

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6391370号
(P6391370)

(45) 発行日 平成30年9月19日(2018.9.19)

(24) 登録日 平成30年8月31日(2018.8.31)

(51) Int.Cl.

G O 1 R 33/26 (2006.01)

F 1

G O 1 R 33/26

請求項の数 13 (全 34 頁)

(21) 出願番号 特願2014-175881 (P2014-175881)
 (22) 出願日 平成26年8月29日 (2014.8.29)
 (65) 公開番号 特開2016-50837 (P2016-50837A)
 (43) 公開日 平成28年4月11日 (2016.4.11)
 審査請求日 平成29年8月28日 (2017.8.28)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100094112
 弁理士 岡部 譲
 (74) 代理人 100101498
 弁理士 越智 隆夫
 (74) 代理人 100106183
 弁理士 吉澤 弘司
 (74) 代理人 100128668
 弁理士 斎藤 正巳
 (72) 発明者 小林 哲生
 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
 国立大学法人京都大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

アルカリ金属原子を内包する 1 または複数のセルと、
 円偏光成分を有する複数のポンプ光を前記 1 または複数のセルの異なる位置に入射する
 ポンプ光光学系と、
 前記 1 または複数のセルに入射した前記複数のポンプ光と前記異なる位置のそれぞれに
 おいて交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を前記セルに入射するプローブ
 光光学系と、
 前記複数のポンプ光と交差した後の前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を

検出する検出手段と、

前記検出手段により検出した前記信号から、前記異なる位置の各々の磁場強度に関する
 情報を取得する情報取得手段とを有し、

前記ポンプ光光学系は、前記複数のポンプ光の周波数及び位相のうちの少なくとも一方
 が互いに異なるように前記複数のポンプ光を変調する変調手段を有する
 ことを特徴とする光ポンピング磁力計。

【請求項 2】

前記変調手段は、前記異なる位置に入射する前記複数のポンプ光の強度、円偏光度及び
 波長のうちの少なくとも 1 つを変調する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 3】

10

20

前記情報取得手段は、前記信号を、前記変調手段において用いた変調周波数と同じ周波数で復調する復調手段を有する

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 4】

前記アルカリ金属原子は、カリウム、ルビジウム及びセシウムを含む群から選択される少なくとも 1 種類の原子である

ことを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 5】

前記アルカリ金属原子は、カリウム及びルビジウムを含む

ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。 10

【請求項 6】

前記変調手段の変調周波数は、10 Hz 以上である

ことを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 7】

前記変調手段の変調周波数は、1 kHz 以上である

ことを特徴とする請求項 6 に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 8】

前記プローブ光光学系は、前記複数のポンプ光とそれぞれ異なる位置で交差するよう前に記セルに複数の前記プローブ光を入射する

ことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。 20

【請求項 9】

複数の前記セルを有し、

前記ポンプ光光学系は、複数の前記セルのそれぞれに、前記複数のポンプ光のうちの少なくとも 1 つの前記ポンプ光を入射し、

前記プローブ光は、複数の前記セルのそれぞれにおいて、前記ポンプ光と交差する

ことを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 10】

複数の前記セルの間に、前記プローブ光を導波する光導波手段を更に有する

ことを特徴とする請求項 9 に記載の光ポンピング磁力計。

【請求項 11】

前記セルと、前記検出手段とを含むセンサヘッドと、

前記ポンプ光光学系から出力される変調の掛った前記複数のポンプ光を前記センサヘッドに導く第 1 の光導波手段と、

前記プローブ光光学系から出力される前記プローブ光を前記センサヘッドに導く第 2 の光導波手段と

を更に有することを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。 30

【請求項 12】

前記異なる位置に入射する前記複数のポンプ光が異なる位相で変調されている

ことを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載の光ポンピング磁力計。 40

【請求項 13】

アルカリ金属原子を内包するセルの異なる位置に、円偏光成分を有し、周波数及び位相のうちの少なくとも一方が互いに異なるポンプ光をそれぞれ入射し、

前記セルに、前記異なる位置のそれぞれにおいて前記ポンプ光と交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を入射し、

前記セルを通過した前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を検出し、

検出した前記信号から、前記異なる位置の各々における磁場強度に関する情報を算出する

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センシング方法及び磁力計に係り、特に、原子の電子スピニ或いは核スピンを利用した光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法に関する。

【背景技術】**【0002】**

非特許文献1及び特許文献1には、光ポンピング磁力計が記載されている。非特許文献1に記載された光ポンピング磁力計は、アルカリ金属ガスが内包されたセルと、ポンプ光用光源と、プローブ光用光源とを有する。この光ポンピング磁力計は、被測定対象磁場を受けて回転した、ポンプ光によって偏極させた原子群のスピンを、プローブ光の偏光面の回転として測定するものである。また、非特許文献1には、プローブ光とポンプ光との交差領域を測定ごとに変えることで、プローブ光の光路上の異なる位置の磁気信号を分離して測定する方法が示されている。また、特許文献1には、複数のセル及びセルごとにプローブ光及びポンプ光をそれぞれ照射する磁気センサアレイの例が示されている。

10

【先行技術文献】**【特許文献】****【0003】**

【特許文献1】特開2011-203133号公報

【非特許文献】**【0004】**

20

【非特許文献1】伊藤陽介、他、「K-Rbハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサによる生体磁気計測に向けた磁場分布計測」、信学技報、vol.112、no.479、MBE2012-93、p.31、2013年3月

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】****【0005】**

非特許文献1の光ポンピング磁力計は、プローブ光とポンプ光との交差領域を変える必要があるため、プローブ光の光路上の異なる位置の磁場強度の測定は同時に行えない。

特許文献1の光ポンピング磁力計は、プローブ光の光路上の異なる位置の磁場強度の測定は行えず、また、セルごとに信号の検出器を必要とする構成であるため装置が大きくなるという課題がある。

30

すなわち非特許文献1および特許文献1の光ポンピング磁力計は、1つのプローブ光で、プローブ光の光路上の空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することはできなかった。

【0006】

本発明の目的は、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定しうる光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】**【0007】**

本発明の一観点によれば、アルカリ金属原子を内包する1または複数のセルと、円偏光成分を有する複数のポンプ光を前記1または複数のセルの異なる位置に入射するポンプ光光学系と、前記1または複数のセルに入射した前記複数のポンプ光と前記異なる位置のそれぞれにおいて交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を前記セルに入射するプローブ光光学系と、前記複数のポンプ光と交差した後の前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を検出する検出手段と、前記検出手段により検出した前記信号から、前記異なる位置の各々の磁場強度に関する情報を取得する情報取得手段とを有し、前記ポンプ光光学系は、前記複数のポンプ光の周波数及び位相のうちの少なくとも一方が互いに異なるように前記複数のポンプ光を変調する変調手段を有することを特徴とする光ポンピング磁力計が提供される。

40

【0008】

50

また、本発明の他の観点によれば、アルカリ金属原子を内包するセルと、円偏光成分を有するポンプ光を前記セルの複数箇所に同時に入射するポンプ光光学系と、前記セルに入射した前記ポンプ光と前記複数箇所のそれぞれにおいて交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を前記セルに入射するプローブ光光学系と、前記セルを通過した前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を検出する検出器と、前記検出器で検出した前記信号から、前記複数箇所の磁場強度に関する情報を算出する算出手段とを有し、前記複数箇所に入射する前記ポンプ光が、同じ変調周波数、異なる位相で変調されていることを特徴とする光ポンピング磁力計が提供される。

【0009】

また、本発明の更に他の観点によれば、アルカリ金属原子を内包するセルの異なる位置に、円偏光成分を有し、周波数及び位相のうちの少なくとも一方が互いに異なるポンプ光をそれぞれ入射し、前記セルに、前記異なる位置のそれぞれにおいて前記ポンプ光と交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を入射し、前記セルを通過した前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を検出し、検出した前記信号から、前記異なる位置の各々における磁場強度に関する情報を算出することを特徴とする磁気センシング方法が提供される。

10

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】本発明の第1実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

【図2a】本発明の第1実施形態による光ポンピング磁力計を用いた測定結果の一例を示す図である。

【図2b】本発明の第1実施形態による光ポンピング磁力計を用いた測定結果の一例を示す図である。

【図2c】本発明の第1実施形態による光ポンピング磁力計を用いた測定結果の一例を示す図である。

【図3】本発明の第2実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

30

【図4】本発明の第2実施形態による光ポンピング磁力計におけるポンプ光の変調方法の例を示す概略図である。

【図5】本発明の第3実施形態による光ポンピング磁力計におけるポンプ光変調の一例を示す図である。

【図6】本発明の第4実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す斜視図である。

【図7】本発明の第4実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す断面図である。

【図8】本発明の第5実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

【図9】本発明の第6実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

【図10】本発明の第7実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

【図11】本発明の第8実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0012】

本実施形態に係る光ポンピング磁力計は、アルカリ金属原子を内包する1または複数のセルと、円偏光成分を有する複数のポンプ光を前記1または複数のセルの異なる位置に入射するポンプ光光学系とを有する。そして、前記1または複数のセルに入射した前記複数のポンプ光と前記異なる位置のそれぞれにおいて交差するように、直線偏光成分を有するプローブ光を前記セルに入射するプローブ光光学系と、前記複数のポンプ光と交差した後の前記プローブ光の偏光面の回転角を反映した信号を検出する検出手段とを有する。そして、検出手段により検出した前記信号から、前記異なる位置の各々の磁場強度に関する情報を取得する情報取得手段を有する。そして、前記ポンプ光光学系は、前記複数のポンプ

50

光の周波数及び位相のうちの少なくとも一方が互いに異なるように前記複数のポンプ光を変調する変調手段を有することを特徴とする。

プローブ光の光路上の異なる位置に照射される複数のポンプ光の周波数及び位相のうちの少なくとも一方が互いに異なるように変調されていれば、情報取得手段で取得される信号を、該異なる位置のポンプ光の変調周波数や位相に応じて復調することで、該異なる位置の磁場強度に関する情報を弁別して検出できる。

以下、本発明の実施形態に係る光ポンピング磁力計について詳細に説明する。

【0013】

[第1実施形態]

本発明の第1実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について、図1及び図2a～cを用いて説明する。 10

【0014】

図1は、本実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。図2a～cは、本実施形態による光ポンピング磁力計を用いた測定結果の一例を示す図である。

【0015】

はじめに、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成について、図1を用いて説明する。

本実施形態による光ポンピング磁力計100は、図1に示すように、セル101と、ポンプ光光学系102と、光変調器104, 105と、遅相子106, 107と、プローブ光光学系108とを有している。また、光ポンピング磁力計100は、偏光分離素子110と、フォトディテクタ111, 112と、差分回路113と、復調器114, 115とを有している。なお、本明細書では、光変調器及び遅相子をも含めてポンプ光光学系と呼ぶこともある。 20

【0016】

ポンプ光光学系102は、アルカリ金属原子、例えばカリウム(K)が内包されたセル101の被測定領域116aに、光変調器104及び遅相子106を介してポンプ光103aを入射するようになっている。また、ポンプ光光学系102は、セル101の被測定領域116bに、光変調器105及び遅相子107を介してポンプ光103bを入射するようになっている。光変調器104, 105は、ポンプ光103a, 103bを変調する変調手段である。 30

【0017】

プローブ光光学系108は、セル101にプローブ光109を入射するようになっている。セル101の被測定領域116a, 116bはプローブ光109の光路上に位置しており、プローブ光109は被測定領域116a, 116bにおいてポンプ光103a, 103bと交差する。

【0018】

セル101の被測定領域116a, 116bを通過したプローブ光109は、偏光分離素子110を介してフォトディテクタ111, 112に入射するようになっている。フォトディテクタ111, 112には、差分回路113を介して、復調器114, 115が接続されている。偏光分離素子110及びフォトディテクタ111, 112は、セル101を通過したプローブ光109の回転角を検出するための検出器或いは検出手段である。また、差分回路113及び復調器114, 115は、検出手段により検出した回転角から被測定領域116a, 116bにおける磁場強度に関する情報を算出する算出手段或いは当該情報を取得する情報取得手段である。復調器114, 115は、変調手段において用いた変調周波数と同じ周波数で復調する復調手段である。 40

【0019】

次に、本実施形態による光ポンピング磁力計の基本動作について、図1を用いて説明する。

【0020】

ポンプ光光学系102から出射されるポンプ光103a, 103bは、光ポンピングに 50

よりセル101内のアルカリ金属原子のスピンの方向を揃えてスピン偏極するためのものである。この目的のもと、ポンプ光103a, 103bの波長は、アルカリ金属原子のD1遷移に共鳴する波長（以下、「D1遷移共鳴波長」という）に合わせておく。ポンプ光103a, 103bには、それぞれ独立の光源から発せられた光を用いてもよいし、単一の光源からの光を分離して用いてもよい。

【0021】

ポンプ光103a, 103bは、光変調器104, 105において、互いに異なる周波数で変調される。ここで、変調後のポンプ光103a, 103bの周波数は、互いに倍波関係のない周波数であることが好ましい。光変調器104, 105によりポンプ光103a, 103bに与える変調としては、例えば、ポンプ光103a, 103bの強度変調、円偏光度の変調、ポンプ光波長の変調が挙げられる。10

【0022】

光変調器104, 105によって変調されたポンプ光103a, 103bは、それぞれ遅相子106, 107によって円偏光成分を持つ光に調整され、セル101の被測定領域116a, 116bにそれぞれ入射される。

【0023】

セル101に入射したポンプ光103a, 103bによって、セル101内のアルカリ金属原子はスピン偏極する。スピン偏極した原子のスピンは、被測定磁場に応じたトルクを受けて歳差運動を行う。そのスピンの運動は、次のプロッホ方程式（式（1））で記述される。式（1）において、ベクトルS（=（S_x, S_y, S_z）^T）は、アルカリ金属原子のスピンを表している。qは、磁気回転比を表している。qは、スローダウンファクターを表している。ベクトルBは、外部磁場を表している。R_{op}（t）は、光ポンピングレートを表している。sは、ポンプ光の円偏光度を表している。T₁は、縦緩和時間を表している。T₂は、横緩和時間を表している。ベクトルx, y, zは、単位方向ベクトルを表している。なお、ここでは、z方向からポンプ光を入射する状況を考えている。20

【数1】

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{\gamma}{q} \vec{S} \times \vec{B} + \frac{R_{op}(t)}{q} \left(\frac{s}{2} \vec{z} - \vec{S} \right) - \frac{S_x \vec{x} + S_y \vec{y}}{T_2} - \frac{S_z \vec{z}}{T_1}$$

【0024】

また、光ポンピングレートは、次式（式（2））で表される。式（2）において、r_eは、古典電子半径を表している。cは、光速度を表している。fは、遷移強度を表している。I_{op}は、入射光強度を表している。hは、吸収線線幅を表している。hは、プランク定数を表している。nは、ポンプ光の周波数を表している。n₀は、アルカリ金属原子の共鳴周波数を表している。30

【数2】

$$R_{op}(t) = s r_e c f \frac{I_{op}}{h \nu} \frac{\Delta \Gamma / 2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta \Gamma / 2)^2}$$

【0025】

式（2）において、円偏光度s、入射光強度I_{op}及びポンプ光周波数nが時間tに対して変化することで、光ポンピングレートR_{op}（t）を変動させることができる。その具体例として、遅相子106を通過したポンプ光103aの光ポンピングレートR_{op}（t）が、次式（式（3））で表されるような周波数n_aの正弦波状で時間的に変化する場合を考える。40

【数3】

$$R_{op}(t) = \frac{R_{op}}{2} (1 + \cos(\omega_a t))$$

【0026】

10

20

30

40

50

式(3)で表されるような時間的に変動する光ポンピングレートのもと、静磁場がz方向の磁場 B_z しか存在しない状況において式(1)の解として、ポンプ光 ω_a と平行方向のスピン偏極のz成分 S_z^a を求める。ポンプ光の変調周波数 ω_a が光ポンピングレート R_{op} に比べて十分に大きいとき、展開した式の中で、 $R_{op}/2q\omega_a$ についての2次以上の項を無視することができる。それにより、次のような近似式(式(4))を得ることができる。なお、実際の測定では時間 t が十分に大きいため、式(4)では測定に寄与しない減衰項は省き、定常項のみを記載した。

【数4】

$$S_z^a(t) \cong \frac{sR_{op}}{\frac{4q}{T_1} + 2R_{op}} \left(1 + \frac{1}{T_1} \frac{\omega_a \sin(\omega_a t) + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{R_{op}}{2q} \right) \cos(\omega_a t)}{\left(\frac{1}{T_1} + \frac{R_{op}}{2q} \right)^2 + \omega_a^2} \right)$$

【0027】

次に、この状況でy方向の角周波数 ω_1 、磁束密度 B_1 の微小磁場を計測する。ここで、 $\omega_1 = \omega_x B_1 / q$ という量を定義する。スピン偏極した原子のスピンは、被測定磁場に応じたトルクを受けて歳差運動を行う。このため、x方向のスピン偏極のx成分 $S_x^a(t)$ を測定することで、磁場を測定することができる。 $S_x^a(t)$ は、 ω_1 に関して摂動を用いて1次まで求め、そのうち減衰項を除くと、その定常項は、次式(式(5))のように表される。

10

20

【数5】

$$\begin{aligned}
 S_x^a(t) \cong & -\frac{sR_{op}\Omega_1}{\frac{4q}{T_1} + 2R_{op}} \left\{ \frac{(\omega + \Omega_0) \sin(\omega t) + (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin(\omega t)}{(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q})^2 + (\omega + \Omega_0)^2} \right. \\
 & + \frac{(\omega - \Omega_0) \sin(\omega t) + (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin(\omega t)}{(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q})^2 + (\omega - \Omega_0)^2} \Big\} \quad 10 \\
 & + \frac{sR_{op}^2\Omega_1}{4q\omega_a(\frac{4q}{T_1} + 2R_{op})} \left\{ \frac{(\omega - \Omega_0) \cos((\omega_a - \omega)t) + (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin((\omega_a - \omega)t)}{(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q})^2 + (\omega - \Omega_0)^2} \right. \\
 & - (\omega - \Omega_0) \cos((\omega_a + \omega)t) + (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin((\omega_a + \omega)t) \\
 & + \frac{-(\omega + \Omega_0) \cos((\omega_a - \omega)t) - (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin((\omega_a - \omega)t)}{(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q})^2 + (\omega + \Omega_0)^2} \quad 20 \\
 & + \frac{(\omega + \Omega_0) \cos((\omega_a + \omega)t) + (\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}) \sin((\omega_a + \omega)t)}{(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q})^2 + (\omega + \Omega_0)^2} \Big\} \quad 30
 \end{aligned}$$

【0028】

ここで、 $\omega_0 (= / q \times B_z)$ は、ラーモア周波数を表している。式(5)の第2項は、スピンの応答が変調周波数 ω_a により変調されていることを示している。

【0029】

同様に、ポンプ光 103b に変調周波数 ω_b を印加した場合のスピン偏極の x 成分 $S_x^b(t)$ の応答は、式(4)の ω_a を ω_b に置き換えた形となる。

【0030】

プローブ光光学系 108 から出射されるプローブ光 109 の偏光は、直線偏光である。
被測定領域 116a を通過したプローブ光 109 の偏光面は、被測定領域 116a でのスピン偏極の x 成分 S_x^a に比例した常磁性ファラデー回転を受ける。次いで、被測定領域 116b を通過したプローブ光 109 の偏光面は、スピン偏極の x 成分 $S_x^b(t)$ に比例した常磁性ファラデー回転を更に受ける。結果として、セル 101 を通過したプローブ光 109 は、被測定領域 116a, 116b の 2ヶ所からのファラデー回転を足し合わせた大きさの偏光面の回転を受けることになる。

【0031】

その後にプローブ光 109 は、偏光分離素子 110 に入射し、その偏光面の角度に応じた強度によって反射光と透過光とに分割される。偏光分離素子 110 を透過した光はフォトディテクタ 111 で、偏光分離素子 110 により反射された光はフォトディテクタ 11

2で、それぞれ検出され、差分回路113によってそれらの光強度の差分が測定される。その出力を復調器114, 115によってそれぞれ光変調器104, 105の変調周波数に応じた周波数で復調する。

【0032】

復調器114で角周波数 ω_a によって復調した場合の復調器114からの出力 $V(t)$ は、次式(式(6))のように表される。ここで、 V_a は、プローブ光の強度や吸収係数などをまとめたスピン偏極の大きさから回路の出力への比例定数を纏めたものである。

【数6】

$$V(t) \cong V_a \left\{ \frac{(\omega - \Omega_0) \sin(\omega t) + \left(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}\right) \cos(\omega t)}{\left(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}\right)^2 + (\omega - \Omega_0)^2} - \frac{(\omega + \Omega_0) \sin(\omega t) + \left(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}\right) \cos(\omega t)}{\left(\frac{1}{T_2} + \frac{R_{op}}{2q}\right)^2 + (\omega + \Omega_0)^2} \right\} \quad 10$$

【0033】

図2aは、100Hzの磁気信号を原子磁気センサで測定した変調前の磁場スペクトル(図中の「変調なし」と、ポンプ光をチョッパーにより変調周波数1010Hzの強度変調をかけて測定した磁場スペクトル(図中の「変調あり」と、ロックインアンプで復調した信号の磁場スペクトル(図中の「ロックイン検出」とを表している。セルとして、K及びRbを同時に封入したものを用い、電気加熱ヒータにより180に加熱している。このときのKおよびRbの密度はそれぞれ 10^{13} cm^{-3} と 10^{14} cm^{-3} 程度である。ポンプ光はKのD1遷移共鳴波長にし、プローブ光は信号応答が大きくなるように、RbのD1遷移共鳴波長より少し離調をとった。センサが100Hzに共鳴するようにバイアス磁場を調整した。図2bは図2aのうち、変調前の磁場スペクトル(図中の「変調なし」と復調後の磁場スペクトル(図中の「ロックイン検出」とを分かりやすいように抜き出したものである。100Hzの磁気信号をポンプ光の強度変調によって変調し、それをロックインアンプによって復調できていることが見て取れる。100Hz付近での磁場感度は、変調していない場合は $20.5 \text{ fT}_{\text{rms}} / \text{Hz}^{1/2}$ 、変調した場合は $53.0 \text{ fT}_{\text{rms}} / \text{Hz}^{1/2}$ 、変調してロックイン検出をした場合は $37.1 \text{ fT}_{\text{rms}} / \text{Hz}^{1/2}$ であった。

図2cは、変調周波数として196Hzを、磁気信号として10Hzを選択した場合の磁場スペクトルである。10Hzの磁気信号(図面上側21)をポンプ光の強度変調によって186Hz(図面上側の22)及び206Hz(図面上側の23)へ変調することができている。そして図面下側ではロックインアンプによって10Hz(図面下側の24)へと復調できていることが見て取れる。

【0034】

2つの変調周波数 ω_a 、 ω_b の差が測定磁場の周波数に対して十分に大きいとき、被測定領域116aからの磁気信号と被測定領域116bからの磁気信号とは、周波数領域では十分に分離される。このため、復調器114において光変調器104と同じ周波数で復調することで、被測定領域116aからの磁気信号を測定することができる。また、復調器115において光変調器105と同じ周波数で復調することで、被測定領域116bからの磁気信号を測定することができる。これによって、プローブ光109の光路上の空間的に異なる場所からの磁気信号を分離して測定することができる。

【0035】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光の光路上で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。

なお、セルは1つだけでなく複数であってもよい。セルが1つの場合、そのセルに複数のポンプ光が入射する構成となる。また、セルが複数の場合、複数のセルのそれぞれにボ

10

20

30

40

50

ンプ光が入射する構成となるが、その上でさらに、各セルに複数のポンプ光が入射する構成であっても良い。

また、本実施形態は、複数のポンプ光は各々異なる周波数で変調されている場合だけでなく、各々異なる位相で変調されている場合も含む。複数のポンプ光が各々異なる位相で変調されている場合、周波数は略同一であることが好ましいが、異なる位置における磁場情報を弁別できるのであれば、異なっていても良い。

以下、第2実施形態から第8実施形態、および変形実施形態については、第1実施形態と異なる事項について述べるが、共通する事項は記載を省略する。

【0036】

[第2実施形態]

10

本発明の第2実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について、図3及び図4を用いて説明する。図1及び図2a～cに示す第1実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0037】

図3は、本実施形態による光ポンピング磁力計の構成を示す概略図である。図4は、ポンプ光の変調方法の例を示す概略図である。

【0038】

はじめに、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成について、図3を用いて説明する。

20

【0039】

本実施形態による光ポンピング磁力計200は、図3に示すように、セル201と、恒温断熱槽227と、バイアス磁場調整用コイル228とを有している。また、光ポンピング磁力計200は、プローブ光光源202と、直線偏光子203と、2分の1波長板204とを有している。また、光ポンピング磁力計200は、ポンプ光光源206と、直線偏光子207と、ビームスプリッタ208と、ミラー209と、光変調器211, 212と、4分の1波長板213, 214と、光ターミネータ215, 216とを有している。また、光ポンピング磁力計200は、偏光分離素子217と、フォトディテクタ218, 219と、差分回路220と、復調器221, 222とを有している。

30

【0040】

アルカリ金属原子、例えばカリウム(K)が内包されたセル201は、恒温断熱槽227内に配置されている。恒温断熱槽227の壁面には、恒温断熱槽227内にプローブ光205及びポンプ光210b, 210cを導入するための光学窓223, 224, 225, 226が設けられている。恒温断熱槽227の周囲には、バイアス磁場調整用コイル228が配置されている。

【0041】

プローブ光光源202は、直線偏光子203、2分の1波長板204及び光学窓223を介して、セル201に直線偏光成分を有するプローブ光205を入射するようになっている。セル201を通過したプローブ光205は、光学窓224を介して偏光分離素子217に入射するようになっている。これらプローブ光光学系は、プローブ光205が、図3に示す座標系においてx方向に沿ってセル201内を伝搬するように、配置されている。

40

【0042】

ポンプ光光源206は、直線偏光子207、ビームスプリッタ208、ミラー209、光変調器211, 212、4分の1波長板213, 214及び光学窓225を介して、セル201にポンプ光210b, 210cを入射するようになっている。ポンプ光光源206から出射されて直線偏光子207を通過したポンプ光210aは、ビームスプリッタ208により、反射光であるポンプ光210bと、透過光であるポンプ光210cとに分割される。ポンプ光210bは、ミラー209、光変調器211、4分の1波長板213及

50

び光学窓 225 を介して恒温断熱槽 227 内に導入され、セル 201 に入射するようになっている。また、ポンプ光 210c は、光変調器 212、4 分の 1 波長板 214 及び光学窓 225 を介して恒温断熱槽 227 内に導入され、セル 201 に入射するようになっている。

【0043】

これにより、セル 201 の互いに異なる位置に、円偏光成分を有するポンプ光 210b, 210c が入射する。セル 201 に入射したポンプ光 210b, 210c は、セル 201 内の互いに異なる位置においてプローブ光 205と交差する。

【0044】

セル 201 を通過したポンプ光 210b, 210c は、光学窓 226 を介して光ターミネータ 215, 216 にそれぞれ入射するようになっている。これらポンプ光光学系は、ポンプ光 210b, 210c が、図 3 に示す座標系において、-z 方向に沿ってセル 201 内を伝搬するように、配置されている。

【0045】

偏光分離素子 217 に入射したプローブ光 205 は、偏光分離素子 217 により、その偏光面の角度に応じた強度によって反射光と透過光とに分割される。そして、偏光分離素子 217 の透過光はフォトディテクタ 218 に入射し、偏光分離素子 217 の反射光はフォトディテクタ 219 に入射するようになっている。フォトディテクタ 218, 219 には、差分回路 220 を介して、復調器 221, 222 が接続されている。

【0046】

次に、本実施形態による光ポンピング磁力計 200 の各構成部分のそれについて、より具体的に説明する。

【0047】

〔1〕セル 201

セル 201 は、ガラスなど、プローブ光やポンプ光に対して透明な材料により構成された気密構造体である。セル 201 内には、アルカリ金属原子としてカリウム (K) が封入されている。セル 201 に利用可能なアルカリ金属原子としては、カリウムのほか、ルビジウム (Rb) やセシウム (Cs) が挙げられる。セル 201 内に封入するアルカリ金属原子は、必ずしも 1 種類である必要はなく、カリウム、ルビジウム及びセシウムを含む群から選択される少なくとも 1 種類の原子を含むことができる。

【0048】

また、セル 201 内には、バッファガスと、クエンチャガスとが更に封入されている。バッファガスとしては、ヘリウム (He) ガスが挙げられる。ヘリウムガスは、偏極アルカリ金属原子の拡散を抑える効果を有しており、セル壁との衝突によるスピン緩和を抑制して偏極率を高めるために有効である。また、クエンチャガスとしては、窒素 (N₂) ガスが挙げられる。窒素ガスは、励起状態にあるカリウム原子からエネルギーを奪い蛍光を抑えるためのクエンチャガスであり、光ポンピングの効率を上げるために有効である。

【0049】

カリウム原子は、自原子同士及びヘリウム原子との衝突によるスピン偏極破壊に対する散乱断面積が、アルカリ金属原子の中で最も小さい。なお、スピン偏極破壊に対する散乱断面積は、カリウム原子に次いでルビジウム原子が小さい。そのため、緩和時間が長く磁場信号応答の大きい磁気センサを構築するためのアルカリ金属原子としては、カリウムが好ましい。

【0050】

一方、ルビジウムやセシウムはカリウムに比べて同一温度下での蒸気圧が高いため、カリウムに比べてより低い温度で同じ原子数密度を得ることができるという利点がある。このため、より低温で動作するセンサを構築する等の観点からは、ルビジウム原子やセシウム原子を用いることも有効である。

【0051】

またセル 201 中のうちポンプ光 210b, 210c とプローブ光 205 がセル中で交

10

20

30

40

50

差する測定領域間に、スピン偏極された原子が拡散およびスピン交換衝突を通じてそのスピン偏極が混合しないように、互いを物理的に分離する板のようなものを設けてもよい。この板はプローブ光が透過できるようにガラスのように透明なものが好ましく、プローブ光が通る個所以外はバッファガスが通れるような穴が空いていてもよい。

【0052】

〔2〕恒温断熱槽227

セル201は、恒温断熱槽227内に設置されている。測定時には、セル201内のアルカリ金属ガスの密度を高めるために、セル201を最大200程度の温度まで加熱する。この熱が外に逃げないようにする役割を、恒温断熱槽227は担っている。恒温断熱槽227の、プローブ光205の光路上には光学窓223, 224が設置され、ポンプ光210b, 210cの光路上には光学窓226, 225が設置されており、それら光が恒温断熱槽227内を通過できるようになっている。10

【0053】

セル201の加熱方式としては、例えば、加熱された不活性な気体を外部から恒温断熱槽227内に流し込みセル201を加熱する方式が挙げられる。或いは、恒温断熱槽227内に配置したヒータに電流を流して加熱する方式でもよい。この場合には、ヒータ電流に起因する磁場が計測信号に影響することを回避するために、ポンプ光の変調周波数よりも倍以上高い周波数の電流でヒータを駆動することが有効である。また、恒温断熱槽227の外部から導入した光をセル201或いはセル201の周囲に配置した吸光部材で吸収させることにより加熱する光加熱方式であってもよい。20

【0054】

〔3〕バイアス磁場調整用コイル228

バイアス磁場調整用コイル228は、図3に示すように、恒温断熱槽227の周囲に配置される。バイアス磁場調整用コイル228は、不図示の磁気シールド内に設置されている。この磁気シールドは、外部環境から侵入する磁場を低減するためのものである。

【0055】

バイアス磁場調整用コイル228は、セル201周囲の磁場環境を操作するために用いられるものである。バイアス磁場調整用コイル228の具体的例としては、例えば、3軸ヘルムホルツコイルが挙げられる。具体的には、バイアス磁場調整用コイル228により、測定周波数とラーモア周波数とが一致し共鳴するようにポンプ光210と平行方向(図中z方向)にバイアス磁場を印加する。そして、プローブ光205及びポンプ光210に対して直交する方向(図中y方向)の磁場を測定する。30

【0056】

また、その他の方向に磁場を印加するためのバイアス磁場調整用コイル228(図中x方向及びy方向)は、残留磁場を打ち消し磁場が印加されていない環境にするために使用される。更に、磁場の不均一を補正するために、シムコイルを追加してもよい。

【0057】

〔4〕プローブ光光学系

プローブ光光学系は、図3に示すように、プローブ光光源202と、直線偏光子203と、2分の1波長板204とを含んで構成される。40

【0058】

プローブ光光源202から出射されるプローブ光205の波長は、信号応答が最大になるようカリウム原子のD1遷移共鳴波長から数GHzないし数十GHz程度の離調をとる。信号応答を最大にする離調の値は、セル201のバッファガス圧及び温度に依存する。この波長を安定的に保つために、プローブ光光源202は外部共振器等の安定化手段を有していてもよい。プローブ光205は、直線偏光子203により直線偏光とされる。また、波長の選定基準として、SNRを最大化するという条件で離調を選定してもよい。いずれの基準を用いた場合も、最適な離調量はセル内のポンプ光強度に依存するので、計測中に定期的にキャリブレーションを行って、離調量の補正を行うことも効果的である。

【0059】

10

20

30

40

50

[5] ポンプ光光学系

ポンプ光光学系は、図3に示すように、ポンプ光光源206と、直線偏光子207と、ビームスプリッタ208と、ミラー209と、光変調器211, 212と、4分の1波長板213, 214と、光ターミネータ215, 216とを含んで構成される。

【 0 0 6 0 】

ポンプ光光源206から出射されるポンプ光210aの波長は、カリウム原子のD1遷移共鳴波長に合わせる。ポンプ光光源206は、ポンプ光210aの波長をカリウム原子のD1遷移共鳴波長に固定するための周波数安定化手段を有している。このポンプ光210aは、直線偏光子207により直線偏光に成形された後、ビームスプリッタ208によって、ポンプ光210bとポンプ光210cとに分割される。

10

【 0 0 6 1 】

ポンプ光210b、210cは、それぞれ光変調器211, 212にて変調を受けた後、4分の1波長板213, 214によって円偏光に変換される。この際、ポンプ光210b及びポンプ光210cは、それぞれ右回り円偏光と左回り円偏光のどちらに変換してもよいが、互いに逆の円偏光成分に変換しておくと、異なる円偏光でスピン偏極された原子が衝突するとスピン緩和が働くため、測定領域間のスピン偏極が混合することを妨げることができる。

【 0 0 6 2 】

円偏光となったポンプ光210b及びポンプ光210cは、光学窓225を透過してセル201に入射し、セル201中のポンプ光210b, 210cの光路上のカリウム原子群をそれぞれ偏極する。ポンプ光210b, 210cは、セルの異なる箇所に同時に入射することができる。セル201を透過したポンプ光210は、光学窓226を透過し、光ターミネータ215, 216により終端処理が行われる。

20

【 0 0 6 3 】

なお、ポンプ光光学系は、ポンプ光210aを3つ以上の複数のポンプ光に分割してもよい。その場合、複数のポンプ光をセルの複数箇所に同時に入射することができる。また、それぞれのポンプ光の間に緩和光として、波長をカリウム原子のD1遷移共鳴波長近辺に合わせた光を入れてもよい。ポンプ光の間に緩和光を照射することにより、この照射領域にあるカリウムのスピン緩和を促進し、カリウムの拡散およびスピン交換衝突を通じて測定領域間のスpin偏極が混合するのを妨げることができる。この緩和光の偏光は円偏光でも楕円偏光でも無偏光でも構わないが、一定強度の緩和光で効率よくスpin緩和を促進するためには直線偏光が好ましい。

30

【 0 0 6 4 】

[6] 光変調系（光変調器211, 212）

ポンプ光210b及びポンプ光210cは、光変調器211, 212によってそのポンピングレートに変調を受ける。縦緩和、横緩和によってスpin偏極が壊れてしまう前に光ポンピングによって再度スpin偏極する必要があるため、このときの変調周波数は、ある程度周波数が高い必要がある。スpin偏極の縦緩和時間T₁はおおよそT₁ ~ 10 msであるため、変調周波数としては、10 Hz以上の周波数が好ましく、100 Hz以上の周波数が好ましく、1 kHz以上の周波数が更に好ましい。

40

【 0 0 6 5 】

また、式(5)の第2項の係数、

【 数7 】

$$\frac{sR_{op}^2 \Omega_1}{4q\omega_a \left(\frac{4q}{T_1} + 2R_{op} \right)}$$

が示す通り、変調後の磁気信号に対する応答は、変調周波数_aに反比例する。このことは、あまりに高い周波数で変調するとスpin偏極が追隨せず、信号応答が弱くなってしまうことを示している。

50

【 0 0 6 6 】

原子磁気センサの原理的なノイズとして、スピンプロジェクションノイズとフォトンショットノイズとが存在し、これらのノイズレベルは変調を掛けても変わらない。典型的な実験条件下（温度 180 °C、プローブ光波長 770 nm、プローブ光パワー 0.1 mW、プローブ光路長 5 cm、ポンプ光強度 0.2 mW/cm²）では、フォトンショットノイズが支配的なノイズになる。プローブ光パワーよりフォトンショットノイズを計算すると、磁場ノイズに換算して $10 \text{ fT}_{\text{rms}} / \text{Hz}^{1/2}$ となる変調周波数は、およそ 5 kHz となる。このため、変調周波数は、5 kHz 以下であることが好ましい。

【 0 0 6 7 】

光変調器 211, 212 における変調方式としては、例えば、ポンプ光強度変調、円偏光度変調、波長変調が挙げられる。光変調器 211, 212 の具体的な構成について、図 4 を用いて以下に説明する。

【 0 0 6 8 】**[6 . 1] ポンプ光強度変調**

ポンプ光強度変調の一例としては、光チョッパーを利用した方法が挙げられる。光チョッパーは、周期的に光を遮蔽するものであり、光チョッパーを通過した光の光強度は、矩形波で変調されることになる。すなわち、図 4 (a) に示すように、ポンプ光 301a を光チョッパー 302 に入射することで、光強度に矩形波状の変調のかかったポンプ光 301b を得ることができる。光チョッパー 302 よる変調周波数は、光チョッパー 302 を制御するための信号発生器 303 により制御することができる。

10

【 0 0 6 9 】

ポンプ光強度変調の他の例としては、電気光学素子を利用した方法が挙げられる。電気光学素子は、電気光学効果によって結晶の複屈折率が変化することを利用して、光の位相・偏光状態を変化させるものである。図 4 (b) に示すように、ポンプ光 304a を 2 分の 1 波長板 305 に入射し、ポンプ光 304a の偏光を電気光学素子 306 の電場の印加方向に対して 45° 傾けておく。そして、2 分の 1 波長板 305 を通したポンプ光 304a を電気光学素子 306 に通し、その偏光の位相差に変調を掛ける。これは、光の円偏光度を周期的に変化させることと同じである。円偏光度に変調がかかった光を直線偏光子 308 に通すと、直線偏光子 308 の透過軸方向と異なる方向の偏光成分は透過しないため、その円偏光度の変調を強度変調に変換することができる。すなわち、光強度に変調のかかったポンプ光 304b を得ることができる。電気光学素子 306 による変調周波数は、電気光学素子 306 に印加する電界を制御するための信号発生器 307 により制御することができる。

20

【 0 0 7 0 】

ポンプ光強度変調は、これらのことと同様の方法の他、DFB レーザ、DBR レーザなどのレーザ光源の駆動電流そのものに変調を加える直接強度変調という方法でもよい。また、電界吸収型光変調器などの電気的光変調器を用いることもできる。

30

【 0 0 7 1 】**[6 . 2] 円偏光度変調**

円偏光度変調の一例としては、電気光学素子を利用した方法が挙げられる。図 4 (c) に示すように、ポンプ光 309a を 2 分の 1 波長板 310 に入射し、その偏光を電気光学素子 311 の電場の印加方向に対して 45° 傾けておく。そして、2 分の 1 波長板 310 を通したポンプ光 309a を電気光学素子 311 に通し、その偏光の円偏光度に変調を掛ける。これにより、電気光学素子 311 を透過したポンプ光 309b は、直線偏光から円偏光に、そしてまた直線偏光へと、周期的に偏光が変化する。このとき、円偏光が逆転するまでの大きな振幅の変調をかけてもよい。電気光学素子 311 による変調周波数は、電気光学素子 311 に印加する電界を制御するための信号発生器 312 により制御することができる。

40

【 0 0 7 2 】**[6 . 3] ポンプ光波長変調**

50

ポンプ光の波長を変化させる手段の一例としては、音響光学素子を利用した方法が挙げられる。図4(d)に示すように、音響光学素子315にポンプ光313aを入射させる際には、最適な偏光角が存在するため、2分の1波長板314によってその偏光角を調整しておくことが望ましい。RF発振器316により音響光学素子315に電気信号を印加すると、ポンプ光313aはいくつかのオーダーに回折され、その周波数が変化する。音響光学素子315の入射前のポンプ光313aの周波数を ω_0 とし、RF発振器316が印加する電気信号の周波数を ω_{RF} とすると、音響光学素子315はポンプ光313aを $\omega_0 + N\omega_{RF}$ の周波数を持つN次の回折光に空間的に分離する。ここでNは任意の整数を表している。これにより、波長変調したポンプ光313bを得ることができる。一次回折光の周波数変化量は、一般的に数十MHzから数百MHz程度である。変調信号の強度を大きくするためには、周波数変化量が、その吸収線幅の半値半幅程度には大きい方がよく、ヘリウムバッファガスを1[magg]程度入れたガラスセルの場合は、周波数変化量が数GHz程度であるのが好ましい。このために高次の回折光を選ぶ必要がある。ここいう[magg]とは、0で測った気圧の大きさを表している。

【0073】

ポンプ光波長変調は、この方法の他、DFBレーザ、DBRレーザなどのレーザ光源の電気的波長チューニングによって行うこともできる。

【0074】

〔7〕偏光測定系

偏光測定系は、図3に示すように、偏光分離素子217と、フォトディテクタ218, 219と、差分回路220と、復調器221, 222とを含んで構成される。

【0075】

偏光分離素子217に入射するプローブ光205は、偏光角 θ に応じて、透過光と反射光とに分割される。光パワーで比を取れば、透過光と反射光との強度比は、 $\cos^2 \theta : \sin^2 \theta$ となる。ここでは、偏光分離素子217への入射光がすべて透過してフォトディテクタ218に入射する偏光状態、すなわち $\theta = 0^\circ$ の場合、を基準にしている。このとき、 $\theta = 90^\circ$ の光は全て反射され、フォトディテクタ219に入射する。

【0076】

2つに分割された光のパワー強度をフォトディテクタ218, 219によりそれぞれ測定し、その差を差分回路220から出力する。被測定磁場が存在しないときのプローブ光205の偏光を $\theta = 45^\circ$ に合わせておくと、被測定磁場が存在しないときにはフォトディテクタ218, 219に同じ光パワーの光が入射することになり、差分回路220からの出力は0になる。

【0077】

一方、被測定磁場が存在するときには、その大きさに応じた偏光面の回転が生じ、フォトディテクタ218, 219には異なる光パワーの光が入射することになり、差分回路220からは0ではないこれらの差分が出力される。すなわち、このときの差分回路220からの出力は、プローブ光の偏光面の回転角に比例した信号であり、被測定磁場の大きさを反映したものである。

【0078】

差分回路220の出力信号は、復調器221, 222に入力され、復調器221, 222において復調される。復調器221, 222としては、例えば、ロックインアンプが挙げられる。このとき、復調器221において、光変調器211と同じ周波数で復調することにより、プローブ光205とポンプ光210bとの交差領域の磁気信号を取り出すことができる。また、復調器222においては、光変調器212と同じ周波数で復調することにより、プローブ光205とポンプ光210cとの交差領域の磁気信号を取り出すことができる。

【0079】

なお、ここでは2つの復調器221, 222を用いて異なる領域の磁気信号を取得する例を示したが、異なる領域の磁気信号を取得する方法は、これに限定されるものではない

10

20

30

40

50

。例えば、復調器を複数台用意する代わりに、差分回路 220 の出力を A/D コンバータにデジタル信号として取り込み、その後、デジタル信号処理を行うようにしてもよい。取り込んだデジタル信号について、周波数領域でそれぞれの変調周波数に合わせた所定の周波数幅のデータをフィルタリングすることで、それぞれの交差領域における磁気信号を分離することができる。

【0080】

また、交差領域間の磁気信号の分離精度を高めるために、センサと信号源の間にアルミニウム等導電体の薄板を配置することが可能である。例えば、ポンプ光 210b, 210c それぞれの変調周波数が f_b [Hz], f_c [Hz] であり、測定周波数が f_x [Hz] 10 とすると、差分回路 220 からの出力の周波数スペクトルは $f_b - f_x$ [Hz], $f_b + f_x$ [Hz], $f_c - f_x$ [Hz], $f_c + f_x$ [Hz] の 4 つのピークをもつスペクトルとなる。ここで測定周波数 f_x が変調周波数差の半分、 $(f_b - f_c) / 2$ [Hz] 以上だと、 $f_b + f_x > f_c - f_x$ となり、復調器 221 からは $f_c - f_b - f_x$ [Hz] という周波数の信号も出力されてしまう。これはポンプ光 210c が作る交差領域からの信号がノイズとして復調器 221 からの出力に入ってしまうことを意味している。この混入を防ぐために、アルミニウム等導電体の薄板を恒温断熱槽 227 の周囲に配置し周波数が $(f_b - f_c) / 2$ [Hz] 以上のものを遮蔽すれば高周波の磁気信号が遮蔽され、交差領域間の磁気信号の分離精度が高まる。時間変化する磁場に対する導電体による遮蔽効果は、高周波ほど高く、ローパスフィルター特性である。導電体板の厚さの目安としては、カットオフ周波数での交流磁場に対する表皮深さ程度とすることができる。変調周波数の周波数差が 1 kHz の場合、500 Hz 以上の磁気信号を $1/e$ (0.37) に低減するためには RF 遮蔽効果を考えると、3 mm 厚のアルミニウム板を配置することで、500 Hz 以上の信号を減衰させつつ、100 Hz 以下の生体磁気信号に対してはほとんど減衰を及ぼさない構成とできる。

【0081】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光の変調周波数を変えるので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。

【0082】

[第3実施形態]

本発明の第3実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について、図3及び図5を用いて説明する。図1乃至図4に示す第1及び第2実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0083】

はじめに、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成について、図3を用いて説明する。

【0084】

本実施形態による光ポンピング磁力計は、復調器 221, 222 を使用しない他は、図3に示す第2実施形態による光ポンピング磁力計と同様である。それ以外の構成部分は、第2実施形態による光ポンピング磁力計と同じもので構成することができる。セル 201、恒温断熱槽 227、バイアス磁場調整用コイル 228、プローブ光光学系、光変調器 211, 212 を除くポンプ光光学系については、第2実施形態と同じように動作するものである。

【0085】

次に、本実施形態による光ポンピング磁力計の動作について、図3及び図5を用いて説明する。図5は、本実施形態による光ポンピング磁力計におけるポンプ光変調の一例を示す図である。

10

20

30

40

50

【0086】

本実施形態による光ポンピング磁力計では、それぞれのポンプ光 $210b$, $210c$ に加える変調の周波数は同じであり、変調の位相が互いに異なっている。第2実施形態と同じように実施できる部分についての説明は省略して、この実施形態に固有の部分を中心に以下に説明する。

【0087】

本実施形態では、光変調器 211 , 212 によってポンプ光 $210b$, $210c$ に与える変調の周波数 $f_{m o d}$ は同じであり、変調の位相が異なっている。変調周波数 $f_{m o d}$ は、変調周波数 $f_{m o d}$ とスピン偏極の緩和時間 T_2 との関係が、 $T_2 = 1 / (2\pi f_{m o d})$ となるように選択される。一例としては、変調周波数 $f_{m o d}$ が 90 Hz のとき、緩和時間 T_2 が 1.5 ms となるアルカリ金属セルが挙げられる。第2実施形態に記載したように、典型的にはスピン偏極の緩和時間 T_1 は、 10 ms 程度である。このセルにおいて、緩和時間 T_2 を 1.5 ms とするために、衝突断面積が大きいクエンチャガスの窒素の封入量を多くして、スピン偏極の緩和時間を短縮している。

【0088】

位相の異なる強度変調の様子を、図5(a)に示す。ポンプ光 $210b$ は、位相 $\phi = 0$ から π の間の光強度が大きく、位相 $\phi = \pi$ から 2π の間は、光強度が0となっている。また、ポンプ光 $210c$ は、位相 $\phi = 0$ から π の間の光強度が0であり、位相 $\phi = \pi$ から 2π の間は、光強度が大きくなっている。光強度の変調は、図5(b)に示すように、光ポンピングレートの変調でもある。

【0089】

このように、同じ周波数で異なる位相で変調されたポンプ光 $210b$, $210c$ が、プローブ光 205 の光路上の異なる領域に照射される。この結果、それぞれのポンプ光 $210b$, $210c$ とプローブ光 205 との交差する領域でのポンプ光方向のスピン偏極の z 成分 S_z は、図5(c)に示すようになる。すなわち、ポンプ光 $210b$ が照射される領域とポンプ光 $210c$ が照射される領域とでは、互いに相補的な周期的な変調を受ける。ただし、緩和時間の影響で、それぞれのスピン偏極の z 成分 S_z の大きさの時間波形は、ポンプ光 $210b$, $210c$ の矩形波に対して有限の立ち上がり、立下り時間で制限されたなまつた波形となる。

【0090】

このスピン偏極の z 成分 S_z が、さらに測定対象としての磁場に応じて回転し、プローブ光方向のスピン偏極の x 成分 S_x を生じるので、プローブ光 205 で読み出される信号も、変調を受けた信号を重ね合わせたものとなっている。プローブ光 205 から、偏光分離素子 217 、フォトディテクタ 218 , 219 及び差分回路 220 を経て得られる出力がプローブ光 205 の偏光面の回転角に比例した信号であることは、第2実施形態の場合と同じである。

【0091】

差分回路 220 からの出力に対しては、以下のようないくつかの信号処理を行うことにより、各測定領域での磁場信号を分離することができる。

【0092】

まず、差分回路 220 からの出力は、時系列の信号としてA/Dコンバータでデジタル化する。基準とする変調周波数における位相を参照して、このデジタルデータを2つの時系列データに振り分ける。それぞれの時系列データについて、データの欠落点は、前後のデータからの補間を行う。サンプリング定理を考慮すると、信号帯域が変調周波数の $1/2$ よりも低周波域に制限されていれば、このような補間によって、この信号を再現できることが保証されている。実際には、位相条件を考慮した、連続した複数点のサンプリングデータがあるので、よりスムーズな補間が可能である。

【0093】

第2実施形態では、1つのプローブ光 205 の光路上の異なる場所からの信号という空間情報を信号の変調周波数に保持させていたが、本実施形態では、信号が変調される位相

10

20

30

40

50

に保持させている。このような変調の方法としては、第2実施形態の説明に記載した、円偏光度の変調やポンプ光波長の変調も有効である。特に、円偏光度の変調を矩形波状に用いた場合には、ポンプしていない位相の範囲内では直線偏光のポンプ光によってスピニ偏極を積極的に破壊させる作用も生じ、ひいては緩和時間の短縮に寄与するため、急峻な波形で信号を分離できるようになる。また、ポンプしていない位相の範囲内で、別途に直線偏光の光を緩和光として照射してもよい。スピニ緩和時間を短縮することで、カリウムの拡散およびスピニ交換衝突を通じて2つの測定領域間のスピニ偏極が混合するのを妨げることができる。信号分離について、位相を参照して振り分ける他にも、緩和特性を考慮したデコンボリューションや、独立成分解析などのデジタル信号処理を適用することで、さらなるノイズ低減が可能となる。

10

【0094】

なお、本実施形態では、1つのプローブ光に対して、2つのポンプ光を用いる例を説明したが、ポンプ光の数を3つ、4つと増やすことも可能である。ポンプ光を3つ用いて3か所の測定の多重化を行う場合には、位相について、0から $2\pi/3$ 、 $2\pi/3$ から $4\pi/3$ 、 $4\pi/3$ から 2π の3つの範囲に分割すればよい。また、ポンプ光を4つ用いて4か所の測定の多重化を行う場合には、位相を $\pi/2$ ごとに分割すればよい。

【0095】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光を、同じ変調周波数、異なる位相で変調するので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができ。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気信号を分離して同時に測定することができる。

20

【0096】

[第4実施形態]

本発明の第4実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について、図6及び図7を用いて説明する。図1乃至図5に示す第1乃至第3実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0097】

図6は、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成を示す斜視図である。図7は、本実施形態による光ポンピング磁力計の断面図である。なお、図7は、図6の座標系におけるx-z平面に平行な面に沿った概略断面図である。

30

【0098】

はじめに、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成について、図6及び図7を用いて説明する。

【0099】

本実施形態による光ポンピング磁力計400は、図6に示すように、セルを内包した恒温断熱槽411, 412と、ポンプ光光源401, 402と、光変調器405, 406と、ミラー407, 408とを有している。また、光ポンピング磁力計400は、図6及び図7に示すように、プローブ光光源501と、ミラー507と、偏光測定系508とを有している。図中、恒温断熱槽411, 412に隣接して描かれた球体は、測定対象物413を想定したものである。

40

【0100】

本実施形態による光ポンピング磁力計400の光学系は、プローブ光光源501から発せられたプローブ光502及びポンプ光光源401, 402から発せられたポンプ光403, 404が、それぞれ以下に示す光路を伝搬するように、配置されている。

【0101】

すなわち、プローブ光光源501から発せられたプローブ光502は、光学窓503を介して恒温断熱槽411内に入射し、恒温断熱槽411内をx方向に沿って伝搬した後、光学窓504から出射される。恒温断熱槽411から出射したプローブ光502は、ミラ

50

-507によって90度屈曲され、光学窓505を介して恒温断熱槽412内に入射し、恒温断熱槽412内を-z方向に沿って伝搬した後、光学窓506から出射される。恒温断熱槽412から出射したプローブ光502は、偏光測定系508に入射する。

【0102】

また、ポンプ光光源401から発せられたポンプ光403は、光変調器405及びミラー-407を介して、光学窓409から恒温断熱槽411内に入射し、恒温断熱槽411内をy方向に沿って伝搬する。そして、恒温断熱槽411内に配置された図示しないセル内において、プローブ光502とポンプ光403とが交差する。ポンプ光光源402から発せられたポンプ光404は、光変調器406及びミラー408を介して、光学窓410から恒温断熱槽412内に入射し、恒温断熱槽412内をy方向に沿って伝搬する。そして、恒温断熱槽412内に配置された図示しないセル内において、プローブ光502とポンプ光404とが交差する。10

【0103】

このように、本実施形態による光ポンピング磁力計では、プローブ光502が、恒温断熱槽411をx方向に伝搬し、更に、恒温断熱槽412を-z方向に伝搬するように構成されている。恒温断熱槽411と恒温断熱槽412との間には、プローブ光502を導波する光導波手段（ミラー507を含む）が設けられている。

【0104】

次に、本実施形態による光ポンピング磁力計の構成部分について、これまでに説明した実施形態とは異なる点を中心に、より具体的に説明する。以下において特に説明しない部分については、これまでに説明した実施形態の場合と同様である。20

【0105】

〔1〕恒温断熱槽411，412

恒温断熱槽411，412には、カリウムが封入されたセル（図示せず）がそれぞれ内包されている。恒温断熱槽411，412は、加熱手段を有しており、180程度の温度でセルを加熱できるようになっている。また、恒温断熱槽411，412の周りには、それぞれ、第2実施形態において説明したような、不図示のバイアス磁場調整用コイル及び勾配補正コイルが配置される。

【0106】

恒温断熱槽411，412は、これらが内包するセルの信号応答特性を揃えるために、2つのセル内のバッファガス圧ができるだけ同じ圧力、好ましくはこれらの圧力差を0.1[mag]以内とする。また、恒温断熱槽411，412内の温度も、できるだけ同じ温度、好ましくはこれらの温度差を0.1以内とする。30

【0107】

図6及び図7には、セルを内包した2つの恒温断熱槽411，412を有する場合を示しているが、セルを内包した恒温断熱槽の数は2つに限定されるものではなく、必要に応じて更に増やすこともできる。また、個々のセルは、必ずしも別々の恒温断熱槽内に配置する必要はなく、複数のセルを共通の大きな恒温断熱槽内に配置するようにしてもよい。

【0108】

また、複数の恒温断熱槽411，412の配置は、測定対象物413の形状等に応じて適宜変更することができる。例えば、図6及び図7の例では、恒温断熱槽411内を通過するプローブ光502の光路と、恒温断熱槽412内を通過するプローブ光502の光路とが直交するように恒温断熱槽411，412を配置しているが、これら光路は必ずしも直交する必要はない。40

【0109】

〔2〕ポンプ光光学系

ポンプ光光学系は、ポンプ光光源401，402のほか、光変調器405，406と、ミラー407，408とを含んで構成される。

【0110】

ポンプ光光源401，402は、その出射光の波長をカリウムのD1遷移共鳴波長に固50

定するための周波数安定化手段及びその出射光の偏光を直線偏光にするための直線偏光子を含む。

【0111】

ポンプ光光源401から出射されるポンプ光403及びポンプ光光源402から出射されるポンプ光404は、光変調器405及び光変調器406において、それぞれ互いに異なる周波数にて変調される。変調方法には、例えば第2実施形態において説明した方法を適用することができる。或いは、ポンプ光403、404は、光変調器405及び光変調器406において、第3実施形態において説明した方法により、同じ変調周波数、異なる位相で変調される。

【0112】

光変調器405、406を通過したポンプ光403、404は、それぞれ不図示の4分の1波長板により、円偏光の光となる。ポンプ光403は、ミラー407によりその光路を調整され、光学窓409を通って恒温断熱槽411へ入射し、その円偏光成分によってセルのカリウム原子群を偏極する。ポンプ光404は、ミラー408によりその光路を調整され、光学窓410を通って恒温断熱槽412へ入射し、その円偏光成分によってセルのカリウム原子群を偏極する。

【0113】

[3] プローブ光光学系

プローブ光光学系は、プローブ光光源501と、ミラー507と、偏光測定系508とを含んで構成される。

10

20

【0114】

プローブ光光源501から出射されるプローブ光502の偏光は、直線偏光である。プローブ光502は、光学窓503を透過して恒温断熱槽411内に入り、その内部のセルに入射する。セルに入射したプローブ光502は、セル中のカリウム原子群により、被測定磁場に比例したファラデー回転を受ける。

【0115】

光学窓504を通して恒温断熱槽411から出射したプローブ光502は、ミラー507により、光学窓505を透過して恒温断熱槽412内へ入り、その内部のセルに入射するように誘導される。セルに入射したプローブ光502は、セル中のカリウム原子群より、被測定磁場に比例したファラデー回転を更に受ける。

30

【0116】

なお、恒温断熱槽411と恒温断熱槽412との間の光導波手段は、プローブ光502の偏光を保ちつつ光学窓505から恒温断熱槽412内へプローブ光502を入射するよう誘導できるものであればよく、必ずしもミラー507である必要はない。例えば、ミラー507を用いる代わりに、プリズム等による屈折を用いて誘導し、或いは、偏波面保存光ファイバーなどの光導波路を用いて誘導するようにしてもよい。

【0117】

恒温断熱槽412内のセルを透過したプローブ光502は、光学窓506を通って偏光測定系508に入射する。偏光測定系508は、例えば、第2又は第3実施形態で説明した偏光測定系と同様の構成とすることができます。これにより、プローブ光502とポンプ光403との交差領域の磁気信号と、プローブ光502とポンプ光404との交差領域の磁気信号とを取り出すことができる。

40

【0118】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。また、複数のセルを用いて異なる位置の磁気情報を測定するので、測定位置の設定の自由度を向上することができる。

【0119】

[第5実施形態]

50

本発明の第5実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について図8を用いて説明する。図1乃至図7に示す第1乃至第4実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0120】

図8は、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成を示す図である。図8(a)は、プローブ光の光路に平行な平面における断面図である。図8(b)及び図8(c)は、ポンプ光の光路に平行な平面における断面図であり、それぞれ図8(a)のA-A線断面図及びB-B線断面図に相当する。図8(d)及び図8(e)は、複合プリズムミラーの概略構成及びその変形例を示す図である。10

【0121】

はじめに、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成について、図8を用いて説明する。

【0122】

本実施形態による光ポンピング磁力計900は、図8(a)に示すように、プローブ光光学系903と、恒温断熱槽914と、プリズムミラー907, 909と、複合プリズムミラー908と、セル905, 906と、偏光計904とを有している。また、光ポンピング磁力計900は、図8(b)に示すように、ポンプ光光学系901と、プリズムミラー910と、光ターミネータ912とを有している。また、光ポンピング磁力計900は、図8(c)に示すように、ポンプ光光学系902と、プリズムミラー911と、光ターミネータ913とを有している。プリズムミラー907, 909, 910, 911、複合プリズムミラー908、カリウム金属セル905, 906は、恒温断熱槽914内に配置されている。20

【0123】

本実施形態による光ポンピング磁力計の光学系は、プローブ光光学系903から発せられたプローブ光915及びポンプ光光学系901, 902から発せられたポンプ光916, 917が、それぞれ以下に示す光路を伝搬するように、配置されている。

【0124】

本実施形態において、ポンプ光光学系901, 902は、光変調器を含む光源である。ポンプ光光学系901, 902からは、第4実施形態の場合と同様に、強度変調された円偏光のポンプ光916, 917が、セルサイズの1/2程度までビーム径を拡大したコリメート光として出射される。ポンプ光916は、図8(b)に示すように、光学窓920を介して恒温断熱槽914内に入射され、プリズムミラー910によって進行方向を90度曲げられて、セル905に照射される。セル905を透過したポンプ光916は、光ターミネータ912で吸収される。同様に、ポンプ光917は、図8(c)に示すように、光学窓921を介して恒温断熱槽914内に入射され、プリズムミラー911によって進行方向を90度曲げられて、セル906に照射される。セル906を透過したポンプ光917は、光ターミネータ913で吸収される。30

【0125】

プローブ光915は、セルサイズの1/2程度までビーム径を拡大したコリメート光としてプローブ光光学系903から出射される。プローブ光光学系903から発せられたプローブ光915は、光学窓918を介して恒温断熱槽914内に入射され、プリズムミラー907によって進行方向を90度曲げられて、セル905に入射する。プローブ光915は、セル905内でポンプ光916と交差し、ここでの磁場に応じた偏光面の回転を受ける。40

【0126】

セル905を通過したプローブ光915は、複合プリズムミラー908によって進行方向をわずかに曲げられた後、セル906に入射する。プローブ光915は、セル906内でポンプ光917と交差し、ここでの磁場に応じた偏光面の回転を受ける。50

【0127】

セル906を通過したプローブ光915は、プリズムミラー909によって進行方向を90度曲げられて、光学窓919を介して恒温断熱槽914から出射された後、偏光面の回転角を計測する偏光計904に入射する。

【0128】

このように、本実施形態の光ポンピング磁力計900は、複数のセル905, 906を共通の恒温断熱槽914に配置する例である。また、複合プリズムミラー908を用いることで、プローブ光915の進行方向を少しづつ曲げて行く光学系の実施例もある。

【0129】

複合プリズムミラー908は、図8(d)に示すように、二つの直角プリズム922, 923を組み合わせた素子である。直角プリズム922, 923同士は、互いに、直角をはさむ面のうちの一方で接している。この接触面の法線を回転軸として、角度だけ回転した配置となっている。ここで、角度は、二つの直角プリズム922, 923の直角二等辺三角形の断面が、互いに並行で、実際的には同一平面上にある状態のときを0度としたときの直角プリズム922, 923間の回転角である。また、複合プリズムミラー908は、図8(e)に示すように、これを複数並べることで、プローブ光を何本も通すときに、光路を小さな角度で折り曲げる際のコンパクトな光学系として有用である。

10

【0130】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができ。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。また、複数のセルを1つの恒温断熱層内に配置するので、複数のセル間の温度を容易に近似させることができ、測定精度を向上することができる。

20

【0131】**[第6実施形態]**

本発明の第6実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について、図9を用いて説明する。図1乃至図8に示す第1乃至第5実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

30

【0132】

図9は、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成を示す図である。

【0133】

本実施形態による光ポンピング磁力計600は、図9に示すように、セル601と、恒温断熱槽638と、バイアス磁場調整用コイル639とを有している。また、光ポンピング磁力計600は、プローブ光光源602, 603と、直線偏光子606, 607と、2分の1波長板610, 611とを有している。また、光ポンピング磁力計600は、ポンプ光光源612, 613と、直線偏光素子608, 609と、光変調器616, 617と、4分の1波長板618, 619と、光ターミネータ620, 621とを有している。また、光ポンピング磁力計600は、偏光分離素子622, 623と、フォトディテクタ624, 625, 626, 627と、差分回路628, 629と、復調器630, 631, 632, 633とを有している。

40

【0134】

カリウム及びルビジウムが内包されたセル601は、恒温断熱槽638内に配置されている。恒温断熱槽638の壁面には、恒温断熱槽638内にプローブ光604, 605及びポンプ光614, 615を導入するための光学窓634, 635, 636, 637が設けられている。恒温断熱槽638の周囲には、バイアス磁場調整用コイル639が配置されている。

【0135】

50

プローブ光光源 602 は、直線偏光子 606、2 分の 1 波長板 610 及び光学窓 634 を介して、セル 601 にプローブ光 604 を入射するようになっている。セル 601 を通過したプローブ光 604 は、光学窓 636 を介して偏光分離素子 622 に入射するようになっている。これらプローブ光光学系は、プローブ光 604 が、図 9 に示す座標系において x 方向に沿ってセル 601 内を伝搬するように配置されている。

【0136】

プローブ光光源 603 は、直線偏光子 607、2 分の 1 波長板 611 及び光学窓 634 を介して、セル 601 にプローブ光 605 を入射するようになっている。セル 601 を通過したプローブ光 605 は、光学窓 636 を介して偏光分離素子 623 に入射するようになっている。これらプローブ光光学系は、プローブ光 605 が、図 9 に示す座標系において x 方向に沿ってセル 601 内を伝搬するように配置されている。10

【0137】

ポンプ光光源 612 は、直線偏光素子 608、光変調器 616、4 分の 1 波長板 618 及び光学窓 635 を介して、セル 601 にポンプ光 614 を入射するようになっている。セル 601 を通過したポンプ光 614 は、光学窓 637 を介して光ターミネータ 620 に入射するようになっている。これらポンプ光光学系は、ポンプ光 614 が、図 9 に示す座標系において、-z 方向に沿ってセル 601 内を伝搬するように配置されている。これにより、ポンプ光 614 は、セル 601 内の互いに異なる位置でプローブ光 604, 605 と交差する。

【0138】

ポンプ光光源 613 は、直線偏光子 609、光変調器 617、4 分の 1 波長板 619 及び光学窓 635 を介して、セル 601 にポンプ光 615 を入射するようになっている。セル 601 を通過したポンプ光 615 は、光学窓 637 を介して光ターミネータ 621 に入射するようになっている。これらポンプ光光学系は、ポンプ光 615 が、図 9 に示す座標系において、-z 方向に沿ってセル 601 内を伝搬するように配置されている。これにより、ポンプ光 615 は、セル 601 内の互いに異なる位置でプローブ光 604, 605 と交差する。20

【0139】

偏光分離素子 622 に入射したプローブ光 604 は、偏光分離素子 622 により、その偏光面の角度に応じた強度によって反射光と透過光とに分割される。そして、偏光分離素子 622 の透過光はフォトディテクタ 624 に入射し、偏光分離素子 622 の反射光はフォトディテクタ 625 に入射するようになっている。フォトディテクタ 624, 625 には、差分回路 628 を介して、復調器 630, 631 が接続されている。30

【0140】

偏光分離素子 623 に入射したプローブ光 605 は、偏光分離素子 623 により、その偏光面の角度に応じた強度によって反射光と透過光とに分割される。そして、偏光分離素子 623 の透過光はフォトディテクタ 626 に入射し、偏光分離素子 623 の反射光はフォトディテクタ 627 に入射するようになっている。フォトディテクタ 626, 627 には、差分回路 629 を介して、復調器 632, 633 が接続されている。

【0141】

次に、本実施形態による光ポンピング磁力計の構成部分について、これまでに説明した実施形態とは異なる点を中心に、より具体的に説明する。以下において特に説明しない部分については、これまでに説明した実施形態の場合と同様である。40

【0142】

〔1〕セル 601

セル 601 は、ガラスなど、プローブ光やポンプ光に対して透明な材料により構成された気密構造体である。セル 601 内には、ポンプ光の進行方向のスピン偏極を空間的に均一にするために、アルカリ金属原子として、カリウムとルビジウムとが封入されている。その他の利用可能なアルカリ金属原子の組み合わせとしては、カリウムとセシウムとの組みあわせ、ルビジウムとセシウムとの組みあわせが考えられる。ただし、磁気回転比の大50

きさが同じになる、すなわち核スピン I が同じ同位体の組み合わせは $I = 3 / 2$ である、 $^{3/9}\text{K}$ と $^{8/7}\text{Rb}$ の組み合わせだけである。また、自原子同士及びヘリウム原子との衝突によるスピン偏極破壊に対する散乱断面積は、アルカリ金属原子の中でカリウム原子が最も小さく、ルビジウム原子がその次に小さい。このため、アルカリ金属原子の組み合わせとしては、カリウムとルビジウムとの組み合わせが最も好ましい。

【0143】

また、ルビジウムはカリウムと比べて、同じ温度での蒸気圧が高いため、セル 601 へのルビジウムの封入量を減らしておく。その他にセル 601 内には、バッファガス及びクエンチャガスとして、ヘリウムガス及び窒素ガスを封入しておく。

【0144】

[2] ポンプ光光学系

ポンプ光光学系は、図 9 に示すように、ポンプ光光源 612, 613 と、直線偏光素子 608, 609 と、光変調器 616, 617 と、4 分の 1 波長板 618, 619 と、光ターミネータ 620, 621 とを含んで構成される。

【0145】

ポンプ光光源 612 は、ポンプ光 614 の波長をルビジウム原子の D1 遷移共鳴波長 (794.7 nm) に固定するための周波数安定化手段を有している。また、ポンプ光光源 613 は、ポンプ光 615 の波長をルビジウム原子の D1 遷移共鳴波長 (794.7 nm) に固定するための周波数安定化手段を有している。これらポンプ光 614, 615 は、同じ光源からの光を 2 つに分割して利用してもよい。これらポンプ光 614, 615 の偏光は、直線偏光素子 608, 609 によりそれぞれ直線偏光の光にされた後、光変調器 616, 617 にて変調を受け、4 分の 1 波長板 618, 619 によって円偏光に変換される。円偏光になったポンプ光 614, 615 は、光学窓 635 を通してセル 601 に入射され、セル 601 中のルビジウム原子をスピン偏極する。

【0146】

スピン偏極したルビジウム原子がカリウム原子に衝突すると、スピン交換相互作用が働き、カリウム原子にそのスピン偏極が受け渡される。このため、ルビジウム原子を偏極することによってカリウム原子も偏極することができる。ルビジウム原子の D1 遷移共鳴波長と、カリウム原子の D1 遷移共鳴波長 (770.1 nm) 及び D2 遷移共鳴波長 (766.7 nm) との波長差は、バッファガス存在下の吸収線幅 ($\sim 10\text{ GHz}$) に比べても十分に大きい。したがって、ポンプ光 614, 615 は、カリウム原子によってほとんど吸収されない。

【0147】

また、ルビジウム原子は偏極すると円偏光であるポンプ光 614, 615 を吸収しないため、ルビジウム原子群の偏極率が高くなるとポンプ光 614, 615 の吸収率が小さくなる。この結果、ポンプ光 614, 615 の強度が十分に大きければ、プローブ光 604 との交差領域のルビジウム原子をスpin偏極しても減衰はせず、プローブ光 605 との交差領域のルビジウム原子を十分にスpin偏極することができる。

【0148】

そして、ルビジウム原子の原子数密度をカリウム原子の原子数密度より小さくすることで、カリウム原子群のスpin偏極率をルビジウム原子群のスpin偏極率よりも小さくできる。すなわち、ルビジウム原子から受けるスpin交換衝突によるカリウム原子のスpin偏極率は、仮にルビジウム原子群が完全にスpin偏極していたとしても、ルビジウム原子群のスpin偏極率よりも小さくなる。このため、カリウム原子のスpin偏極率を、磁場感度が最大になる偏極率付近 (~ 0.5) に下げることができる。

【0149】

セル 601 を透過したポンプ光 614, 615 は、光学窓 637 を介して恒温断熱槽 638 内から出射され、光ターミネータ 620, 621 よりそれぞれ終端処理が行われる。

【0150】

[3] プローブ光光学系

10

20

30

40

50

プローブ光光学系は、プローブ光光源 602, 603 と、直線偏光子 606, 607 と、2 分の 1 波長板 610, 611 とを含み構成される。

【0151】

プローブ光光源 602 から出射されるプローブ光 604 の波長及びプローブ光光源 603 から出射されるプローブ光 605 の波長は、信号応答が最大になるようカリウム原子の D1 遷移共鳴から数 GHz 程度の離調をとる。信号応答を最大にする離調の値は、セル 601 のバッファガス圧及び温度に依存する。この波長を安定的に保つために、プローブ光光源 602, 603 は、外部共振器等の安定化手段を有していてもよい。プローブ光 604, 605 は、直線偏光子 606, 607 によりそれぞれ直線偏光にされる。

【0152】

プローブ光 604, 605 は、光学窓 634 を通り、セル 601 に入射する。カリウム原子の D1 遷移共鳴波長から数 GHz 程度の離調をとったプローブ光 604, 605 の波長は、ルビジウム原子の D1 遷移共鳴波長及び D2 遷移共鳴波長とは十分離れている。そのため、プローブ光 604, 605 は、ルビジウム原子によって吸収されたりファラデー相互作用を受けたりせず、被測定磁場によって回転したカリウム原子のスピン偏極のうち x 成分の大きさに比例して、その偏光面がファラデー回転する。セル 601 を透過したプローブ光 604, 605 は光学窓 636 を通り抜け、それぞれ偏光分離素子 622, 623 に入射し偏光測定される。

【0153】

なお、ポンプ光 614, 615 の波長とプローブ光 604, 605 との波長の組み合わせは、上述のものに限定されるものではない。例えば、ポンプ光 614, 615 の波長をカリウムの D1 遷移共鳴波長に合わせ、プローブ光 604, 605 の波長をルビジウムの D1 遷移共鳴波長から信号応答が最大になるよう数 GHz 程度の離調をとった波長とする組み合わせでもよい。

【0154】

〔4〕バイアス磁場調整用コイル 639

バイアス磁場調整用コイル 639 は、図 9 に示すように、恒温断熱槽 638 の周囲に配置される。バイアス磁場調整用コイル 639 は、不図示の磁気シールド内に設置されている。この磁気シールドは、外部環境から侵入する磁場を低減するためのものである。

【0155】

バイアス磁場調整用コイル 639 は、プローブ光 604, 605 とポンプ光 614, 615 との交差領域、計 4 力所の磁場環境を操作するために用いられる。これら 4 力所の測定領域において、互いの磁場環境ができるだけ同じ磁場環境であることが好ましいため、磁場不均一を補正するために更にシムコイルを追加してもよい。

【0156】

また、セル 601、恒温断熱槽 638 及びバイアス磁場調整用コイル 639 は、単一のものである必要はなく、各交差領域に 1 つずつ配置してもよい。

【0157】

〔5〕偏光測定系

偏光測定系は、図 9 に示すように、偏光分離素子 622, 623 と、フォトディテクタ 624, 625, 626, 627 と、差分回路 628, 629 と、復調器 630, 631, 632, 633 とを含んで構成される。このうち、プローブ光 604 の偏光を測定する偏光測定系は、偏光分離素子 622 と、フォトディテクタ 624, 625 と、差分回路 628 と、復調器 630, 631 とにより構成される。また、プローブ光 605 の偏光を測定する偏光測定系は、偏光分離素子 623 と、フォトディテクタ 626, 627 と、差分回路 629 と、復調器 632, 633 とにより構成される。

【0158】

復調器 630 により、光変調器 616 における変調周波数と同じ周波数で復調することで、プローブ光 604 とポンプ光 614 との交差領域の磁気信号を取り出すことができる。また、復調器 631 により、光変調器 617 における変調周波数と同じ周波数で復調す

10

20

30

40

50

ることで、プローブ光 604 とポンプ光 615 との交差領域の磁気信号を取り出すことができる。また、復調器 632 により、光変調器 616 における変調周波数と同じ周波数で復調することで、プローブ光 605 とポンプ光 614 との交差領域の磁気信号を取り出すことができる。また、復調器 633 により、光変調器 617 における変調周波数と同じ周波数で復調することで、プローブ光 605 とポンプ光 615 との交差領域の磁気信号を取り出すことができる。したがって、本実施形態による光ポンピング磁力計 600 では、図 9 に示す座標系において、被測定磁場の y 方向成分 B_y の $x - z$ 平面における 4 点の磁場分布を測定することができる。

【0159】

本実施形態では、ポンプ光の波長として、ルビジウムの D1 遷移共鳴波長を用い、プローブ光の波長として、カリウムの D1 線機共鳴波長を用いる例で説明してきたが、このようなハイブリッドセルでは、ポンプ光の波長としてカリウムの D1 遷移共鳴波長を用い、プローブ光の波長としてルビジウムの D1 遷移共鳴波長を用いることも可能である。セルに関する説明の中で記載したように、この場合には、使用温度でカリウムの密度がルビジウムの密度よりも高くなるような封入量のセルを用いると、高い感度のセンサを構成する上で効果的である。

【0160】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。また、複数のプローブ光と複数のポンプ光とを用いることで、これらプローブ光及びポンプ光の各交差部において、磁気情報を分離して同時に測定することができる。

【0161】

[第7実施形態]

本発明の第7実施形態による光ポンピング磁力計及び磁気センシング方法について図10を用いて説明する。図1乃至図9に示す第1乃至第6実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0162】

図10は、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成を示す図である。

【0163】

本実施形態による光ポンピング磁力計 1000 は、図10に示すように、セル 1001 と、ポンプ光光学系 1002, 1003, 1004, 1005, 1006 と、プローブ光光学系 1008 と、プリズムミラー 1007, 1009, 1010 とを有している。また、光ポンピング磁力計 1000 は、偏光ビームスプリッタ 1011 と、フォトディテクタアレイ 1012, 1013 とを有している。

【0164】

本実施形態による光ポンピング磁力計 1000 は、第6実施形態による光ポンピング磁力計において、1本のプローブ光あたり5か所の磁場を読みとる構成としたものである。本実施形態ではポンプ光の数を5本とした例を示すが、ポンプ光の数はこれに限定されるものではない。

【0165】

ポンプ光光学系 1002, 1003, 1004, 1005, 1006 から出射されたポンプ光は、プリズムミラー 1007 によって光路を 90 度曲げられて、セル 1001 に入射するようになっている。ポンプ光光学系 1002, 1003, 1004, 1005, 1006 では、不図示の光ファイバーから導入された光をスポットサイズ拡大した上でコリメート光とし、また、プリズムミラー 1007 で屈曲された光が円偏光となるような偏光状態の調整が行われる。それぞれのポンプ光光学系 1002, 1003, 1004, 1005, 1006

10

20

30

40

50

05, 1006に導入される光は、各チャンネルそれぞれで不図示の変調器で強度変調を加えた後に、光ファイバーを介して導入される。このため、ポンプ光光学系1002, 1003, 1004, 1005, 1006の各光学系から出射される光は、それぞれのチャンネルごとの周波数で強度変調された光となっている。

【0166】

プローブ光光学系1008から出射されたプローブ光は、プリズムミラー1009によって光路を90度曲げられて、セル1001に入射するようになっている。プローブ光光学系1008では、不図示の光ファイバーから導入された光を扁平にスポットサイズ拡大した上でコリメート光とし、プリズムミラー1009により屈曲した光が直線偏光となるような偏光状態の調整が行われる。プローブ光は、セル1001内でそれぞれのポンプ光と交差した後、セル1001から出射される。セル1001から出射されたプローブ光は、プリズムミラー1010によって光路を90度曲げられて、偏光ビームスプリッタ1011に入射する。偏光ビームスプリッタ1011に入射したプローブ光は、偏光ビームスプリッタ1011において偏波分離され、フォトディテクタアレイ1012, 1013により受光される。同じプローブ光に対応する位置にあるフォトディテクタアレイ1012, 1013からの信号出力の差を求めてことで、各プローブ光ごとのバランス型偏光計を構成している。

【0167】

プローブ光は、扁平幅広で空間的に連続なビームであっても、フォトディテクタアレイ1012, 1013の受光素子の受光部に到達する部分だけが切り出されるため、実質的には個別のビームとなっている。プローブ光光学系1008内で、あらかじめ、光学絞りを配置して、個別のビームを形成してから複数のビームとして出射してもよい。なお、図10には、このようにして5本のプローブ光を出射した場合を例示している。

【0168】

偏光ビームスプリッタ1011とフォトディテクタアレイ1012, 1013とで構成されるバランス型偏光計のバランス位置調整のためには、直線偏光のプローブ光の偏光面を調整することが効果的である。このための位相板（典型的には1/2波長板）は、プローブ光光学系1008の中に配置してもよいし、偏光ビームスプリッタ1011の直前に配してもよい。

【0169】

ルビジウム及びカリウムの両方を封入したセルの利用は、セル全体で、均一な磁場応答を生じさせるために望ましい。ポンプ光の波長として、ルビジウムのD1遷移共鳴波長を用い、プローブ光の波長として、カリウムのD1遷移共鳴波長を用いることで、セル内全体にわたって、ルビジウムの高いスピinn偏極とカリウムの適切な（スピinn偏極率～0.5の近傍が磁場応答の極大に対応する）スピinn偏極を生成できるためである。

【0170】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。また、実質的に複数のプローブ光を含む扁平幅広で空間的に連続なプローブ光と複数のポンプ光とを用いることで、これらプローブ光及びポンプ光の各交差部において、磁気情報を分離して同時に測定することができる。

【0171】

[第8実施形態]

本発明の第8実施形態による光ポンピング磁力計について、図11を用いて説明する。図1乃至図10に示す第1乃至第7実施形態による光ポンピング磁力計と同様の構成要素については同一の名称で表し、説明を省略し或いは簡潔にする。同一の構成要素についての各実施形態における説明は、各実施形態に特有の構成に反しない範囲で、相互に適用可能である。

【0172】

10

20

30

40

50

図11は、本実施形態による光ポンピング磁力計の概略構成を示す図である。

【0173】

本実施形態による光ポンピング磁力計700は、図11(a)に示すように、セルを加熱するオープン701と、光学ガラスセルの内部を真空排気して封止したオープン701の断熱蓋712と、光学系保持部702とを含むセンサヘッド738を有している。

【0174】

光学系保持部702には、ポンプ光光学系703, 704, 705, 706が配置されている。それぞれのポンプ光光学系703, 704, 705, 706は、一端に偏波面保存光ファイバーのコネクタ(不図示)を有する。ポンプ光光学系703, 704, 705, 706は、この光ファイバー端から放出されるレーザ光をレンズでコリメートし、2分の1波長板、直線偏光子、4分の1波長板を介して、円偏光のコリメーションビームを出射する。
10

【0175】

また、光学系保持部702には、プローブ光光学系707が配置されている。プローブ光光学系707は、一端に偏波面保存光ファイバーのコネクタ(不図示)を有する。プローブ光光学系707は、この光ファイバー端から放出されるレーザ光をレンズでコリメートし、2分の1波長板、直線偏光子、2分の1波長板を介して、直線偏光のコリメーションビームを出射する。

【0176】

さらに、光学系保持部702には、2分の1波長板及びレンズからなるレンズユニット708と、偏光ビームスプリッタ709と、ミラー710と、フォトディテクタ711とを含んで構成されるバランス型の偏光計が配置されている。
20

【0177】

オープン701の内部には、図11(c)に示すような測定光学系がオープン基板722上に配置されている。測定光学系は、アルカリ金属が封入されたセル730と、ポンプ光を折り曲げるためのプリズムミラー728と、プローブ光を折り曲げるためのプリズムミラー729とを含む。また、図示は省略するが、オープン701内には、オープン701を加熱するためのヒータ、オープン701内の温度を制御するための温度モニターも配置されている。

【0178】

ポンプ光光学系703, 704, 705, 706から出射されたポンプ光723, 724, 725, 726は、図11(b)に示すように、プリズムミラー728によって光路が屈曲され、それぞれセル730に入射する。また、プローブ光光学系707から出射されたプローブ光727は、プリズムミラー729によって光路が順次屈曲され、その過程で2つのセル730を通過する。これにより、2つのセル730を通過するプローブ光727は、セル730内でポンプ光723, 724, 725, 726と順次交差する。その後にプローブ光727は、レンズユニット708、偏光ビームスプリッタ709及びミラー710を介して、フォトディテクタ711に入射する。
30

【0179】

このように構成されるセンサヘッド738は、図11(d)に示すように、磁気シールド739とバイアス磁場調整用コイル(不図示)の中に配置され、磁場測定に用いられる。

【0180】

ポンプ光光学系703, 704, 705, 706には、図11(d)に示すように、ポンプ光光源733からの光を、電気光学変調器734, 735, 736, 737を介して導入する。すなわち、ポンプ光光源733からの光は、偏波面保存光ファイバーを通して光カッplerで4分割され、電気光学変調器734, 735, 736, 737にそれぞれ入射する。そして、電気光学変調器734, 735, 736, 737から出射される光は、偏波面保存光ファイバーを通して、ポンプ光光学系703, 704, 705, 706にそれぞれ導入される。また、プローブ光光学系707には、プローブ光光源732からの
50

光が、偏波面保存光ファイバーを通して導入される。センサヘッド 738 からの出力信号は、バランス型偏光計の二つのフォトディテクタからの電流信号を、トランスインピーダンスアンプと差動増幅器からなる検出回路 731 で読み出す。

【 0181 】

それぞれの変調周波数を用いた復調、或いはデジタルデータとしてそれぞれの変調周波数周辺の所定の帯域幅の信号を抽出するなどの復調の方法は、これまでに説明した実施形態と同じように行うことができる。

【 0182 】

このように、本実施形態によれば、セルの異なる位置に入射するポンプ光に対して異なる変調を行うので、これら異なる位置におけるそれぞれの磁気情報をプローブ光に乗せることができる。これにより、1つのプローブ光で空間的に異なる場所の磁気情報を分離して同時に測定することができる。また、光源、変調器及び電気信号処理部をセンサヘッドから分離するので、センサヘッドを小型化することができる。

【 0183 】

[変形実施形態]

本発明は、上記実施形態に限らず種々の変形が可能である。

上記実施形態は、本発明を適用しうる幾つかの態様を例示したものに過ぎず、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜修正や変形を行うことを妨げるものではない。

【 符号の説明 】

【 0184 】

101 セル

102 ポンプ光光学系

103a , 103b ポンプ光

104 , 105 光変調器

106 , 107 遅相子

108 プローブ光光学系

109 プローブ光

110 偏光分離素子

111 , 112 フォトディテクタ

113 差分回路

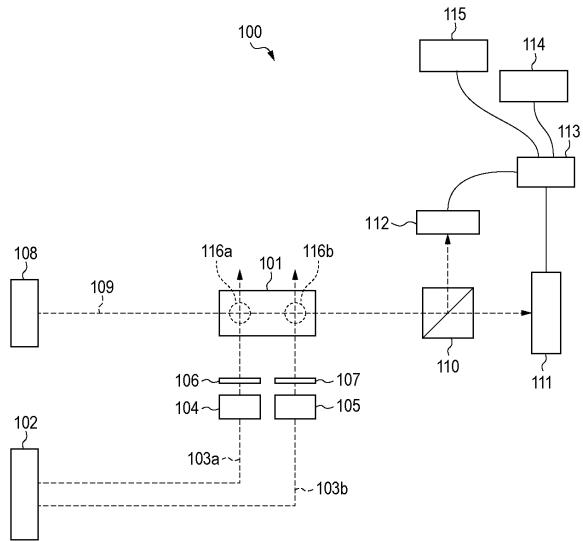
114 , 115 復調器

10

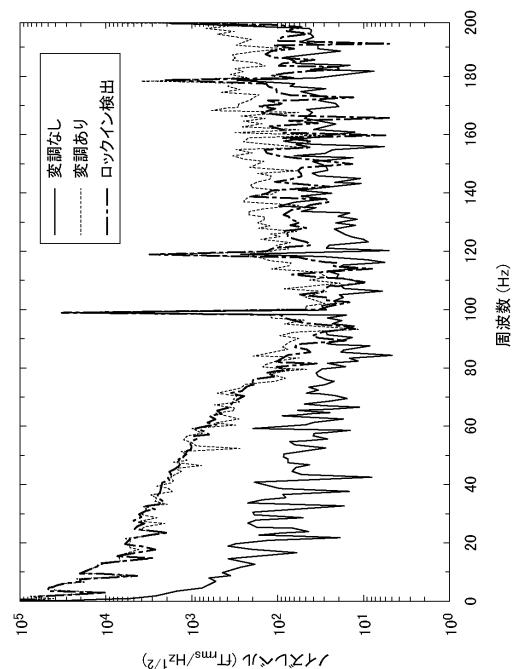
20

30

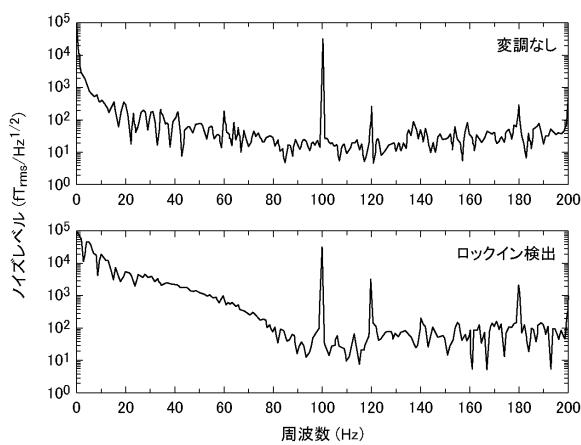
【図1】



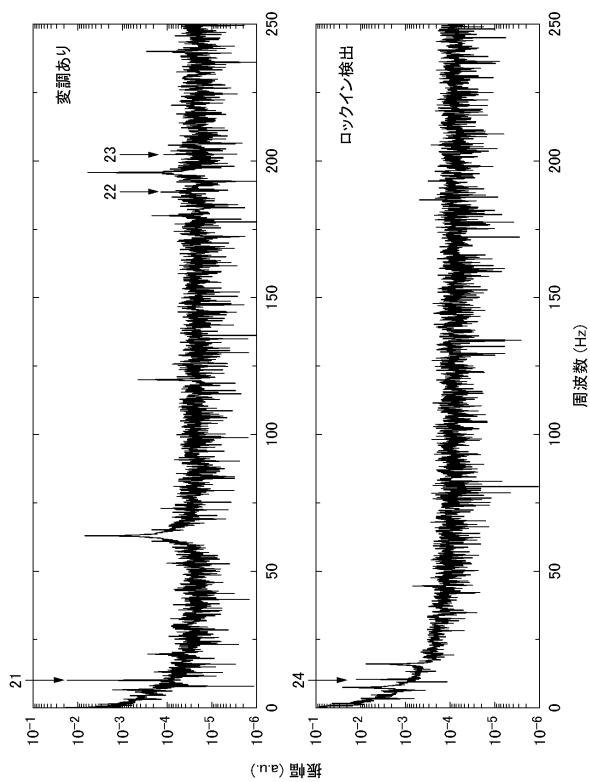
【図2 a】



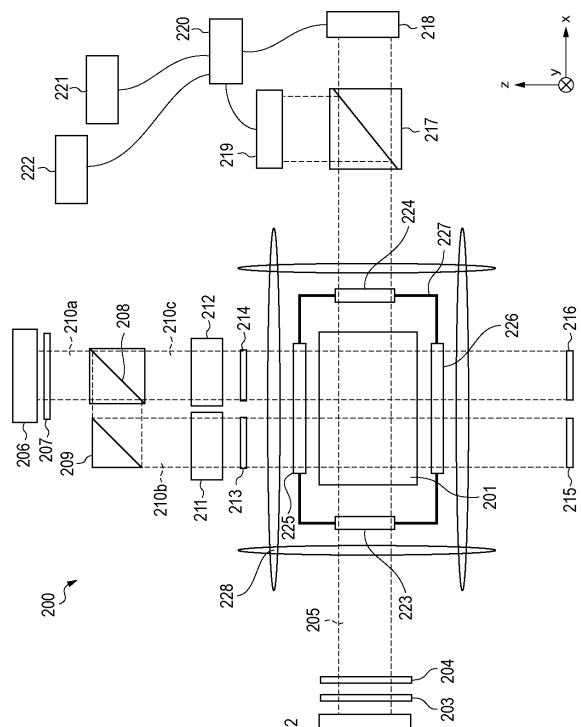
【図2 b】



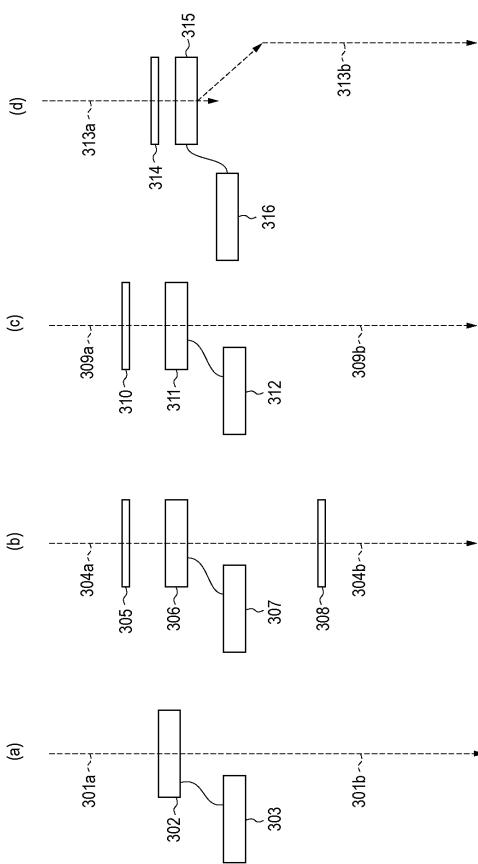
【図2 c】



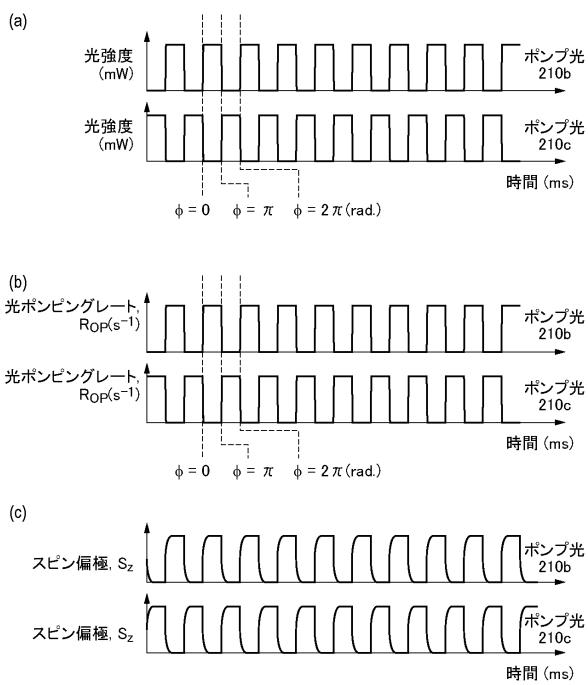
【図3】



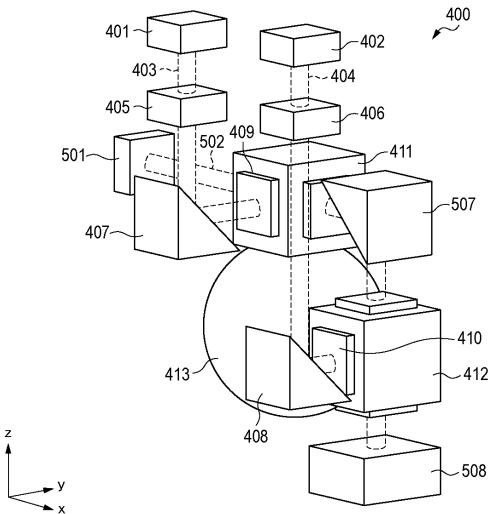
【図4】



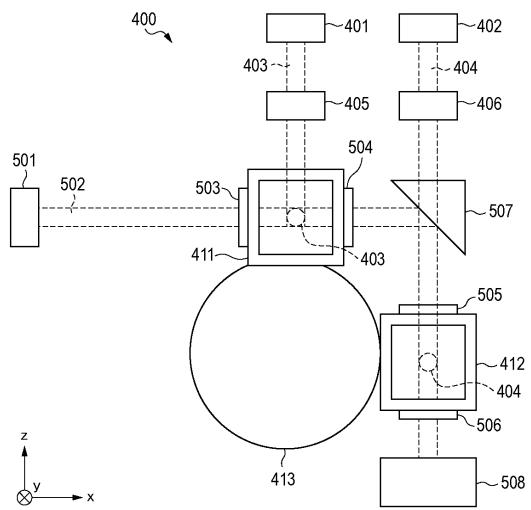
【図5】



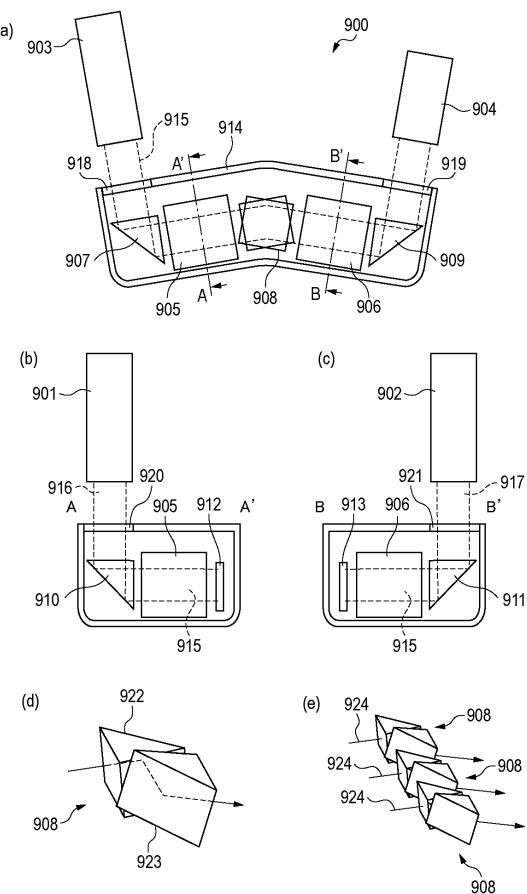
【図6】



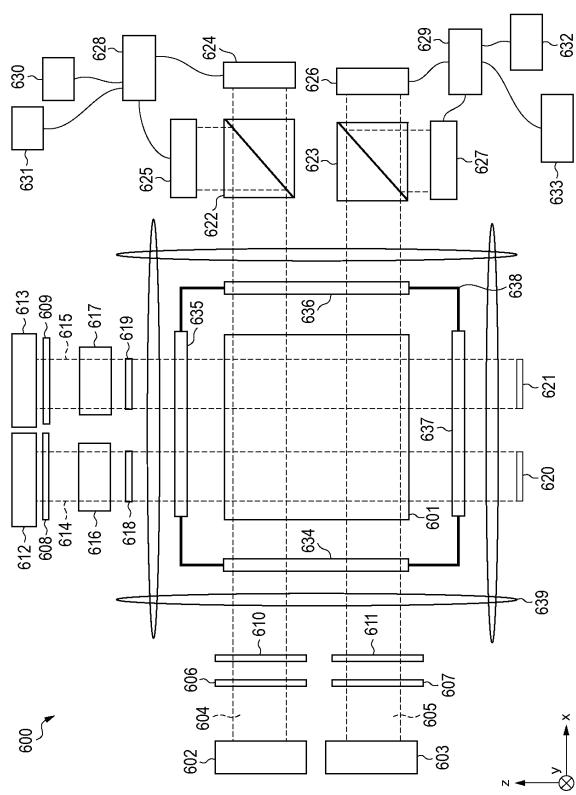
【図7】



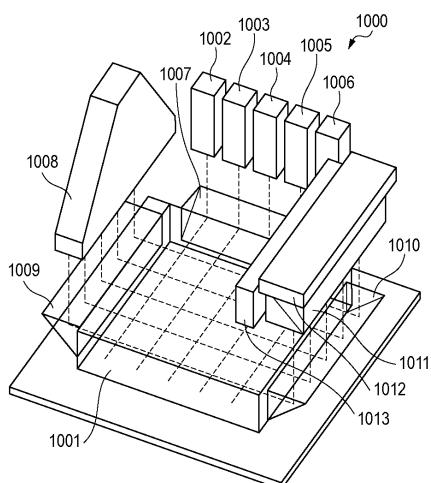
【図8】



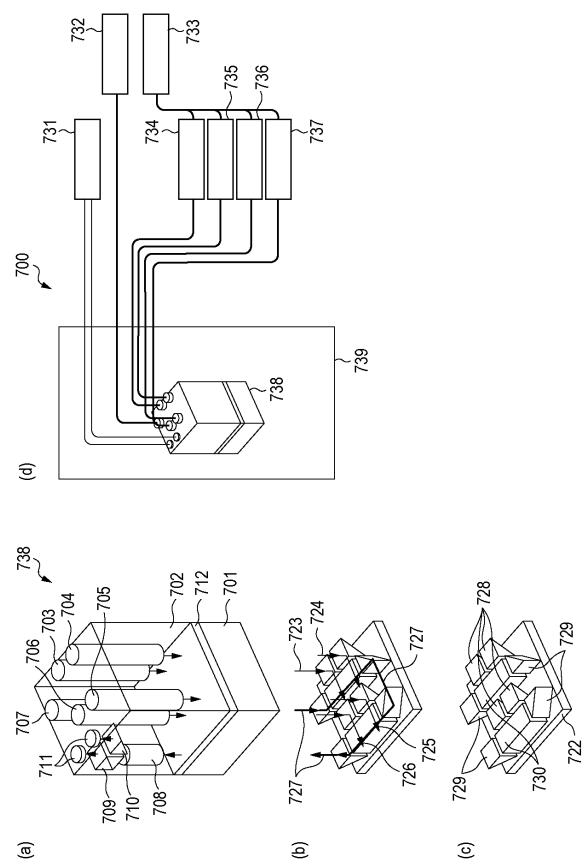
【図9】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 伊藤 陽介
京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内
(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
(72)発明者 水谷 夏彦
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 青木 洋平

(56)参考文献 特開2014-139546(JP,A)
特開2012-042237(JP,A)
特開2009-162554(JP,A)
特開2011-007660(JP,A)
特開2013-134086(JP,A)
市原直 他, 光ポンピング原子磁気センサにおける差動測定でのSNR向上, 日本生体磁気学会誌, 日本, 日本生体磁気学会, 2014年 5月, VOL.27 No.1, Page.68-69
伊藤陽介 他, K-Rbハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサによる生体磁気計測に向けた磁場分布計測, 電子情報通信学会技術研究報告, 日本, 電子情報通信学会, 2013年 3月 6日, Vol.112 No.479, Page.31-34
夏川浩明 他, モジュール型光ポンピング原子磁気センサによるMR信号の遠隔計測, 応用物理学秋季学術講演会講演予稿集, 日本, 応用物理学会, 2013年, 74th, 19p-C14-2
佐藤大地 他, 光ポンピングK-Rbハイブリッド原子磁気センサを用いた頭部ファントムから生じる微弱電波の多点同時計測, 応用物理学秋季学術講演会講演予稿集, 日本, 応用物理学会, 2013年, 74th, 19p-C14-3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 33/00 - 33/26
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)