

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6134092号  
(P6134092)

(45) 発行日 平成29年5月24日 (2017.5.24)

(24) 登録日 平成29年4月28日 (2017.4.28)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 R 33/032 (2006.01)

G O 1 R 33/032

請求項の数 5 (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2011-229036 (P2011-229036)  
 (22) 出願日 平成23年10月18日 (2011.10.18)  
 (65) 公開番号 特開2013-88289 (P2013-88289A)  
 (43) 公開日 平成25年5月13日 (2013.5.13)  
 審査請求日 平成26年10月2日 (2014.10.2)  
 審判番号 不服2016-9925 (P2016-9925/J1)  
 審判請求日 平成28年7月1日 (2016.7.1)

(73) 特許権者 000002369  
 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 110000752  
 特許業務法人朝日特許事務所  
 (72) 発明者 上野 仁  
 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

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁場計測装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

軸方向の両端に開口部を有する筒状に形成された磁気シールドと、  
 内部に気体原子が封入され、前記磁気シールドの中空の領域に配置されたガスセルと、  
 電場の振動方向が前記磁気シールドの軸方向に合うように調整された直線偏光を含む照  
 射光を、前記気体原子に対して、当該磁気シールドの軸方向に垂直な方向に沿って照射す  
 る照射手段と、

前記照射手段により照射され、前記気体原子を透過した照射光の偏光面の回転角度を計  
 測する計測手段と、

を具備することを特徴とする磁場計測装置。

10

【請求項 2】

前記照射手段は、前記照射光を光ファイバーによってガスセルに導く  
 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】

軸方向の両端に開口部を有する筒状に形成された磁気シールドと、  
 内部に気体原子が封入され、前記磁気シールドの中空の領域に配置されるガスセルと、  
 円偏光成分を含むポンプ光を、前記気体原子に対して、前記磁気シールドの軸方向に平  
 行な方向に沿って照射するポンプ光照射手段と、

直線偏光を含むプローブ光を、前記気体原子に対して、前記磁気シールドの軸方向に垂  
 直な方向に沿って照射するプローブ光照射手段と、

20

前記プローブ光照射手段により照射され、前記気体原子を透過したプローブ光の偏光面の回転角度を計測する計測手段と、

を具備することを特徴とする磁場計測装置。

【請求項 4】

前記ポンプ光照射手段は、前記ポンプ光を光ファイバーによってガスセルに導き、  
前記プローブ光照射手段は、前記プローブ光を光ファイバーによってガスセルに導く  
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】

前記気体原子はアルカリ金属原子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。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光を利用した磁場計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

光を利用した磁場計測装置は、心臓からの磁場（心磁）や脳からの磁場（脳磁）などの生体から発生する微小な磁場を計測するもので、医療画像診断装置などへの応用が期待されている。磁場の計測には、アルカリ金属原子などのガスを封入した素子を用いる。この素子にポンプ光を照射することで素子内の原子のエネルギーが磁場に応じて励起され、この素子を透過したプローブ光の偏光面は磁気光学効果により回転する。磁場計測装置は、この偏光面の回転角度を磁場情報として計測する。

これらの磁場計測装置の感度を向上させる研究が行われている。特許文献 1 には、検出信号強度を増大させることによって、より高感度な磁場検出を可能にする光ポンピング磁力計が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【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】

【0004】

しかしながら、特許文献 1 に開示された磁力計では、計測すべき磁場方向以外の方向に外乱となる磁場が存在すると、感度が低下するという問題がある。

【0005】

本発明は、計測すべき磁場方向以外の方向に存在する外乱の磁場の影響を抑制して磁場を計測することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上述した課題を解決するため、本発明に係る磁場計測装置は、内部にガスセル配置領域を有する磁気シールドと、前記ガスセル配置領域に気体原子が封入されたガスセルが配置された場合に、電場の振動方向が前記ガスセルに於ける外乱磁場の方向に沿うように調整された直線偏光を含む照射光を、前記ガスセルに対して、前記外乱磁場の方向に垂直な方向に沿って照射する照射手段と、前記照射手段により照射され、前記ガスセルを透過した照射光の偏光面の回転角度を計測する計測手段と、を具備することを特徴とする。

好ましくは、上述した態様において、前記外乱磁場の方向に垂直な方向は測定すべき磁場の方向であるとよい。

また、本発明に係る磁場計測装置は、両端に開口部を有する筒状に形成された磁気シールドと、内部に気体原子が封入され、前記磁気シールドの中空の領域に配置されるガスセルと、電場の振動方向が前記磁気シールドの軸の方向に合うように調整された直線偏光を

10

20

30

40

50

含む照射光を、前記ガスセルに封入された気体原子に対して、当該磁気シールドの軸に垂直な方向に沿って照射する照射手段と、前記照射手段により照射され、前記気体原子を透過した照射光の偏光面の回転角度を計測する計測手段と、を具備することを特徴とする。

この構成によれば、計測すべき磁場方向以外の方向に存在する外乱の磁場の影響を抑制して磁場を計測することができる。

【0007】

好ましくは、前記照射手段は、前記照射光を光ファイバーによってガスセルに導くとよい。

この構成によれば、光ファイバーによって照射光をガスセルに導かない場合に比較して、照射手段の大きさや配置についての制約を減らすことができる。

【0008】

また、本発明に係る磁場計測装置は、内部にガスセル配置領域を有する磁気シールドと、前記ガスセル配置領域に気体原子が封入されたガスセルが配置された場合に、円偏光成分を含むポンプ光を、前記ガスセルに対して、前記中空の領域に於ける外乱磁場の方向に沿って照射するポンプ光照射手段と、直線偏光を含むプローブ光を、前記ガスセルに対して、前記外乱磁場の方向に垂直な方向に沿って照射するプローブ光照射手段と、前記プローブ光照射手段により照射され、前記ガスセルを透過したプローブ光の偏光面の回転角度を計測する計測手段と、を具備することを特徴とする。

好ましくは、上述した態様において、前記外乱磁場の方向に垂直な方向は測定すべき磁場の方向であるとよい。

また、本発明に係る磁場計測装置は、両端に開口部を有する筒状に形成された磁気シールドと、内部に気体原子が封入され、前記磁気シールドの中空の領域に配置されるガスセルと、円偏光成分を含むポンプ光を、前記ガスセルに封入された気体原子に対して、前記磁気シールドの軸に平行な方向に沿って照射するポンプ光照射手段と、直線偏光を含むプローブ光を、前記ガスセルに封入された気体原子に対して、前記磁気シールドの軸に垂直な方向に沿って照射するプローブ光照射手段と、前記プローブ光照射手段により照射され、前記気体原子を透過したプローブ光の偏光面の回転角度を計測する計測手段と、を具備することを特徴とする。

この構成によれば、計測すべき磁場方向以外の方向に存在する外乱の磁場の影響を抑制して磁場を計測することができる。

【0009】

好ましくは、前記ポンプ光照射手段は、前記ポンプ光を光ファイバーによってガスセルに導き、前記プローブ光照射手段は、前記プローブ光を光ファイバーによってガスセルに導くとよい。

この構成によれば、光ファイバーによってポンプ光およびプローブ光をガスセルに導かない場合に比較して、ポンプ光照射手段およびプローブ光照射手段の大きさや配置についての制約を減らすことができる。

また、好ましくは、上述した態様において、前記気体原子はアルカリ金属原子であるとよい。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第1実施形態に係る磁場計測装置の全体構成を示す図である。

【図2】磁気シールドの外観を示す図である。

【図3】ワンビーム方式の計測装置により磁場を計測する原理を説明するための図である。

【図4】第1実施形態に係る磁場計測装置の特徴を有していない計測装置による磁場の計測を説明するための図である。

【図5】第1実施形態に係る磁場計測装置による磁場の計測を説明するための図である。

【図6】第2実施形態に係る磁場計測装置の全体構成を示す図である。

【図7】ツービーム方式の計測装置により磁場を計測する原理を説明するための図である

10

20

30

40

50

。

【図 8】第 2 実施形態に係る磁化ベクトルの軌跡を説明する図である。

【図 9】第 2 実施形態に係る磁場計測装置の特徴を有していない計測装置による磁場の計測を説明するための図である。

【図 10】第 2 実施形態に係る磁場計測装置による磁場の計測を説明するための図である。

。

【発明を実施するための形態】

【0011】

1. 第 1 実施形態

1 - 1. 構成

10

図 1 は、本発明の第 1 実施形態に係る磁場計測装置 9 の全体構成を示す図である。磁場計測装置 9 は、ポンプ光の照射をプローブ光の照射によって兼ねる、いわゆるワンビーム方式の計測装置である。照射部 1 は、光源 11 と変換部 12 とを備える。光源 11 は、後述するガスセル 2 に封入された原子の超微細構造準位の遷移に対応した周波数のレーザーを発生させるレーザー発生装置である。変換部は偏光板などを備え、光源 11 が発生させたレーザーを所定方向の直線偏光成分を有する照射光に変換する。光源 11 により発生し変換部 12 により変換された照射光は、例えば光ファイバーなどにより導かれてガスセル 2 に照射される。なお、例えば照射部 1 を後述する磁気シールド 7 の内側に配置することによって、上述の照射光は、光ファイバーなどを介さずに直接、照射手段などから照射されてもよいが、光ファイバーなどにより照射光を導くことにより、照射部 1 の大きさや配置などの制約が少なくなる。

20

【0012】

ガスセル 2 は、カリウム (K) やセシウム (Cs) などのアルカリ金属原子が封入されたガラス製のセル (素子) である。ガスセル 2 は、照射部 1 から照射された上述の照射光を透過させる。ガスセル 2 を透過した上述の照射光は、光ファイバーなどにより偏光分離器 3 に導かれる。なお、ガスセル 2 の材質はガラスに限られず、照射光を透過する材質であれば、樹脂などであってもよい。また、ガスセル 2 を透過した上述の照射光は、光ファイバーなどを介さずに直接、照射手段などから照射されてもよい。

【0013】

偏光分離器 3 は、ガスセル 2 を透過した上述の照射光を偏光方向に基づいて分離する。具体的には、偏光分離器 3 は、変換部 12 により変換される前の照射光に含まれる上述の直線偏光成分と同じ向きの直線偏光成分を透過させ、この直線偏光成分の偏光方向に垂直な方向の偏光成分を有する光を反射させる。

30

【0014】

受光部 4 は、透過光受光素子 41 と反射光受光素子 42 とを有する。偏光分離器 3 を透過した透過光は、透過光受光素子 41 により受光され、偏光分離器 3 を反射した反射光は、反射光受光素子 42 により受光される。透過光受光素子 41 および反射光受光素子 42 は、いずれも受光した光の量に応じた信号を発生し、信号処理回路 5 に供給する。信号処理回路 5 は、透過光受光素子 41 および反射光受光素子 42 にかから上述の信号をそれぞれ受け取る。そして、信号処理回路 5 は、受け取った各信号に基づいて、照射部 1 により照射された照射光に含まれる直線偏光成分がガスセル 2 を透過して回転した回転量、すなわち、偏光面の回転角度を計測する。偏光分離器 3、受光部 4、および信号処理回路 5 は、照射手段 1 により照射され、気体原子を透過した照射光の偏光面の回転角度を計測する計測手段として機能する。表示装置 6 は、信号処理回路 5 により計測された偏光面の回転角度を表示する。

40

【0015】

図 1 に二点鎖線で示す磁気シールド 7 は、両端に開口部を有する筒状に形成されたシールドであり、外部の領域の磁場が中空の領域に侵入することを抑制する。なお、図 1 に表された磁気シールド 7 は、照射部 1、ガスセル 2、および偏光分離器 3 に対する配置を示すものではない。

50

## 【 0 0 1 6 】

磁気シールド 7 の材質は、パーマロイ、鉄・クロム・コバルト系の各アモルファス材、フェライト焼結体などの各磁性体材料を含む。図 2 は、磁気シールド 7 の外観を示す図である。以下、図において、磁場計測装置 9 の各構成の配置を説明するため、各構成が配置される空間を  $x y z$  右手系座標空間として表す。また、図に示す座標記号のうち、内側が白い円の中に黒い円を描いた記号は、紙面奥側から手前側に向かう矢印を表している。また、内側が白い円の中に交差する 2 本の線分を描いた記号は、紙面手前側から奥側に向かう矢印を表している。空間において  $x$  軸に沿う方向を  $x$  軸方向という。また、 $x$  軸方向のうち、 $x$  成分が増加する方向を  $+x$  方向といい、 $x$  成分が減少する方向を  $-x$  方向という。同様に、 $y$ 、 $z$  成分についても、 $y$  軸方向、 $+y$  方向、 $-y$  方向、 $z$  軸方向、 $+z$  方向、 $-z$  方向を定義する。

10

## 【 0 0 1 7 】

なお、以下の説明において、或る方向が或る軸に沿っているとは、その「或る方向」がその「或る軸」と完全に平行である場合を含むが、これに限定されず、同様の効果を生じさせるのであれば、平行と見なすことができる場合も含む。平行と見なすことができる場合とは、例えば両者の成す角が  $\pm 2$  度の範囲に入っているといった場合である。

## 【 0 0 1 8 】

図 2 に示すように、磁気シールド 7 の両端の開口部を結ぶ軸は、 $y$  軸方向に沿っている。磁気シールド 7 の中空の領域には、ガスセル 2 が配置される。

この磁場計測装置 9 は、変換部 1 2 によって変換された照射光に含まれる直線偏光の電場の振動方向が、磁気シールド 7 の軸の方向に合うように構成されている点に特徴を有する。

20

## 【 0 0 1 9 】

## 1 - 2 . 動作

図 3 は、いわゆるワンビーム方式の計測装置により磁場を計測する原理を説明するための図である。ワンビーム方式の計測装置において、ガスセルに封入された気体原子に直線偏光が照射されると、気体原子が光ポンピングされ、エネルギーが変化した際に生じる磁気モーメントの確率分布は、球形の原点对称な分布から変化する。例えば、超微細構造準位  $F$ 、 $F' = F - 1$  のエネルギー遷移のときにおいて、気体原子の磁気モーメントの確率分布はその直線偏光の振動の向きに沿って伸びる領域  $R_1$  に応じた形状となる。この確率分布をアライメントという。すなわち、図 3 ( a ) に示すように、例えば電場の振動方向が  $+y$  方向に平行な矢印  $D_0$  方向に沿っている直線偏光を、 $+x$  方向に向けて照射すると、この直線偏光が透過する気体原子には、 $y$  軸方向に沿った領域  $R_1$  に分布するアライメントが生じる。気体原子を透過すると、線形二色性により直線偏光の偏光面は回転する。図 3 ( b ) には、 $-x$  方向に直線偏光の電場の振動方向を見たときの偏光面の回転角度が示されている。この回転角度  $\theta$  が、 $+x$  方向の磁場の強さと相関があるため、この回転角度  $\theta$  を計測することにより、ガスセル 2 の内部における  $x$  軸方向の磁場の強さが求まる。なお、ワンビーム方式において、測定する磁場の方向  $D_M$  は、光を照射する方向 ( 図 3 では  $+x$  方向 ) となる。

30

## 【 0 0 2 0 】

ここで、本発明に係る磁場計測装置 9 の上述した特徴を説明するために、この特徴を有していない計測装置の動作を説明する。図 4 は、磁場計測装置 9 の特徴を有していない計測装置による磁場の計測を説明するための図である。この計測装置は、磁場計測装置 9 と共通の構成を備えているが、照射光に含まれる直線偏光の電場の振動方向が、磁気シールドの軸の方向に合うように構成されていない。例えば、この計測装置において磁気シールドの軸は図 4 に示す  $y$  軸方向に沿っており、測定すべき磁場の方向  $D_M$  が  $+x$  方向であるため、直線偏光成分を有する照射光は  $+x$  方向に向けて照射される。照射される直線偏光は、その電場の振動方向が、磁気シールドの軸の方向 ( $y$  軸方向) に合わないようになっている。具体的には、上記の振動方向は、 $z$  軸方向に平行である。したがって、ガスセル中の気体原子には、図 4 ( a ) に破線で示した領域  $R_2$  にアライメントが発生する。この

40

50

アライメントは、 $z$  軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $z$  軸方向に沿って伸びている。

#### 【0021】

この計測装置は、 $y$  軸方向に沿って軸が配置されている磁気シールドを有するので、 $x$  軸方向や  $z$  軸方向、およびこれらを合成した方向に沿った外乱の磁場は防がれる可能性が高いが、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場は、中空の領域に影響し易い。ガスセル中の気体原子に発生した上述のアライメントは、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場を受けると、 $y$  軸に平行な軸を中心に回転する。すなわち、アライメントは回転し、図 4 (a) に実線で示す領域  $R_b$  に応じた姿勢となる。図 4 (b) には、 $+y$  方向に向かって見たアライメントが示されている。このように、本来、領域  $R_a$  に発生していたアライメントは、磁気シールドによって防ぎきれなかった  $y$  軸方向の磁場に影響され、矢印  $D_4$  方向に回転し、領域  $R_b$  に応じた姿勢となる。

10

#### 【0022】

図 4 (c) には、気体原子を透過した照射光を計測する側、すなわち、 $+x$  方向の側から、気体原子の存在する側、すなわち、 $-x$  方向の側を見たときのアライメントが示されている。 $-x$  方向に向かって見て、外乱の磁場による回転後のアライメントの形状を示す領域  $R_b$  は、回転前のアライメントの形状を示す領域  $R_a$  に比べて長さが短くなっている。すなわち、領域  $R_a$  の  $z$  軸方向の長さは、 $L_0$  であるのに対し、領域  $R_b$  の  $z$  軸方向の長さは、 $L_0$  よりも短い  $L_1$  である。したがって、この計測装置において、気体原子を透過した照射光を計測する側から見たアライメントは、外乱の磁場に影響されて小さくなる。その結果、この計測装置の感度は、外乱の磁場の影響によって低下する。

20

#### 【0023】

一方、図 5 は、本発明に係る磁場計測装置 9 による磁場の計測を説明するための図である。磁場計測装置 9 において磁気シールド 7 の軸は図 5 に示す  $y$  軸方向に沿っており、測定すべき磁場の方向  $D_M$  が  $+x$  方向であるため、直線偏光成分を含む照射光は  $+x$  方向に向けて照射される。照射される直線偏光は、その電場の振動方向が、磁気シールドの軸の方向 ( $y$  軸方向) に合うようになっている。したがって、ガスセル中の気体原子には、図 5 (a) に示した領域  $R_1$  にアライメントが発生する。このアライメントは、 $y$  軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $y$  軸方向に沿って伸びている。なお、このアライメントは  $x$  軸を中心にラーマ回転しており、そのため、回転対称は  $y$  軸からずれている。しかし、その変位は外乱磁場の大きさに比較して僅かであるため、このアライメントは、 $y$  軸を中心としてほぼ回転対称の形状と見なせる。

30

#### 【0024】

磁場計測装置 9 は、 $y$  軸方向に沿って軸が配置されている磁気シールド 7 を有するので、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場は、 $x$  軸方向や  $z$  軸方向に沿った外乱の磁場よりも中空の領域に影響し易い。ガスセル 2 内の気体原子に発生した上述のアライメントは、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場を受けると、 $y$  軸方向を軸として回転する。すなわち、アライメントは図 5 (a) に示す矢印  $D_5$  方向に回転する。図 5 (b) には、 $+y$  方向に向かって見たアライメントが示されている。上述したとおり、領域  $R_1$  に発生したアライメントは、 $y$  軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $y$  軸方向に沿って伸びているので、 $y$  軸を中心とする弧の軌跡に沿った矢印  $D_5$  方向に回転しても、その形状はほとんど変化しない。したがって、図 5 (c) に示すように、 $-x$  方向に向かって見て、アライメントの形状の長さは、外乱の磁場によって回転する前後でほとんど変わらない。すなわち、回転前のアライメントの長さ  $L_0$  は、回転後のアライメントの長さ  $L_1$  とほぼ同じである。したがって、この磁場計測装置 9 の感度は、外乱の磁場に影響され難い。

40

#### 【0025】

### 2. 第 2 実施形態

#### 2 - 1. 構成

図 6 は、本発明の第 2 実施形態に係る磁場計測装置 9 A の全体構成を示す図である。磁場計測装置 9 A は、ポンプ光の照射装置とプローブ光の照射装置とを分離した、いわゆる

50

ツービーム方式の計測装置である。磁場計測装置 9 A は、照射部 1 に代えてプローブ光照射部 1 A を具備している点と、ポンプ光照射部 8 を具備している点が、第 1 実施形態の磁場計測装置 9 と異なり、他の構成は共通している。なお、図 6 に表された磁気シールド 7 は、プローブ光照射部 1 A、ガスセル 2、ポンプ光照射部 8、および偏光分離器 3 に対する配置を示すものではない。

以下、磁場計測装置 9 A について、主に磁場計測装置 9 と異なる点を説明する。

#### 【 0 0 2 6 】

プローブ光照射部 1 A は、光源 1 1 A および変換部 1 2 A を備える。光源 1 1 A は光源 1 1 であってもよく、変換部 1 2 A は変換部 1 2 であってもよいが、プローブ光照射部 1 A によって照射されるプローブ光の波長は、不必要なポンピングを避けるためにガスセル 2 に封入された気体原子の共鳴周波数から離れていることが望ましい。また、プローブ光に含まれる成分は、全成分に占める直線偏光の割合が高いほど望ましい。ただし、プローブ光は、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てもよい。光源 1 1 A により発生し変換部 1 2 A により変換されたプローブ光は、例えば光ファイバーなどにより導かれてガスセル 2 に照射される。なお、例えばプローブ光照射部 1 A を磁気シールド 7 の内側に配置することによって、プローブ光は、光ファイバーなどを介さずに直接、ガスセル 2 に照射されてもよい。

#### 【 0 0 2 7 】

ポンプ光照射部 8 は、光源 8 1 および変換部 8 2 を備える。光源 8 1 は、ガスセル 2 に封入された原子の超微細構造準位の遷移に対応した周波数のレーザーを発生させるレーザー発生装置である。すなわち、光源 8 1 は、ガスセル 2 に封入された気体原子を励起できる波長に同調するレーザーを発生する。変換部 8 2 は、円偏光フィルターなどを備え、光源 8 1 が発生させたレーザーを、円偏光成分を有するポンプ光に変換する。光源 8 1 により発生し変換部 8 2 により変換されたポンプ光は、例えば光ファイバーなどにより導かれてガスセル 2 に照射される。ポンプ光は、プローブ光とガスセル 2 の内部で交差するように照射される。なお、例えばポンプ光照射部 8 を磁気シールド 7 の内側に配置することによって、ポンプ光は、光ファイバーなどを介さずに直接、ガスセル 2 に照射されてもよい。

#### 【 0 0 2 8 】

磁場計測装置 9 A は、変換部 8 2 によって変換されたポンプ光の入射方向が、磁気シールド 7 の軸の方向に合うように構成されている点に特徴を有する。

#### 【 0 0 2 9 】

### 2 - 2 . 動作

図 7 は、いわゆるツービーム方式の計測装置により磁場を計測する原理を説明するための図である。ツービーム方式の計測装置において、ガスセルに封入された気体原子にポンプ光が照射されると、気体原子が光ポンピングされ、エネルギーが変化した際に生じる磁気モーメントの確率分布は、そのポンプ光の入射方向に沿って伸びる領域  $R_2$  に応じた形状となる。この確率分布をオリエンテーションという。そして、オリエンテーションが形成されることにより生じる磁化の向きを表すベクトル（以下、磁化ベクトル  $M$  という）は、オリエンテーションの向きとなる。この場合、ポンプ光の照射方向が磁化ベクトル  $M$  の方向となる。

#### 【 0 0 3 0 】

図 7 に示すように、例えば矢印  $D_7$  方向の円偏光成分を有するポンプ光を矢印  $D_p$  方向（ $+y$  方向）に向けて照射すると、このポンプ光が透過する気体原子には、 $+y$  方向に伸びる領域  $R_2$  に分布するオリエンテーションが形成され、 $+y$  方向の磁化ベクトル  $M$  が生じる。そして、電場の振動方向が矢印  $D_0$  方向に沿っている直線偏光成分を有するプローブ光を矢印  $D_r$  方向（ $+x$  方向）に向けて照射すると、矢印  $D_p$  方向（ $+y$  方向）、および矢印  $D_r$  方向（ $+x$  方向）にそれぞれ垂直な矢印  $D_M$  方向（ $-z$  方向）を中心にオリエンテーションがラマ回転する。これにより、磁化ベクトル  $M$  は  $z$  軸を中心に回転するが、このとき以下の 2 つの現象が生じる

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 1 】

[ 現象 a ] オリエンテーション ( 磁化ベクトル  $M$  ) をポンプ光の方向に戻そうとする現象。

[ 現象 b ] オリエンテーションを光ポンピング前の球状の原点对称に緩和させる現象。

これにより磁化ベクトル  $M$  は、 $x y$  平面上において渦巻き状の軌跡を描く。図 8 は、磁化ベクトル  $M$  の軌跡を説明する図である。例えば、図 7 に示した構成において、磁化ベクトル  $M$  は、矢印  $D_M$  方向 (  $-z$  方向 ) に見た  $x y$  平面上において図 8 ( a ) に示す軌跡  $T_M$  を描く。そして、上述したプローブ光の偏光面は、ファラデー効果によりオリエンテーションを透過して回転する。したがって、この偏光面の回転角度を計測することにより、ガスセル 2 の内部における矢印  $D_M$  方向 (  $-z$  方向 ) の磁束密度が求まる。

10

## 【 0 0 3 2 】

例えば、磁化ベクトル  $M$  が図 8 ( a ) に示す軌跡  $T_M$  を描くとき、 $+x$  方向の磁化の期待値  $\langle M_x \rangle$  は、特定の値として現れる。横軸に磁束密度  $B$  を、縦軸に磁化の期待値  $\langle M_x \rangle$  をそれぞれ表すと、図 8 ( b ) に示すような出力波形が得られる。この波形における原点近傍の線形的に変化している部分 ( 図中  $B$  の範囲 ) の出力を読み取ることによって測定すべき磁束密度  $B$  がわかる。

なお、磁化の期待値  $\langle M_x \rangle$  と磁束密度  $B$  との関係式は以下ようになる。

## 【 0 0 3 3 】

$$\left. \frac{d\langle M_x \rangle}{dB} \right|_{B=0} = -C \frac{\gamma}{\Gamma_g} \approx -C \gamma T_2$$

20

ここで、 $\gamma$  は緩和速度であり、緩和時間  $T$  の逆数で与えられる。そして緩和時間  $T$  は、縦緩和時間  $T_1$  および横緩和時間  $T_2$  により、 $1/T = 1/T_1 + 1/T_2$  で表される。また、ラーモア角周波数を  $\omega_L$  [ rad / s ] とし、磁気回転比を  $\gamma$  [ rad / s T ] とし、磁束密度を  $B$  [ T ] とすると、 $\omega_L = \gamma B$  が成り立つ。磁化  $M$  は、磁気モーメントの単位体積あたりの総和であるから比例定数  $C$  は原子密度  $n$  に比例するパラメータと考える。

## 【 0 0 3 4 】

ここで、本発明に係る磁場計測装置 9 A の上述した特徴を説明するために、この特徴を有していない計測装置の動作を説明する。図 9 は、磁場計測装置 9 A の特徴を有していない計測装置による磁場の計測を説明するための図である。この計測装置は、磁場計測装置 9 A と共通の構成を備えているが、ポンプ光の入射方向  $D_p$  が、磁気シールド 7 の軸の方向に合うように構成されていない。例えば、この計測装置において磁気シールドの軸は図 9 に示す  $y$  軸方向に沿っており、円偏光成分を有するポンプ光は  $+z$  方向に向けて照射される。つまり、照射されるポンプ光の入射方向  $D_p$  (  $+z$  方向 ) は、磁気シールドの軸の方向 (  $y$  軸方向 ) に合わないようになっている。したがって、ガスセル中の気体原子には、図 9 ( a ) に破線で示した領域  $R_c$  にオリエンテーションが発生する。このオリエンテーションは、 $z$  軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $z$  軸方向に沿って伸びている。

30

## 【 0 0 3 5 】

この計測装置は、 $y$  軸方向に沿って軸が配置されている磁気シールドを有するので、 $x$  軸方向や  $z$  軸方向、およびこれらを合成した方向に沿った外乱の磁場は防がれる可能性が高いが、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場は、中空の領域に影響し易い。ガスセル中の気体原子に発生した上述のオリエンテーションは、 $y$  軸方向に沿った外乱の磁場を受けると、 $y$  軸に平行な軸を中心に回転する。すなわち、オリエンテーションは回転し、図 9 ( a ) に実線で示す領域  $R_d$  に応じた姿勢となる。図 9 ( b ) には、 $+y$  方向に向かって見たオリエンテーションが示されている。このように、本来、破線で示す領域  $R_c$  に発生していたオリエンテーションは、磁気シールドによって防ぎきれなかった  $y$  軸方向の磁場に影響され、矢印  $D_g$  方向に回転し、領域  $R_d$  に応じた姿勢となる。

40

## 【 0 0 3 6 】

50



ここで、図9に示す例では、矢印 $D_M$ 方向（ $-x$ 方向）の磁束密度を測定するために、矢印 $D_r$ 方向（ $+y$ 方向）に向けてプローブ光を照射する。すなわち、ガスセルの $-y$ 方向からプローブ光が照射され、ガスセルの $+y$ 方向に透過したプローブ光の偏光面の回転角度が計測手段（偏光分離器3、受光部4、信号処理回路5）によって計測される。図9（b）に示したように、 $+y$ 方向に沿って見るとオリエンテーションは $y$ 軸方向に沿った外乱の磁場を受け、領域 $R_c$ から領域 $R_d$ に回転しているので、磁化ベクトル $M$ も $-x$ 方向に回転している。そのため、磁化ベクトル $M$ は上述した図8（a）と異なる軌跡を描くこととなり、磁化の期待値も異なる値となるため、出力波形は外乱の磁場の影響が加味された波形となる。したがって、この場合の計測は、外乱磁場に影響を受け易い。

【0037】

10

一方、図10は、本発明に係る磁場計測装置9Aによる磁場の計測を説明するための図である。磁場計測装置9Aにおいて磁気シールド7の軸は、図10に示す $y$ 軸方向に沿っており、円偏光成分を有するポンプ光は $+y$ 方向に向けて照射される。つまり、照射されるポンプ光の入射方向 $D_p$ （ $+y$ 方向）は、磁気シールドの軸の方向（ $y$ 軸方向）に合うようになっている。したがって、ガスセル中の気体原子には、図10（a）に示した領域 $R_2$ にオリエンテーションが発生する。このオリエンテーションは、 $y$ 軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $y$ 軸方向に沿って伸びている。なお、ここでは、矢印 $D_r$ 方向（ $+x$ 方向）に向けてプローブ光が照射され、矢印 $D_M$ 方向（ $-z$ 方向）の磁場が測定される。

【0038】

20

磁場計測装置9Aにおいて、 $y$ 軸方向に沿って軸が配置されている磁気シールド7を有するので、 $y$ 軸方向に沿った外乱の磁場は、中空の領域に影響し易い。ガスセル2内の気体原子に発生した上述のオリエンテーションは、 $y$ 軸方向に沿った外乱の磁場を受けると、 $y$ 軸方向を軸として回転する。すなわち、オリエンテーションは図10（a）に示す矢印 $D_g$ 方向に回転する。図10（b）には、 $+y$ 方向に向かって見たオリエンテーションが示されている。上述したとおり、領域 $R_2$ に発生したオリエンテーションは、 $y$ 軸を中心としてほぼ回転対称の形状であり、 $y$ 軸方向に沿って伸びているので、 $y$ 軸を中心とする弧の軌跡に沿った矢印 $D_g$ 方向に回転しても、その形状はほとんど変化しない。したがって、図10（c）に示すように、矢印 $D_M$ 方向（ $-z$ 方向）に見た $xy$ 平面上において、オリエンテーションの形成によって生じる磁化ベクトル $M$ の方向は、外乱の磁場によってオリエンテーションが回転する前後で変わらない。したがって、この場合、直線偏光成分を有するプローブ光を矢印 $D_r$ 方向（ $+x$ 方向）に向けて照射すると、磁化ベクトル $M$ は図8（a）に示したような軌跡を描き、磁束密度が求まる。すなわち、この磁場計測装置9Aの感度は、外乱の磁場に影響され難い。

30

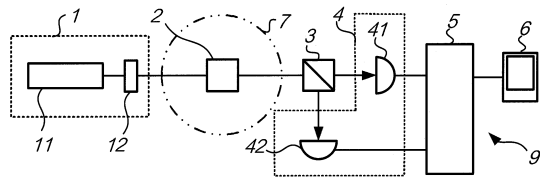
【符号の説明】

【0039】

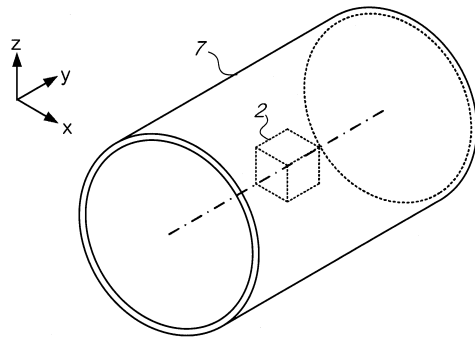
1...照射部、1A...プローブ光照射部、11, 11A...光源、12, 12A...変換部、2...ガスセル、3...偏光分離器、4...受光部、41...透過光受光素子、42...反射光受光素子、5...信号処理回路、6...表示装置、7...磁気シールド、8...ポンプ光照射部、81...光源、82...変換部、9...磁場計測装置（第1実施形態）、9A...磁場計測装置（第2実施形態）

40

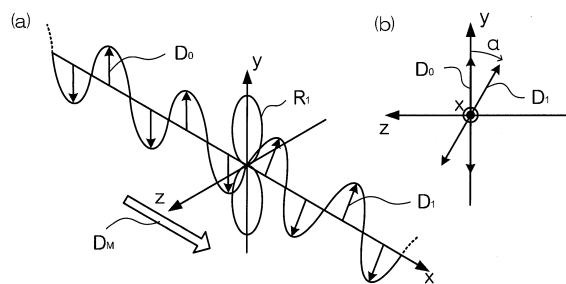
【図 1】



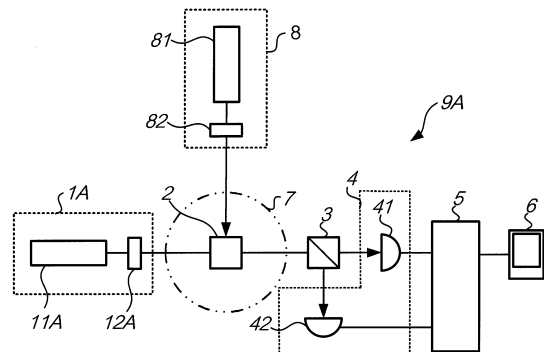
【図 2】



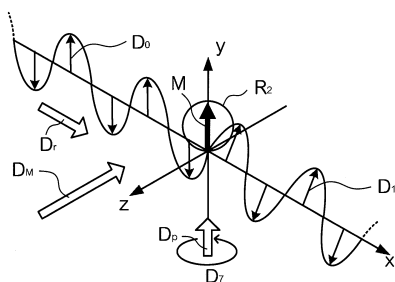
【図 3】



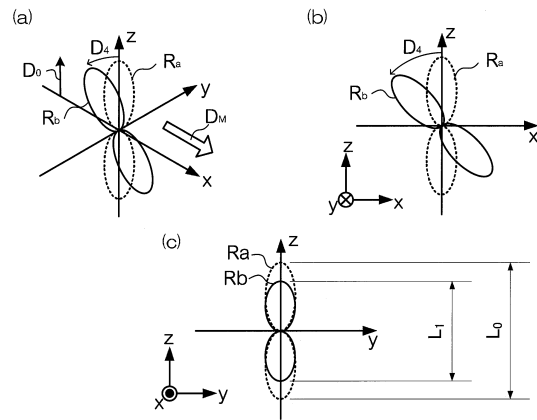
【図 6】



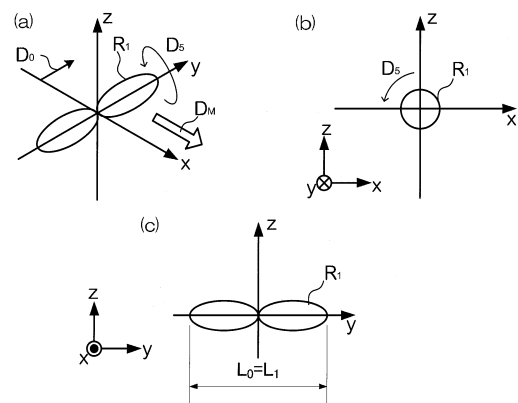
【図 7】



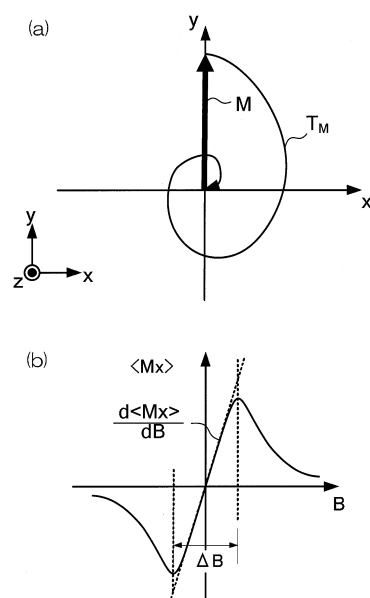
【図 4】



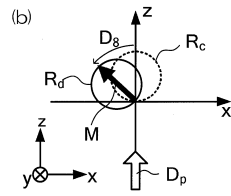
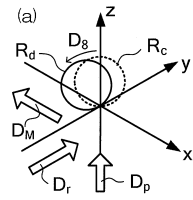
【図 5】



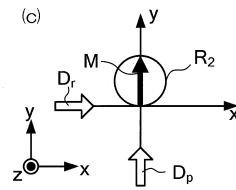
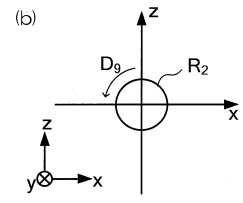
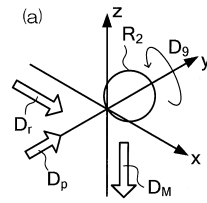
【図 8】



【図 9】



【図 10】



---

フロントページの続き

合議体

審判長 中塚 直樹

審判官 関根 洋之

審判官 酒井 伸芳

- (56)参考文献 特開2011-7660(JP,A)  
特開2010-85134(JP,A)  
特開2009-236598(JP,A)  
特開2007-167616(JP,A)  
米国特許出願公開第2004/0140799(US,A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01R 33/032