

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6270744号  
(P6270744)

(45) 発行日 平成30年1月31日(2018.1.31)

(24) 登録日 平成30年1月12日(2018.1.12)

(51) Int.Cl.

G O 1 R 33/26 (2006.01)

F 1

G O 1 R 33/26

請求項の数 8 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2014-558825 (P2014-558825)  
 (86) (22) 出願日 平成25年2月21日 (2013.2.21)  
 (65) 公表番号 特表2015-510597 (P2015-510597A)  
 (43) 公表日 平成27年4月9日 (2015.4.9)  
 (86) 國際出願番号 PCT/US2013/027145  
 (87) 國際公開番号 WO2013/126577  
 (87) 國際公開日 平成25年8月29日 (2013.8.29)  
 審査請求日 平成28年2月3日 (2016.2.3)  
 (31) 優先権主張番号 61/601,883  
 (32) 優先日 平成24年2月22日 (2012.2.22)  
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 514209087  
 ジオメトリクス インコーポレイテッド  
 アメリカ合衆国、カリフォルニア州 95  
 131、サンホセ、フォーチュン ドラ  
 イブ 2190  
 (74) 代理人 100091904  
 弁理士 成瀬 重雄  
 (74) 代理人 100096862  
 弁理士 清水 千春  
 (72) 発明者 スミス、ケネス、アール.  
 アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94  
 536、フレモン  
 ト、カーリン ストリート 39428

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】量子力学的測定装置および量子力学的測定方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を被測定磁界中において有するスピン集団と、

第1の波長の第1の光を提供するための第1の光源であつて、前記第1の光源が、前記スピン集団を照らしてそれと光学的に相互作用するように位置決めされる、第1の光源と、

前記スピン集団からの光を検出するように位置決めされる検出器と、

前記第1の光源からの前記第1の光の周波数の変調信号を時間の関数として発生させるための変調器とを備える、量子力学的測定装置において、

前記第1の光源からの前記第1の光についての前記変調信号は、前記歳差運動共鳴周期の一部においては、前記吸収共鳴周波数又はその近くの周波数で第1の光を提供すること、及び、前記歳差運動共鳴周期の残部においては、前記歳差運動共鳴周波数よりも高い変調周波数を有する急速変調により前記第1の光を提供することを含む、量子力学的測定装置。

## 【請求項 2】

前記歳差運動共鳴周波数は、ラーモア周波数であり、前記歳差運動共鳴周期は、ラーモア周期である、請求項1に記載の量子力学的測定装置。

## 【請求項 3】

第2の光を提供するための第2の光源をさらに備え、前記第2の光は、前記スピン集団

10

20

を照らすように向けられ、前記第2の光源からの前記第2の光は、前記検出器に向けられ、前記第1の光は、前記第2の光を検出する検出器に向けられない、請求項1又は2に記載の量子力学的測定装置。

**【請求項4】**

前記第1の波長は前記第2の光における第2の波長と異なる、請求項3に記載の量子力学的測定装置。

**【請求項5】**

第1の波長の第1の光でスピン集団を照らすことによって前記スピン集団中のスピンを偏極させるステップであって、前記スピン集団が、歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸收共鳴周波数を被測定磁界中において有する、ステップと、10

前記第1の光の周波数を前記スpin集団の前記歳差運動共鳴周波数で変調するステップであって、

第1の光源からの前記第1の光の周波数についての前記変調が、前記歳差運動共鳴周期の一部については前記吸收共鳴周波数またはその近くの周波数で前記第1の光を提供すること、及び、前記歳差運動共鳴周期の残部については前記歳差運動共鳴周波数よりも高い変調周波数を有する急速変調により前記第1の光を提供することを含む、ステップと、

前記スpin集団からの光を検出するステップと、

前記スpin集団の量子状態の量子力学的測定値を提供するために前記検出された光を使用するステップとを含む、量子力学的測定を行うための方法。

**【請求項6】**

磁場測定値を提供するために前記量子状態の前記量子力学的測定値を使用するステップをさらに含み、前記歳差運動共鳴周波数は、ラーモア周波数であり、前記歳差運動共鳴周期は、ラーモア周期である、請求項5に記載の方法。20

**【請求項7】**

第2の光で前記スpin集団を照らすステップをさらに含む、請求項5又は6に記載の方法。

**【請求項8】**

請求項1から4のいずれか1項に記載の量子力学的測定装置を用いた磁力計であって、前記検出器からの出力を受け取り、前記出力から磁場情報を決定するためのコントローラを備えてなる、磁力計。30

**【発明の詳細な説明】**

**【技術分野】**

**【0001】**

関連出願の相互参照

本出願は、参照により全体としてすべての目的のために組み込まれる、2012年2月22日に出願され、スミス氏他を発明者とする、「LASER-BASED ATOMIC MAGNETOMETERS」と題する同時係属の米国仮出願第61/601,883号について、米国特許法119条(e)の下で優先権を主張するものである。

**【0002】**

本発明は、磁力計の分野に関する。より詳しくは、本発明は、スpin集団、例えばアルカリ蒸気セルに基づく磁力計に関する。40

**【背景技術】**

**【0003】**

磁力計は、磁場の強度および方向を測定するために使用される。磁力計は、地球磁場のわずかな変化を測定するのに有用なこともあります、その変化は、油および鉱物の鉱床の位置などの、地球表面下の地質学的条件、ならびに他の条件を使用者が識別することを可能にする。

**【0004】**

セシウム原子蒸気を使用する磁力計は、参照によりすべての目的のために組み込まれる、2010年5月25日にKenneth R. Smithに発行された米国特許第7,50

723, 985号に記載されている。セシウム原子蒸気磁力計が動作することを可能にする基本原理は、セシウム原子が、原子核の周りの電子原子軌道の配置を伴ういくつかのエネルギー準位に存在することができるという事実である。セル内のセシウム原子が、発光体からの光子に遭遇すると、セシウム原子は、より高いエネルギー状態に飛び移り、次いで光子を再放出して、不確定のより低いエネルギー状態に落ちる。セシウム原子は、あるエネルギー状態でのみ発光体からの光子に「敏感で」ある。従って、その原子は、光子と相互作用しないそれらの状態を優先的に占有することになる。光子は従って、妨げられずに通過し、光子検出器によって測定される。この条件下では、セル中のセシウムは、光学的に飽和している。

## 【0005】

10

いったんセシウムが、光学的に飽和すると、システムは、測定手順の準備ができている。原子スピンの軸は、周囲の磁場の周りで歳差運動をする。この歳差運動は、原子と光との間の整列状態を、光の吸収に有利に働く整列状態と吸収を低減する整列状態との間で周期的に変化させる。もし光が、原子の歳差運動速度と同じ周波数でパルス状にオン／オフされるならば、光を吸収するように整列されるそれらの原子は、より高いエネルギー状態に追いやられることになる。これらの原子は次いで、より低いエネルギー状態の1つに減衰することになる。原子が、より低い状態に戻るとき、それらの歳差運動の位相は、変更されていることになる。もし歳差運動が今、光がパルスを発するときに原子が光を吸収しないように整列されるようなものであるならば、原子は、この状態にとどまることになる。それ故に、光が、歳差運動速度に等しい速度でパルス状にオン／オフされるとき、セルでの吸収は、低減される。

## 【0006】

20

発光体からの光の波長は典型的には、吸収線と呼ばれるもののオン／オフに変調される。これは、セルでの光の吸収が最大化される波長である。Bell-Bloomシステムでは、その変調は、ラーモア周波数として周知の周波数におけることもある。ラーモア周波数は、原子スピン歳差運動の周波数であり、磁場の強度に比例する。Bell-Bloom磁力計は典型的には、発光体が変調される速度をわずかに変化させ、変調の周波数に関して吸収の変化を観察することによって、磁場の強度を追跡するために使用できるラーモア周波数の変化を追跡する。

## 【0007】

30

しかしながら、吸収線は、単一線ではなく、単一線として見えるようにそれらの間隔よりも広い副線の小さな群である。異なる副線についてのラーモア周波数は、わずかに異なる。これらの異なるラーモア周波数は、様々なより低いエネルギー状態の占有数に応じて複合ラーモア周波数を形成する。発光体が、片側の状態の方へその線を離れて変調されると、発光体は、それらの状態の占有数を変更し、その結果複合ラーモア周波数を変更する傾向がある。結果として、変調の詳細は、磁場測定に影響を及ぼし、ドリフトおよびヘッディング・エラーにつながる。

## 【0008】

さらに、半導体レーザ発光体は、その熱時定数のために、変調にすぐに応答しない。光出力をラーモア周波数（地球の周囲磁場における）の近くの周波数で変調しようとする試みは、これらの時間遅延によって大幅に位相シフトされる。これらの位相シフトは、磁力計の動作を複雑にする。

40

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0009】

本発明は、上記に鑑みて、改良された量子力学的測定装置および量子力学的測定を行うための方法を提供することを課題とするものである。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0010】

前述のことを達成するために、本発明の目的に従って、量子力学的測定装置が、提供さ

50

れる。歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有するスピン集団が、準備される。第1の光源は、第1の波長の第1の光を提供し、その第1の光源は、スピン集団を照らすように位置決めされる。検出器は、スピン集団からの光を検出するように位置決めされる。変調器は、平均（ある時間間隔にわたる）中心周波数を吸収共鳴周波数またはその近くに維持しながら、スピン集団の歳差運動共鳴周波数で第1の光源からの第1の光のパワースペクトルを変えるために変調信号を使用する。

#### 【0011】

本発明の別の態様では、量子力学的測定を行うための方法が、提供される。スピン集団中のスピンは、第1の波長の第1の光でスピン集団を照らすことによって偏極され、そのスピン集団は、歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有する。第1の光のパワースペクトルは、平均中心周波数を吸収共鳴周波数またはその近くに維持しながら、スピン集団の歳差運動共鳴周波数で変調される。スピン集団からの光が、検出される。検出された光は、スピン偏極の量子力学的測定値を提供するために使用される。10

#### 【0012】

本発明の別の態様では、磁力計が、提供される。歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有するスpin集団が、準備される。第1の光源は、第1の波長の第1の光を提供し、その第1の光源は、スpin集団の少なくとも一部分を照らすように位置決めされる。検出器は、スpin集団からの光を検出するように位置決めされる。コントローラは、検出器からの出力を受け取り、その出力から磁場情報を決定する。変調器は、平均中心周波数を吸収共鳴周波数またはその近くに維持しながら、スpin集団の歳差運動共鳴周波数で第1の光源からの第1の光のパワースペクトルを変調する。20

#### 【0013】

本発明の更に別の態様では、原子蒸気磁力計が、提供される。レーザ光源は、第1の波長の第1の光を提供し、その第1の光源は、原子蒸気の少なくとも一部分を照らすように位置決めされる。検出器は、原子蒸気からの光を検出するように位置決めされる。コントローラは、検出器からの出力を受け取り、その出力から磁場情報を決定する。レーザの波長は、レーザに供給される電流信号によって変調される。その波長は、レーザの内部温度の関数であり、その内部温度は、レーザを通る電流によって影響を受ける。レーザのパワースペクトルは、平均中心周波数を吸収共鳴周波数またはその近くに維持しながら、原子スピンの歳差運動共鳴周波数で変調される。このことは、変調信号によって成し遂げられ、それは、この実施形態ではレーザを通る電流である。この変調信号は、ラーモア周波数の1/3とラーモア周波数の2倍との間の周波数帯域でそのパワー（DCを含まず）の半分未満を含有する。例えば、変調信号は、ラーモア歳差運動周波数によって変調される2MHz搬送波振幅から成ることもあり得る。30

#### 【0014】

本発明のこれらの特徴および他の特徴は、本発明の詳細な説明により、図面と併せて以下に、より詳細に述べられることになる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0015】

【図1】本発明の実施形態の高レベルの流れ図である。

【図2】本発明の実施形態の例の概略図である。

【図3】コントローラのより詳細な概略図である。

【図4】コントローラの一部を形成してもよいコンピュータ・システムを示す高レベルのプロック図である。

【図5】本発明のこの実施形態についてのポンピングおよびプローピングの概要を例示する図である。

【図6】FM変調を使用する、第1の光源からの第1の光の変調された周波数対時間のグラフである。

【図7】セル吸収対周波数のグラフである。40

50

【図8】本発明の別の実施形態の概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

本発明を実施するための、本発明者らによって熟考されるベスト・モードを含む本発明の具体的実施形態について、以下に詳細に説明することとする。これらの具体的実施形態の例は、添付の図面で例示される。本発明は、これらの具体的実施形態と併せて述べられるが、本発明をその述べられる実施形態に限定することが意図されていないことは、理解されよう。それどころか、添付の請求項によって規定されるような本発明の趣旨および範囲内に含まれてもよいような代替形態、変更形態、および等価物を含めることが、意図されている。次の説明では、本発明の完全な理解を提供するために、具体的詳細が、説明される。本発明は、これらの具体的詳細のいくつか又はすべてを除いて実施されてもよい。加えて、周知の特徴は、本発明を必要に分かり難くすることを避けるために、詳細には述べられていないところもある。

【0017】

図1は、本発明の実施形態の高レベルの流れ図である。スピン集団が、照らされる（ステップ104）。スピン集団は、光によって変調されかつ探査されてもよい少なくとも1つのスピンを提供する。より好ましくは、スピン集団は、光アドレス可能なスピンの集まりである。スピン集団の例は、原子蒸気セル、分子蒸気セル、捕獲された電子、捕獲された陽子、および光がスピンと相互作用することを可能にする窒素空孔中心である。照らすことで、スピン集団中のスピンを偏極させる。スピン集団は、歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有する。光のパワースペクトルは、変調信号を用いてスピン集団の歳差運動共鳴周波数で変調される（ステップ108）。この変調信号は、ラーモア周波数の1/3とラーモア周波数の2倍との間の周波数帯域でそのパワー（DCを含まず）の半分未満を含有する。光の平均周波数は、吸収線幅のほんのわずかだけ最大吸収の点から意図的にずらされてもよい。本明細書および請求項での「吸収共鳴周波数の近く」は、吸収線の半値幅内であると定義される。スピン集団からの光が、検出される（ステップ112）。検出された光は、量子力学的測定のために使用される（ステップ116）。本明細書および請求項において、「光」は、電波、赤外線放射、光学的放射、および紫外線放射のスペクトルに及ぶ電磁放射と定義される。

【0018】

例

図2は、本発明の実施形態の例の概略図である。この例では、セシウム原子蒸気を保持するスピン集団204が、準備される。第1のレーザ・ダイオード210および第1の偏光子212を備える第1の光源208が、準備され、その結果第1の光源208は、偏光を提供する。第1のレンズ216は、第1の光源208とスピン集団204との間の第1の光学経路218に置かれる。第2のレンズ220は、第1の光学経路218に沿って第1のレンズ216からスピン集団204の反対側に置かれる。第1の検出器224は、第1の光学経路218に沿ってスピン集団204から第2のレンズ220の反対側に置かれる。第2のレーザ・ダイオード230および第2の偏光子232を備える第2の光源228が、準備され、その結果第2の光源228は、偏光を提供する。第2のレンズ220は、第2の光源228とスピン集団204との間の第2の光学経路238に置かれる。第1のレンズ216は、第2の光学経路238に沿っている。第2の検出器244は、第2の光学経路238に沿ってスピン集団204から第1のレンズ216の反対側に置かれる。コントローラ248は、第1の光源208、第2の光源228、第1の検出器224、および第2の検出器244に電気的に接続される。コントローラ248はまた、スピン集団204または第1の偏光子212または第2の偏光子232を制御するまたは監視する装置などの他の装置に電気的に接続されてもよい。様々な実施形態では、コントローラ248は、单一装置、電気的に一緒に接続される複数の装置、または電気的に一緒に接続されない複数の装置であってもよい。加えて、コントローラ248のいくつかの構成要素は、第1の光源208または第2の光源228などの他の装置の一部を形成してもよい。

10

20

30

40

50

## 【0019】

図3は、コントローラ248のより詳細な概略図である。コントローラ248は、増幅器およびフィルタ304、変調器308、ならびに増幅器およびフィルタ304と変調器308とに電気的に接続されるコンピュータ400を備える。増幅器およびフィルタ304は、第1の検出器224に電気的に接続され、入力として第1の検出器224からの出力を受け取る。変調器308は、第1の光源208に電気的に接続され、第1の光源208を制御するための出力を提供する。増幅器およびフィルタ304は、分離した増幅器および分離したフィルタであってもよくまたは單一ユニットであってもよい。

## 【0020】

図4は、本発明の実施形態でコントローラ248の一部を形成してもよいコンピュータ・システム400を示す高レベルのブロック図である。コンピュータ・システムは、集積回路、プリント回路基板、および小型携帯端末から巨大なスーパー・コンピュータまでに及ぶ多くの物理的形状を有してもよい。コンピュータ・システム400は、1つまたは複数のプロセッサ402を含み、さらに電子表示装置404（図形、テキスト、および他のデータを表示するための）、メイン・メモリ406（例えば、ランダム・アクセス・メモリ（RAM））、記憶装置408（例えば、ハード・ディスク・ドライブ）、リムーバブル記憶装置410（例えば、光ディスク・ドライブ）、ユーザー・インターフェース装置412（例えば、キーボード、タッチ・スクリーン、キーパッド、マウスまたは他のポインティング装置、その他）、および通信インターフェース414（例えば、無線ネットワーク・インターフェース）を含むことができる。通信インターフェース414は、ソフトウェアおよびデータがコンピュータ・システム400と外部装置との間でリンクを介して移送されることを可能にする。システムはまた、前述の装置／モジュールが接続される通信基盤416（例えば、通信バス、クロスオーバー・バー、またはネットワーク）を含んでもよい。

10

20

30

## 【0021】

通信インターフェース414を介して移送される情報は、信号を運びかつワイヤもしくはケーブル、光ファイバ、電話回線、携帯電話リンク、無線周波数リンク、または他の通信チャネルを使用して実装されてもよい通信リンクを介して、通信インターフェース414が受け取ることができる電子的、電磁気的、光学的、または他の信号などの信号の形であってもよい。そのような通信インターフェースを用いると、1つまたは複数のプロセッサ402は、上述の方法ステップを行う過程で情報をネットワークから受け取ってもよく、または情報をネットワークに出力してもよいと思料される。さらに、本発明の方法実施形態は、プロセッサだけで実行してもよく、または処理の一部分を共有する遠隔プロセッサと併せてインターネットなどのネットワークを通じて実行してもよい。

30

## 【0022】

用語「非一時的コンピュータ可読媒体」は一般に、メイン・メモリ、二次メモリ、リムーバブル記憶装置などの媒体、ならびにハード・ディスク、フラッシュ・メモリ、ディスク・ドライブ・メモリ、C R - R O Mおよび持続的記憶の他の形などの記憶装置を指すために使用され、搬送波または信号などの一過性の対象を含めると解釈されないものとする。コンピュータ・コードの例は、コンパイラによって作成されるなどの機械コード、およびインタープリタを使用してコンピュータによって実行されるより高いレベルのコードを含有するファイルを含む。コンピュータ可読媒体はまた、搬送波で具体化されるコンピュータ・データ信号によって伝送され、プロセッサによって実行可能である一連の命令を表すコンピュータ・コードであってもよい。

40

## 【0023】

## 動作

本発明の実施形態の動作時には、コントローラ248は、スピニ集団204を照らす（ステップ104）ために第1の光源208に第1の光学経路218に沿って第1の偏光を提供させる。第1の偏光は、スピニ集団のスピニを偏極させる。この実施形態では、第1の偏光子212は、第1の光の進行方向に沿って反時計方向に光を円偏光させる。コント

50

ローラ 248 は、第 2 の光源 228 に第 2 の光学経路 238 に沿って第 2 の偏光を提供させる。この実施形態では、第 2 の偏光子 232 は、第 2 の光の進行方向に沿って反時計方向に光を円偏光させる。第 1 の光は、第 1 のレンズ 216 によって集束され、スピニ集団 204 を通り抜けて第 2 のレンズ 220 に進み、そこで第 1 の光は、第 1 の検出器 224 に集束される。第 2 の光は、第 2 のレンズ 220 によって集束され、スピニ集団 204 を通り抜けて第 1 のレンズ 216 に進み、そこで第 2 の光は、第 2 の検出器 244 に集束される。第 2 の検出器 244 は、コントローラ 248 に提供される出力を提供する。

#### 【 0024 】

この実施形態では、第 1 の光および第 2 の光は、2 つの異なる周波数である。図 5 は、本発明のこの実施形態についてのポンピングおよびプローピングの概要を例示する。第 1 の光源 208 によって提供される第 1 の光は、光学的ポンピングを提供するように遷移 508 を引き起こす。第 2 の光源 228 によって提供される第 2 の光は、遷移 504 を引き起こすことによって集団を探査する。他の遷移 512 がまた、起こることもある。

#### 【 0025 】

第 1 の光のパワースペクトルは、変調信号を用いてスピニ集団のスピニ歳差運動共鳴周波数で変調される（ステップ 108）。図 6 は、第 1 の光源 208 からの第 1 の光の周波数変調を引き起こす変調信号の周波数対時間のグラフ 604 である。変調信号を時間の関数として考えると、我々は、この信号の高速フーリエ変換（FFT）を計算することができる。スピニ歳差運動共鳴周波数の 1/3 とスピニ歳差運動共鳴周波数の 2 倍との間の帯域での FFT のパワーは、FFT での全パワー（DC を含まず）の半分未満である。この例では、量子力学的測定は、磁場についてである。従って、スピニ歳差運動共鳴周波数は、スピニ集団のラーモア周波数であり、歳差運動共鳴周期は、スピニ集団のラーモア周期である。変調信号は、第 1 の光の周波数に次の変化を引き起こす。 $t_1$  より前の時間については、第 1 の光は、周波数  $f_1$  で提供され、次いで  $t_1$  から  $t_2$  までは、周波数は、 $f_2A$  から  $f_2B$  まで急速に変調され（または掃引され）、ただし  $f_1$  は、変調の中心またはその近くである。この例では、急速変調は、約 5 回変調される。一般に、周波数は、少なくとも 3 回変調される。 $t_2$  から  $t_3$  までは、周波数は、 $f_1$  に維持される。このサイクルは、スピニ集団 204 についてのラーモア共鳴周波数くらいの周波数で繰り返される。その周期は、ラーモア周期にほぼ等しい。結果として、ラーモア周期の一部分の間は、第 1 の光源は、蒸気の吸収共鳴周波数またはその近くであり、ラーモア周期の他の部分については、第 1 の光源の周波数は、吸収共鳴周波数の周りで急速に変調される。従って、この急速変調は、ラーモア周波数よりも大きい周波数を有する。第 1 の光源の周波数変調は、この例では方形波エンベロープを有するけれども、他の実施形態は、正弦波または他のエンベロープを有する周波数変調を提供してもよい。変調は、検出器 224 によって検出可能である信号をもたらすのに十分である。この実施形態では、 $f_2A$  および  $f_2B$  は、 $f_1$  から十分に間隔を空けられ、その結果  $f_2A$  および  $f_2B$  での吸収は、 $f_1$  での吸収の 90% 未満であり、その結果  $f_2A$  および  $f_2B$  において 10% よりも多い吸収の低減がある。第 1 の光の平均周波数は、共鳴周波数またはその近くであることになる。歳差運動共鳴周波数よりも 3 倍を超えて速い周波数でのこの掃引は、周波数側波帯を形成し、ただし平均周波数は、周波数側波帯の真ん中にある。

#### 【 0026 】

図 7 は、セル吸収の吸収曲線対周波数のグラフである。そのグラフは、簡略化された吸収曲線であり、明確にするために 1 つの遷移だけの効果を示す。図 7 で示されるように、最大吸収は、周波数  $f_1$  にある。第 1 の光は、 $f_1$  と  $f_2A$  および  $f_2B$  との間で FM 変調され、最大吸収の位置から両矢印 704 によって示される最小吸収の位置へと移行する。この実施形態では、変調周波数は、セシウム原子が光周波数の変化に応答することができる、約 1 MHz である速度よりも大きく、約 1 GHz である次の励起状態遷移の周波数よりも小さい。吸収曲線は、半振幅の周波数  $f_3W$  および  $f_4W$  を有し、それらは、吸収の振幅が共鳴周波数  $f_1$  での吸収の振幅の半分である周波数である。平均周波数が、共鳴周波数  $f_1$  またはその近くであるとき、その時平均周波数は、 $f_3W$  と  $f_4W$  との間で

10

20

30

40

50

ある。

**【0027】**

この実施形態では、第2の検出器244からの出力は、増幅器およびフィルタ304に提供され、それは、帯域通過フィルタとしての役割を果たし、次いで信号をコンピュータ400に提供する。コンピュータは、第1の光源208からの第1の光を変調する変調器308にフィードバックを提供するためにその信号を使用する。

**【0028】**

変調された第1の光は、スピニング集団と相互作用する。第2の検出器244は、スピニング集団204を通過した後の第2の光源228を検出し(ステップ112)、検出された光の量を表す信号をコントローラ248に提供する。検出された光は、この実施形態では磁場の強度または方向である量子力学的測定値を決定するためにコントローラ248によって使用される(ステップ116)。もし正味の偏極ベクトルが、磁場に平行であるならば、歳差運動信号は、測定されないことになる。もしモーメントが、磁場から離れて動かされるならば、測定可能な歳差運動が、結果的に生じることになる。変調をラーモア周波数で適用することによって、磁気モーメントは、磁場から離れて傾けられ、その結果歳差運動信号を測定することができる。原子が、磁場中で歳差運動をすると、原子は、光ビームと相互作用することになり、そのビームから光を吸収する傾向があり、検出器での明るさの観測可能な減少を生じさせる。原子が、ラーモア周波数で歳差運動をすると、ラーモア周波数に等しい特性周波数を有する振幅変調が、もたらされる。

**【0029】**

磁力計は、変調がラーモア周波数で適用されるときに吸収の大きな変化が得られる、共鳴回路としての役割を果たす。システム出力は、ラーモア周波数での自励発振を引き起こす正のフィードバックを発生させるために使用されてもよい。本明細書および請求項で使用されるような「自励発振フィードバック回路」は、歳差運動共鳴周波数を追跡するための可変周波数発生回路を含有しない。歳差運動共鳴周波数は、正のフィードバックを通じて発生される。正のフィードバックを得るための1つの要件は、フィードバックが適切な位相であること、および電子機器の位相応答が共鳴周波数を変更しないことを保証することである。本発明の実施形態は、フィードバック信号の位相の調整を必要としない。

**【0030】**

この実施形態は、実質的に平行である光学的光路を提供するので、この実施形態は、磁力計の性能を制限する90度位相シフトを必要とすることがある従来技術に優る利点を提供する。従来技術での他の装置は、周波数を共鳴から離れて移動させるときに位相遅れを経験することもあり、そのことは、磁力計の性能をさらに制限することもある。

**【0031】**

本発明のこの実施形態でのレーザの使用は、放電ランプよりも大幅に低い電力消費を可能にし、振幅または周波数が変調されることを可能にする。

**【0032】**

検出器224、244は、検出器224、244に向けられる光の強度を測定する光検出器であってもよい。他の実施形態では、検出器は、光の偏光、波長、周波数、または光の任意の他の特性もしくは光の特性の組み合わせを検出してよい。

**【0033】**

追加の実施形態

図8は、本発明の別の実施形態の概略図である。スピニング集団804は、原子または分子の蒸気を含有する。光源808、検出器824、および集束ミラー850は、スピニング集団804に隣接して置かれる。コントローラ848は、スピニング集団804、光源808、および検出器824に制御可能に接続される。

**【0034】**

動作時には、光源808は、光学経路818に沿って偏光を提供することによってスピニング集団804を照らす。スピニング集団804を通過した後、光は、集束ミラー850によって反射され、スピニング集団804を再び通過し、そこで光は、検出器824に集束される。

10

20

30

40

50

光は、検出器 824 によって検出され、その検出器は、コントローラ 848 に提供される信号を発生させる。コントローラ 848 は、変調を光源 808 に提供しあつ磁気ベクトル測定値などの測定値を提供するために検出された信号を使用する。コントローラ 848 はまた、温度などの、スピン集団 804 の様々なパラメータを制御するために制御信号をスピン集団 804 に提供してもよい。コントローラ 848 はまた、光源 808 の温度または光源 808 を調整するために使用されてもよい他のパラメータなどの、光源 808 の他のパラメータを制御してもよい。

#### 【0035】

この実施形態は、単一レーザ・ダイオードを使用してポンピングおよびプローピングの両方を行うことが可能である。単一レーザ・ダイオードを使用することによって、この実施形態の所要電力および構成要素の数は、低減される。加えて、先の実施形態のレンズは、集束ミラーで置き換えられる。10

#### 【0036】

本発明の他の実施形態は、重力もしくは時間を測定する、またはジャイロスコープもしくはコンパスとして使用されてもよい、量子力学的測定装置を提供することができる。別の実施形態では、偏光は、同じ方向である。別の実施形態では、光は、偏光されない。ポンピング光をプローピング光から分離するために偏光子および偏光フィルタを使用することに加えて、光源は、光が検出器に達するときに分離されることを保証するように集束されてもよい。加えて、不透明なスクリーンが、ポンピング光をプローピング光から分離するために使用されてもよい。加えて、分離は、光学経路を直交させることによって提供されてもよい。別の実施形態では、振幅変調が、周波数変調の代わりに使用されてもよい。2つの光源を有する別の実施形態では、光源は、同じ周波数の光を提供する。いくつかの実施形態では、光源は、偏光を本質的に提供してもよい。20

#### 【0037】

本発明は、いくつかの好ましい実施形態の観点から述べられたが、本発明の範囲内に入る改変、置換、変更および様々な代替等価物がある。本発明の方法および装置を実施する多くの代替的方法があることもまた、留意されるべきである。従って、次の添付の請求項は、本発明の真の趣旨および範囲内に入るようなすべてのそのような改変、置換、変更、および様々な代替等価物を含むと解釈されることが意図されている。

#### (付記)

本発明は下記のように表現できる。

##### (項目1)

歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有するスピン集団と

第1の波長の第1の光を提供するための第1の光源であって、前記第1の光源が、前記スピン集団を照らすように位置決めされる、第1の光源と、

前記スピン集団からの光を検出するように位置決めされる検出器と、

前記第1の光源からの前記第1の光の電力スペクトルを変調し、変調信号を時間の関数として発生させるための変調器とを備える、量子力学的測定装置において、

前記スピン歳差運動共鳴周波数の1/3と前記スピン歳差運動共鳴周波数の2倍との間の周波数帯域での前記変調信号の電力は、前記変調信号の全電力(DCを含まず)の半分未満である、量子力学的測定装置。40

##### (項目2)

前記変調器は、前記検出器から入力を受け取りかつ対象とする物理量の尺度を出力として提供するコントローラの一部である、項目1に記載の量子力学的測定装置。

##### (項目3)

前記コントローラは、前記検出器からの前記入力から磁場を計算し、前記スピン歳差運動共鳴周波数は、ラーモア周波数であり、前記スピン歳差運動共鳴周期は、ラーモア周期である、項目2に記載の量子力学的測定装置。

##### (項目4)

10

20

30

40

50

前記コントローラはさらに、フィードバック・ループとして前記変調器に提供される処理された信号を生成するために前記検出器からの信号を処理するためのプロセッサを備える、項目3に記載の量子力学的測定装置。

(項目5)

第2の光を提供するための第2の光源をさらに備え、前記第2の光は、前記スピニ集団を照らすように向けられ、前記第2の光源からの光は、前記検出器に向かされ、前記第1の光は、前記検出器に向けられない、項目4に記載の量子力学的測定装置。

(項目6)

前記変調器は、自励発振フィードバック回路の一部である、項目5に記載の量子力学的測定装置。

10

(項目7)

前記変調器は、自励発振フィードバック回路の一部である、項目1に記載の量子力学的測定装置。

(項目8)

前記コントローラはさらに、フィードバック・ループとして前記変調器に提供される処理された信号を生成するために前記検出器からの信号を処理するためのプロセッサを備える、項目2または3のいずれかに記載の量子力学的測定装置。

(項目9)

第2の光を提供するための第2の光源をさらに備え、前記第2の光は、前記スピニ集団を照らすように向けられ、前記第2の光源からの光は、前記検出器に向かられ、前記第1の光は、前記検出器に向けられない、項目1に記載の量子力学的測定装置。

20

(項目10)

前記変調器は、自励発振フィードバック回路の一部である、項目1に記載の量子力学的測定装置。

(項目11)

第1の波長の第1の光でスピニ集団を照らすことによって前記スピニ集団中のスピニを偏極させるステップであって、前記スピニ集団が、歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有する、ステップと、

前記第1の光の電力スペクトルを前記スピニ集団の前記歳差運動共鳴周波数で変調するステップであって、

30

第1の光源からの前記第1の光の前記電力スペクトルの前記変調が、前記歳差運動共鳴周期の一部については前記吸収共鳴周波数またはその近くの周波数の前記第1の光を提供することおよび前記歳差運動共鳴周期の一部については前記吸収共鳴周波数の周りに複数の離散または連続周波数側波帯を有する前記第1の光を提供することを含む、ステップと、

前記スピニ集団からの光を検出するステップと、

前記スピニ集団の量子状態の量子力学的測定値を提供するために前記検出された光を使用するステップとを含む、量子力学的測定を行うための方法。

(項目12)

第1の波長の第1の光でスピニ集団を照らすことによって前記スピニ集団中のスピニを偏極させるステップであって、前記スピニ集団が、歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有する、ステップと、

40

前記第1の光の電力スペクトルを前記スピニ集団の前記歳差運動共鳴周波数で時間の関数としての変調信号を用いて変調するステップであって、

前記スピニ歳差運動共鳴周波数の1/3と前記スピニ歳差運動共鳴周波数の2倍との間の周波数帯域での前記変調信号の電力が、前記変調信号の全電力(DCを含まず)の半分未満である、ステップと、

前記スピニ集団からの光を検出するステップと、

前記スピニ集団の量子状態の量子力学的測定値を提供するために前記検出された光を使用するステップとを含む、量子力学的測定を行うための方法。

50

(項目13)

物理量の測定値を推測するために前記量子状態の前記量子力学的測定値を使用するステップと、

前記測定された物理量の出力を提供するステップとをさらに含む、項目12に記載の方法。

(項目14)

フィードバック・ループでの変調を制御するために前記検出された光からの信号を使用するステップをさらに含む、項目13に記載の方法。

(項目15)

磁場測定値を提供するために前記量子状態の前記量子力学的測定値を使用するステップをさらに含み、前記スピン歳差運動周波数は、ラーモア周波数であり、前記スピン歳差運動周期は、ラーモア周期である、項目14に記載の方法。

10

(項目16)

前記フィードバック・ループは、前記スピン集団のスピン偏極を維持するために使用される、項目14に記載の方法。

(項目17)

第2の光で前記スpin集団を照らすステップをさらに含む、項目12に記載の方法。

(項目18)

フィードバック・ループでの変調を制御するために前記検出された光からの信号を使用するステップをさらに含む、項目12から13のいずれかに記載の方法。

20

(項目19)

磁場測定値を提供するために前記量子状態の前記量子力学的測定値を使用するステップをさらに含み、前記スpin歳差運動周波数は、ラーモア周波数であり、前記スpin歳差運動周期は、ラーモア周期である、項目12に記載の方法。

(項目20)

前記フィードバック・ループは、前記スpin集団のスpin偏極を維持するために使用される、項目18に記載の方法。

(項目21)

第2の光で前記スpin集団を照らすステップをさらに含む、項目12に記載の方法。

(項目22)

30

歳差運動共鳴周波数、歳差運動共鳴周期、および吸収共鳴周波数を有するスpin集団と、

第1の波長の第1の光を提供する第1の光源であって、前記第1の光源が、前記スpin集団の少なくとも一部分を照らすように位置決めされる、第1の光源と、

前記スpin集団からの光を検出するように位置決めされる検出器と、

前記検出器からの出力を受け取り、前記出力から磁場情報を決定するためのコントローラと、

前記第1の光源からの前記第1の光の電力スペクトルを変調し、変調信号を時間の関数として発生させるための変調器とを備える、磁力計において、

ラーモア周波数の1/3とラーモア周波数の2倍との間の周波数帯域での前記変調信号の電力は、前記変調信号の全電力(DCを含まず)の半分未満である、磁力計。

40

(項目23)

前記コントローラは、フィードバック・ループを提供するために前記変調器への出力を発生させるように前記検出器からの入力を処理する、項目22に記載の磁力計。

(項目24)

第2の光を提供するための第2の光源をさらに備え、前記第2の光は、前記スpin集団を照らすように向けられ、前記第2の光源からの光は、前記検出器に向かされ、前記第1の光は、前記検出器に向けられない、項目23に記載の磁力計。

(項目25)

前記第1の波長は、前記第2の波長と異なる、項目24に記載の磁力計。

50

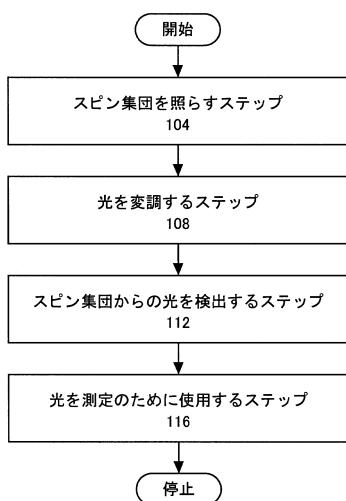
(項目26)

第2の光を提供するための第2の光源をさらに備え、前記第2の光は、前記スピニン集団を照らすように向けられ、前記第2の光源からの光は、前記検出器に向けられ、前記第1の光は、前記検出器に向けられない、項目22または23に記載の磁力計。

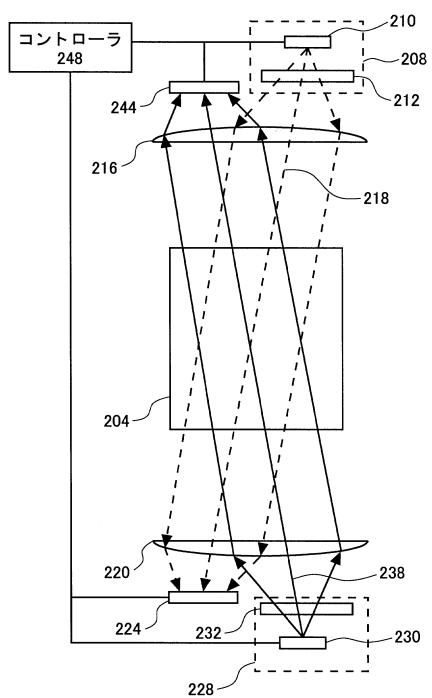
(項目27)

前記第1の波長は、前記第2の波長と異なる、項目26に記載の磁力計。

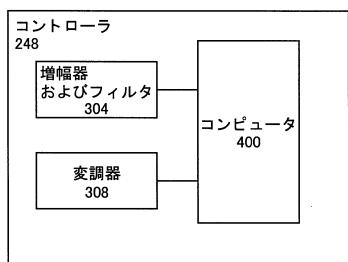
【図1】



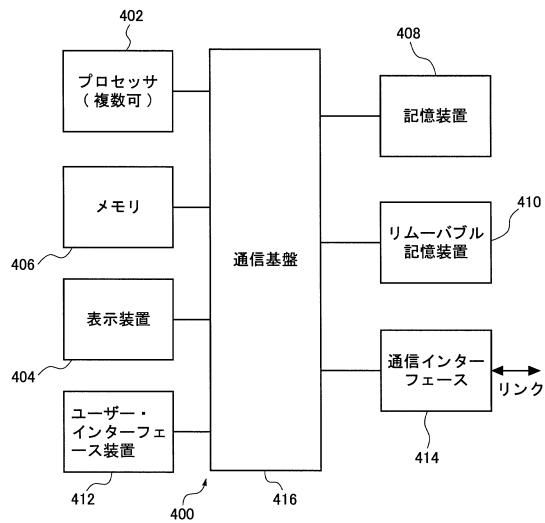
【図2】



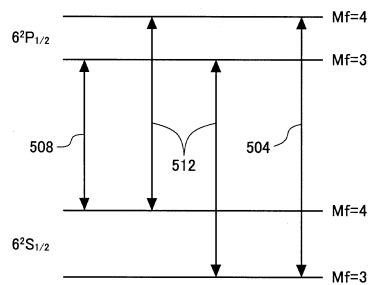
【図3】



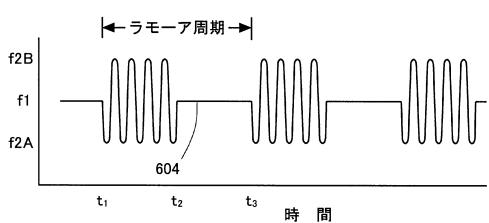
【図4】



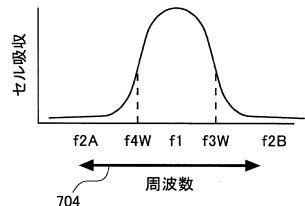
【図5】



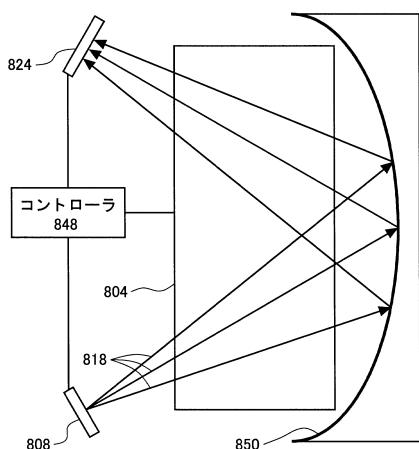
【図6】



【図7】



【図8】



---

フロントページの続き

(72)発明者 キエルスノヴスキー, クルジストフ, エイ.  
アメリカ合衆国、カリフォルニア州 94563、  
ドライブ 23

オリンダ、アイビー

審査官 小川 浩史

(56)参考文献 米国特許出願公開第2008/0290867(US, A1)

Mark PROUTY, "SERDP Project MR-1512 FINAL REPORT:Development of a Micro-Fabricated Total-Field Magnetometer", GEOMETRICS, INC., 2011年 3月, pp.57-59

William E. BELL, Arnold L. BLOOM, "OPTICALLY DRIVEN SPIN PRECESSION", PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1961年 3月15日, Vol.6, No.6, pp.280-281

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 R 3 3 / 2 6