

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5178187号

(P5178187)

(45) 発行日 平成25年4月10日 (2013. 4. 10)

(24) 登録日 平成25年1月18日 (2013. 1. 18)

(51) Int. Cl.

F I

G O 1 R 33/032 (2006.01)

G O 1 R 33/032

請求項の数 8 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2007-340474 (P2007-340474)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成19年12月28日 (2007. 12. 28)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2009-162554 (P2009-162554A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成21年7月23日 (2009. 7. 23)	(74) 代理人	100123788
審査請求日	平成22年12月24日 (2010. 12. 24)		弁理士 宮崎 昭夫
(出願人による申告) 平成18年度、文部科学省、「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成 (高次生体イメージング先端テクノハブ)」に係わる委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(74) 代理人	100106138
			弁理士 石橋 政幸
		(74) 代理人	100127454
			弁理士 緒方 雅昭
		(72) 発明者	小林 哲生
			京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学
			法人京都大学大学院工学研究科内
		(72) 発明者	杉岡 秀行
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
			ヤノン株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子磁気センサ、及び磁気センシング方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

空洞を有するセルと、

前記セルの前記空洞に内包され、直線偏光光であるプローブ光が伝播する媒体を構成する原子群であって、前記プローブ光が前記媒体を第1、第2の測定位置の順に通過し、前記媒体が前記第1及び第2の測定位置において、磁場強度に応じて前記プローブ光の偏光回転角を変化させる原子群と、

前記プローブ光を前記セルに照射するためのプローブ光用光源と、

前記原子群を構成する複数の原子のスピンの向きを揃える円偏光光をポンプ光として、前記第1及び第2の測定位置で前記プローブ光の照射方向と交差するように前記セルに照射するためのポンプ光用光源と、

前記プローブ光の偏光回転角を検出するための検出器と、を含み、

前記第1の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角と、前記第2の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角との光学的差演算を行うように構成されていることを特徴とする原子磁気センサ。

【請求項2】

前記第1及び第2の測定位置は、それぞれ第1及び第2のセル内に設けられており、且つ前記第1のセルと前記第2のセルとの間には、前記プローブ光が通過するように構成されている半波長板が設けられている、請求項1に記載の原子磁気センサ。

【請求項3】

10

20

前記第 1 及び第 2 の測定位置は、同一の前記セル内またはそれぞれ第 1 及び第 2 のセル内に設けられており、且つ前記第 1 の測定位置を通過した前記プローブ光の進行方向を逆にして前記第 2 の測定位置を通過させるための光路変換手段が設けられている、請求項 1 に記載の原子磁気センサ。

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 の測定位置は、同一の前記セル内またはそれぞれ第 1 及び第 2 のセル内に設けられており、且つ前記第 1 及び第 2 の測定位置に照射される前記円偏光光は、ともに右円偏光光あるいは左円偏光光のいずれかであり、前記第 1 及び第 2 の測定位置に照射される前記円偏光光は光路が互いに逆向きである、請求項 1 に記載の原子磁気センサ。

【請求項 5】

前記第 1 及び第 2 の測定位置は、同一の前記セル内またはそれぞれ第 1 及び第 2 のセル内に設けられており、且つ前記第 1 及び第 2 の測定位置に照射される前記円偏光光は、互いに逆回りの円偏光光であり、前記第 1 及び第 2 の測定位置に照射される前記円偏光光は光路がともに同じ向きである、請求項 1 に記載の原子磁気センサ。

【請求項 6】

同一セル内またはそれぞれ第 1 及び第 2 のセル内の前記第 1 及び第 2 の測定位置に加えて、該第 1 及び第 2 の測定位置とは異なる測定位置を有するように構成されている、請求項 1 に記載の原子磁気センサ。

【請求項 7】

前記ポンプ光用光源からのレーザ光を右円偏光光と左円偏光光との光強度を等しくするための偏光素子を有する部材が設けられ、前記ポンプ光用光源からのレーザ光を前記部材を透過させた後、前記セルに円偏光光が照射されるように構成されている、請求項 1 に記載の原子磁気センサ。

【請求項 8】

セルが有する空洞に内包され、直線偏光光であるプローブ光が伝播する媒体を構成する原子群に対して、ポンプ光を照射することによって該原子群を構成する原子のスピンの向きを揃え、原子のスピンの向きが揃えられた前記原子群に前記プローブ光を照射して、磁場強度に応じて前記プローブ光の偏光回転角を変化させ、該プローブ光の偏光回転角を測定する磁気センシング方法であって、

前記セル内の原子群に対するポンプ光となる円偏光光を、該円偏光光の照射方向が前記プローブ光の照射方向と前記媒体の第 1 の測定位置で交差すると共に、前記プローブ光が前記第 1 の測定位置を通過した前記媒体の第 2 の測定位置で交差するように照射することと、

前記第 1 の測定位置での磁場強度によりその偏光面が回転された前記プローブ光を、前記プローブ光の偏光回転角の光学的差演算を行うように前記第 2 の測定位置に導き、該第 2 の測定位置を通過した前記プローブ光の偏光回転角を測定することによって、互いに異なる 2 つの位置における磁場強度の差を取得することを特徴とする磁気センシング方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁場強度を計測する磁気センサに関する。特に、本発明は、アルカリ金属ガスまたは希ガスを利用した原子磁気センサ及び磁気センシング方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、アルカリ金属ガスや希ガスのスピンを利用した高感度の原子磁気センサが提案されている。特許文献 1 には、アルカリ金属蒸気が存在するセルに対して、ポンプ光用の円偏光光源から円偏光を、プローブ光用の直線偏光光源から直線偏光光を照射することを特徴とする原子磁気センサが提案されている。そして、プローブ光の偏光回転角を測定するために、フォトダイオードアレイを光検出器として用いている。

【特許文献 1】 米国特許第 7 0 3 8 4 5 0 号明細書

10

20

30

40

50

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

ところで、測定位置の違いによる磁場強度に関する情報を、磁場勾配情報として計測することがある。斯かる場合は、それぞれの測定位置に対応した光検出器で検出して得られる電気的な信号の差分情報を使って、磁場強度の差分情報（磁場勾配情報）を取得することになる。

【0004】

しかしながら、実際には、個々の光検出器自体の増幅率やノイズに関する条件は必ずしも厳密に揃っていないと考えられる。つまり、光検出器から取得された電気信号を用いて磁場勾配情報を取得しようとする、当該情報には個々の光検出器の特性差異に基づくノイズが混入してしまっているという懸念点がある。

10

【0005】

そこで、本発明者らは上記懸念点を踏まえ、鋭意検討したところ、測定位置の違いに基づく微小な磁場強度の差を、直線偏光プローブ用レーザー光の偏光回転角の差に置き換えて測定することにより、高感度な磁場勾配の計測が可能になるという考えに至った。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明に係る磁気センシング方法は、

セルが有する空洞に内包され、直線偏光光であるプローブ光が伝播する媒体を構成する原子群に対して、ポンプ光を照射することによって該原子群を構成する原子のスピンの向きを揃え、原子のスピンの向きが揃えられた前記原子群に前記プローブ光を照射して、磁場強度に応じて前記プローブ光の偏光回転角を変化させ、該プローブ光の偏光回転角を測定する磁気センシング方法であって、

20

前記セル内の原子群に対するポンプ光となる円偏光光を、該円偏光光の照射方向が前記プローブ光の照射方向と前記媒体の第1の測定位置で交差すると共に、前記プローブ光が前記第1の測定位置を通過した前記媒体の第2の測定位置で交差するように照射することと、

前記第1の測定位置での磁場強度によりその偏光面が回転された前記プローブ光を、前記プローブ光の偏光回転角の光学的差演算を行うように前記第2の測定位置に導き、該第2の測定位置を通過した前記プローブ光の偏光回転角を測定することによって、互いに異なる2つの位置における磁場強度の差を取得することを特徴とする。

30

【0008】

本発明に係る原子磁気センサは、

空洞を有するセルと、

前記セルの前記空洞に内包され、直線偏光光であるプローブ光が伝播する媒体を構成する原子群であって、前記プローブ光が前記媒体を第1、第2の測定位置の順に通過し、前記媒体が前記第1及び第2の測定位置において、磁場強度に応じて前記プローブ光の偏光回転角を変化させる原子群と、

前記プローブ光を前記セルに照射するためのプローブ光用光源と、

40

前記原子群を構成する複数の原子のスピンの向きを揃える円偏光光をポンプ光として、前記第1及び第2の測定位置で前記プローブ光の照射方向と交差するように前記セルに照射するためのポンプ光用光源と、

前記プローブ光の偏光回転角を検出するための検出器と、を含み、

前記第1の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角と、前記第2の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角との光学的差演算を行うように構成されていることを特徴とする。

【発明の効果】

【0009】

このように本発明は、互いに異なる2つの測定位置における磁場強度の差を、プローブ

50

光の偏光回転角の差として直接測定することにより、高感度センサを提供するものである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

(第1の実施形態：磁気センシング方法)

本実施形態に係る磁気センシング方法に関する発明について、図1を用いて説明する。ここでいう磁気センシング方法とは、以下の特徴を有する。

【0011】

すなわち、セルが有する空洞に内包されている原子群に対して、ポンプ光を照射することによって該原子群を構成する原子のスピン向きを揃える。そして、原子のスピン向きが揃えられた前記原子群にプローブ光としての直線偏光光を照射して、該プローブ光の偏光面の回転角を測定することにより測定磁場強度に関する情報を取得しようとする方法である。

10

【0012】

本実施形態に係る発明においては、図1に記載されているように、まず、第1の測定位置での磁場強度によりプローブ光の偏光方向を回転させる(S1)。そして、当該第1の測定位置での磁場強度によりその偏光方向が回転された前記プローブ光を、前記プローブ光の偏光回転角の光学的差演算となるように第2の測定位置に導く(S2)。次に、該第2の測定位置を通過した前記プローブ光の偏光面の回転角を測定する(S3)。こうすることによって、互いに異なる2つの位置における磁場強度の差に関する情報を取得することが可能となる。

20

【0013】

ここで、原子磁気センサを用いたセンシング方法における特徴的な要素について詳述する。

【0014】

A：セル

セルはガラスやプラスチックなどプローブ光やポンプ光を透過し得る材料から構成される。当該セル内には、原子群あるいは原子集団として、アルカリ金属(KやRbなど)がガス状態で包含される。勿論、センシングの際にガス状態(蒸気)となるのであれば、センシングを行っていない時には、必ずしもガス状態となっている必要はない。例えば、ガラスセルにカリウム金属を入れておき、180℃程度に加熱することで、同ガラスセル内に、カリウム金属の蒸気を充満させることができる。

30

【0015】

また、セル内に包含される原子群としては、アルカリ金属原子に限らず、上記したセンシング方法を行うことができれば特に材料も限定されない。更に、セル内には、前記原子群の他にバッファーとなるガスを封入しておくこともできる。また、原子群として、K、Rbのほか、Xeなども混入させることができる。

【0016】

B：ポンプ光

ポンプ光は、円偏光光自体、即ち実質的に円偏光光だけからなることが望ましいが、本実施形態に係る発明においては、当該円偏光成分を有していれば他の偏光成分を含有していることを除外するものではない。

40

【0017】

このポンプ光は、原子群を構成する各原子の電子スピンの向きを揃えるために用いられる。具体的には、円偏光ポンピングと呼ばれる現象を用いて、原子のスピン向きを揃えることができ、右円偏光のポンプ光を用いると、それぞれランダムな向きを持った原子のスピン向きをポンプ光の進行方向に揃えることができる。なお、左円偏光のポンプ光では、ポンプ光の逆方向に原子のスピン向きを揃えることができる。なお、原子のスピン向きを揃えるとは、厳密には、セルに内包される物質がアルカリ金属の場合には電子スピンの向きを揃えることを意味し、希ガスの場合には、原子核のスピン(核スピン)の向

50

きを揃えることを意味する。

【0018】

このようにスピンの向きを揃えることができるのは、円偏光の光は角運動量を持つため、角運動量保存により、光を吸収しないスピンの向きが存在するからである。一旦励起された原子は、自然放出によりランダムな偏光状態の光を放出し、互いに異なる基底状態を取り得るが、このポンピングを繰り返すことにより、最終的には原子群を構成するそれぞれの原子のスピンの向きを揃えることが可能となる。

【0019】

C：プローブ光

プローブ光は、不必要なポンピングを避けるため、また、吸収を避けるために、原子の共鳴周波数からある程度離調してあることが望ましい。また、プローブ光は、直線偏光だけからなることが望ましいが、本実施形態に係る発明においては、当該直線偏光成分を有していれば他の偏光成分を含有していることを除外するものではない。

【0020】

そして、このプローブ光と前記ポンプ光とのセル内の原子群への照射方向が、それぞれの測定位置で交差するように、装置は構成される。前記プローブ光と前記ポンプ光との照射方向は交差すれば特に制限されるものではないが、一般的には、両方の照射方向が直交するように構成される。

【0021】

偏極している原子群に、直線偏光の光をx方向に入射させると、非線形ファラデー効果やコットン-ムートン効果等を含む広義のファラデー回転とも呼べる磁気光学効果により、偏光面が回転することが知られている。具体的には、入射方向に沿って進行しているプローブ光の偏光角は、プローブ光に平行または直交する測定磁場によってyz面内で回転する。そして、この回転角が磁場の大きさに対応して変化することを利用した磁気センサが知られている。

【0022】

本実施形態に係る発明においても、前述のポンプ光によって、偏極原子群を形成し、前記セル内の当該原子群に直線偏光のプローブ光を入射させ、セルを通過する前後で、前記プローブ光の偏光回転角に関する情報を取得する。

【0023】

光源に関しては、ポンプ光とプローブ光でそれぞれ個別の光源を用いてもよいし、光源は共通として、偏光板等を利用することで、円偏光のポンプ光と直線偏光のプローブ光とを作り出すこともできる。なお、ポンプ光とプローブ光を出力するための光源としては、レーザ光源を用いることができる。例えば、セル内の原子群あるいは原子集団としてカリウムを使用する場合には、0.02 nmから1 nmの範囲で互いに離調された波長が約770 nmのレーザ光源を利用できる。

【0024】

D：プローブ光の偏光面の回転角に関する情報の取得

偏光面（あるいは偏光方向）の回転角に関する情報は、例えば、前記セルを通過したプローブ光を偏光板を介してフォトダイオード列で検出することで取得することができる。勿論、偏光面の回転角に関する情報を取得することができるのであれば、前記フォトダイオード列による検出手段以外の方法も適宜採用することができる。

【0025】

具体的には、クロスニコル型ポラリメータ、または、バランス型ポラリメータによりプローブ光の偏光回転角は検出される。詳細には、後述の実施例においてその例を示している。

【0026】

E：光学的差演算（光演算）を行うための手法

互いに異なる2つの測定位置（当該位置が、同一セル内である場合は勿論、それぞれ、別のセル内にある場合も含む。）における磁場強度の差分情報を原子磁気センサを用いた

10

20

30

40

50

磁気センシング方法により行う場合、夫々の位置における以下の要素を適宜組み合わせることにより可能となる。

【0027】

- (1) ポンプ光としての円偏光光の測定位置への入射方向
 - (2) ポンプ光としての円偏光光の回転方向（右円偏光光か左円偏光光）
 - (3) プローブ光の測定位置への入射方向
 - (4) プローブ光の偏光回転角に関する操作の有無
- （第2の実施形態：原子磁気センサ）

本実施形態に係る原子磁気センサは、以下の特徴を有する。具体的には、空洞を有するセルと、前記セルの前記空洞に内包されている原子群と、前記原子群を構成する複数の原子のスピンの向きを揃えるためのポンプ光用光源とを有する。さらに、プローブ光としての直線偏光光を前記セルに照射するためのプローブ光用光源と、前記直線偏光光の偏光面の回転角に関する情報を検出するための検出器とを含み構成される。

10

【0028】

ここで、セル内の原子群に対する、ポンプ光となる円偏光光の照射方向と、前記プローブ光の照射方向とが、第1の測定位置で交差するように構成される。

【0029】

そして、ポンプ光となる円偏光光と、前記第1の測定位置を通過した前記プローブ光との前記原子群に対する照射方向とが、前記第1の位置とは異なる第2の測定位置で交差するように構成される。また、前記第1の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角と、前記第2の測定位置での磁場強度による前記プローブ光の偏光回転角との光学的差演算を行うように構成される。

20

【0030】

具体的に、光学的差演算を行うための構成としては、以下の(1)から(4)の構成が挙げられるが、本発明は以下に示す構成に限定されるものではない。

(1) 前記第1及び第2の測定位置は、それぞれ第1の及び第2のセル内に設けられており、且つ前記第1のセルと前記第2のセルとの間には、前記プローブ光が通過するように構成されている半波長板が設けられる（図2）。

(2) 前記第1及び第2の測定位置は、同一セル内に設けられており、且つ前記第1の測定位置を通過した前記プローブ光の進行方向を逆にして前記第2の測定位置を通過させるための光路変換手段が設けられる（図3、4）。

30

(3) 前記第1及び第2の測定位置は、同一セル内に設けられている。そして、前記第1及び第2の測定位置に照射される前記円偏光光は、ともに右円偏光光あるいは左円偏光光のいずれかであり、前記第1及び第2の測定位置に照射される前記円偏光光は互いに逆向きである（図5）。

(4) 前記第1及び第2の測定位置は、同一セル内に設けられており、且つ前記第1及び第2の測定位置に照射される前記円偏光光は、互いに逆回りの円偏光光であり、前記第1及び第2の測定位置に照射される前記円偏光光はともに同じ向きである（図6）。

【0031】

なお、本実施形態に係る原子磁気センサにおいては、同一セル内に前記第1及び第2の測定位置に加えて、該第1及び第2の測定位置とは異なる測定位置を有するように構成することもできる（図7、8、10）。

40

【0032】

また、前記ポンプ光用光源からのレーザ光を右円偏光光と左円偏光光との光強度を等しくするための偏光素子を有する部材を透過させた後、前記セルに円偏光光が照射されるように構成することもできる（図9、10）。

【0033】

更にまた、本実施形態に係る発明においては、原子群が内包されているセルとしては、それぞれの測定位置に応じて別個のセルを用いることもできる。また、同一セル内に互いに異なる複数の測定位置を設けることもできる。但し、別個のセルを用いる場合には、そ

50

れぞれのセルに内包される原子群の種類や量を厳密に揃えておくことが好ましい。

【0034】

(第3の実施形態：磁気センサ)

上記第1及び第2の実施形態においては、ポンプ光として円偏光光を使用する場合を前提として説明したが、以下に示すように、必ずしも当該ポンプ光は必須ではない。

【0035】

具体的には、プローブ光用光源と、プローブ光が伝播する媒体とを備えた磁気センサである。

【0036】

ここで、前記媒体は、第1及び第2の測定位置を有すると共に、プローブ光が伝播する際の該第1及び第2の位置における磁場強度に応じて偏光回転角が変化する物質であり、具体的には、カリウム、セシウムなどのアルカリ金属蒸気である。また、ヘリウム、キセノンなどの希ガスも利用することができる。更にまた、Fe、Co、Ni、 Y_3Fe_{12} 、MnSb、MnBi、 $YFeO_3$ 、 $NdFe_3$ 、 $CrBr_3$ 、EuO、 $CdCr_2S_4$ などの磁性体やガラス等の物質の適用も可能である。そして、前記プローブ光の伝播経路に沿って、前記媒体内の前記第1及び第2の測定位置における磁場強度の差を偏光回転角の差として直接測定することによっても磁場勾配計を実現できる。

【0037】

具体的には、実施例8及び9において詳述している。

【0038】

以下に、より詳細な実施例を用いて、本発明を説明する。

【実施例】

【0039】

(実施例1)

図2は、本発明の実施例1の特徴を示す図である。

【0040】

同図において、1a、1bは円偏光ポンピング用レーザー光、2は直線偏光プローブ用レーザー光、3はアルカリ金属蒸気または希ガスをスピンの歳差運動として模式的に示したものである。

【0041】

4a、4bは該アルカリ金属蒸気または希ガスを封入したセルであり、6aと6bはz軸方向の静磁場キャンセル用またはバイアス磁場印加用のヘルムホルツコイルを模式的に示したものである。なお、y軸、x軸方向にもヘルムホルツコイルを準備し、3軸ヘルムホルツコイル（不図示）とすることもできる。

【0042】

また、11は第一の測定位置、12は第二の測定位置、13と14は偏光軸が互いに直交する位置にある偏光板、すなわち互いにクロスニコルの位置にある偏光板である。15はプローブ光に微小な偏光角の振動を与えるためのファラデーモジュレータである。16は光検出器であり、例えばフォトダイオード等により構成されている。

【0043】

9はアルカリ金属セル4a、4bの温度を一定に保持する恒温槽であり、23は半波長板である。第一の測定位置11を透過することによってプローブ光（直線偏光）の偏光面の回転角が23の結晶軸に対して $+\phi$ であるとする、前記半波長板を透過させることにより、23の結晶軸に対して符号が反転し $-\phi$ となる。

【0044】

また、第一の測定位置11におけるy方向の磁場（磁束密度）を B_{y1} とし、第二の測定位置12におけるy方向の磁場を B_{y2} とする。

【0045】

本実施例は、プローブ光と、該プローブ光が伝播するとき磁場強度に応じて偏光回転角が変化する媒体と、前記媒体の第一及び第二の測定位置を有する磁気センサである。そし

10

20

30

40

50

て、前記プローブ光の伝播経路に沿って、第一及び第二の測定位置における磁場強度の差を偏光回転角の差として直接測定することを特徴とする。

【0046】

また、本実施例では、プローブ光を備えたアルカリ金属ガスまたは希ガスを用いた原子磁気センサにおいて、アルカリ金属蒸気または希ガスを封入したセル4a、4bとプローブ光2と第一及び第二の測定位置11、12を有する構成である。そして、第一及び第二の測定位置11、12における磁場強度の差($B_{y2} - B_{y1}$)を、偏光回転角の差($\phi_2 - \phi_1$)として直接測定することにより、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度センサを提供するものである。

【0047】

本実施例1は、特に、半波長板23を有し、前記プローブ光を前記第一のセル4a通過後、前記半波長板23により偏光回転方向を反転させ、前記第二のセル4bを通過させる。これによって、第一及び第二の測定位置11、12における磁場強度の差($B_{y2} - B_{y1}$)を、偏光回転角の差($\phi_2 - \phi_1$)として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度磁気センサを提供する。

【0048】

ここで、アルカリ金属蒸気等が封入されているセルに、円偏光レーザ光(ポンプ光)とプローブ光を入射することにより磁場計測を行う原子磁気センサとは、以下の原理に基づくものである。すなわち、円偏光レーザ光(ポンプ光)によって励起された電子スピンの示すマクロな磁化の測定磁場による回転を、プローブ光として入射された直線偏光の偏光方向の回転として測定するものであり、静磁場や振動磁場を高感度に測定できる磁気センサである。

【0049】

図2に示したxyz座標系において、円偏光レーザ光1a、1bをz軸方向に照射し、プローブ光(直線偏光光)をx軸方向に照射し、y軸方向に測定対象となる磁場 B_y がある系をまず考える。このとき、電子スピンの示すマクロな磁化ベクトル $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)$ は、以下の光ブロッホ方程式によって記述される。

【0050】

【数1】

$$d\mathbf{m}/dt = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{m} - \gamma_{eff} \mathbf{m} + \mathbf{P} \dots \dots (1)$$

【0051】

ここで、既述のように $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)$ は励起された電子スピンの示すマクロな磁化であり、 $\boldsymbol{\Omega} = (0, \Omega_{eff}, 0)$ は磁場に関するパラメータである。 $\mathbf{P} = (0, 0, P)$ はポンプ光に関するパラメータ、 γ_{eff} は緩和に関するパラメータである。ただし、 $\Omega_{eff} = \gamma_e B_y / Q$ 、 $\gamma_{eff} = (R_{SD} + R_p) / Q$ 、 $P = R_p / Q$ 、 $\gamma_e = g \mu_B / \hbar$ である。なお、Qはスローダウンファクター、 $\hbar$ はプランク定数、 $g (= 2.0023)$ はg因子、 R_p は光ポンピングレート、 R_{SD} はスピン緩和レート、 μ_B はボーア磁子である。

【0052】

B_y が静磁場の場合、(1)式の定常解は $dm/dt=0$ より、
 $(m_x, m_y, m_z) = (P \Omega_{eff} / (\Omega_{eff}^2 + \gamma_{eff}^2), 0, -P \gamma_{eff} / (\Omega_{eff}^2 + \gamma_{eff}^2)) \dots \dots (2)$
 となる。

【0053】

このとき、x軸方向に伝搬する直線偏光光であるプローブ光に関して、その偏光方向の磁場による偏光回転角 ϕ は、x軸方向に対して右ネジの回転方向を正として、
 $\phi (= \pi L (n^+ - n^-) / \lambda) = 2 \pi L m_x (n_0 - 1) / \lambda \dots \dots (3)$
 となる。ここで、Lは伝搬距離、 λ は波長、 n^+ 、 n^- はそれぞれ、右回り円偏光に対する屈

10

20

30

40

50

折率と左回り円偏光に対する屈折率である。 n_0 はスピン分極がない場合の媒体の屈折率である。

【0054】

よって、(2)(3)式より、静磁場による偏光回転角は、磁場 B_y が弱く、 $\Omega_{eff} \ll \gamma_e$ と近似できるとき、

$$\phi = \alpha_A B_y \cdots \cdots (4)$$

$$\alpha_A = 2\pi L (n_0 - 1) P \gamma_e / (\lambda Q \gamma_{eff}^2) \cdots \cdots (5)$$

となる。それゆえ、偏光回転角 ϕ の回転方向は $m_x (= P \Omega / \gamma_{eff}^2)$ の符号に依存し、最終的には、 $P B_y$ の符号に依存することがわかる。ここで、 $P = R_p / Q$ の符号は、 z 軸方向の右回り円偏光では正、 z 軸方向の左回り円偏光では負となり、 $-z$ 軸方向の右回り円偏光では負、 $-z$ 軸方向の左回り円偏光では正となる。

10

【0055】

また、実施例1は、互いに偏光透過軸方向が直交する偏光板13、14の間でファラデーモジュレータ15により、微小な振動角 $\phi_F (= \Delta \phi_{F0} \exp[-i \omega F t])$ を与える。そして、暗状態となる振動角 ϕ_F から偏光板間でのアルカリ金属蒸気セルによる偏光回転角を測定する。ただし、 ω_F はファラデーモジュレータの角振動数である。いま、プローブ光2を偏光板13により直線偏光とした後の初期偏光回転角が、半波長板23の結晶軸に対して $\phi_0 (= 0)$ とすると、セル4aで $\phi_1 (= \alpha_A B_{y1})$ 回転する。そのために、セル4a通過後の偏光回転角は、 $\phi_F + \phi_0 + \phi_1$ となる。

【0056】

20

そして、半波長板23は位相を π (rad)シフトさせるため、半波長板23通過後は半波長板23の結晶軸に対して、偏光回転角の符号が逆転し、その結果、 $-(\phi_F + \phi_0 + \phi_1)$ なる偏光回転角となる。さらに、セル4bで $\phi_2 (= \alpha_A B_{y2})$ 回転するため、セル4b通過後の偏光回転角は、 $-(\phi_F + \phi_0 + \phi_1 - \phi_2)$ となる。それゆえ、暗状態となる振動角 ϕ_F から偏光板間でのアルカリ金属蒸気セルによる偏光回転角 $(-\phi_0 - \phi_1 + \phi_2)$ を測定するものである。ここで、 $\phi_0 = 0$ であれば、偏光回転角の差 $(\phi_2 - \phi_1)$ として直接測定できる。また、 $\phi_0 = 0$ ではないときでも ϕ_0 は一定なので、偏光回転角の差 $(\phi_2 - \phi_1)$ として直接測定できる。

【0057】

ここで、 ϕ_1 と ϕ_2 の値を別々に偏光回転計(ポラリメータ)で測定して、勾配計を構成する従来型原子磁気センサについて考える。

30

【0058】

いま、ポラリメータとして、実施例1と同様な、一対の偏光板とファラデーモジュレータとフォトセンサからなるクロスニコル型ポラリメータを考えると、従来型原子磁気センサ勾配計では、2つのポラリメータが必要となる。

【0059】

ポラリメータは、一般に偏光回転角 ϕ に対して信号 $V (= \beta \phi)$ を与える装置であり、この信号 V に対して測定磁場 B_y が $B_y = q V (= q \beta \phi)$ として求まる。ただし、 q 、 β は比例定数である。

【0060】

40

特に、 β はポラリメータやポラリメータを構成するフォトセンサの特性に依存する比例定数である。ここで、2つのポラリメータの比例定数を β_1 、 β_2 、信号を V_1 、 V_2 とし、フォトセンサなどに由来する信号ノイズを δV_1 、 δV_2 ($\sim \delta V_1 \sim \delta V$)とすると、 $V_1 = \beta_1 \phi_1 + \delta V_1$ 、 $V_2 = \beta_2 \phi_2 + \delta V_2$ となる。なお、「 $\sim \delta V_1 \sim \delta V$ 」とは、 δV_1 や δV_2 とオーダーが同じという意味である。それゆえ、第一及び第二の測定位置における磁場強度の差 $\Delta B_{y21} (= B_{y2} - B_{y1})$ は、

$$\Delta B_{y21} = (q \beta_2 \phi_2 - q \beta_1 \phi_1) + q (\delta V_2 - \delta V_1) \cdots \cdots (6)$$

となる。ここで、(6)式第2項は δV_2 と δV_1 で位相が異なるため、 $q (\delta V_2 - \delta V_1) \sim q \delta V$ となる。

【0061】

50

また、(6)式第1項より、 ϕ_1 と ϕ_2 の差が極めて近い場合には、 β_1 、 β_2 が理想的に等しくならない限り、第一及び第二の測定位置における磁場強度の差 ΔB_{y21} ($=B_{y2}-B_{y1}$)は厳密に正確な測定はできないことがわかる。

【0062】

一方、第一及び第二の測定位置11、12における磁場強度の差($B_{y2}-B_{y1}$)を偏光回転角の差($\phi_2-\phi_1$)として直接測定する本発明では、ポラリメータを一つだけ用いるため、

$$\Delta B_{y21} = q \beta (\phi_2 - \phi_1) + q \delta V \cdots (7)$$

から、($\phi_2-\phi_1$)の差が小さい場合にも、磁場強度差を精度よく測定できることがわかる。

10

【0063】

また、実施例1では、クロスニコル型ポラリメータを用いた例を示したが、バランス型ポラリメータを用いることもできる。

【0064】

ここで、本発明によれば、クロスニコル型ポラリメータの場合は、フォトセンサの数を2個から1個に減らすことができ、バランス型ポラリメータの場合には、4個から2個へ減らすことができる。また、本実施例1では、アルカリ金属として、カリウムを用いたが、ルビジウム、セシウムなども同様に用いることができる。また、本発明は、アルカリ金属ガスまたは希ガスをを用いた一般の原子磁気センサにも適用できる。

【0065】

20

また、上では磁場が弱い場合について述べたが、磁場が強い場合にも同様に適用できることがわかる。

【0066】

さらに、以上では、静磁場測定または、静磁場と見なせる程周波数が低い場合について述べたが、振動磁場測定に対しても本発明は同様な効果がある。

【0067】

以下に、振動磁場測定について説明する。 B_y が角周波数 ω の振動磁場の場合、 $B_y = B_{y0} e^{-i\omega t}$ として、(1)式に対する強制振動解を求め、z方向に印加する共鳴用バイアス磁場 $Bz0$ による角周波数を ω_0 とし、 m_x の実部を S と定義すると、

$$S = \gamma_{eff} m_z \gamma_e B_{y0} \cos(\omega t) / (Q((\omega - \omega_0)^2 + \gamma_{eff}^2)) \cdots (8)$$

30

【0068】

このとき、x方向に伝搬する直線偏光であるプローブ光の偏光方向の磁場による偏光回転角 ϕ はx方向に対して右ネジの方向を正として、

$$\phi = 0.5 L r_e c f_{D1} n S [-D_{D1}(\nu) + D_{D2}(\nu)] \cdots (9)$$

と表わせる。ここで、 ν はプローブ光の振動数、 n は原子数密度、 c は光の速度、 r_e ($=2.82 \times 10^{-15} \text{m}$)は古典電子半径である。

【0069】

また、ここでは、アルカリ金属蒸気としてK原子を用い、 $f_{D1} = 1/3$ 、 $[-D_{D1}(\omega) + D_{D2}(\omega)]$ 項はカリウムのD1、D2線に対する波長分散を考慮した分散関係を示す。よって、(8)(9)式より、振動磁場に対する偏光回転角は

40

$$\phi = \alpha_B B_{y0} \cdots (10)$$

$$\alpha_B = 0.5 L r_e c f_{D1} n [-D_{D1}(\omega) + D_{D2}(\omega)] \gamma_{eff} m_z \gamma_e B_{y0} \cos(\omega t) / (Q((\omega - \omega_0)^2 + \gamma_{eff}^2)) \cdots (11)$$

となる。

【0070】

それゆえ、 ϕ の回転方向は $m_z B_{y0} \cos(\omega t)$ の符号に依存することがわかる。ここで、 m_z の符号はz方向の右回り円偏光では正、z方向の左回り円偏光では負、-z方向の右回り円偏光では負、-z方向の左回り円偏光では正となる。また、周期 $T = 2\pi/\omega$ に比べて、光が光速 c でセル4a、4bを通過する時間は無視できるため、 $\cos(\omega t)$ は

50

セル 4 a、4 b 通過時に同じ値と考えられる。

【0071】

よって、セル 4 a、4 b と半波長板 2 3 通過後の偏光角は

$$\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 = \alpha_B (B_{y02} - B_{y01}) \cdots (12)$$

となる。ただし、 $B_{y1} = B_{y01} e^{-i \omega t}$ として、 $B_{y2} = B_{y02} e^{-i \omega t}$ とした。

【0072】

よって、振動磁場測定の場合にも、磁場強度の差 ($B_{y2} - B_{y1}$) を偏光回転角の差 ($\phi_2 - \phi_1$) として直接測定することにより、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な原子磁気センサを提供できることがわかる。

【0073】

10

(実施例 2)

図 3 は、本発明の実施例 2 の特徴を示す図である。

【0074】

同図において、1 は円偏光レーザー光、2 はプローブ用レーザー光、3 はアルカリ金属蒸気または希ガスをスピンの歳差運動として模式的に示したものであり、4 は該アルカリ金属蒸気または希ガスを封入したセルである。

【0075】

6 a、6 b は静磁場キャンセル用またはバイアス磁場印加用の 3 軸順ヘルムホルツコイルを模式的に示したものである。また、11 は第一の測定位置、12 は第二の測定位置、13 と 14 は互いにクロスニコルの位置にある偏光板である。15 はファラデーモジュレータ、16 は光検出器、9 はアルカリ金属セル 4 の温度を一定に保持する恒温槽である。また、20 は偏光保持光路折り返し手段であるところの偏光保持ファイバーである。

20

【0076】

実施例 2 では、特に、円偏光レーザー光 1 とプローブ光 2 を備えたアルカリ金属蒸気を用いた原子磁気センサにおいて、以下の特徴を有する場合について説明する。

【0077】

すなわち、アルカリ金属蒸気を封入したセル 4 と、当該アルカリ金属蒸気を励起する円偏光レーザー光 1 と、該円偏光光に対して垂直に照射されるプローブ光 2 と偏光保持光路折り返し手段 20 を有する。そして、前記プローブ光を前記セル内の第一の測定位置 11 を通過後、光路折り返し手段 20 を用いて前記プローブ光の光路を折り返させて前記セル内の第二の測定位置 12 を通過させる。これによって、第一及び第二の測定位置 11、12 における磁場強度の差 ($B_{y2} - B_{y1}$) を偏光回転角の差 ($\phi_2 - \phi_1$) として直接測定する。こうすることにより、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な原子磁気センサを提供するものである。

30

【0078】

実施例 1 では半波長板を用いて、 ϕ_1 の符号の反転操作を行ったが、実施例 2 では偏光保持光路折り返し手段 20 を使って、 ϕ_1 の符号の反転操作を行うことにより、偏光回転角の差の演算処理を行うものである。

【0079】

いま、プローブ光 2 を偏光板 13 により直線偏光とした後の初期偏光回転角を x 軸に対する右ネジの方向を正として $\phi_0 (= 0)$ とする。セル 4 内の第一の測定位置 11 を通過することにより $\phi_1 (= \alpha_A B_{y1})$ 回転するため、偏光回転角は $\phi_F + \phi_0 + \phi_1$ となる。ここで、 ϕ_F は実施例 1 においても説明したように、偏光板 13、14 の間でファラデーモジュレータ 15 により与えられる、微小な振動角 $\phi_F (= \Delta \phi_{F0} \exp [-i \omega_F t])$ のことである。

40

【0080】

セル 4 を通過したプローブ光は、その後、偏光保持光路折り返し手段 20 を使って、-x 方向に折り返すと、y 軸に対して対称な偏光方向となるため、偏光回転角の符号が逆転し、 $-(\phi_F + \phi_0 + \phi_1)$ なる偏光回転角となる。

【0081】

50

更に、折り返すプローブ光については、プローブ光の進行方向（ $-x$ ）方向に対して、ポンプ光が z 軸方向へ照射されるため、偏光回転角の回転方向が進行方向（ $-x$ ）に対しては逆転する。しかし、 x 軸方向に対してはやはり右ネジの方向に回転するため、第2の測定位置12を通過することにより、 $+\phi_2$ （ $=\alpha_A B_{y2}$ ）回転する。

【0082】

従って、第2の測定位置12通過後には、 $-(\phi_F + \phi_0 + \phi_1 - \phi_2)$ なる偏光回転角となる。つまり、実施例1と同様に、第一及び第二の測定位置11、12における磁場強度の差（ $B_{y2} - B_{y1}$ ）を偏光回転角の差（ $\phi_2 - \phi_1$ ）として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な磁気センサを提供できる。

【0083】

また、図3では、偏光保持光路折り返し手段20として、偏光保持ファイバーを用いたが、図4に示すように、2つのミラー17、18と位相調整板19とにより構成した偏光保持光路折り返し手段20bを用いることもできる。

【0084】

ここで、19は主にミラー17、18の誘電損に由来する反射による楕円偏光を直線偏光に修正するためのものであるが、17、18のミラーが偏光反射特性に関して良好とみなせる場合には、位相調整板19は省略することもできる。また、ミラーの反射特性によって一定値と見なせる微小な偏光回転角 ϕ_M が付加されることもあるが、一定値であるため特に問題とはならない。また、ミラー17、18として特に多層膜反射ミラーを用いれば、楕円偏光が抑制され偏光方向が前述した偏光保持ファイバーと同様に折り返しによって反転するように設計することができる。

【0085】

（実施例3）

図5は、本発明の実施例3を説明する図である。

【0086】

実施例3では、ポンプ光とプローブ光を備えたアルカリ金属蒸気を用いた原子磁気センサにおいて、以下の構成を有することが特徴である。

【0087】

アルカリ金属蒸気3と該アルカリ金属蒸気3を封入したセル4と、前記アルカリ原子蒸気3の電子スピンを、異なる位置で偏極するための第一及び第二のポンプ光1a、1cと、該第一及び第二ポンプ光1a、1cに対して垂直に照射されるプローブ光2を有する。該第一及び第二ポンプ光1a、1cを互いに逆向きに照射し、該プローブ光2を第一ポンプ光1aによる第一の測定位置11を通過後、第二ポンプ光1cによる第二の測定位置12を通過させる。これによって、第一及び第二の測定位置11、12における磁場強度の差（ $B_{y2} - B_{y1}$ ）を偏光回転角の差（ $\phi_2 - \phi_1$ ）として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な磁気センサを提供する。

【0088】

より具体的には、図4に示したように、第一の測定位置11については右円偏光の第一のポンプ光を z 方向に入射し、第二の測定位置12については右円偏光の第二のポンプ光を $-z$ 向に入射させ、直線偏光させたプローブ光を x 軸方向に照射させる。

【0089】

ここで、実施例1で説明したように、円偏光ポンプ光の照射方向を逆にすると、磁場に対する偏光回転角の回転方向が反転する。そこで、逆向きのポンプ光によって励起された測定位置11、12にプローブ光2を通過させることにより、偏光回転角の差演算を行うことができる。

【0090】

いま、プローブ光2を偏光板13により直線偏光とした後の初期偏光回転角を x 軸に対する右ネジの方向を正として ϕ_0 とすると、セル4内の第一の測定位置11の通過により ϕ_1 （ $=\alpha_A B_{y1}$ ）回転するため、偏光回転角は $\phi_F + \phi_0 + \phi_1$ となる。

【0091】

10

20

30

40

50

また、ポンプ光方向が異なるセル 4 内の第二の測定位置 1 2 を通過することにより、 $-\phi_2 (= -\alpha_A B_{y2})$ 回転する。それゆえ、第 2 の測定位置 1 2 を通過後には、偏光回転角は、 $(\phi_F + \phi_0 + \phi_1 - \phi_2)$ となる。実施例 1 と同様に、第一及び第二の測定位置 1 1、1 2 における磁場強度の差 $(B_{y2} - B_{y1})$ を偏光回転角の差 $(\phi_2 - \phi_1)$ として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な磁気センサを提供できる効果がある。

【0092】

また、6 a、6 b、6 c、6 d は、バイアス磁化を印加して、振動磁場の共鳴測定を行うための順方向ヘルムホルツコイルであり、差演算を行う共鳴測定を可能とするものである。なお、図 5 において付されている番号の内、図 1 から 3 と同一の番号は、同様の機能を有するものである。

10

【0093】

(実施例 4)

図 6 は、本発明の実施例 4 を説明する図である。

【0094】

実施例 4 は、特に、ポンプ光とプローブ光を備えたアルカリ金属蒸気を用いた原子磁気センサにおいて、アルカリ金属蒸気 3 とアルカリ金属蒸気 3 を封入したセル 4 と、前記アルカリ金属蒸気 3 を異なる位置で偏極する第一及び第二のポンプ光 1 a、1 d を有する。更に、該第一及び第二ポンプ光 1 a、1 d に対して垂直に照射されるプローブ光 2 を有する。該第一及び第二ポンプ光の持つ円偏光の回転方向を互い逆向きにし、該プローブ光 2 を第一ポンプ光 1 a による第一の測定位置 1 1 の通過後に、第二ポンプ光 1 b による第二の測定位置 1 2 を通過させる。これによって、第一及び第二の測定位置 1 1、1 2 における磁場強度の差 $(B_{y2} - B_{y1})$ を偏光回転角の差 $(\phi_2 - \phi_1)$ として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度磁気センサを提供する。

20

【0095】

より具体的には、図 6 に示したように、第一の測定位置 1 1 については右円偏光の第一のポンプ光を z 方向に入射し、第二の測定 1 2 については左円偏光の第二のポンプ光を z 方向に入射させ、直線偏光させたプローブ光を x 軸方向に照射する。ここで、実施例 1 で説明したように、円偏光ポンプ光の円偏光の回転方向を逆にすると、磁場に対する偏光回転角の回転方向が反転する。そこで、逆向きの円偏光回転方向のポンプ光によって励起された測定位置 1 1、1 2 にプローブ光 2 を通過させることにより、偏光回転角の差演算を行うことができる。

30

【0096】

いま、プローブ光 2 を偏光板 1 3 により直線偏光とした後の初期偏光回転角を x 軸に対する右ネジの方向を正として ϕ_0 とすると、セル 4 内の第一の測定位置 1 1 通過により $\phi_1 (= \alpha_A B_{y1})$ 回転するため、偏光回転角は $\phi_F + \phi_0 + \phi_1$ となる。

【0097】

また、ポンプ光の円偏光回転方向が異なるセル 4 内の第二の測定位置 1 2 を通過することにより、 $-\phi_2 (= -\alpha_A B_{y2})$ 回転する。

【0098】

40

それゆえ、第 2 の測定位置 1 2 を通過後の偏光回転角は、 $(\phi_F + \phi_0 + \phi_1 - \phi_2)$ となる。実施例 1、実施例 3 と同様に、第一及び第二の測定位置 1 1、1 2 における磁場強度の差 $(B_{y2} - B_{y1})$ を偏光回転角の差 $(\phi_2 - \phi_1)$ として直接測定し、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度な磁気センサを提供できる。

【0099】

また、図 6 ではヘルムホルツコイルを 2 組用いたが、図 7 に示すように 1 組のヘルムホルツコイル 6 a、6 b で代用してもよい。なお、図 6 や 7 において付されている番号の内、図 2 から 4 と同一の番号は、同様の機能を有するものである。

(実施例 5)

図 8 は、本発明の実施例 5 を説明する図である。

50

【0100】

実施例5は、特に、プローブ光を備えたアルカリ金属ガスまたは希ガスを用いた原子磁気センサにおいて、アルカリ金属蒸気または希ガスを封入したセルと複数の測定位置76a～76dと、該複数の測定位置76a～76dを通過するプローブ光2を有する。そして、複数の測定位置76a～76dにおける磁場強度の高次勾配量を、前記プローブ光の偏光回転角の光演算量として直接測定することにより、フォトセンサ間の差異によるノイズ混入を抑制した高感度なセンサを提供する。

【0101】

具体的には、図8に示すように、測定位置76a、76dに対しては、右円偏光のポンプ光をz方向に照射し、測定位置76b、76cについては左円偏光のポンプ光をz方向に入射させる。そして、76a～76dを通過する直線偏光させたプローブ光をx軸方向に照射する。

10

【0102】

ここで、実施例1で説明したように、円偏光ポンプ光の円偏光の回転方向を逆にすると、磁場に対する偏光回転角の回転方向が反転する。そこで、順次、右円偏向・左円偏向・左円偏向・右円偏向のポンプ光によって励起された測定位置76a～76dにプローブ光2を通過させる。これによって、偏光回転角の光演算量 $(\phi_4 - \phi_3 - \phi_2 + \phi_1)$ として複数の測定位置における磁場強度の高次勾配量 $(B_{y4} - B_{y3} - B_{y2} + B_{y1}) / (dx)^2$ を直接測定できる。

20

【0103】

ただし、 ϕ_4 、 ϕ_3 、 ϕ_2 、 ϕ_1 は B_{y4} 、 B_{y3} 、 B_{y2} 、 B_{y1} の磁場に対応したプローブ光の偏向回転角であり、 dx は測定位置間の距離を示す。ここで、 $(B_{y4} - B_{y3} - B_{y2} + B_{y1}) / (dx)^2 = ((B_{y4} - B_{y3}) / dx - (B_{y2} - B_{y1}) / dx) / dx$ であり、測定位置での2次勾配量である。

【0104】

このようなn次勾配計を形成すると、 $(n-1)$ 次のノイズ勾配を除去でき、生体情報等の測定に好ましいセンサを少ない光検出装置で構成できる。

【0105】

(実施例6)

図9は、本発明の実施例6を説明する図である。

30

【0106】

実施例6は、3個の測定位置86a、86b、86cで2次勾配計を構成することを除いて、実施例5と同様である。

【0107】

より具体的には、実施例6では、図9に示したように、測定位置86a、86cについては、右円偏光のポンプ光をz方向に幅 $w (< 2dx)$ 照射し、測定位置86bについては左円偏光のポンプ光をz方向に幅 $2w (< 2dx)$ で入射する。そして、86aから86cを通過する直線偏光させたプローブ光をx軸方向に照射させる。

【0108】

ここで、実施例1で説明したように、円偏光ポンプ光の円偏光の回転方向を逆にすると、磁場に対する偏光回転角の回転方向が反転する。そこで、順次、右円偏向・左円偏向・右円偏向のポンプ光によって励起された測定位置86aから86cにプローブ光2を通過させる。これによって、偏光回転角の光演算量 $(\phi_3 - 2\phi_2 + \phi_1)$ として複数の測定位置における磁場強度の高次勾配量 $(B_{y3} - 2B_{y2} + B_{y1}) / (dx)^2$ を直接測定できる。ただし、 ϕ_3 、 ϕ_2 、 ϕ_1 は B_{y3} 、 B_{y2} 、 B_{y1} の磁場に対応したプローブ光の偏向回転角であり、 dx は測定位置間の距離を示す。ここで、 $(B_{y3} - 2B_{y2} + B_{y1}) / (dx)^2 = ((B_{y3} - B_{y2}) / dx - (B_{y2} - B_{y1}) / dx) / dx$ であり、測定位置での2次勾配量である。

40

【0109】

(実施例7)

50

図10は、本発明の実施例7を説明する図である。

【0110】

実施例7は、特に、互いに90度異なる偏光角を有する偏光素子93a、93bを基板上にアレイ状に複数配置した素子99を用いて、微細な右円偏光、左円偏光アレイを形成し光演算させることにより光勾配計を形成するものである。本構成により、独立した偏光素子を偏光板ホルダーに保持し独立に配置する場合に比べて、装置を簡略化しコンパクト化できる。また、MEMS（微小電気機械システム）技術等を用いて、微細化するに適する。

【0111】

ここで、素子99は、具体的には、フィルム状の偏光調整用の偏光素子92と、互いに90度異なる偏向角を有するフィルム状の偏光素子93a、93bと、フィルム状の1/4波長板94を一对のガラス基板91、95に挟持した素子である。斯かる構成により、微細な右円偏光、左円偏光アレイを形成できる。より具体的には、偏光素子92の偏向方向はy軸方向であり、93aの偏光方向はy軸よりz軸方向に向かって右ねじの方向を正として+45度、93bの偏光方向は-45度とした。ここで、偏光素子92はポンプ光レーザー光97の偏光状態によらず、偏光素子93a、93bと1/4波長板94の通過によって形成される右円偏光と左円偏光の光強度を等しくする機能を有し、装置のコンパクト化に有効である。

【0112】

また、96は円光向の幅や大きさを決定する微細なアパーチャであり、光演算の重みづけに重要な機能を果たす効果がある。また、ポンプ光、プローブ光の波長はロックされている。また、図11は、特に、互いに90度異なる偏光角を有する偏光素子93aから93cを基板上にアレイ状に複数配置して高次勾配計を構成したものである。斯かる構成によって、近接した位置に回転方向の異なる複数の円偏光を配置することができ、接近した位置での勾配情報を検出できる効果がある。（実施例8）

図12は、実施例8を説明する図である。

【0113】

実施例1では、プローブ光とポンプ光を用いた原子磁気センサ（特に、SERF型）の場合について説明したが、実施例8はプローブ光だけを用いた原子磁気センサの場合を示す。

【0114】

すなわち、実施例8は、原子磁気センサがプローブ光だけで動作すること、およびプローブ光と測定磁場の方向が平行であることを除いて実施例1と同様であり、半波長板23の働きにより、2つの測定位置における磁場の差を偏光回転角の差として検知できる。ただし、検知する磁場の差はx方向の磁場の差（ $B_{x2}-B_{x1}$ ）である。また、プローブ光と磁場方向が平行であり、ポンプ光が不要な原子磁気センサは、例えば、Phys. Rev. A 47, 1220 - 1226 (1993)等で詳しく説明されている。

【0115】

すなわち、本発明は、プローブ光とポンプ光を有する原子磁気センサに限定されないことがわかる。また、Phys. Rev. A 73, 053404 (2006)等に記載されている、FM-NMOR型の原子磁気センサ等にも適用できる。

【0116】

（実施例9）

図13は実施例9の特徴を示す図である。

【0117】

実施例9は、偏光回転角 ϕ_1 、 ϕ_2 を与える媒質がアルカリ金属蒸気や希ガスではなく、例えば、ガラスなどの、狭義の線形ファラデー効果を引き起こす媒質であることを除いて、実施例1、実施例8と同様である。実施例9では、半波長板23の働きにより、2つの測定位置における磁場の差を偏光回転角の差として検知できる。

【0118】

すなわち、本発明は原子磁気センサに限定されるものではなく、磁場強度をプローブ光の偏光回転角の大きさとして測定する任意の磁気センサに用いることができることがわか

10

20

30

40

50

る。

【産業上の利用可能性】

【0119】

以上説明した本発明は、脳磁場などの微小な磁場情報の測定や、MRI装置に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0120】

【図1】本発明に係る磁気センシング方法を説明するための工程図である。

【図2】実施例1の説明図である。

【図3】実施例2の説明図である。

10

【図4】実施例2の補足説明図である。

【図5】実施例3の説明図である。

【図6】実施例4の説明図である。

【図7】実施例4の追加説明図である。

【図8】実施例5の説明図である。

【図9】実施例6の説明図である。

【図10】実施例7の説明図である。

【図11】実施例7の追加説明図である。

【図12】実施例8の説明図である。

【図13】実施例9の説明図である。

20

【符号の説明】

【0121】

1,1a,1b,1c,1d 円偏光励起光

2 プローブ光

3 アルカリ金属原子の電子スピンまたはアルカリ金属蒸気

4 ガラスセル

6a,6b,6c,6d ヘルムホルツコイル

9 恒温槽

11,12 第一及び第二の測定位置

13,14 偏光板

30

15 ファラデーモジュレータ

16 フォトセンサ

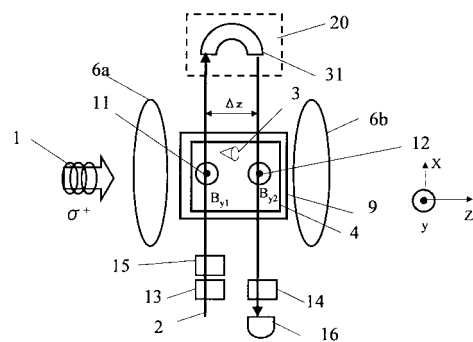
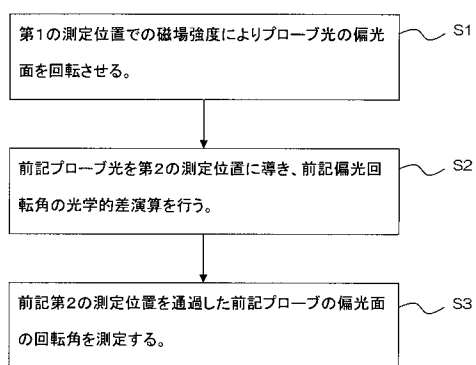
17,18 ミラー

19 位相調整板

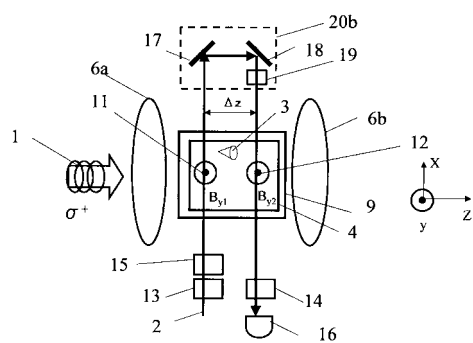
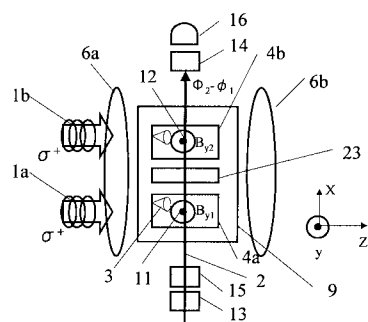
20,20a 偏光保持光路反転手段

23 半波長板

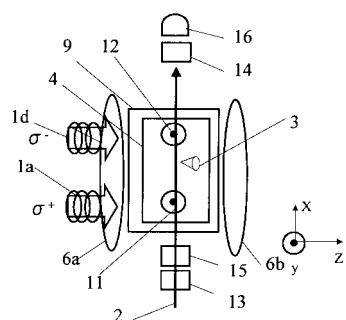
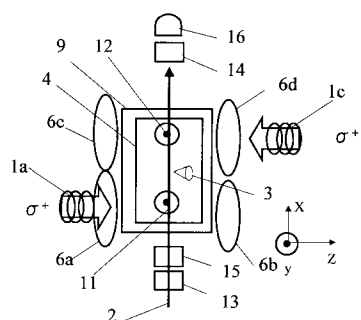
【図 3】



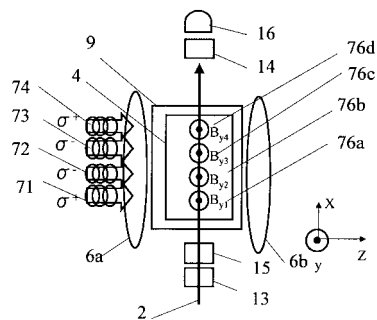
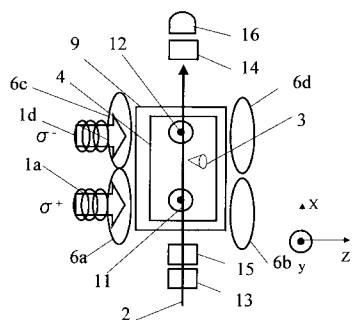
【図 4】



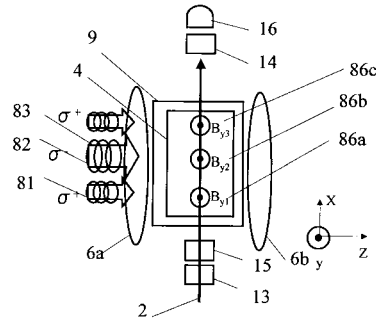
【图 7】



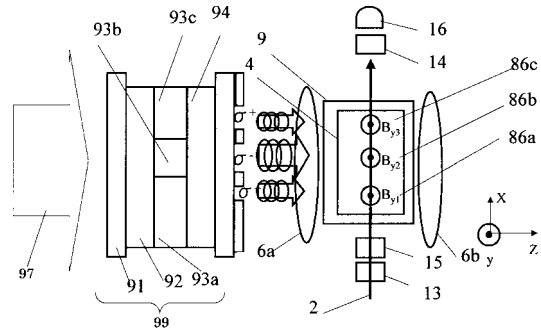
【図 8】



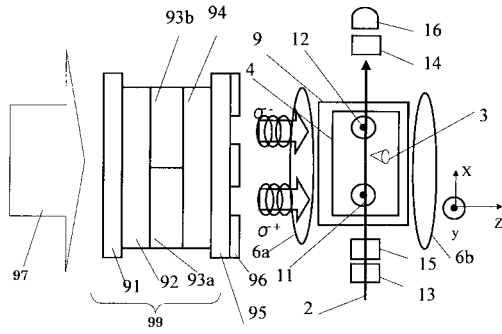
【図 9】



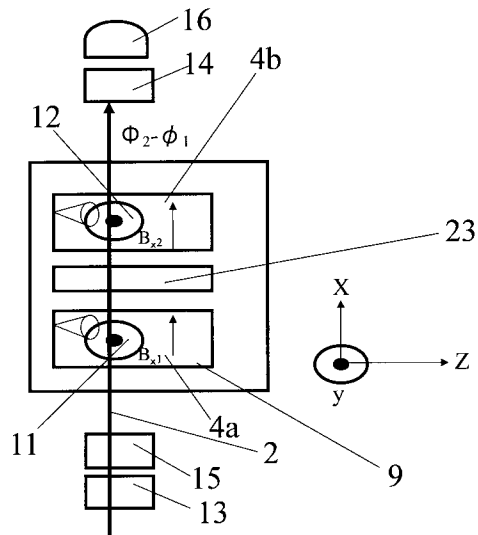
【図 11】



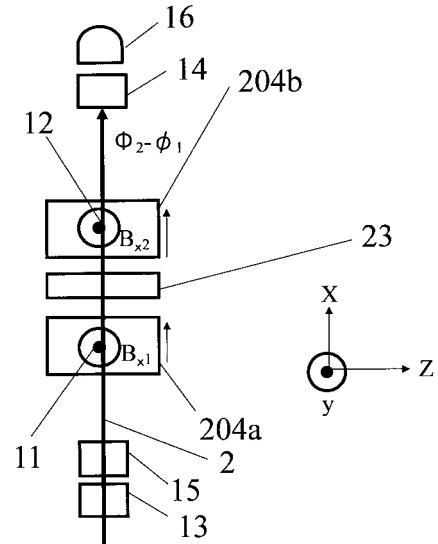
【図 10】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

(72)発明者 市原 直
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

審査官 藤原 伸二

(56)参考文献 米国特許出願公開第2004/0140799 (US, A1)
米国特許第4731581 (US, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01R 33/00-33/26
G01N 21/21
G01R 15/00-17/22
JSTPlus (JDreamII)