

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

magnets (106), (108) and three groups of laser beam pairs. A portion of the laser beam pairs LZ is masked by the magnets (106), (108), so that a region (114) which is a non-atom catch space is formed inside a crossing region (112) where the three groups of laser beam pairs cross. The inside of the crossing region (112) is irradiated with a laser beam (118) so that atoms inside the non-atom catch space move to the outside of the crossing region (112).

(57) 要約: 磁石 (106), (108) によって形成される四重極磁場と、3組のレーザー光対とによって、原子が捕捉される。磁石 (106), (108) によって、レーザー光対 LZ の一部がマスクされることで、3組のレーザー光対が交差する交差領域 (112) 内に、非原子捕捉空間である領域 (114) が形成される。交差領域 (112) 内にレーザー光 (118) が照射されることで、非原子捕捉空間内の原子が交差領域 (112) の外側へ移動する。

明 細 書

発明の名称：

磁気光学トラップ装置、物理パッケージ、光格子時計用物理パッケージ、原子時計用物理パッケージ、原子干渉計用物理パッケージ、量子情報処理デバイス用物理パッケージ、及び、物理パッケージシステム

技術分野

[0001] 本発明は、磁気光学トラップ装置、物理パッケージ、光格子時計用物理パッケージ、原子時計用物理パッケージ、原子干渉計用物理パッケージ、量子情報処理デバイス用物理パッケージ、及び、物理パッケージシステムに関する。

背景技術

[0002] 光格子時計は、2001年に、本出願の発明者の一人である香取秀俊によって提案された原子時計である。光格子時計では、レーザー光で形成した光格子内に原子集団を閉じ込めて、可視光領域の共振周波数を計測するため、現行のセシウム時計の精度をはるかに凌駕する18桁の精度の計測が可能である。光格子時計は、発明者らのグループによって鋭意研究開発がなされている他、国内外の様々なグループによっても研究開発が行われて、次世代原子時計として発展してきている。

[0003] 最近の光格子時計の技術については、例えば、下記特許文献1～3を挙げることができる。特許文献1には、中空の通路を有する光導波路の内部に、1次元の移動光格子を形成することが記載されている。特許文献2には、実効的魔法周波数を設定する態様について記載されている。実際に、ストロンチウム、イッテルビウム、水銀、カドミウム及びマグネシウム等で、魔法波長が、理論的にかつ実験的に決定されている。また、特許文献3には、周囲の壁から放射される黒体輻射からの影響を低減する輻射シールドについて記載されている。

[0004] 光格子時計では、高精度で時間計測を行うため、重力による一般相対性論

的な効果に基づく地球上の1 cmの高度差を、時間の進み方のずれとして検出することができる。そこで、光格子時計を小型化、可搬化して研究室外のフィールドで利用できるようになれば、地下資源探索、地下空洞、マグマだまりの検出等、新たな測地技術への応用可能性が広がる。光格子時計を量産して各地に配置し、重力ポテンシャルの時間変動を連続監視することにより、地殻変動の検出、重力場の空間マッピング等の応用も可能となる。このように、光格子時計は、高精度な時間計測の枠を超えて、新たな基盤技術として社会に貢献することが期待されている。

[0005] 一般的な光格子時計の物理パッケージは、原子オーブンと、ゼーマン減速器と、磁気光学トラップ装置(MOT)とを含む。原子オーブンとゼーマン減速器とによって冷却原子ビームが生成され、生成された冷却原子ビームは、磁気光学トラップ装置に出力される。

[0006] 一般的に、ゼーマン減速器は、ボアと、当該ボアの中心軸に沿った磁場を発生させる磁場発生器とを含む。ゼーマン減速器は、ゼーマン減速法を用いて、原子オーブンから出射した速い初速を持つ原子ビームの速度を、磁気光学トラップ装置によって捕捉し得る速度まで減速させる。ボア内には、ボアの開口部からレーザー光が照射される。当該レーザー光は、原子ビームの進行方向とは逆の方向に進行するレーザー光であり、原子遷移共鳴周波数からドップラーシフト項を補正して得られた周波数を持つレーザー光である。当該レーザー光の強い輻射力によって原子ビームが減速される。更に、磁場発生器によって、ボアを中心に空間的に勾配を持った磁場を形成することで、減速に伴うドップラーシフトの変化をゼーマンシフトで補い、原子に対して減速用のレーザー光が常に共鳴する状況を作り出すことができる。

[0007] ゼーマン減速器の後段に位置する磁気光学トラップ装置は、複数のレーザー光と、原子が捕捉される位置を中心に形成された四重極磁場と、によって原子を捕捉する。

[0008] レーザー光の周波数は、原子の共鳴周波数から負に離調した値に設定される。レーザー光の光子が原子に吸収される際に、光子の運動量が原子に与え

られ、原子に対して輻射圧として作用する。原子が有限の速度で運動しているとき、その運動に対向するレーザー光の周波数は、原子の共鳴周波数に近づくようにドップラーシフトする。一方、その運動の方向と平行なレーザー光の周波数は、原子の共鳴周波数から離れるようにドップラーシフトする。したがって、原子は、運動に対向するレーザー光からの輻射圧をより強く受け、結果として、原子は減速する。

[0009] 更に、四重極磁場によって、位置依存性を持った輻射圧を発生させることができる。具体的には、その位置依存性を持った輻射圧は、原子の共鳴周波数が捕捉空間の中心から離れるにしたがって大きくゼーマンシフトするような輻射圧である。また、レーザー光の偏光を選択することで、輻射圧が加わる方向を中心に向けることができる。

[0010] 以上のように、ゼーマン減速器と磁気光学トラップ装置とを組み合わせることで、高速の原子ビームを減速させ、捕捉空間にて原子を捕捉することができる。

[0011] 例えば、ストロンチウム原子を原子源として用いる場合、波長が461 nm ($^1S_0 - ^1P_1$ 準位間のエネルギーに相当する波長)であるレーザー光が、減速用のレーザー光として用いられる。

[0012] ところで、捕捉された冷却原子を、後段の装置に向けて供給するための技術が知られている。

[0013] 別の技術として、ムービングモラセスを用いる技術が知られている(特許文献4参照)。磁気光学トラップを実現するためのレーザー光対のうち、冷却原子を移動させたい方向に沿ったレーザー光の周波数を上げ、その反対方向に沿ったレーザー光の周波数を下げることによって、冷えたままの状態の原子を、捕捉位置から移動させることができる。

[0014] 別の技術として、穴が形成されたミラーを利用する技術が知られている(非特許文献1参照)。具体的には、磁気光学トラップを実現するためのレーザー光対のうち、冷却原子を移動させたい方向に沿ったレーザー光を、それと対となるレーザー光からの反射光から生成する。その反射光を生成するた

めのミラーの中央に穴が形成されており、かつ、そのミラーは、複数組のレーザー光対が交差する領域に接する位置に近づけて設置される。この構成によれば、その穴によって、レーザー光が反射されない柱状の領域が形成される。その領域に進入した冷却原子には、穴から放出される方向に輻射圧が加わり、その結果、冷却原子は、確率的にミラーの穴から引き出される。中心軸に穴が形成された円錐ミラーやピラミッドミラー等が用いられる場合も同様である。

[0015] 別の技術として、互いに直交する3組のレーザー光対のうちの2組のレーザー光対の光路上に、レーザー光を遮る部材を設ける技術が知られている。この技術では、3組のレーザー光対が交差する領域において、等方的な輻射圧の他、当該領域から離れる方向に沿って異方的な輻射圧が発生する。その異方的な輻射圧によって、確率的に冷却原子が引き出される。

[0016] 別の技術として、トラップ法を磁気光学トラップ法から光トラップ法に切り替え、冷却原子を拘束する光ポテンシャルを掃引することで、冷却原子を移動させる技術が知られている（特許文献3）。

[0017] 別の技術として、トラップ法を磁気光学トラップ法から磁気トラップ法に切り替え、冷却原子を拘束する磁気ポテンシャルを掃引することで、冷却原子を移動させる技術が知られている（非特許文献2）。

[0018] また、磁気光学トラップ中の原子を非トラップ状態に光ポンプして、重力によって冷却原子を引き出す方法が知られている（非特許文献3）。

[0019] 磁気光学トラップに必要な四重極磁場を生成する方法として、例えば、反ヘルムホルツコイルを用いる方法や、磁化が互いに反平行な永久磁石対を用いる方法等が知られている。特許文献5には、3組のレーザー光対のうちの一対のレーザー光を貫くリング磁石が、励起コイルと共に用いることが記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0020] 特許文献1：特許第6206973号公報

特許文献2：特許第6635608号公報

特許文献3：特許第7189588号公報

特許文献4：米国特許第5274232号明細書

特許文献5：米国特許第10371763号明細書

非特許文献

[0021] 非特許文献1：Phys.Rev.Lett 77(1996)3331 Z.T.Liu et al.

非特許文献2：Phys.Rev. A 63(2001)031401 M.Greiner et. al.

非特許文献3：Phys.Rev. A 46(1992)R17 F.Shimizu et. al.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0022] ところで、原子時計や原子干渉計等の装置においては、冷却された原子気体が連続的に供給されて、計測が連続的に実行されることが望まれる。

[0023] 本発明の目的は、原子を捕捉して連続的に後段の装置に供給することにある。

課題を解決するための手段

[0024] 本発明の1つの形態は、第1光群と磁場とによって原子を捕捉する原子捕捉空間を形成する第1形成手段と、前記第1光群が交差する交差領域内に非原子捕捉空間を形成する第2形成手段と、前記交差領域内に第2光を照射することで、前記非原子捕捉空間内の原子を前記交差領域内から出射させる光照射手段と、を含むことを特徴とする磁気光学トラップ装置である。

[0025] 前記第1形成手段と前記第2形成手段は、磁場を発生させる一对の磁石を含み、前記一对の磁石のそれぞれには、光を通す穴が形成されており、前記光照射手段は、前記穴を通して前記交差領域に前記第2光を照射してもよい。

[0026] 前記一对の磁石は、前記第1光群の中の一部が進行する光路上に設置され、前記第1光群の中の一部を部分的にマスクし、前記第1光群の中で前記一对の磁石によってマスクされていない光群と、前記一对の磁石から発生した

磁場とによって、前記一对の磁石の間に前記原子捕捉空間が形成され、前記一对の磁石によって光がマスクされた空間に前記非原子捕捉空間が形成されてもよい。

[0027] 磁気光学トラップ装置は、前記原子捕捉空間を形成するための補助磁石を更に含んでもよい。

[0028] 前記第2形成手段は、光を通す穴が形成された一对のマスクであり、前記一对のマスクは、前記第1光群の中の一部が進行する光路上に設置され、前記第1光群の中の一部を部分的にマスクし、前記光照射手段は、前記穴を通して前記交差領域に前記第2光を照射してもよい。

[0029] 前記一对のマスクは、常磁性物質であってもよい。

[0030] 前記第2光は、プッシュレーザー光であってもよい。

[0031] 前記第1光群は、波長が461nmであるレーザー光、又は、波長が689nmであるレーザー光であってもよい。

[0032] 本発明の1つの態様は、上記の磁気光学トラップ装置を含む、ことを特徴とする物理パッケージである。

[0033] 本発明の1つの態様は、上記の物理パッケージを含む、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージである。

[0034] 本発明の1つの態様は、上記の物理パッケージを含む、ことを特徴とする原子時計用物理パッケージである。

[0035] 本発明の1つの態様は、上記の物理パッケージを含む、ことを特徴とする原子干渉計用物理パッケージである。

[0036] 本発明の1つの態様は、上記の物理パッケージを含む、ことを特徴とする原子又はイオン化された原子についての量子情報処理デバイス用物理パッケージである。

[0037] 本発明の1つの態様は、上記の物理パッケージと、前記物理パッケージの動作を制御する制御装置と、を含む物理パッケージシステムである。

発明の効果

[0038] 本発明によれば、原子を捕捉して連続的に後段の装置に供給することがで

きる。

図面の簡単な説明

- [0039] [図1]実施形態にかかる光格子時計の全体構成を示すブロック図である。
- [図2]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置の概略構成を示す断面図である。
- [図3]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置の概略構成を示す断面図である。
- [図4]一对の磁石を示す斜視図である。
- [図5]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図6]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図7]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図8]第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図9]一对の磁石の変形例を示す斜視図である。
- [図10]一对の磁石の変形例を示す斜視図である。
- [図11]物理パッケージの概略を示す図である。
- [図12]第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置の概略構成を示す断面図である。
- [図13]第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図14]第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置によって形成される磁場分布の計算値を示す図である。
- [図15]5本のレーザー光を示す図である。
- [図16]第3実施形態に係る磁気光学トラップ装置の概略構成を示す断面図である。

[図17] 一对の磁石の実装方法を説明するための断面図である。

[図18] 一对の磁石の実装方法を説明するための断面図である。

発明を実施するための形態

[0040] <光格子時計の構成>

図1を参照して、実施形態に係る磁気光学トラップ装置が用いられる光格子時計10の概略構成について説明する。図1は、光格子時計10の全体構成を示すブロック図である。ここでは、実施形態に係る磁気光学トラップ装置が用いられる装置の一例として光格子時計10を例に挙げて説明するが、もちろん、実施形態に係る磁気光学トラップ装置は、光格子時計10以外の装置に用いられてもよい。

[0041] 光格子時計10は、例えば、物理パッケージ12と、光学系装置14と、制御装置16と、PC(Personal Computer)18とを含む。

[0042] 物理パッケージ12は、原子集団を捕捉し、光格子に閉じ込め、時計遷移を起こさせる装置である。光学系装置14は、原子捕捉用レーザー光源、時計遷移励起レーザー光源、レーザー周波数制御装置等の光学的機器を備えた装置である。光学系装置14は、レーザー光を物理パッケージ12に送る他、物理パッケージ12において原子集団が放出した蛍光信号を受光して電気信号に変換し、原子の共鳴周波数に合うようにレーザー光源へフィードバックする等の処理を行う。制御装置16は、物理パッケージ12及び光学系装置14を制御する装置である。制御装置16は、例えば、物理パッケージ12の動作制御、光学系装置14の動作制御、及び、計測によって得られた時計遷移の周波数解析等の解析処理を行う。物理パッケージ12、光学系装置14、及び、制御装置16が、相互に連携することで、光格子時計10の機能が実現される。

[0043] PC18は、プロセッサとメモリとを含む、汎用的なコンピュータである。プロセッサとメモリとを含むハードウェアによってソフトウェアが実行されることで、PC18の機能が実現される。PC18には、光格子時計10を制御するアプリケーションプログラムがインストールされている。PC1

8は、制御装置16に接続されており、制御装置16のみならず、物理パッケージ12と光学系装置14とを含む光格子時計10の全体を制御してもよい。また、PC18は、光格子時計10のUI (User Interface) を提供する。ユーザは、PC18を介して、光格子時計10の起動、時間計測、及び、結果確認等を行うことができる。

[0044] なお、物理パッケージ12と物理パッケージ12の制御に必要となる構成とを含むシステムを、「物理パッケージシステム」と称することがある。制御に必要となる構成は、制御装置16又はPC18に含まれてもよいし、物理パッケージ12に含まれてもよい。また、制御装置16の機能の一部又は全部が、物理パッケージ12に含まれてもよい。

[0045] 以下、実施形態に係る磁気光学トラップ装置について詳しく説明する。

[0046] <第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置>

図2から図4を参照して、第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置100について説明する。図2及び図3は、第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置100の概略構成を示す断面図である。図4は、一对の磁石を示す斜視図である。

[0047] ここで、互いに直交するX軸、Y軸及びZ軸からなる座標系を定義する。X軸、Y軸及びZ軸が互いに交差する点が、原子捕捉空間102の中心Oとして定められている。中心Oは、磁気光学トラップ用の四重極磁場Bの対称点と一致する。

[0048] 磁気光学トラップ装置100は、真空チャンバーと、レーザー光を原子の原子捕捉空間102に照射する第1照射装置104と、四重極磁場Bを生成する磁場発生装置の一例である一对の磁石（一对の磁石は、磁石106と磁石108とからなる）と、を含む。

[0049] 第1照射装置104は、レーザー光を出射する1又は複数の光源と、1又は複数の光源から出射したレーザー光を原子捕捉空間102に照射するための1又は複数の光学素子（例えばミラーやビームスプリッター等）と、を含む。第1照射装置104によって、互いに直交する3組のレーザー光対が照

射される。当該3組のレーザー光対は、対象の原子に対して負に離調された、合計で6本の共鳴レーザー光からなる。

[0050] 当該3組のレーザー光対は、具体的には、X軸に沿って照射されるレーザー光対L Xと、Y軸に沿って照射されるレーザー光対L Yと、Z軸に沿って照射されるレーザー光対L Zと、からなる。

[0051] レーザー光対L Xは、X軸上を正の方向に進行するレーザー光L X 1と、X軸上を負の方向に進行するレーザー光L X 2（つまり、レーザー光L X 1の進行方向とは反対の方向に進行するレーザー光）と、からなる。

[0052] レーザー光対L Yは、図2及び図3に示されていないが、Y軸上を正の方向に進行するレーザー光L Y 1と、Y軸上を負の方向に進行するレーザー光L Y 2（つまり、レーザー光L Y 1の進行方向とは反対の方向に進行するレーザー光）と、からなる。

[0053] レーザー光対L Zは、Z軸上を正の方向に進行するレーザー光L Z 1と、Z軸上を負の方向に進行するレーザー光L Z 2（つまり、レーザー光L Z 1の進行方向とは反対の方向に進行するレーザー光）と、からなる。

[0054] 図2には、レーザー光が照射される領域110が模式的に示されている。また、図3には、交差領域112が破線で示されている。交差領域112は、3組のレーザー光対が交差する領域である。交差領域112内に存在する原子は、3組のレーザー光対と相互作用し、原子の運動方向とは逆の方向から当該原子に輻射圧が加えられる。

[0055] 交差領域112内では、四重極磁場Bによって輻射圧に空間依存性が生じ、その空間依存性を有する輻射圧が、原子に対して四重極磁場Bの中心点に向けた復元力となる。

[0056] 四重極磁場Bは、上記の一对の磁石（磁石106, 108）によって生成される。磁石106, 108は、例えばリング状の磁石である。磁石106の中央には、着磁方向に磁石106を貫通する穴106aが形成されている。同様に、磁石108の中央には、着磁方向に磁石108を貫通する穴108aが形成されている。穴106a, 108aの形状は円形であってもよい。

し、矩形であってもよい。

[0057] 例えば、磁石106, 108は、Z軸に沿って着磁された永久磁石である。つまり、着磁方向がZ軸の方向と平行になるように、磁石106, 108がZ軸上に設置されている。具体的には、磁石106, 108は、交差領域112の中心Oを間にして、磁石106の着磁方向106bと磁石108の着磁方向108bとが互いに反対方向となるように設置されている。磁石106と中心Oとの間の距離と、磁石108と中心Oとの間の距離とは等しい。また、磁石106, 108は、レーザー光対LX, LYを遮らないように、交差領域112に接近した位置に設置されている。

[0058] 磁石106, 108のX軸方向の幅及びY軸方向の幅は、レーザー光LZ1, LZ2の直径よりも小さい。磁石106, 108がZ軸上に設置されることで、レーザー光LZ1, LZ2のそれぞれの一部が、磁石106, 108によってマスクされる。その結果、交差領域112内に、レーザー光LZ1, LZ2が照射されない領域114が形成される。この領域114は、磁石106, 108によって光がマスクされる領域であり、非原子捕捉空間の一例に相当する。

[0059] つまり、磁石106, 108は、3組のレーザー光対の中の一部であるレーザー光対LZが進行する光路上に設置され、レーザー光対LZ（つまりレーザー光LZ1, LZ2）の一部を部分的にマスクする。これにより、磁石106, 108によってマスクされていないレーザー光群（つまり、レーザー光対LXと、レーザー光対LYと、レーザー光対LZのうちマスクされていないレーザー光と、を含むレーザー光群）と、磁石106, 108によって形成される四重極磁場Bと、によって、原子捕捉空間102が形成される。また、磁石106, 108によって光がマスクされた空間に、非原子捕捉空間である領域114が形成される。

[0060] また、磁気光学トラップ装置100は、第2照射装置116を含む。第2照射装置116は、レーザー光を出射する光源と、光源から出射したレーザー光を交差領域112に照射するための1又は複数の光学素子（例えばミラ

ーやビームスプリッター等)と、を含む。第2照射装置116によって、レーザー光118が交差領域112に照射される。レーザー光118は、Z軸上に沿って、磁石106の穴106aと磁石108の穴108aとを通過して、原子捕捉空間102に照射される。

[0061] 磁石106, 108の大きさ(例えば直径)と、穴106a, 108aの大きさ(例えば直径)と、磁気光学トラップ用のレーザー光(レーザー光LZ1等)の直径との関係は、以下に示す関係となる。

穴106a, 108aの大きさ<磁石106, 108の大きさ<磁気光学トラップ用のレーザー光の直径

[0062] レーザー光118は、原子を光トラップするためのレーザー光である。光トラップの一例として、光電場によって誘起された双極子力によって原子を捕捉する方法が挙げられる。この方法が用いられる場合、レーザー光118として、光双極子トラップ用のレーザー光が用いられる。別の例として、光の定在波によって原子を捕捉する方法が挙げられる。この方法が用いられる場合、レーザー光118として、光格子用のレーザー光が用いられる。更に別の例として、共鳴レーザー光からなるプッシュレーザー光が、レーザー光118として用いられてもよい。この場合、輻射力によって原子に運動力を付与することができる。

[0063] なお、3組のレーザー光が、第1光群の一例に相当し、第1照射装置104と磁石106, 108が、第1形成手段の一例に相当し、磁石106, 108が、第2形成手段の一例に相当し、第2照射装置116が、光照射手段の一例に相当し、レーザー光118が、第2光の一例に相当する。

[0064] 以下、磁気光学トラップ装置100の動作について説明する。

[0065] 第1照射装置104によってレーザー光対LX, LY, LZが照射され、交差領域112が形成される。また、磁石106, 108によって四重極磁場Bが形成される。また、第2照射装置116によって、レーザー光118が原子捕捉空間102に照射される。

[0066] 交差領域112内に入った原子は、復元力となる輻射圧を受けることで、

四重極磁場Bの中心Oに向けて減速しながら移動する。

[0067] 上述したように、交差領域112内には、磁石106、108によって光がマスクされた領域114が存在する。領域114には、レーザー光対LX、LYが照射され、レーザー光対LZは照射されない。この領域114内では、X方向(+X方向、-X方向)に対する原子の速度とY方向(+Y方向、-Y方向)に対する原子の速度は減速されるが、Z方向(+Z方向、-Z方向)に対する原子の速度は減速されない。そのため、領域114内に存在する原子は、Z方向への運動が制限されず、Z方向に向けて拡散する。図2中の符号120は、Z方向への運動が制限されていない原子の動きを指し示している。

[0068] Z方向に向けて拡散した原子が、更に拡散しながら、光がマスクされた領域114の外側又は内側に移動したと仮定する。

[0069] 領域114の外側に移動した原子には、レーザー光対LZが照射されるので、領域114の外側に移動した原子は、レーザー光対LX、LY、LZと四重極磁場Bとによって、四重極磁場Bの中心Oの方向へ引き戻される。

[0070] 一方、領域114の内側に移動した原子は、レーザー光118と相互作用することになる。ここでは一例として、レーザー光118は、-Z方向に向けて照射されている。レーザー光118がプッシュレーザー光である場合、原子は輻射圧を受けて、-Z方向に進行する。レーザー光118が光トラップ用のレーザー光である場合、光トラップのポテンシャルを外部から制御することで、原子を-Z方向に移動させることができる。-Z方向に移動した原子は、磁石108の穴108aを通過して、交差領域112の外側に押し出される。

[0071] 以上のように、有限の確率で、レーザー光118の進行方向に対する運動量を原子に与えて、原子を交差領域112の外側に移動させることができる。交差領域112の外側に移動した原子は、後段の装置へ供給される。これにより、冷却した原子を連続的に後段の装置へ供給することができる。例えば、原子捕捉空間102内に捕捉された原子を移動させるために、レーザー

光対L X, L Y, L Zをオフにしなくても、冷却した原子を後段の装置へ供給することができる。

- [0072] 第1実施形態の具体例として、レーザー光対L X, L Y, L Zの波長は、689 nmである。また、一例として、磁石106, 108のX方向及びY方向の幅（外径）は、0.8 mm程度であり、穴106 a, 108 aのX方向及びY方向の幅（内径）は、0.27 mm程度であり、磁石106と磁石108との間の距離は、10 mm～15 mm程度である。
- [0073] 図5から図8には、磁石106と磁石108との間に発生する磁場の分布の計算値が示されている。
- [0074] 図5に示されている計算値は、YZ面（Y軸とZ軸とによって形成される面）内における磁場のY成分の計算値（BY（G））である。図6に示されている計算値は、YZ面内における磁場のZ成分の計算値（BZ（G））である。計算値が濃淡で表現されている。
- [0075] 図7には、Y軸上における磁場成分の計算値が示されている。図7中の横軸はY軸上の位置を示しており、縦軸は磁場の計算値を示している。符号122は、磁場のX成分の計算値（BX）と、磁場のZ成分の計算値（BZ）とを指し示している。符号124は、磁場のY成分の計算値（BY）を指し示している。符号126が指し示すように、-2 mmから+2 mmの間に、+3.5 G/cmの直線的な磁場勾配が形成されている。
- [0076] 図8には、Z軸上における磁場成分の計算値が示されている。図8中の横軸はZ軸上の位置を示しており、縦軸は磁場の計算値を示している。符号128は、計算値（BX）と計算値（BZ）を指し示している。符号130は、計算値（BY）を指し示している。-2 mmから+2 mmの間に、-7.1 G/cmの直線的な磁場勾配が形成されている。
- [0077] 図7及び図8に示すように、第1実施形態では、比較的、小さな磁場勾配を有する四重極磁場が形成される。このような四重極磁場と波長が689 nmのレーザー光とによる磁気光学トラップによって、原子の温度が μ K程度になるまで原子が冷却される。 μ K程度の温度まで冷却された原子は、磁気

光学トラップ装置100から後段の装置へ供給される。

[0078] 以上のように、リング状の磁石106, 108がレーザー光対に対するマスクとして機能するため、新たな構成を追加せずに、冷却原子を磁気光学トラップ装置100から取り出して後段の装置へ供給することができる。また、各構成の精密な位置調整やパラメーターの調整をしなくても、冷却原子を連続的に出射することができる。

[0079] 原子気体がマスク部材に付着して、マスク部材が汚れる可能性がある。マスク部材が、穴が形成されたミラー等の光学素子である場合、その汚れによって光学素子の光学特性が劣化する可能性がある。これに対して、穴が形成された磁石106, 108がマスクとして機能するため、光学素子の光学特性が劣化するという問題は生じない。

[0080] 図9及び図10には、四重極磁場Bを形成する一对の磁石の変形例が示されている。図9及び図10は、変形例に係る磁石を示す斜視図である。

[0081] 図9に示す例では、磁石140, 142によって一对の磁石が構成される。磁石140, 142はそれぞれ、矩形状の形状を有する。また、磁石140には、着磁方向に磁石140を貫通する穴140aが形成されている。同様に、磁石142には、着磁方向に磁石142を貫通する穴142aが形成されている。磁石140, 142の着磁方向は、磁石106, 108の着磁方向と同じである。レーザー光118は、穴140a, 142aを通して原子捕捉空間102に照射される。上述した第1実施形態と同様に、磁石140, 142の大きさ（例えば対角線の長さ）と、穴140a, 142aの大きさ（例えば直径）と、磁気光学トラップ用のレーザー光（レーザー光LZ1等）の直径との関係は、以下に示す関係となる。

穴140a, 142aの大きさ < 磁石140, 142の大きさ < 磁気光学トラップ用のレーザー光の直径

[0082] 図10に示す例では、磁石144, 146によって一对の磁石が構成される。中心に穴144aが形成されるように、複数の磁石が軸対称に設置されることで、磁石144が構成される。同様に、中心に穴146aが形成され

るように、複数の磁石が軸対称に設置されることで、磁石146が構成される。具体的には、磁石144, 146はそれぞれ、軸対称に四分割された磁石である。磁石144, 146の着磁方向は、磁石106, 108の着磁方向と同じである。レーザー光118は、穴144a, 146aを通して原子捕捉空間102に照射される。上述した第1実施形態と同様に、磁石144, 146の大きさと、穴144a, 146aの大きさと、磁気光学トラップ用のレーザー光の直径との関係は、以下に示す関係となる。

穴144a, 146aの大きさ<磁石144, 146の大きさ<磁気光学トラップ用のレーザー光の直径

[0083] 以下、図11を参照して、磁気光学トラップ装置100を含む物理パッケージについて説明する。図11は、物理パッケージ150の概略構成を示す図である。

[0084] 物理パッケージ150は、原子オーブン152と、ゼーマン減速器154と、磁気光学トラップ装置100とを含む。

[0085] 原子オーブン152は、試料が収容される試料容器、ヒーター、温度計、電気コネクタ、キャピラリーノズル及び熱輻射シールド等を含む。試料容器等は、内部が超高真空に維持される真空容器内に収容される。ヒーターによって、試料が加熱されることで、試料から原子気体が発生する。原子気体は、キャピラリーノズルからゼーマン減速器154に向けて出射する。原子気体がキャピラリーノズルから出射することで、指向性を持つ原子ビームが形成される。試料としては、例えば、ストロンチウムやイッテルビウム等が用いられるが、これら以外の原子が試料として用いられてもよい。

[0086] ゼーマン減速器154は、ボアと磁場発生器とを含む。磁場発生器は、ソレノイドコイルを含み、ボアの中心軸に沿った磁場を発生させる。原子オーブン152を出射した原子ビームは、ボア内に照射される。

[0087] ゼーマン減速器154は、ゼーマン減速法を用いることで、原子オーブン152から出射した大きい初速を持つ原子ビームの速度を、後段の磁気光学トラップ装置100が捕捉し得る速度まで減速させる。

- [0088] ボア内には、原子ビームの進行方向とは逆の方向からレーザー光が照射される。そのレーザー光は、磁気光学トラップ用のレーザー光として併用されるレーザー光であってもよい。
- [0089] ゼーマン減速器154では、磁場発生器が発生させた磁場とレーザー光とによって、原子オープン152からボア内に照射された原子ビームの速度が減速する。高温の原子ビームは、磁場発生器が発生させた磁場とレーザー光とによってゼーマン減速法に従って減速しながら、ボア内を磁気光学トラップ装置100に向けて進行する。
- [0090] なお、原子オープン152とゼーマン減速器154として、公知の原子オープンとゼーマン減速器を用いることができる。
- [0091] 上述したように、磁気光学トラップ装置100は真空チャンバーを含み、真空チャンバー内は超高真空に維持される。真空チャンバーの内部は、ゼーマン減速器154のボア及び原子オープン152の真空容器に繋がっており、ボア及び原子オープン152の真空容器内は、超高真空に維持される。磁気光学トラップ装置100の真空チャンバー内に、原子捕捉空間102、交差領域112及び領域114（非原子捕捉空間）が形成される。
- [0092] 以下、物理パッケージ150の動作について説明する。
- [0093] 物理パッケージ150では、真空チャンバーの内部が真空化される。原子オープン152からゼーマン減速器154に出射した原子ビームは、ゼーマン減速法に従って十分に減速され、磁気光学トラップ装置100に至る。
- [0094] 磁気光学トラップ装置100では、上述したように、レーザー光対LX, LY, LZと四重極磁場Bとによって原子が捕捉され、レーザー光118によって、極低温の原子が確率的に交差領域112の外側に移動させられる。
- [0095] 交差領域112の外側に移動した極低温の原子に対して、例えば、光格子トラップ等が適用される。例えば、光格子光ビームが磁気光学トラップ装置100の真空チャンバー内に入射し、真空チャンバー内に設けられた光学共振器によって反射され、これにより、光格子光ビームの進行方向に定在波が連なった光格子ポテンシャルが形成される。原子集団は、光格子ポテンシ

ルに捕捉される。

[0096] 波長を若干変化させることで、光格子を光格子光ビームの進行方向に移動させることができる。この移動光格子による移動手段によって、原子集団は時計遷移空間まで移動させられる。

[0097] 時計遷移空間では、光周波数を制御したレーザー光を原子に照射し、時計遷移（すなわち時計の基準となる原子の共鳴遷移）の高精度分光を行い、原子固有かつ不変な周波数を計測する。これにより、正確な原子時計が実現する。

[0098] 原子時計の精度を高めるためには、原子を取り巻く摂動を排除し、周波数を正確に読み出す必要がある。特に重要なことは、原子の熱運動によるドップラー効果が引き起こす周波数シフトの除去である。光格子時計では、時計レーザーの波長に比べ十分に小さい空間に、レーザー光の干渉によって作る光格子で原子を閉じ込めることで、原子の運動を凍結させる。一方で、光格子内では、光格子を形成するレーザー光によって原子の周波数がずれてしまう。そこで、光格子光ビームとしては、「魔法波長」又は「魔法周波数」と呼ばれる特定の波長及び周波数を選ぶことで、光格子が共鳴周波数に与える影響を除去する。

[0099] 時計遷移の結果、発光する光は、光学系装置14によって受光され、制御装置16によって分光処理等されて、周波数が求められる。

[0100] <第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置>

図12を参照して、第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Aについて説明する。図12は、第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Aの概略構成を示す断面図である。

[0101] 第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Aは、第1実施形態に係る磁気光学トラップ装置100の構成に加えて、更に、一对の補助磁石を含む。一对の補助磁石は、リング状の補助磁石160、162からなる。補助磁石160の中央には、着磁方向に補助磁石160を貫通する穴160aが形成されている。同様に、補助磁石162の中央には、着磁方向に補助磁石

162を貫通する穴162aが形成されている。補助磁石160, 162は、Z軸に沿って着磁された磁石である。つまり、着磁方向がZ軸の方向と平行になるように、補助磁石160, 162がZ軸上に設置されている。具体的には、補助磁石160, 162は、交差領域112の中心Oを間にして、磁石106, 108よりも、中心Oから離れた位置に設置されている。また、補助磁石160, 162は、補助磁石160の着磁方向と補助磁石162の着磁方向とが互いに反対方向となるように設置されている。補助磁石160と中心Oとの間の距離と、補助磁石162と中心Oとの間の距離とは等しい。また、補助磁石160の穴160aの直径と補助磁石162の穴162aの直径は、レーザー光対LZの直径よりも大きい。レーザー光対LZは、穴160a, 162aを通して進行し、レーザー光対LZの一部は、磁石106, 108によってマスクされる。図12に示す例では、一例として、6本{LX1, LX2, LY1, LY2, LZ1, LZ2}のレーザー光によって、交差領域112が形成されるが、これは一例に過ぎない。また、図12には、ボア156と磁場発生器158とを含むゼーマン減速器154が示されている。

[0102] 第2実施形態では、比較的、大きな磁場勾配（例えば50G/cm程度）を有する四重極磁場が形成される。このような四重極磁場と波長が461nmのレーザー光とによって構成される磁気光学トラップによって、原子の温度がmK程度になるまで原子が冷却される。このような強い磁場勾配を持った四重極磁場を発生させるために、磁石106, 108として、例えば、サマリウムコバルト製の強力な磁石が用いられる。ゼーマン減速器154の磁場発生器158が形成する磁場分布と磁石106, 108が形成する磁場分布とが、空間的に無駄無く繋がるように、補助磁石160, 162が用いられる。

[0103] 図13には、第2実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Aによって形成される磁場分布の計算結果が示されている。横軸はZ軸上の位置を示しており、縦軸は磁場の計算値を示している。符号166（実線）は、理想的

な磁場の計算結果を指し示している。符号168（丸点）は、磁気光学トラップ装置100Aによって得られる磁場の計算結果を指し示している。図13においては、符号166が示す値と符号168が示す値は、ほぼ一致している。

[0104] 図14には、理想的な磁場の計算結果と磁気光学トラップ装置100Aによって得られる磁場の計算結果との差が示されている。横軸はZ軸上の位置を示しており、縦軸は差を示している。

[0105] 第2実施形態によれば、磁石106、108と補助磁石160、162とを用いることで、理想的な磁場分布を形成することができる。

[0106] また、中心Oに形成される磁場勾配の大きさの計算値は、 35 G/cm であり、比較的、大きな磁場勾配を持つ四重極磁場を形成することが可能となる。これにより、mK程度の温度まで冷却された原子を出力することが可能となる。

[0107] 補助磁石160、162の着磁方向は、磁石106、108の着磁方向と同じ方向であってもよいし、補助磁石160、162の着磁方向は、動径方向であってもよい。

[0108] 円筒状の形状を有する磁石を $2n$ ($n \geq 2$) 個に分割することで得られた一対の磁石を、補助磁石160、162として用いてもよい。分割によって、補助磁石160、162とレーザー光対LX、LYとが干渉し難くなる。別の例として、四重極磁場を形成するように、棒磁石や円柱磁石等を対称的な位置に設置してもよい。

[0109] 第2実施形態において、磁石106、108はソフト磁石であってもよい。例えば、補助磁石160、162から出た磁力線が、ソフト磁石である磁石106、108によって束ねられ、中心O付近に四重極磁場が形成されるように、ソフト磁石の形状が設計される。また、補助磁石160、162の代わりに、反ヘルムホルツコイルを用いて、磁場分布を調整してもよい。

[0110] 上述した第1及び第2実施形態においては、第1光群に相当する例として、互いに直交する3組のレーザー光対LX、LY、LZを例に挙げて説明し

た。図15には、第1光群に相当する別の例が示されている。図15に示すように、計5本のレーザー光の組み合わせ{LXY1, LXY2, LXY3, LZ1, LZ2}が第1光群として用いられてもよい。レーザー光LZは、Z軸上を正の方向に進行するレーザー光LZ1と、Z軸上を負の方向に進行するレーザー光LZ2とからなる。レーザー光LXY1は、X軸上を正の方向に進行するレーザー光である。レーザー光LXY2は、レーザー光LXY1をXY面上で中心Oの周りに+120度回転させたレーザー光である。レーザー光LXY3は、レーザー光LXY1をXY面上で中心Oの周りに-120度回転させたレーザー光である。5本のレーザー光の組み合わせを利用した磁気光学トラップは、特願2022-014486で提案された。

[0111] 上述した第1及び第2実施形態において、ミラーによって1本のレーザー光からレーザー光対LZを生成してもよい。この場合、冷却原子を後段の装置に供給するために、当該ミラーの中央に、冷却原子を通すための穴が形成されてもよい。別の例として、冷却原子を後段の装置に供給するために、共鳴レーザー光からなるディフレクタが用いられてもよい。ディフレクタは、冷却原子を任意の方向に曲げる機能を有する。

[0112] <第3実施形態に係る磁気光学トラップ装置>

以下、図16を参照して、第3実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Bについて説明する。図16は、第3実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Bの概略構成を示す断面図である。

[0113] 第3実施形態に係る磁気光学トラップ装置100Bは、四重極磁場Bを形成する一对の磁石と、一对のマスク部材と、を含む。一对の磁石は、リング状の磁石170, 172からなる。一对のマスク部材は、リング状のマスク部材174, 176からなる。なお、マスク部材174, 176は、第2形成手段の一例に相当する。

[0114] 磁石170の中央には、着磁方向に磁石170を貫通する穴170aが形成されている。磁石172の中央には、着磁方向に磁石172を貫通する穴172aが形成されている。第3実施形態では、磁石170, 172は、X

軸に沿って着磁された磁石である。つまり、着磁方向がX軸の方向と平行になるように、磁石170, 172がX軸上に設置されている。具体的には、磁石170, 172は、交差領域112の中心Oを間にして、磁石170の着磁方向と磁石172の着磁方向とが互いに反対方向となるように設置されている。磁石170と中心Oとの間の距離と、磁石172の中心Oとの間の距離とは等しい。また、穴170a, 172aの直径は、レーザー光対LXの直径よりも大きい。磁石170, 172は、レーザー光対LY, LZの進行を妨げないように設置される。つまり、磁石170と磁石172との間の長さは、レーザー光対LY, LZの直径よりも長い。

[0115] マスク部材174の中央には、マスク部材174の厚さ方向に貫通する穴174aが形成されている。マスク部材176の中央には、マスク部材176の厚さ方向に貫通する穴176aが形成されている。マスク部材174, 176は、交差領域112の中心Oを間にしてZ軸上に設置されている。マスク部材174と中心Oとの間の距離と、マスク部材176と中心Oとの間の距離とは等しい。マスク部材174, 176の外径は、レーザー光対LZの直径よりも小さい。レーザー光対LZの一部は、マスク部材174, 176によってマスクされる。

[0116] 原子を光トラップするためのレーザー光118は、マスク部材174の穴174aとマスク部材176の176aとを通過して、原子捕捉空間に照射される。

[0117] マスク部材174, 176は、常磁性物質からなる。常磁性物質は、光学的な作用を行わず、レーザー光対LZの一部をマスクすることができる。マスク部材174, 176は、マスクすることのみに用いられるため、マスク部材174, 176の交差領域112側の面が原子気体によって汚されても、問題は生じない。

[0118] 磁気光学トラップ装置100Bは、更に、ミラー178, 180を含む。ミラー178の中央には、ミラー178の厚さ方向に貫通する穴178aが形成されている。ミラー178は、Z軸上において、マスク部材176より

も中心Oから離れた位置に設置されている。レーザー光118は、穴178aを通して進行する。レーザー光対LZに含まれる一方のレーザー光（例えばレーザー光LZ2）がミラー178によって反射されることで、他方のレーザー光（例えばレーザー光LZ1）が生成される。

[0119] ミラー180は、X軸上において、磁石172よりも中心Oから離れた位置に設置されている。レーザー光対LXに含まれる一方のレーザー光がミラー180によって反射されることで、他方のレーザー光が生成される。

[0120] なお、ミラー178, 180は、レーザー光対を生成する光学素子の一例に過ぎず、他の光学素子（例えばビームスプリッター等）を用いることで、レーザー光対が生成されてもよい。第1及び第2実施形態においても同様である。

[0121] 第3実施形態においても、上述した第1及び第2実施形態と同様に、有限の確率で、レーザー光118の進行方向に対する運動量を原子に与えて、原子を交差領域112の外側に移動させることができる。

[0122] 以下、図17及び図18を参照して、リング状の磁石（例えば磁石106, 108等）の実装方法について説明する。図17及び図18は、リング状の磁石を示す断面図である。例えば、光を透過するガラスやサファイヤ等の円盤プレートに、リング状の磁石を貼り付けて、その円盤プレートを磁気光学トラップ装置によって支持する手法が考えられる。

[0123] 図17に示す例では、中央に穴204aが形成された円盤プレート204の一方の面に、磁石200が設置されており、円盤プレート204の反対側の面に磁石202が設置されている。磁石200, 202は、円盤プレート204を間にして、自身の磁気力によって円盤プレート204に固定されている。

[0124] 図18に示す例では、アウトガスの少ない接着剤又はインジウム超音波はんだによって、磁石200が円盤プレート204に固定されている。

[0125] 更に別の例として、ガラス上にメタルパターンをめっきし、そのパターンにインジウムはんだによって磁石200を取り付けてもよい。

[0126] 以上の説明においては、光格子時計を例に挙げた。しかし、上述した各実施形態の技術は、当業者であれば、光格子時計以外にも適用可能である。具体的には、光格子時計以外の原子時計、又は、原子を使った干渉計である原子干渉計にも適用可能である。例えば、磁気光学トラップ装置100、磁気光学トラップ装置100A又は磁気光学トラップ装置100Bを含む原子時計用の物理パッケージや、原子干渉計用の物理パッケージが構成されてもよい。また、第1から第3実施形態は、原子又はイオン化された原子に対する各種の量子情報処理デバイスにも適用可能である。量子情報処理デバイスとは、原子や光の量子状態を利用して計測、センシング、及び、情報処理を行う装置をいい、原子時計、原子干渉計の他に、磁場計、電場計、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子中継器等を例示することができる。量子情報処理デバイスの物理パッケージでは、第1から第3実施形態の技術を利用することで、光格子時計の物理パッケージと同様に、小型化又は可搬化を達成することができる。なお、こうしたデバイスでは、時計遷移空間は、時計計測を目的とする空間ではなく、単に、時計遷移分光を起こす空間として扱われる場合があることに注意されたい。

[0127] 以上の説明においては、理解を容易にするため、具体的な態様について示した。しかし、これらは実施形態を例示するものであり、他にも様々な実施形態をとることが可能である。

符号の説明

[0128] 100, 100A, 100B 磁気光学トラップ装置、102 原子捕捉空間、104 第1照射装置、106, 108 磁石、112 交差領域、116 第2照射装置、118 レーザー光。

請求の範囲

- [請求項1] 第1光群と磁場とによって原子を捕捉する原子捕捉空間を形成する第1形成手段と、
前記第1光群が交差する交差領域内に非原子捕捉空間を形成する第2形成手段と、
前記交差領域内に第2光を照射することで、前記非原子捕捉空間内の原子を前記交差領域内から出射させる光照射手段と、
を含むことを特徴とする磁気光学トラップ装置。
- [請求項2] 請求項1に記載の磁気光学トラップ装置において、
前記第1形成手段と前記第2形成手段は、磁場を発生させる一対の磁石を含み、
前記一対の磁石のそれぞれには、光を通す穴が形成されており、
前記光照射手段は、前記穴を通して前記交差領域に前記第2光を照射する、
ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。
- [請求項3] 請求項2に記載の磁気光学トラップ装置において、
前記一対の磁石は、前記第1光群の中の一部が進行する光路上に設置され、前記第1光群の中の一部を部分的にマスクし、
前記第1光群の中で前記一対の磁石によってマスクされていない光群と、前記一対の磁石から発生した磁場とによって、前記一対の磁石の間に前記原子捕捉空間が形成され、
前記一対の磁石によって光がマスクされた空間に前記非原子捕捉空間が形成される、
ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。
- [請求項4] 請求項3に記載の磁気光学トラップ装置において、
前記原子捕捉空間を形成するための補助磁石を更に含む、
ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。
- [請求項5] 請求項1に記載の磁気光学トラップ装置において、

前記第2形成手段は、光を通す穴が形成された一対のマスクであり

、

前記一対のマスクは、前記第1光群の中の一部が進行する光路上に設置され、前記第1光群の中の一部を部分的にマスクし、

前記光照射手段は、前記穴を通して前記交差領域に前記第2光を照射する、

ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。

[請求項6] 請求項5に記載の磁気光学トラップ装置において、

前記一対のマスクは、常磁性物質である、

ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。

[請求項7] 請求項1に記載の磁気光学トラップ装置において、

前記第2光は、プッシュレーザー光である、

ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。

[請求項8] 請求項1に記載の磁気光学トラップ装置において、

前記第1光群は、波長が461nmであるレーザー光、又は、波長が689nmであるレーザー光である、

ことを特徴とする磁気光学トラップ装置。

[請求項9] 請求項1から請求項8のいずれか一項に記載の磁気光学トラップ装置を含む、

ことを特徴とする物理パッケージ。

[請求項10] 請求項9に記載の物理パッケージを含む、

ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

[請求項11] 請求項9に記載の物理パッケージを含む、

ことを特徴とする原子時計用物理パッケージ。

[請求項12] 請求項9に記載の物理パッケージを含む、

ことを特徴とする原子干渉計用物理パッケージ。

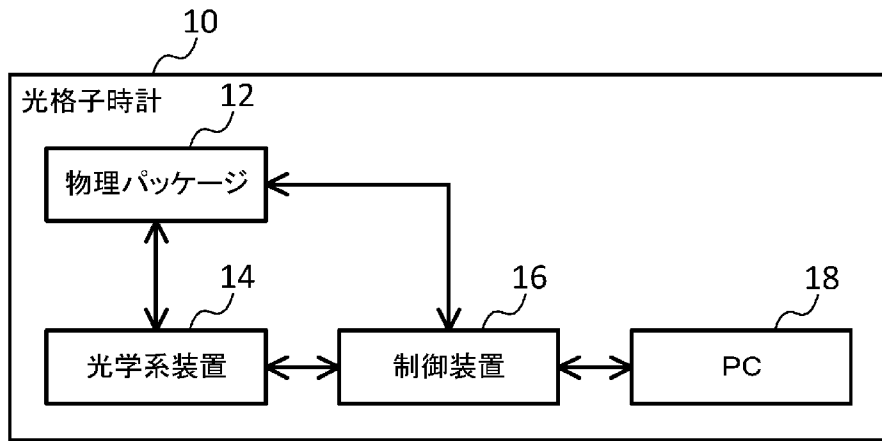
[請求項13] 請求項9に記載の物理パッケージを含む、

ことを特徴とする原子又はイオン化された原子についての量子情報

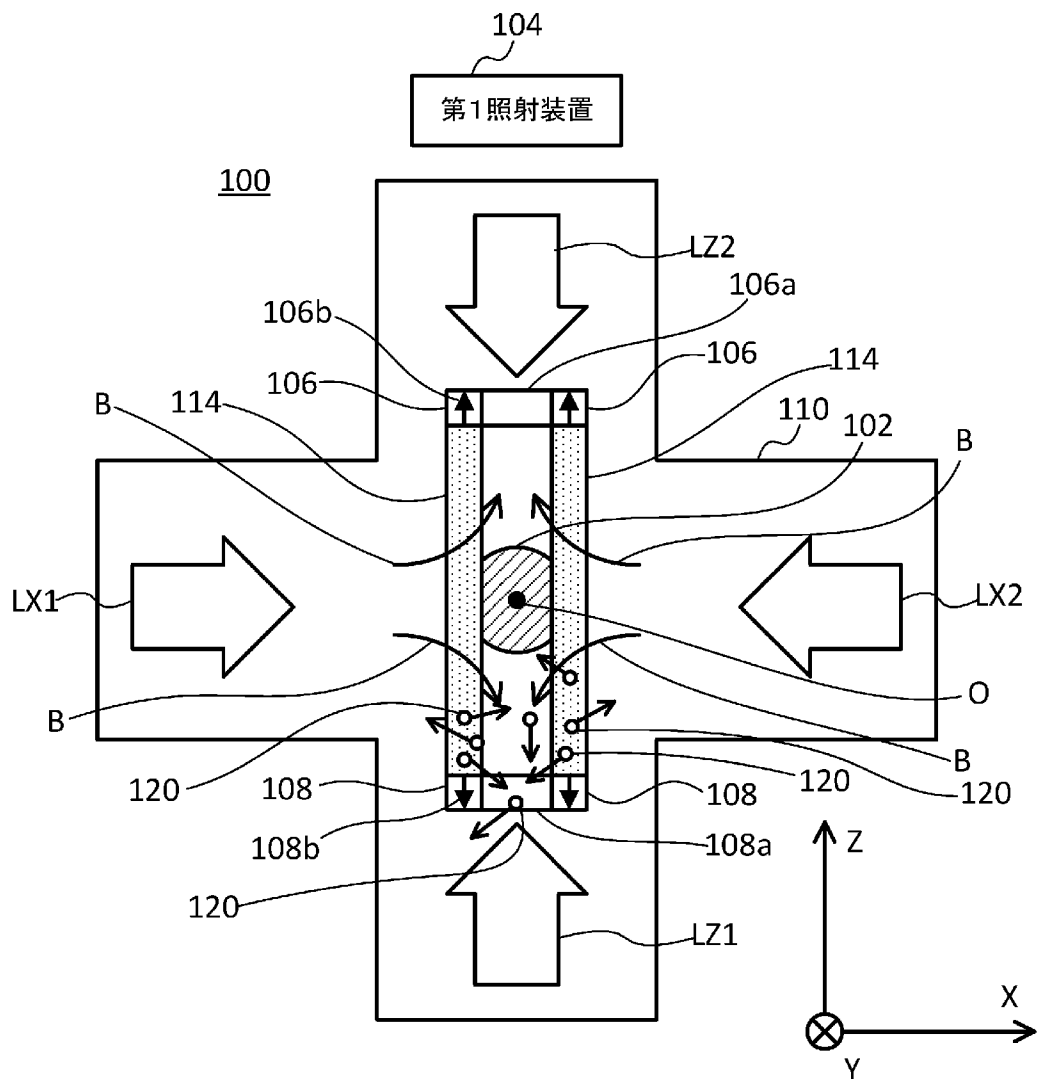
処理デバイス用物理パッケージ。

- [請求項14] 請求項9に記載の物理パッケージと、
前記物理パッケージの動作を制御する制御装置と、
を含む物理パッケージシステム。

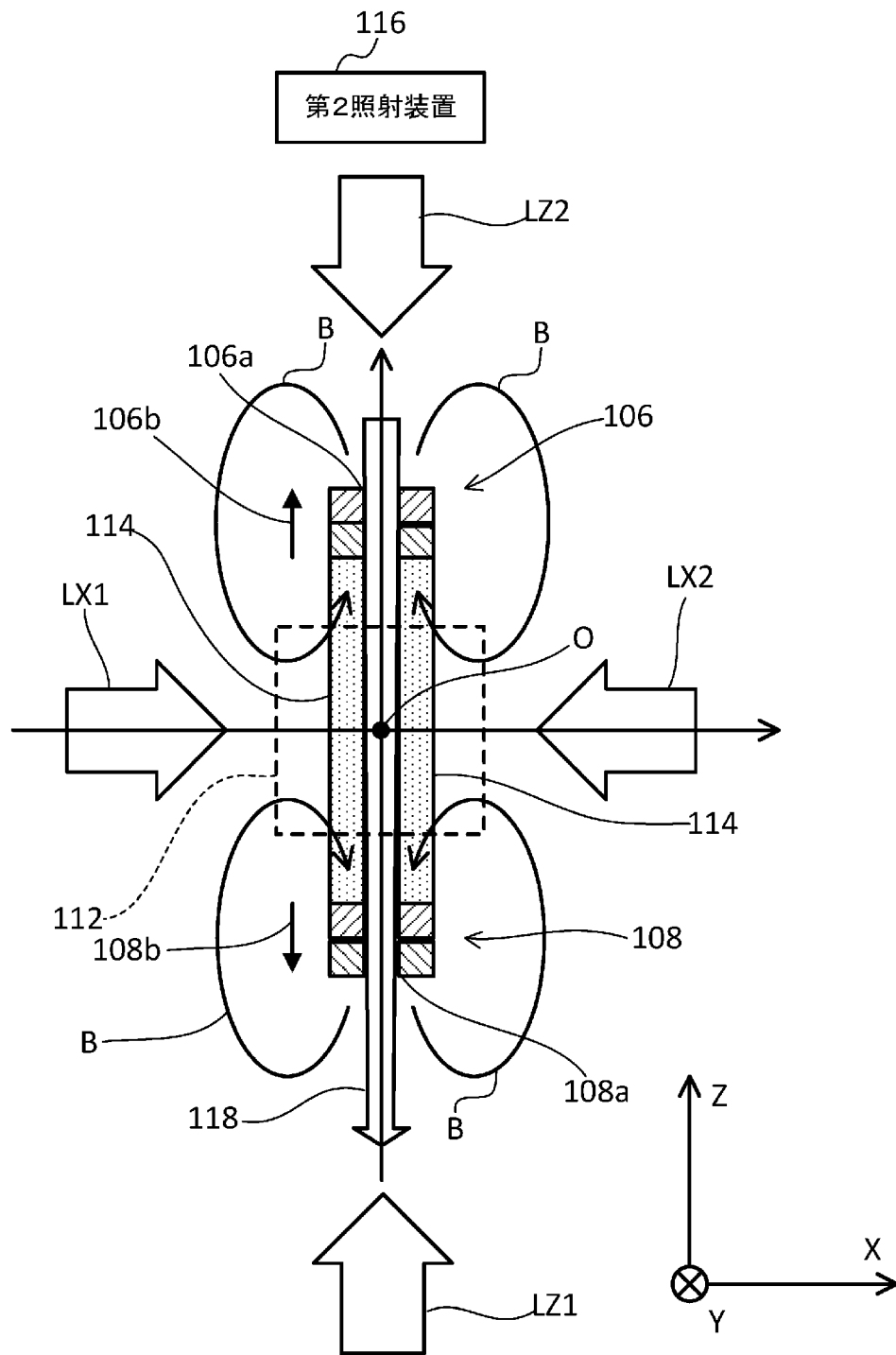
[図1]



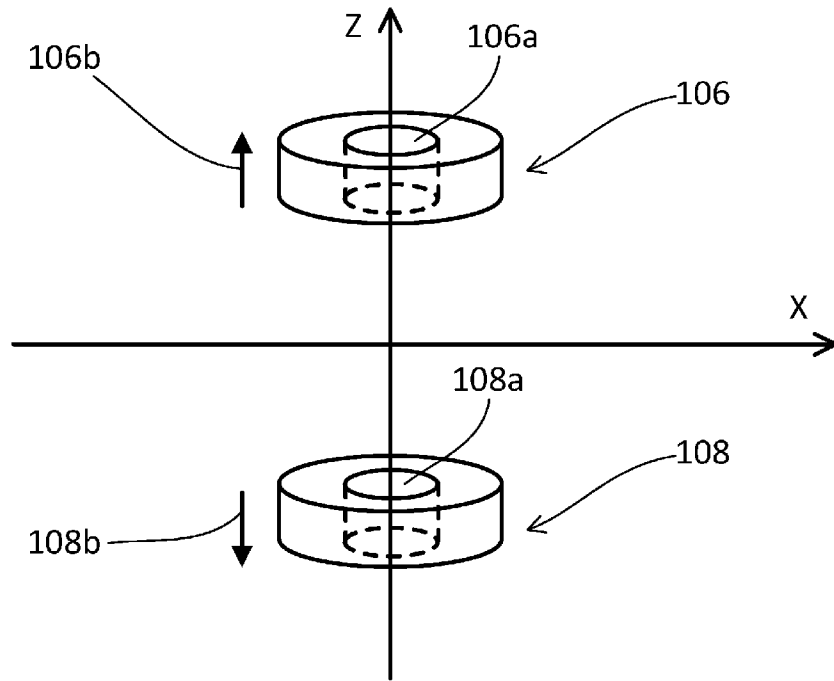
[図2]



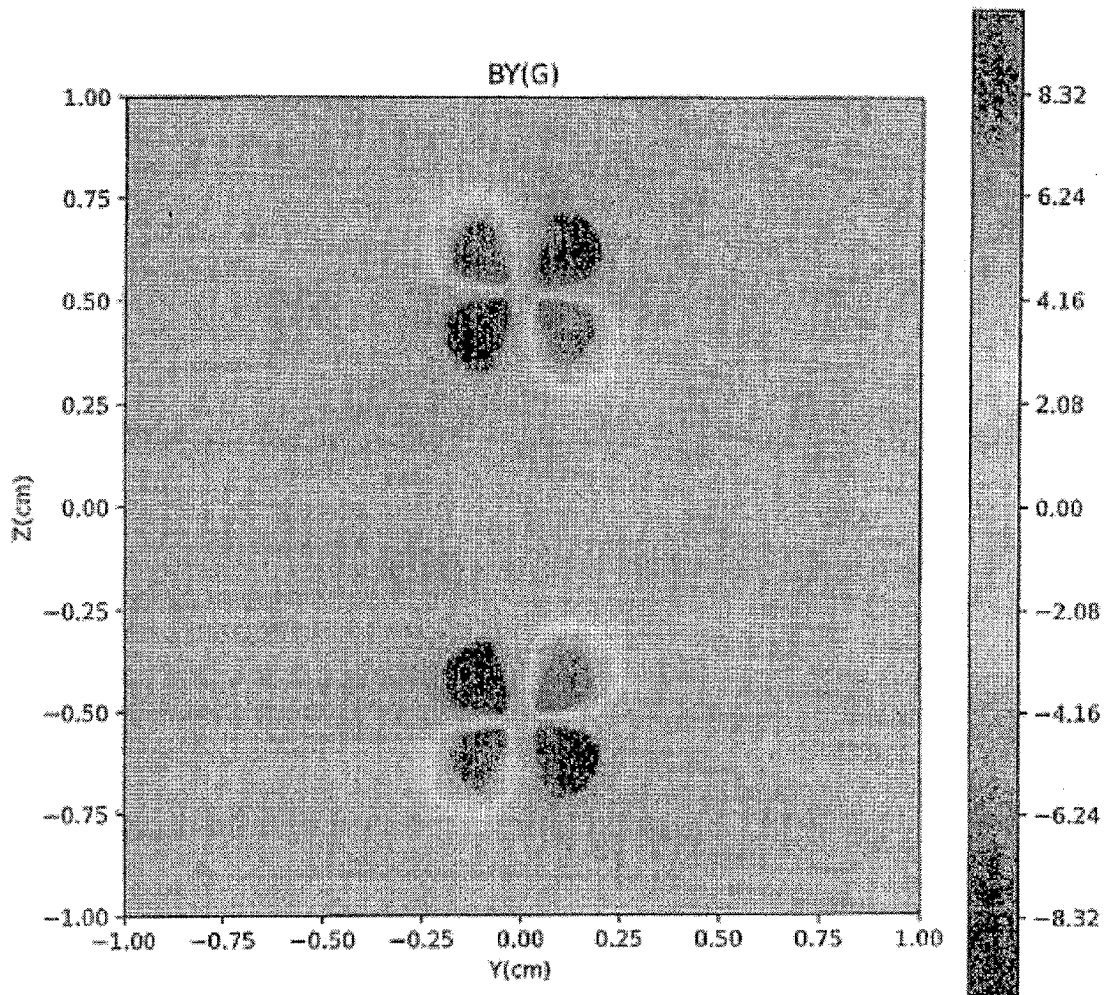
[図3]



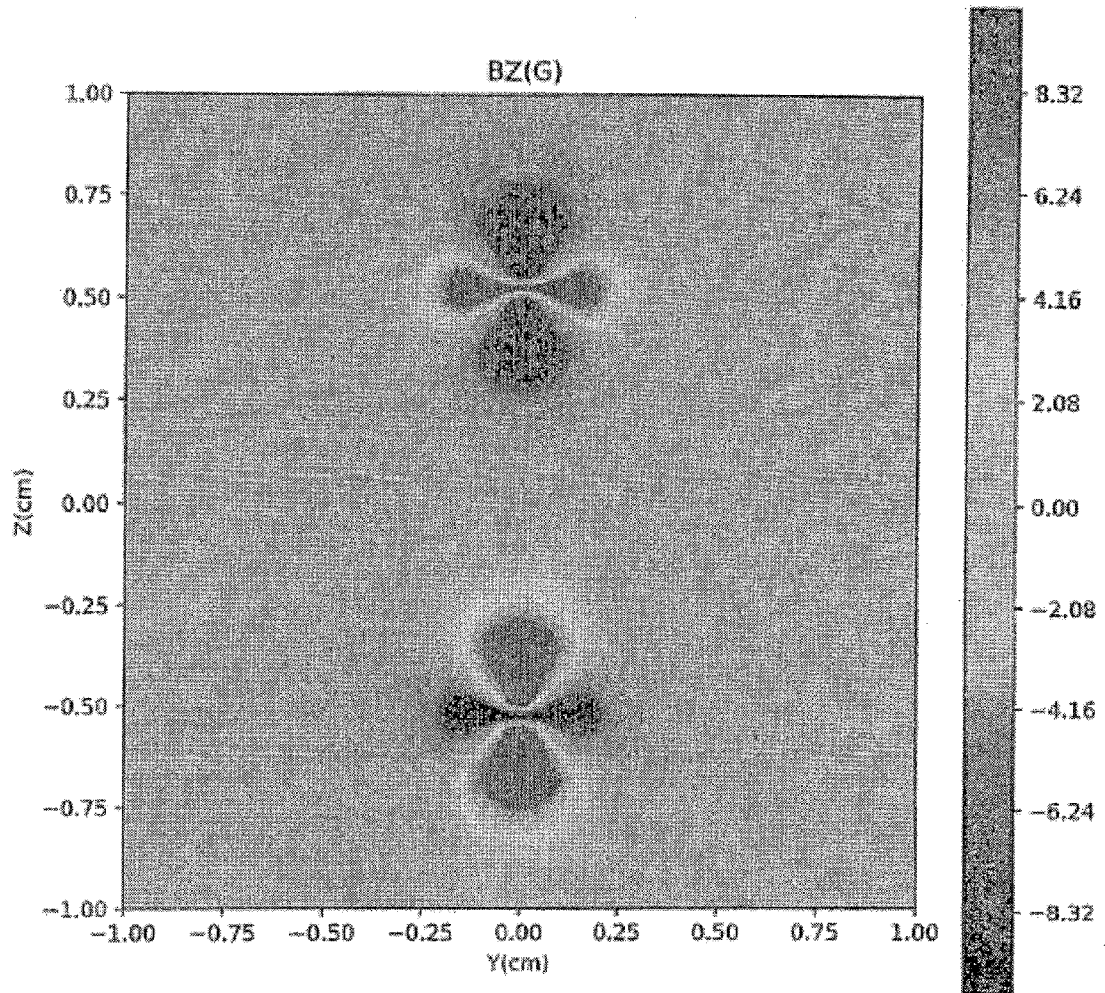
[図4]



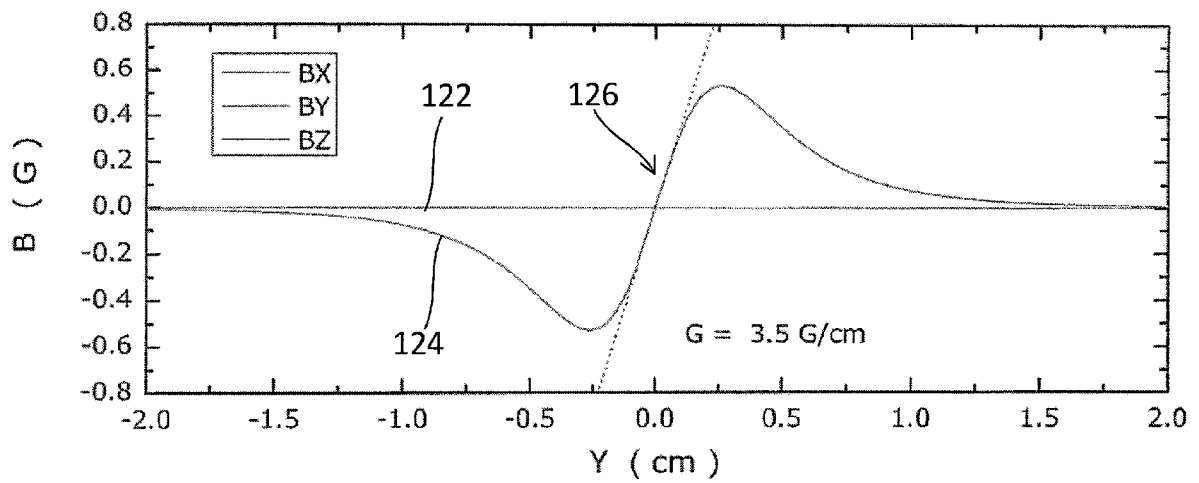
[図5]



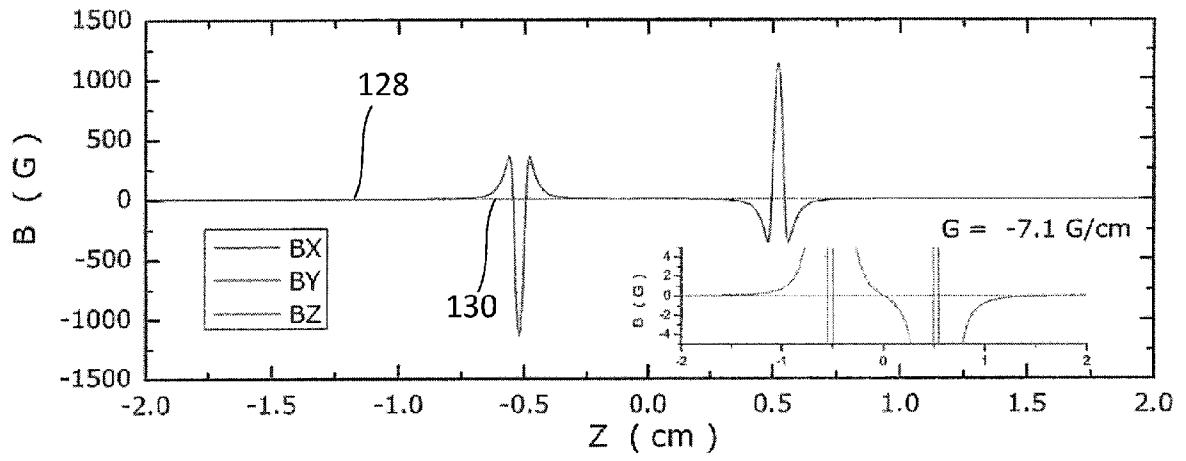
[圖6]



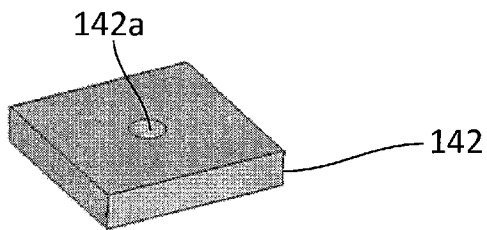
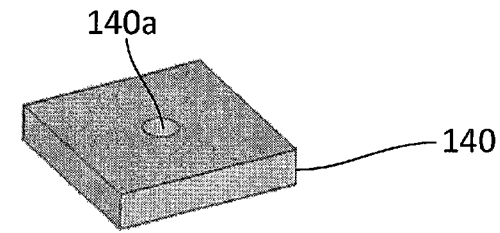
[圖7]



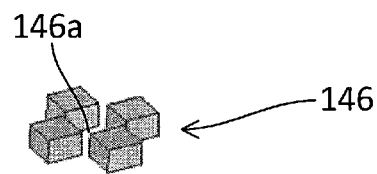
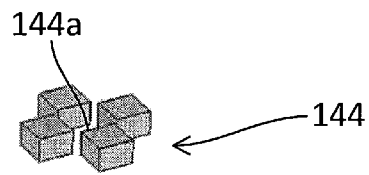
[図8]



[図9]



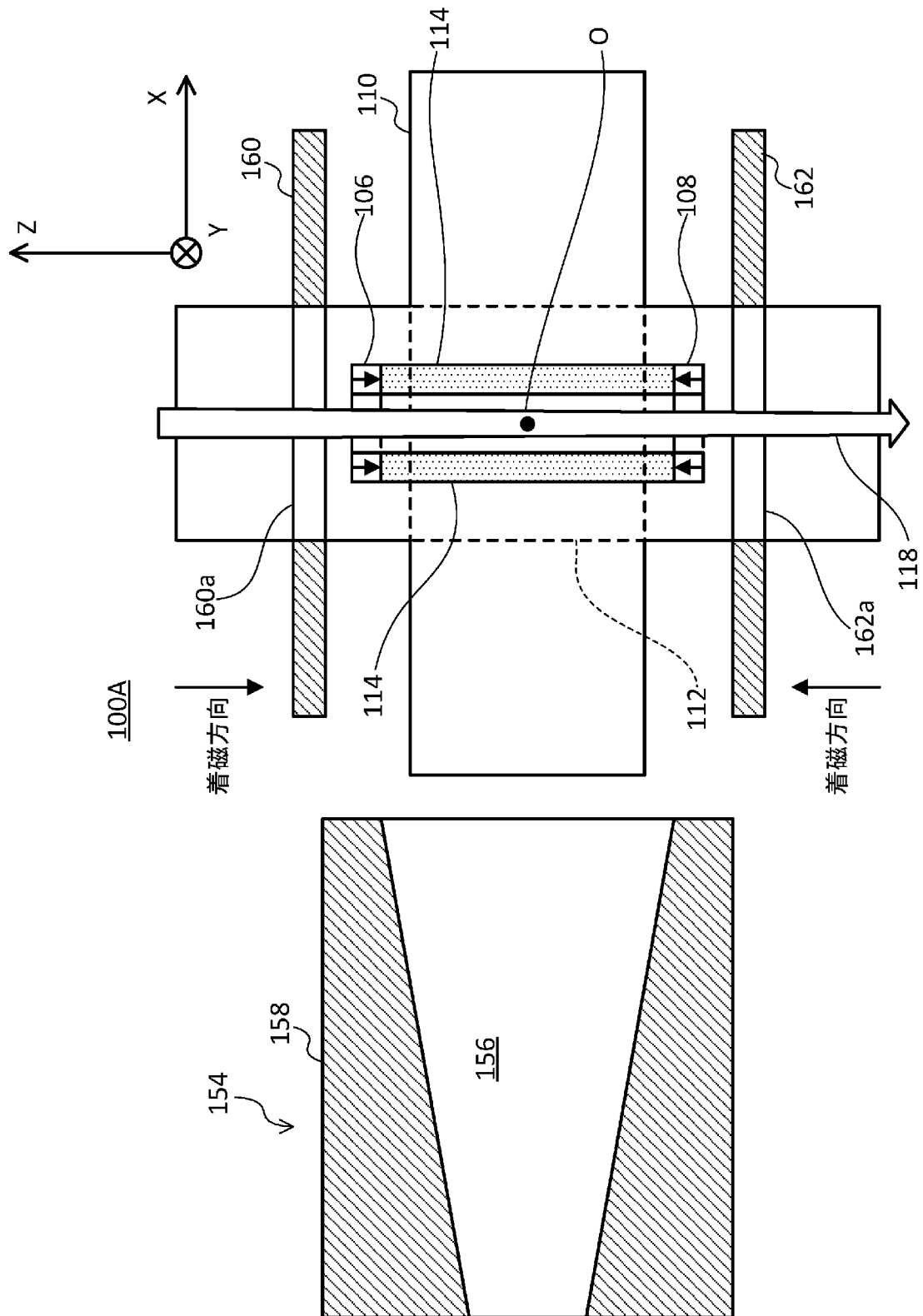
[図10]



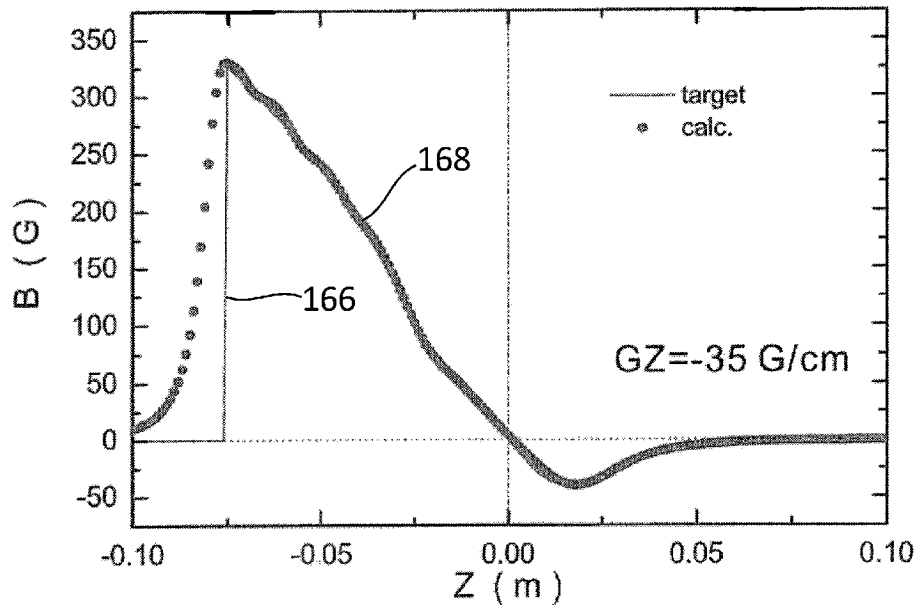
[図11]



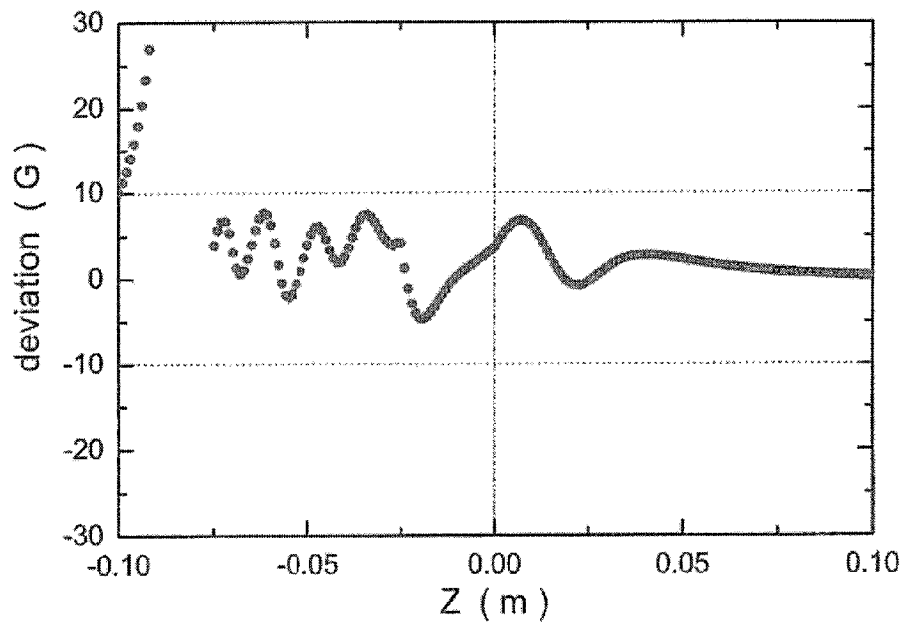
[圖12]



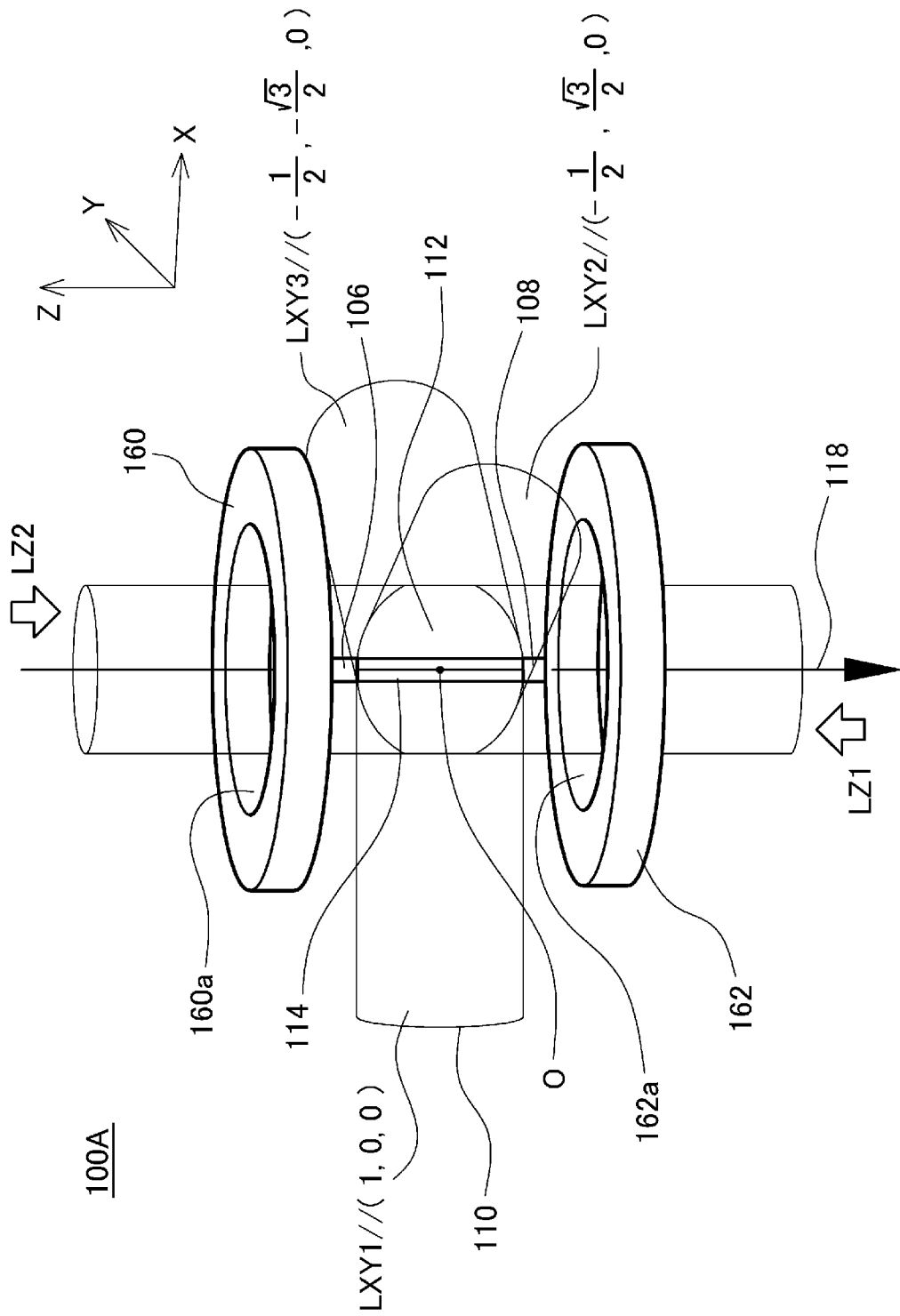
[圖13]



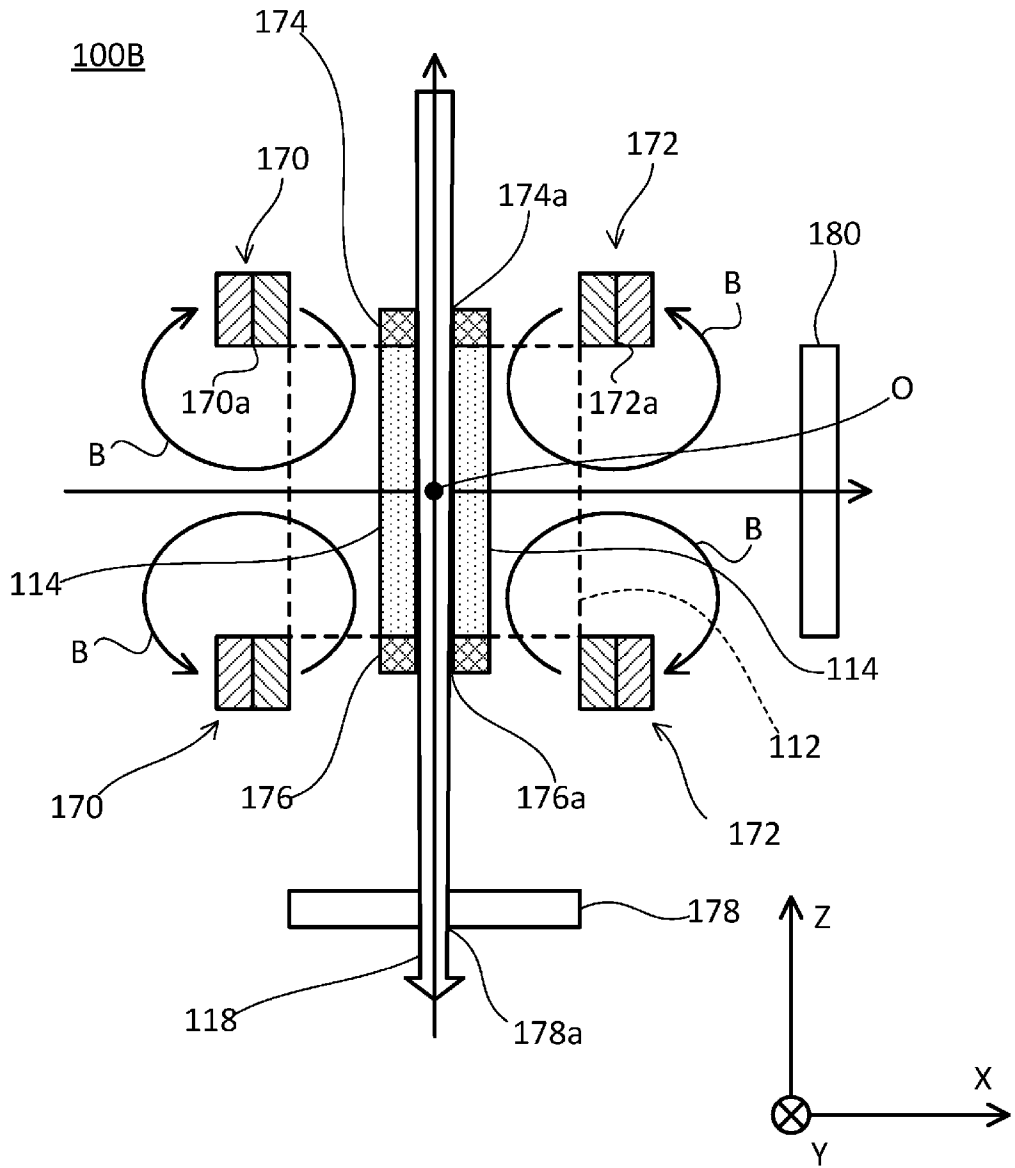
[圖14]



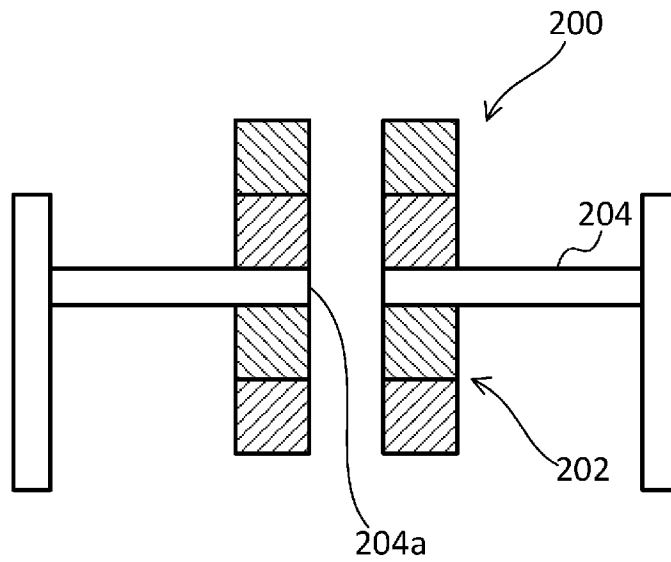
[圖15]



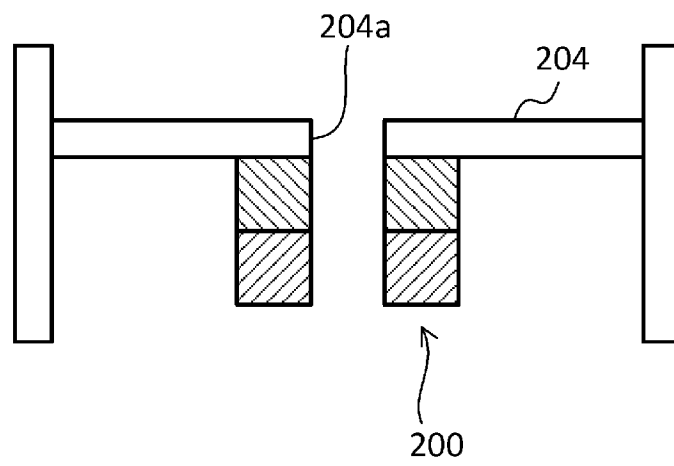
[図16]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/016938

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>H01S 3/00</i> (2006.01)i; <i>G04F 5/14</i> (2006.01)i; <i>H01S 1/06</i> (2006.01)i FI: H01S3/00 A; H01S1/06; G04F5/14		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01S1/00-4/00; G04F5/14		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	US 6303928 B1 (THE AEROSPACE CORPORATION) 16 October 2001 (2001-10-16) column 5, line 51 to column 7, line 67, fig. 2	1, 7-14 2-6
Y A	JP 2020-20636 A (JAPAN AVIATION ELECTRONICS INDUSTRY, LIMITED) 06 February 2020 (2020-02-06) paragraphs [0020]-[0037], fig. 1	1, 7-14 2-6
Y A	CN 210016681 U (BEIJING UNIVERSITY) 04 February 2020 (2020-02-04) paragraphs [0003]-[0024], fig. 1-3	1, 7-14 2-6
Y A	JP 2021-163883 A (JEOL LTD) 11 October 2021 (2021-10-11) claims 1-11, paragraphs [0027]-[0069], fig. 1-4	9-14
A	JP 2004-58225 A (INST OF PHYSICAL & CHEMICAL RES) 26 February 2004 (2004-02-26) entire text, all drawings	1-14
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 07 July 2023		Date of mailing of the international search report 18 July 2023
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2023/016938

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 6303928 B1	16 October 2001	(Family: none)	
JP 2020-20636 A	06 February 2020	US 2021/0233676 A1 paragraphs [0027]-[0047], fig. 1 WO 2020/026588 A1 EP 3799077 A1 CN 112236833 A	
CN 210016681 U	04 February 2020	(Family: none)	
JP 2021-163883 A	11 October 2021	(Family: none)	
JP 2004-58225 A	26 February 2004	(Family: none)	
JP 2023-21719 A	14 February 2023	US 2023/0030450 A1 entire text, all drawings	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 3/00(2006.01)i; G04F 5/14(2006.01)i; H01S 1/06(2006.01)i FI: H01S3/00 A; H01S1/06; G04F5/14		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） H01S1/00-4/00; G04F5/14 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922 - 1996年 日本国公開実用新案公報 1971 - 2023年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2023年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2023年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	US 6303928 B1 (THE AEROSPACE CORPORATION) 16.10.2001 (2001 - 10 - 16) 5欄51行-7欄67行, 図2	1, 7-14 2-6
Y A	JP 2020-20636 A (日本航空電子工業株式会社) 06.02.2020 (2020 - 02 - 06) [0020]-[0037], 図1	1, 7-14 2-6
Y A	CN 210016681 U (BEIJING UNIVERSITY) 04.02.2020 (2020 - 02 - 04) [0003]-[0024], 図1-3	1, 7-14 2-6
Y A	JP 2021-163883 A (日本電子株式会社) 11.10.2021 (2021 - 10 - 11) 請求項1-11, [0027]-[0069], 図1-4	9-14
A	JP 2004-58225 A (理化学研究所) 26.02.2004 (2004 - 02 - 26) 全文全図	1-14
P, A	JP 2023-21719 A (日本電気株式会社) 14.02.2023 (2023 - 02 - 14) 全文全図	1-14
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日	
07.07.2023	18.07.2023	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 右田 昌士 2K 9513 電話番号 03-3581-1101 内線 3255	

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/016938

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
US 6303928 B1	16.10.2001	(ファミリーなし)	
JP 2020-20636 A	06.02.2020	US 2021/0233676 A1 [0027]-[0047], 図1 WO 2020/026588 A1 EP 3799077 A1 CN 112236833 A	
CN 210016681 U	04.02.2020	(ファミリーなし)	
JP 2021-163883 A	11.10.2021	(ファミリーなし)	
JP 2004-58225 A	26.02.2004	(ファミリーなし)	
JP 2023-21719 A	14.02.2023	US 2023/0030450 A1 全文全図	