7)に当てはめると、 $p_1$ 波の振幅 $P_1$ 、 $s_1$ 波の振幅 $S_1$ 、 $p_2$ 波の振幅 $P_2$ 、 $s_2$ 波の振幅 $S_2$ は、以下の数式(20)～数式(23)によって導かれる。

【0096】

【数20】

$$P_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos(\alpha + \omega) - \sin(\alpha + \omega)) \quad \cdots (20)$$

20

【0097】

【数21】

$$S_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos(\alpha + \omega) + \sin(\alpha + \omega)) \quad \cdots (21)$$

【0098】

【数22】

$$P_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos \omega - \sin \omega) \quad \cdots (22)$$

30

【0099】

【数23】

$$S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos \omega + \sin \omega) \quad \cdots (23)$$

40

【0100】

PD 106に入射した直線偏光の振幅 $P_4$ は、 $P_4 = P_1 + S_2$ であり、PD 107に入射した直線偏光の振幅 $S_4$ は、 $S_4 = S_1 + P_2$ であることから、 $P_4$ 、 $S_4$ は以下の数式(24)、数式(25)で導かれる。

【0101】

【数24】

$$P_4 = P_1 + S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos(\alpha + \omega) - \sin(\alpha + \omega) + \cos \omega + \sin \omega) \quad \cdots (24)$$

50



【 0 1 0 2 】

【 数 2 5 】

$$S_4 = S_1 + P_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} W (\cos(\alpha + \omega) + \sin(\alpha + \omega) + \cos \omega - \sin \omega) \quad \dots (25)$$

【 0 1 0 3 】

この場合の P D 1 0 7 に入射した直線偏光の強度である  $S_4^2$  と、 P D 1 0 6 に入射した直線偏光の強度である  $P_4^2$  との差を  $U_1$  とすると、  $U_1$  は、以下の数式 ( 2 6 ) で導かれる。

10

【 0 1 0 4 】

【 数 2 6 】

$$\begin{aligned} U_1 &= S_4^2 - P_4^2 \\ &= 2W^2 \left[ \sin(\alpha + \omega) \cos(\alpha + \omega) + \sin(\alpha + \omega) \cos \omega \right. \\ &\quad \left. - \sin \omega \cos(\alpha + \omega) - \sin \omega \cos \omega \right] \\ &= 2W^2 \left[ \sin(\alpha + \omega) - \sin \omega \right] \left[ \cos(\alpha + \omega) + \cos \omega \right] \\ &= 8W^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\alpha + 2\omega}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha + 2\omega}{2} \right) \cos \frac{\alpha}{2} \\ &= 2W^2 \sin \alpha \cos^2 \left( \frac{\alpha + 2\omega}{2} \right) \end{aligned} \quad \dots (26) \quad 20$$

【 0 1 0 5 】

上記第 1 実施形態において説明したように、本来の回転角度 と直線偏光回転ノイズの回転角度 との関係は、  $\frac{\pi}{2}$  であり、且つ、  $\frac{\pi}{2}$  の値も極小さいものとして (  $\frac{\pi}{2} + 2\pi$  ) 0 として近似することが可能であることから、数式 ( 2 6 ) に (  $\frac{\pi}{2} + 2\pi$  ) 0 を適用すると、以下の数式 ( 2 7 ) が導かれる。

30

【 0 1 0 6 】

【 数 2 7 】

$$U_1 = 2 W^2 \sin \alpha \quad \dots (27)$$

【 0 1 0 7 】

数式 ( 2 7 ) に示すように、本来の回転角度を  $\theta$  とし、直線偏光回転ノイズの回転角度を  $\theta_n$  とすると、  $U_1$  は回転角度  $\theta$  の正弦値として得られる。つまり、直線偏光回転ノイズに係る回転角度  $\theta_n$  の影響を除いて、本来の回転角度  $\theta$  に基づく磁場の測定が可能となる。

40

【 0 1 0 8 】

直線偏光回転ノイズに係る回転角度  $\theta_n$  の影響が除かれることから、回転角度  $\theta$  の回転方向 (  $\pm$  ) は無視できる。また、本来の回転角度  $\theta$  の回転方向 (  $\pm$  ) に関わらず磁場の測定が可能である。

【 0 1 0 9 】

上記第 3 実施形態の磁場計測装置 1 0 0 B は、レーザー光照射装置 1 0 1 から照射されたレーザー光 L をプローブ光 L p と参照光 L r とに分岐する無偏光ビームスプリッター 1 0 3 と、ガスセル 1 0 2 を透過したプローブ光 L p の強度に対して参照光 L r の強度を同

50

等とする光学フィルター 105 とを備えている。このような磁場計測装置 100 B によれば、ガスセル 102 を透過したプローブ光  $L_p$  を偏光ビームスプリッター 104 に入射させて分岐し、分岐した  $p_1$  波を PD 106 へ入射させ、分岐した  $s_1$  波を PD 107 に入射させる。また、ガスセル 102 を透過しない参照光  $L_r$  を偏光ビームスプリッター 104 に入射させて分岐し、分岐した  $s_2$  波を PD 106 へ入射させ、分岐した  $p_2$  波を PD 107 に入射させる。また、PD 106 に入射する  $p_1$  波と  $s_2$  波とにおいて、その光軸と位相とが同じになるように、また、PD 107 に入射する  $p_2$  波と  $s_1$  波とにおいて、その光軸と位相とが同じになるように、無偏光ビームスプリッター 103 と偏光ビームスプリッター 104 とがレーザー光  $L$  (プローブ光  $L_p$ ) の光軸上に配置されている。したがって、PD 106 と PD 107 とに入射した直線偏光の強度の差  $U_1$  を求めると、直線偏光であるプローブ光  $L_p$  に直線偏光回転ノイズが含まれていても、 $U_1$  は本来の回転角度の正弦値として表される。つまり、直線偏光回転ノイズの回転角度の影響が除かれて、本来の回転角度に基づく磁場の測定が可能となる。すなわち、直線偏光回転ノイズを含む光学ノイズを低減して、精度よく磁場源 M1 の磁場を測定することができる。

10

#### 【0110】

本発明は、上記した実施形態に限られるものではなく、請求の範囲および明細書全体から読み取れる発明の要旨あるいは思想に反しない範囲で適宜変更可能であり、そのような変更を伴う磁場計測装置もまた本発明の技術的範囲に含まれるものである。上記実施形態以外にも様々な変形例が考えられる。以下、変形例を挙げて説明する。

20

#### 【0111】

(変形例 1) 上記第 2 実施形態の磁場計測装置 150 において、非磁性のミラー 151, 152 の配置は、これに限定されない。図 6 は変形例の磁場計測装置の構成を示す概略図である。例えば、図 6 に示す変形例の磁場計測装置 150 B は、上記第 2 実施形態の磁場計測装置 150 に対して、1 つの非磁性のミラー 151 を用いた例を示すものである。具体的には、磁場計測装置 150 B は、レーザー光照射装置 101 と、ガスセル 102 と、無偏光ビームスプリッター 103 と、偏光ビームスプリッター 104 と、光学フィルター 105 と、PD 106 と、PD 107 と、1 つの非磁性のミラー 151 と、を備えている。レーザー光  $L$  は無偏光ビームスプリッター 103 によってプローブ光  $L_p$  と参照光  $L_r$  とに分岐される。分岐された参照光  $L_r$  は光学フィルター 105 を透過した後に、ミラー 151 で反射して、偏光ビームスプリッター 104 の第 2 面 104 b に入射する構成となっている。つまり、分岐された参照光  $L_r$  がミラー 151 に入射するように、レーザー光照射装置 101 とガスセル 102 との間の光軸上におけるプリズム界面 103 a の向きが設定されるよう無偏光ビームスプリッター 103 を回転させている。変形例の磁場計測装置 150 B では、1 つのミラー 151 を用いているので、複数のミラーを用いる場合に比べて装置構成が簡素化される。なお、非磁性のミラーの数は、1 つあるいは 2 つに限定されず、3 つ以上のミラーを用いて参照光  $L_r$  を第 2 面 104 b に導いてもよい。

30

#### 【0112】

(変形例 2) 上記各実施形態の磁場計測装置において、第 2 光学手段である偏光ビームスプリッター 104 にプローブ光  $L_p$  と参照光  $L_r$  とを入射させる光学手段は、非磁性のミラーに限定されない。プローブ光  $L_p$ 、参照光  $L_r$  のそれぞれの光路に例えばプリズムを挿入して、第 1 面 104 a にプローブ光  $L_p$  を入射させ、第 2 面 104 b に参照光  $L_r$  を入射させてもよい。

40

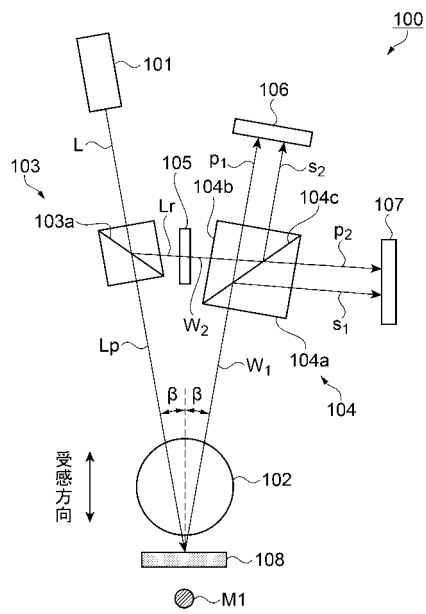
#### 【符号の説明】

#### 【0113】

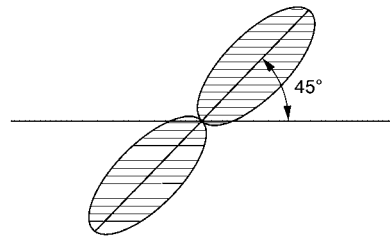
100, 150 ... 磁場計測装置、101 ... 光照射手段としてのレーザー光照射装置、102 ... ガスセル、103 ... 第 1 光学手段としての無偏光ビームスプリッター、104 ... 第 2 光学手段としての偏光ビームスプリッター、104 a ... 第 1 面、104 b ... 第 2 面、105 ... 第 3 光学手段としての光学フィルター、106 ... 第 1 検出部としてのフォトディテクタ (PD)、107 ... 第 2 検出部としてのフォトディテクタ (PD)、108, 151, 152 ... 非磁性のミラー、 $L_p$  ... プローブ光、 $L_r$  ... 参照光、M1 ... 磁場源。

50

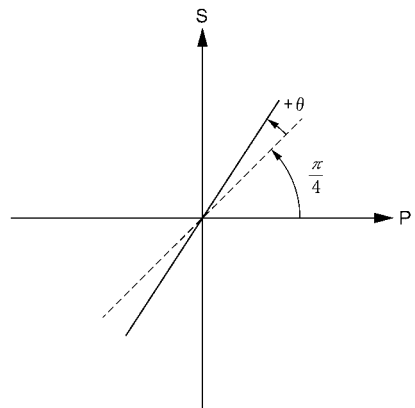
【図 1】



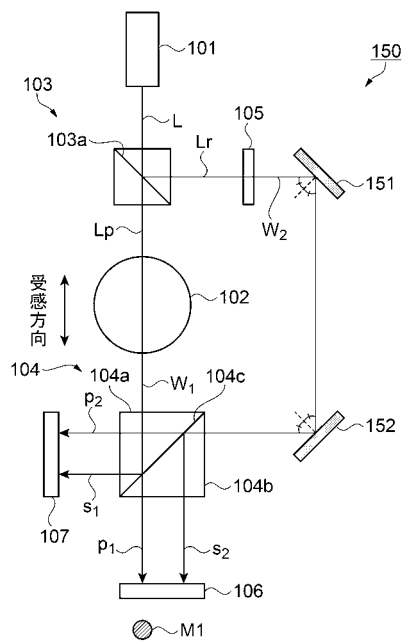
【図 2】



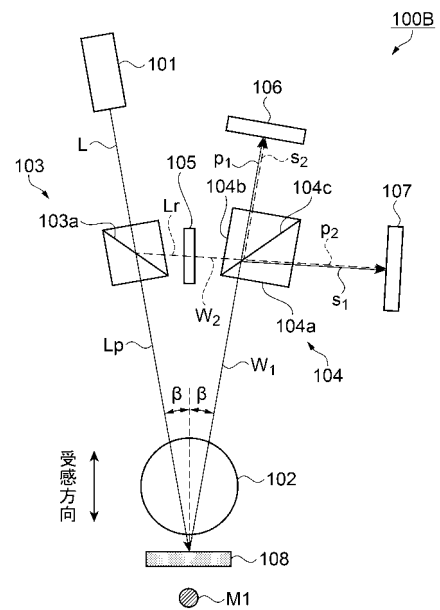
【図 3】



【図 4】



【図 5】



【 図 6 】

