

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年4月18日(18.04.2019)



(10) 国際公開番号
WO 2019/073657 A1

- (51) 国際特許分類:
G01C 19/58 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2018/027827
- (22) 国際出願日: 2018年7月25日(25.07.2018)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2017-196987 2017年10月10日(10.10.2017) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人東京工業大学 (TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1528550 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 Tokyo (JP). 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 Osaka (JP).

JP); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 Osaka (JP). 日本航空電子工業株式会社 (JAPAN AVIATION ELECTRONICS INDUSTRY, LIMITED) [JP/JP]; 〒1500043 東京都渋谷区道玄坂一丁目10番8号 Tokyo (JP). 三菱重工業株式会社 (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目16番5号 Tokyo (JP).

- (72) 発明者: 上妻 幹旺 (KOZUMA, Mikio); 〒1528550 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内 Tokyo (JP). 井上 遼太郎 (INOUE, Ryotaro); 〒1528550 東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内 Tokyo (JP). 向山 敬 (MUKAIYAMA, Takashi); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番

(54) Title: GYROSCOPE BASED ON MACH-ZEHNDER-TYPE ATOMIC INTERFERENCE

(54) 発明の名称: マッハーツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープ

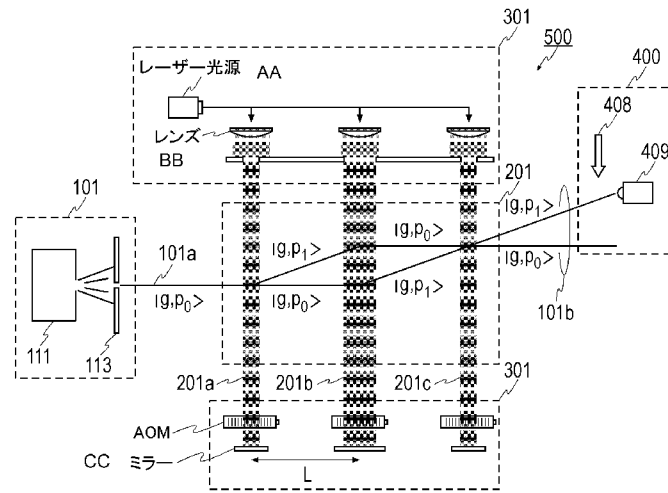


図2

AA Laser light source
 BB Lens
 CC Mirror

(57) Abstract: The present invention includes: a traveling light standing wave generation unit 301 for generating three traveling light standing waves 201a, 201b, 201c; an atomic beam source 101 for continuously generating an atomic beam 101a in which individual atoms are in the same state; an interference unit 201 in which the Sagnac effect is exhibited as a result of the interaction between the atomic beam 101a and the three traveling light standing waves 201a, 201b, 201c; and an observation unit 400 which detects angular velocity or acceleration by observing the atomic beam 101b from the



WO 2019/073657 A1

1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 森元 誠一(MORIMOTO, Seiichi); 〒1500043 東京都渋谷区道玄坂一丁目10番8号 日本航空電子工業株式会社内 Tokyo (JP). 吉岡 和範(YOSHIOKA, Kazunori); 〒1500043 東京都渋谷区道玄坂一丁目10番8号 日本航空電子工業株式会社内 Tokyo (JP). 田中 敦史(TANAKA, Atsushi); 〒1500043 東京都渋谷区道玄坂一丁目10番8号 日本航空電子工業株式会社内 Tokyo (JP). 神納 祐一郎(KAMINO, Yuichiro); 〒1088215 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 中尾 直樹, 外(NAKAO, Naoki et al.); 〒1600022 東京都新宿区新宿三丁目1番22号 新宿NSOビル6階 Tokyo (JP).

(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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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))

interference unit 201. Each of the traveling light standing waves satisfies n-order Bragg conditions when n is a positive integer of 2 or higher.

(57) 要約: 3個の進行光定在波201a, 201b, 201cを生成する進行光定在波生成部301と、個々の原子が同じ状態にある原子線101aを連続生成する原子線源101と、原子線101aと3個の進行光定在波201a, 201b, 201cとの相互作用によってサニャック効果を発現する干渉部201と、干渉部201からの原子線101bを観測することによって角速度または加速度を検出する観測部400を含む。各進行光定在波は、nを2以上の正整数として、n次Bragg条件を満たす。

明 細 書

発明の名称：

マッハ-ツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープ

技術分野

[0001] 本発明は、マッハ-ツェンダー (Mach-Zehnder) 型原子干渉に基づくジャイロスコープに関する。

背景技術

[0002] 近年、レーザー技術の進展に伴い、原子干渉計、原子干渉を利用した重力加速度計やジャイロスコープなどの研究が進んでいる。原子干渉計の一つとしてマッハ-ツェンダー型原子干渉計が知られている。図1に示す従来のマッハ-ツェンダー型原子干渉計900は原子線源100と干渉部200と進行光定在波生成部300と観測部400を含む。

[0003] 原子線源100は原子線100aを生成する。原子線100aは、熱的原子線、冷却原子線（熱的原子線の速度よりも遅い速度を持つ原子線）、ボース-アインシュタイン凝縮体 (Bose-Einstein Condensate) などである。熱的原子線は、例えば、純度の高い元素をオーブンで加熱することによって生成される。冷却原子線は、例えば、熱的原子線をレーザー冷却することによって生成される。ボース-アインシュタイン凝縮体は、ボース粒子を絶対零度近くまで冷却することによって生成される。原子線100aに含まれる個々の原子は光ポンピングによって同じエネルギー準位（例えば、後述する $|g\rangle$ である）に設定される。

[0004] 干渉部200では、原子線100aが3個の進行光定在波200a, 200b, 200cを通過する。なお、進行光定在波は、周波数の異なるレーザーを対向させて生成され、光の速度に比べて十分に遅い速度でドリフトする。原子干渉計では、光照射による原子の2準位間遷移が利用される。したがって、自然放出によるデコヒーレンスを避ける観点から、一般的に、寿命の長い2準位間遷移が利用される。例えば、原子線がアルカリ金属原子線であ

る場合、基底状態の超微細構造に含まれる2準位間の誘導ラマン遷移が利用される。超微細構造において、最も低いエネルギー準位を $|g\rangle$ とし、 $|g\rangle$ よりも高いエネルギー準位を $|e\rangle$ とする。2準位間の誘導ラマン遷移は、一般的に、差周波数が $|g\rangle$ と $|e\rangle$ との共鳴周波数に概ね等しい2個のレーザー光の対向照射で形成される進行光定在波によって実現される。3個の進行光定在波200a, 200b, 200cを生成する進行光定在波生成部300の光学的構成は公知であり、また、本発明の要点と関係しないので説明を省略する(図1では、概略としてレーザー光源、レンズ、ミラー、音響光学変調器(AOM (Acousto-Optic Modulator))などが図示されている)。以下、進行光定在波による2光子ラマン過程を利用した原子干渉について説明する。

[0005] 原子線源100からの原子線100aが第1の進行光定在波200aを通過すると、初期状態が $|g\rangle$ にある個々の原子の状態は $|g\rangle$ と $|e\rangle$ との重ね合わせ状態に変化する。例えば第1の進行光定在波200aの通過時間 Δt (つまり、進行光定在波と原子との相互作用時間)を適切に設定すると、第1の進行光定在波200aを通過した直後の $|g\rangle$ の存在確率と $|e\rangle$ の存在確率の比は1対1になる。原子は、対向して進む2光子の吸収・放出を通して、 $|g\rangle$ から $|e\rangle$ に遷移する際に光子2個分の運動量を得る。したがって、状態 $|e\rangle$ の原子の運動方向は、状態 $|g\rangle$ の原子の運動方向からずれる。つまり、原子線100aが第1の進行光定在波200aを通過すると、原子線100aは、1対1の割合で、状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線に分裂する。第1の進行光定在波200aは、 $\pi/2$ パルスと呼ばれ、原子線のスプリッターとしての機能を持つ。

[0006] 分裂後、状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線は、第2の進行光定在波200bを通過する。このとき、例えば第2の進行光定在波200bの通過時間(つまり、進行光定在波と原子との相互作用時間)を $2\Delta t$ に設定すると、第2の進行光定在波200bを通過することによって、状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線は通過過程で状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線に反転し、状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線は通過過程で状態 $|g\rangle$ の原子から

なる原子線に反転する。このとき、前者については、 $|g\rangle$ から $|e\rangle$ に遷移した原子の進行方向は、上述のとおり、状態 $|g\rangle$ の原子の運動方向からずれる。この結果、第2の進行光定在波200bを通過後の状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向は、第1の進行光定在波200aを通過後の状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向と平行になる。また、後者については、原子は、対向して進む2光子の吸収・放出を通して、 $|e\rangle$ から $|g\rangle$ に遷移する際に2光子から得た運動量と同じ運動量を失う。つまり、 $|e\rangle$ から $|g\rangle$ に遷移した原子の運動方向は、遷移前の状態 $|e\rangle$ の原子の運動方向からずれる。この結果、第2の進行光定在波200bを通過後の状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向は、第1の進行光定在波200aを通過後の状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向と平行になる。第2の進行光定在波200bは、 π パルスと呼ばれ、原子線のミラーとしての機能を持つ。

[0007] 反転後、状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線は、第3の進行光定在波200cを通過する。原子線源100からの原子線100aが第1の進行光定在波200aを通過する時刻を $t_1=T$ とし、分裂後の2個の原子線が第2の進行光定在波200bを通過する時刻を $t_2=T+\Delta T$ とすると、反転後の2個の原子線が第3の進行光定在波200cを通過する時刻は $t_3=T+2\Delta T$ である。時刻 t_3 にて、反転後の状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と反転後の状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線は互いに交差する。このとき、例えば第3の進行光定在波200cの通過時間（つまり、進行光定在波と原子との相互作用時間）を適切に設定すると（具体的には、第3の進行光定在波200cの通過時間を上記 Δt に設定する）、状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線との交差領域に含まれる個々の原子の $|g\rangle$ と $|e\rangle$ との重ね合わせ状態に応じた原子線100bが得られる。この原子線100bが、干渉部200の出力である。第3の進行光定在波200cは、 $\pi/2$ パルスと呼ばれ、原子線のコンバイナーとしての機能を持つ。

[0008] マッハ-ツェンダー型原子干渉計900に角速度または加速度が加わると、第1の進行光定在波200aの照射から第3の進行光定在波200cの照射

までの原子線の2個の経路に位相差が生じ、この位相差が第3の進行光定在波200cを通過した個々の原子の状態 $|g\rangle$ の存在確率と状態 $|e\rangle$ の存在確率に反映される。したがって、観測部400は、干渉部200からの原子線100bを観測することによって角速度または加速度を検出する。例えば、観測部400は、干渉部200からの原子線100bにプローブ光408を照射して、状態 $|e\rangle$ の原子からの蛍光を光検出器409によって検出する。

[0009] 上述の進行光定在波による2光子ラマン過程を利用したマッハツェンダー型原子干渉計については、例えば、非特許文献1などが参考になる。

先行技術文献

非特許文献

[0010] 非特許文献1: T. L. Gustavson, P. Bouyer and M. A. Kasevich, "Precision Rotation Measurements with an Atom Interferometer Gyroscope," Phys. Rev. Lett. 78, 2046-2049, Published 17 March 1997.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0011] 進行光定在波による2光子ラマン過程を利用したマッハツェンダー型原子干渉計では、原子は、対向して進む2光子の吸収・放出を通して、 $|g\rangle$ から $|e\rangle$ に遷移すると共に光子2個分の運動量を得る。このため、図1では誇張して描画してあるが、実際には、第1の進行光定在波を通過した後に得られる2個の経路(状態 $|g\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|e\rangle$ の原子からなる原子線)の間隔はとても狭い。具体的には、原子線源からの原子線がミリメートルオーダーの径を持つのに対して、第2の進行光定在波を通過する位置における当該間隔はマイクロメートルオーダーである。

[0012] ところで、ジャイロスコープの位相感度は、 A を原子線の2個の経路で囲まれた面積とし、 v を原子速度として、 A/v に比例することが知られている。2光子ラマン過程を利用したマッハツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープにおいても、位相感度の向上には、面積 A の増大、および/ま

たは、速度 v の低減が有効である。図 1 に示す構成において面積 A を増大するには、第 1 の進行光定在波と第 3 の進行光定在波との間隔を大きくすればよい（2 光子ラマン過程では、原子が受け取れる運動量が光子 2 個分に限られているので、2 個の経路の間隔を拡げることはできない）。しかし、このようなジャイロスコープは大型であり実用的でない。

[0013] したがって、本発明は、マッハ-ツェンダー型原子干渉に基づく、高感度の実用的ジャイロスコープを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明のジャイロスコープは、マッハ-ツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープであって、原子線源と進行光定在波生成部と干渉部と観測部を含む。

原子線源は、個々の原子が同じ状態にある原子線を連続生成する。

進行光定在波生成部は、3 個以上の進行光定在波を生成する。各進行光定在波は、 n を 2 以上の正整数として、 n 次 Bragg 条件を満たす。

干渉部は、原子線と 3 個以上の進行光定在波とが相互作用した結果の原子線を得る。

観測部は、干渉部からの原子線を観測することによって角速度または加速度を検出する。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、進行光定在波による n 次 Bragg 回折を利用したマッハ-ツェンダー型原子干渉に基づくことによって、高感度の実用的ジャイロスコープを実現できる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]従来のジャイロスコープの構成を説明するための図。

[図2]実施形態のジャイロスコープの構成を説明するための図。

発明を実施するための形態

[0017] 図面を参照して、本発明の実施形態を説明する。なお、図は実施形態の理

解のために提供され、図示される各構成要素の寸法は正確ではない。

[0018] 本発明による実施形態のマッハツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープは、 n 次（ただし、 n は2以上の予め定められた正整数である）のBragg回折を利用する。図2に示す実施形態のジャイロスコープ500は、原子線源101と干渉部201と進行光定在波生成部301と観測部400を含む。この実施形態では、原子線源101と干渉部201と観測部400は図示しない真空チャンバー内に收容されている。

[0019] 原子線源101は、個々の原子が同じ状態にある原子線101aを連続生成する。現在の技術水準によれば、熱的原子線（例えば、 $\sim 100\text{ m/s}$ ）あるいは冷却原子線（例えば、 $\sim 10\text{ m/s}$ ）を連続生成する技術は知られている。既述のように、熱的原子線は、例えば、純度の高い元素をオープン111で昇華させて得られた高速の原子気体をコリメーター113に通すことによって生成される。また、冷却原子線は、例えば、高速の原子気体を図示しないゼーマンスローワー（Zeeman Slower）あるいは2次元冷却装置に通すことによって生成される。2次元冷却装置を使った低速原子線源については参考文献1を参照のこと。

（参考文献1）J. Schoser et al., “Intense source of cold Rb atoms from a pure two-dimensional magneto-optical trap,” Phys. Rev. A 66, 023410 – Published 26 August 2002.

[0020] 進行光定在波生成部301は、 n 次Bragg条件を満たす3個の進行光定在波（第1の進行光定在波201a、第2の進行光定在波201b、第3の進行光定在波201c）を生成する。ただし、第1の進行光定在波201aは上述のスプリッターとしての機能を、第2の進行光定在波201bは上述のミラーとしての機能を、第3の進行光定在波201cは上述のコンバイナーとしての機能をそれぞれ持つという条件も満たす。

[0021] このような諸条件を満たす3個の進行光定在波（第1の進行光定在波201a、第2の進行光定在波201b、第3の進行光定在波201c）はそれぞれ、ガウシアンビーム（Gaussian Beam）のビームウェスト、波長、光強度

、さらに、対向するレーザー間の差周波数をそれぞれ適切に設定することによって実現される。なお、ガウシアンビームのビームウェストは光学的に設定でき（例えばレーザー光をレンズで集光する）、ガウシアンビームの光強度は電氣的に設定できる（例えばガウシアンビームの出力を調整する）。つまり、進行光定在波の生成パラメータが従来の生成パラメータと異なるのであり、これら3個の進行光定在波を生成する進行光定在波生成部301の構成は従来の進行光定在波生成部300（図1）の構成と異なるから、進行光定在波生成部301の構成の説明を省略する（図2では、概略としてレーザー光源、レンズ、ミラー、AOMなどが図示されている）。

[0022] 干渉部201では、原子線101aは3個の進行光定在波201a, 201b, 201cを通過する。本実施形態における原子干渉計では、同じ内部状態における異なる2個の運動量状態 $|g, p_0\rangle$ と $|g, p_1\rangle$ との間の光照射による遷移が利用される。

[0023] 原子線源101からの原子線101aが第1の進行光定在波201aを通過すると、初期状態が $|g, p_0\rangle$ にある個々の原子の状態は $|g, p_0\rangle$ と $|g, p_1\rangle$ との重ね合わせ状態に変化する。第1の進行光定在波201aと原子との相互作用を適切に設定すると（ビームウェストと波長と光強度と対向するレーザー間の差周波数をそれぞれ適切に設定する）、第1の進行光定在波201aを通過した直後の $|g, p_0\rangle$ の存在確率と $|g, p_1\rangle$ の存在確率の比は1対1になる。原子は、対向して進む2n個の光子の吸収・放出を通して、 $|g, p_0\rangle$ から $|g, p_1\rangle$ に遷移する際に光子2n個分の運動量（ $=p_1-p_0$ ）を得る。したがって、状態 $|g, p_1\rangle$ の原子の運動方向は、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子の運動方向から大きくずれる。つまり、原子線が第1の進行光定在波201aを通過すると、原子線101aは、1対1の割合で、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線に分裂する。状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向はn次のBragg条件に基づく方向である。0次光の方向（つまり、Bragg回折しなかった状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線101aの進行方向）とn次のBragg条件に基づく方向とが成す角は、0次光の方向と1次のBragg条件に

基づく方向とが成す角の n 倍である。つまり、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向の広がり（換言すると、乖離）を従来（図 1）よりも大きくできる。

[0024] 分裂後、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線は、第 2 の進行光定在波 201 b を通過する。このとき、第 2 の進行光定在波 201 b と原子との相互作用を適切に設定すると（ビームウェストと波長と光強度と対向するレーザー間の差周波数をそれぞれ適切に設定する）、第 2 の進行光定在波 201 b を通過することによって、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線は通過過程で状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線に反転し、状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線は通過過程で状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線に反転する。このとき、前者については、 $|g, p_0\rangle$ から $|g, p_1\rangle$ に遷移した原子の進行方向は、上述のとおり、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子の運動方向からずれる。この結果、第 2 の進行光定在波 201 b を通過後の状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向は、第 1 の進行光定在波 201 a を通過後の状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向と平行になる。また、後者については、原子は、対向して進む $2n$ 個の光子の吸収・放出を通して、 $|g, p_1\rangle$ から $|g, p_0\rangle$ に遷移する際に $2n$ 個の光子から得た運動量と同じ運動量を失う。つまり、 $|g, p_1\rangle$ から $|g, p_0\rangle$ に遷移した原子の運動方向は、遷移前の状態 $|g, p_1\rangle$ の原子の運動方向からずれる。この結果、第 2 の進行光定在波 201 b を通過後の状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向は、第 1 の進行光定在波 201 a を通過後の状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線の進行方向と平行になる。

[0025] 反転後、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線は、第 3 の進行光定在波 201 c を通過する。この通過時点にて、反転後の状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と反転後の状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線は互いに交差する。このとき、第 3 の進行光定在波 201 c と原子との相互作用を適切に設定すると（ビームウェストと波長と光強度と対向するレーザー間の差周波数をそれぞれ適切に設定する）、状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線との交差領域に含まれる個々

の原子の $|g, p_0\rangle$ と $|g, p_1\rangle$ との重ね合わせ状態に応じた原子線101bが得られる。第3の進行光定在波201cを通過した後に得られる原子線101bの進行方向は、理論的には、0次光の方向とn次のBragg条件に基づく方向のいずれか一方または両方である。

[0026] ジャイロスコープ500に、第1の進行光定在波201aの作用から第3の進行光定在波201cの作用までの原子線の2個の経路を含む平面内の角速度または加速度が加わると、第1の進行光定在波201aの作用から第3の進行光定在波201cの作用までの原子線の2個の経路に位相差が生じ、この位相差が第3の進行光定在波201cを通過した個々の原子の状態 $|g, p_0\rangle$ の存在確率と状態 $|g, p_1\rangle$ の存在確率に反映される。したがって、観測部400は、干渉部201からの原子線101b（つまり、第3の進行光定在波201cを通過した後に得られる原子線101b）を観測することによって角速度または加速度を検出する。例えば、観測部400は、干渉部201からの原子線101bにプローブ光408を照射して、状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からの蛍光を光検出器409によって検出する。光検出器409としては、光電子増倍管、蛍光フォトディテクタなどを例示できる。また、本実施形態によると空間分解が向上する、つまり第3の進行光定在波を通過した後の2個の経路（状態 $|g, p_0\rangle$ の原子からなる原子線と状態 $|g, p_1\rangle$ の原子からなる原子線）の間隔が広いので、光検出器409としてCCDイメージセンサを用いることもできる。あるいは、光検出器409としてチャンネルトロンを用いる場合は、第3の進行光定在波を通過した後の2個の経路の一方の原子線を、プローブ光の代わりにレーザー等によってイオン化し、チャンネルトロンでイオンを検出してもよい。

[0027] 上述のとおり、0次光の方向とn次のBragg条件に基づく方向とが成す角が0次光の方向と1次のBragg条件に基づく方向とが成す角のn倍であるので、本実施形態のジャイロスコープ500の位相感度は、ジャイロスコープ500における第1の進行光定在波と第3の進行光定在波との間隔と同じ間隔を持つ従来のジャイロスコープ900の位相感度よりも大きい。つまり、同じ

位相感度を持つ本実施形態のジャイロスコープ500と従来のジャイロスコープ900を比較すると、本実施形態のジャイロスコープ500の全長（原子線の射出方向の長さ）は従来のジャイロスコープ900の全長よりも短い。

[0028] <好ましい実施形態>

ジャイロスコープの位相感度が向上するとジャイロスコープのバイアス安定性も向上するが、位相感度は、既述のとおり、 A を原子線の2個の経路で囲まれた面積とし、 v を原子速度として、 A/v に比例することが知られている。つまり、図2に示すジャイロスコープ500において、原子線101aと第1の進行光定在波201aとの相互作用位置から原子線101aと第2の進行光定在波201bとの相互作用位置までの距離を L とすると、位相感度は L^2/v に比例する。小型のジャイロスコープ500を実現するためには L を小さくすればよいが、単に L を小さくしただけでは位相感度も低下してしまう。したがって、位相感度を低下させないためには原子速度も小さくすればよい。この観点から、冷却原子線を使うことが好ましい。例えば、原子速度を熱的原子速度の1/100にすれば位相感度を変えずにジャイロスコープ500のサイズを元のサイズの1/10にできる。

[0029] この他、本発明は上述の実施形態に限定されず、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更が可能である。例えば、上述の実施形態では、3個の進行光定在波を用いて、1回の分裂と1回の反転と1回の混合を行うマッハツェンダー型原子干渉を利用しているが、このような実施形態に限定されず、本発明は、例えば複数回の分裂と複数回の反転と複数回の混合を行う多段のマッハツェンダー型原子干渉を利用した実施形態として実施することもできる。このような多段のマッハツェンダー型原子干渉については、参考文献2を参照のこと。

(参考文献2) Takatoshi Aoki et al., “High-finesse atomic multiple-beam interferometer comprised of copropagating stimulated Raman-pulse fields,” Phys. Rev. A 63, 063611 (2001) – Published 16 May 2001.

[0030] 以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されない。本発明の要旨を逸脱しない範囲において種々の変更と変形が許される。選択され且つ説明された実施形態は、本発明の原理およびその実際の応用を解説するためのものである。本発明は様々な変更あるいは変形を伴って様々な実施形態として使用され、様々な変更あるいは変形は期待される用途に応じて決定される。そのような変更および変形のすべては、添付の請求範囲によって定義される本発明の範囲に含まれることが意図されており、公平、適法および公正に与えられる広さに従って解釈される場合、同じ保護が与えられることが意図されている。

符号の説明

[0031]	1 0 1	原子線源
	1 0 1 a	原子線
	1 0 1 b	原子線
	1 1 1	オープン
	1 1 3	コリメーター
	2 0 1	干渉部
	2 0 1 a	第1の進行光定在波
	2 0 1 b	第2の進行光定在波
	2 0 1 c	第3の進行光定在波
	3 0 1	進行光定在波生成部
	4 0 0	観測部
	5 0 0	ジャイロスコープ

請求の範囲

- [請求項1] マッハ-ツェンダー型原子干渉に基づくジャイロスコープであって、
- 、
- 個々の原子が同じ状態にある原子線を連続生成する原子線源と、
- 3個以上の進行光定在波を生成する進行光定在波生成部と、
- 前記原子線と前記3個以上の進行光定在波とが相互作用した結果の原子線を得る干渉部と、
- 前記干渉部からの前記原子線を観測することによって角速度または加速度を検出する観測部と
- を含み、
- 各前記進行光定在波は、 n を2以上の正整数として、 n 次Bragg条件を満たす
- ことを特徴とするジャイロスコープ。
- [請求項2] 請求項1に記載のジャイロスコープにおいて、
- 前記原子線源は、冷却原子線を生成する
- ことを特徴とするジャイロスコープ。

[図1]

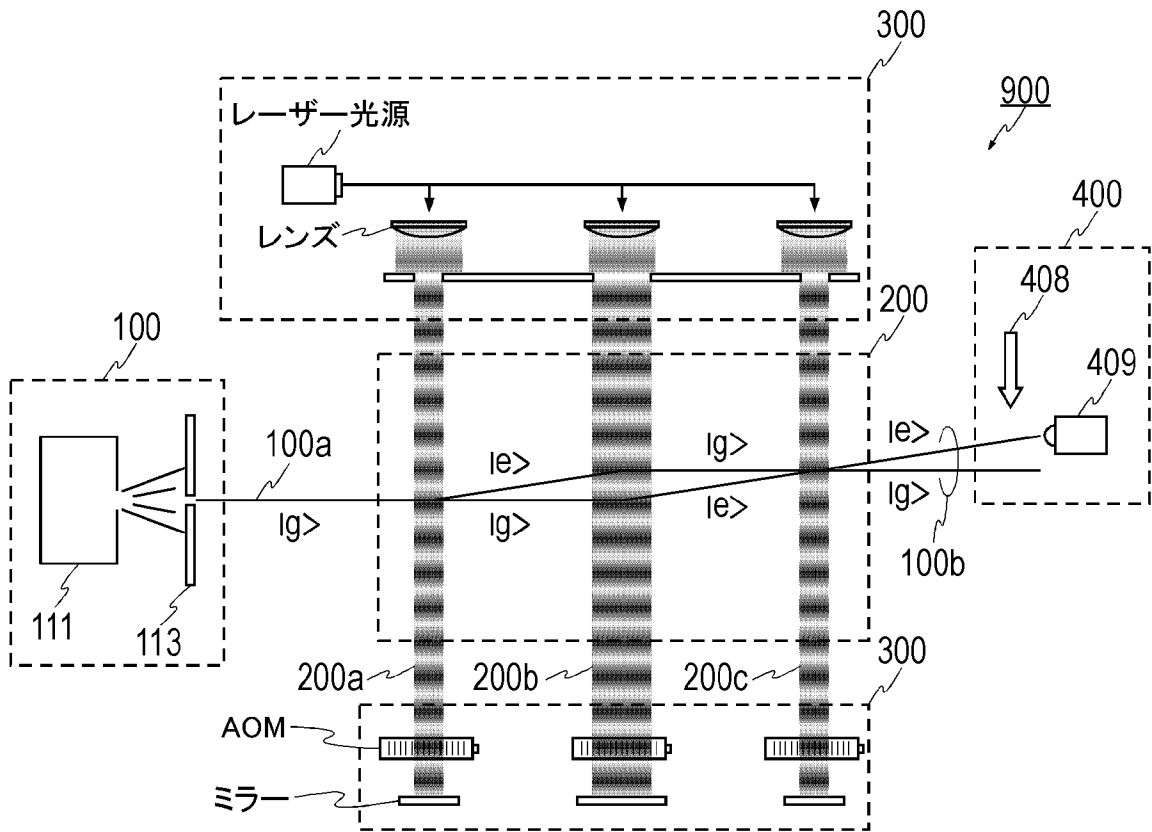


図1

[図2]

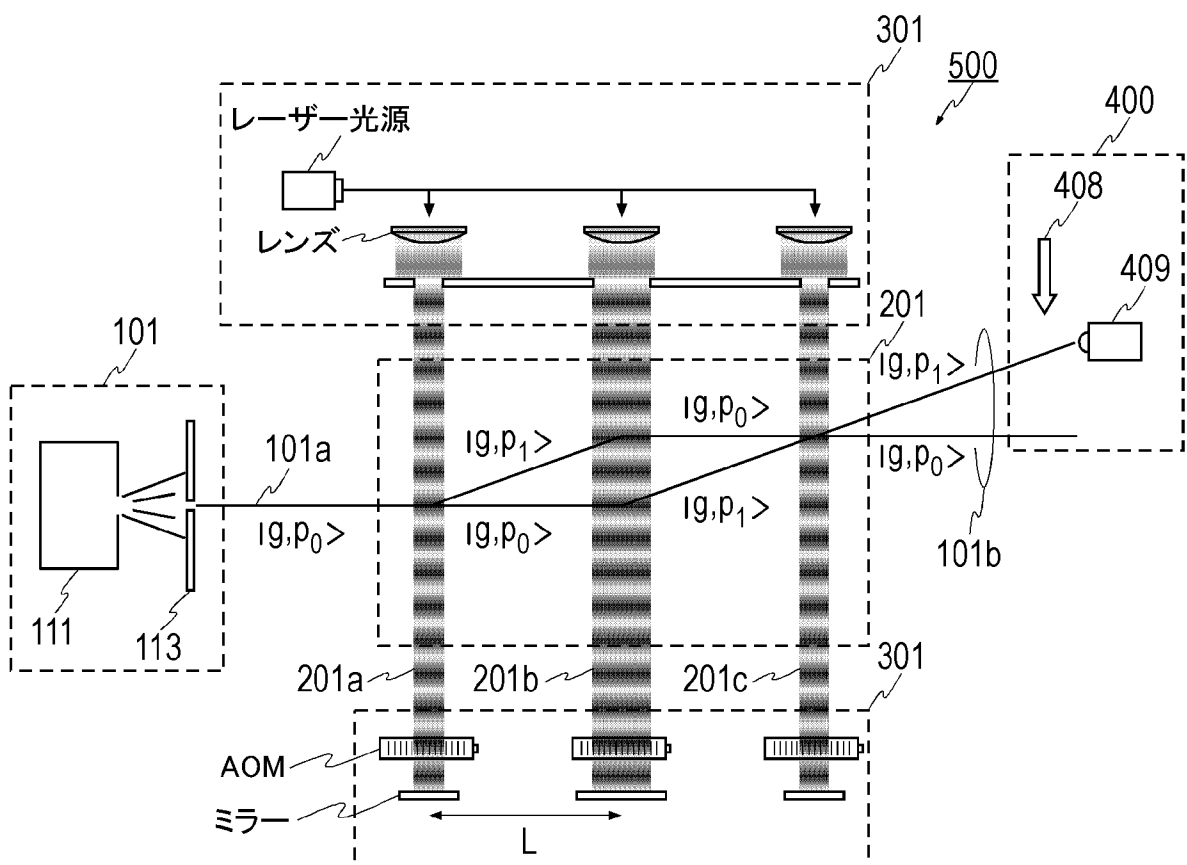


図2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/027827

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int. Cl. G01C19/58 (2006.01) i

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)
Int. Cl. G01C19/00-19/72, G01P15/00-15/18

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 1971-2018
Registered utility model specifications of Japan 1996-2018
Published registered utility model applications of Japan 1994-2018

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	JP 2008-544284 A (NORTHROP GRUMMAN GUIDANCE AND ELECTRONICS COMPANY, INC.) 04 December 2008, paragraphs [0003]-[0005], [0012]-[0016], fig. 2 & WO 2007/002327 A1 & EP 1896796 A1 & AT 431544 T	1-2
Y	HU, Qingqing et al., A theoretical analysis and determination of the technical requirements for a Bragg diffraction-based cold atom interferometry gravimeter, International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 2016, pp. 1-9	1-2

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“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
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“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
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“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
“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)	“&” document member of the same patent family
“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	

Date of the actual completion of the international search
05.09.2018

Date of mailing of the international search report
18.09.2018

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2018/027827

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DELHUILLE, R. et al., High contrast Mach-Zehnder lithium atom interferometer in the Bragg regime, Applied Physics B Lasers and Optics, March 2002, pp. 1-5	1-2
Y	盛永篤郎, 原子干渉計による超高感度・高精度物理計測, 応用物理学会分科会日本光学会, 10 July 2008, pp. 376-382 (MORINAGA, Atsuo. Atom Interferometry with Cold Atoms for Precise Measurement. JSAP Photonics Division.)	2
A	JP 2017-15685 A (HONEYWELL INTERNATIONAL INC.) 19 January 2017, entire text, all drawings & US 2016/0377436 A1 & EP 3048418 A1 & CN 105973218 A	1-2
P, A	US 2017/0370840 A1 (THE CHARLES STARK DRAPER LABORATORY, INC.) 28 December 2017, entire text, all drawings & WO 2017/222785 A1	1-2

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01C19/58(2006.01)i

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))

Int.Cl. G01C19/00-19/72, G01P15/00-15/18

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	1971-2018年
日本国実用新案登録公報	1996-2018年
日本国登録実用新案公報	1994-2018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	JP 2008-544284 A (ノースロップ グラマン ガイダンス アンド エレクトロニクス カンパニー, インコーポレーテッド) 2008.12.04, 段落[0003]-[0005], [0012]-[0016], 第2図 & WO 2007/002327 A1 & EP 1896796 A1 & AT 431544 T	1-2
Y	HU, Qingqing et al., A theoretical analysis and determination of the technical requirements for a Bragg diffraction-based cold atom interferometry gravimeter, International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 2016, p.1-9	1-2

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ 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矛盾するものではなく、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

05.09.2018

国際調査報告の発送日

18.09.2018

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
郵便番号 100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

梶田 真也

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

2S

3303

C (続き) . 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	R. Delhuille et al., High contrast Mach-Zehnder lithium atom interferometer in the Bragg regime, Applied Physics B Lasers and Optics, 2002.03, p.1-5	1-2
Y	盛永 篤郎, 原子干渉計による超高感度・高精度物理計測, 応用物理学会分科会日本光学会, 2008.07.10, p.376-382	2
A	JP 2017-15685 A (ハネウエル・インターナショナル・インコーポレーテッド) 2017.01.19, 全文, 全図 & US 2016/0377436 A1 & EP 3048418 A1 & CN 105973218 A	1-2
P, A	US 2017/0370840 A1 (THE CHARLES STARK DRAPER LABORATORY, INC.) 2017.12.28, 全文, 全図 & WO 2017/222785 A1	1-2