

(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
2023年11月16日(16.11.2023)



(10) 国際公開番号

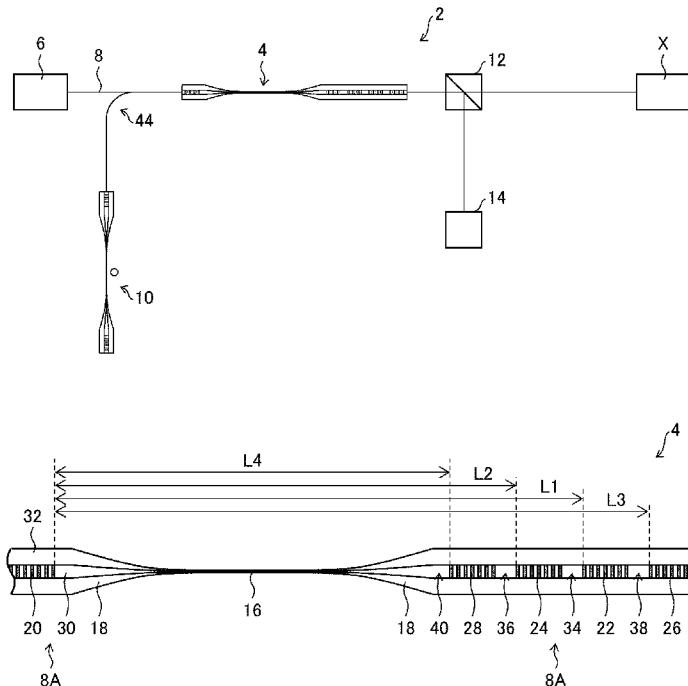
WO 2023/219002 A1

- (51) 国際特許分類:
G02F 1/383 (2006.01) *G02F 1/39* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/016812
- (22) 国際出願日: 2023年4月28日(28.04.2023)
- (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 2022-079015 2022年5月12日(12.05.2022) JP
- (71) 出願人: 学校法人早稲田大学 (**WASEDA UNIVERSITY**) [JP/JP]; 〒1698050 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 青木 隆朗(**AOKI, Takao**); 〒1698050 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人 **H A R A K E N Z O W O R L D P A T E N T & T R A D E M A R K (HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK)**; 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋2丁目北2番6号 大和南森町ビル Osaka (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,

(54) **Title:** QUANTUM WAVELENGTH CONVERTER, HERALDED SINGLE PHOTON SOURCE

(54) 発明の名称: 量子波長変換器、伝令付き単一光子源

図 1



(57) **Abstract:** The present invention achieves a quantum wavelength converter that is easily coupled to an optical fiber. A quantum wavelength converter (2) comprises: an optical fiber (8) that contains a plurality of resonators (34, 36, 38, 40) that have a shared resonance optical path at at least a portion thereof; and a laser light source (6) that is connected to the optical fiber and inputs pump light that has one or more frequencies into the optical fiber. The plurality of resonators satisfy the law of conservation of energy and phase matching conditions for four-wave mixing or parametric conversion

HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, 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:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

at the shared resonance optical path.

(57) 要約: 光ファイバとの結合が容易な量子波長変換器を達成する。量子波長変換器 (2) は、少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器 (34、36、38、40) を内部に含む光ファイバ (8) と、光ファイバと接続し、少なくとも1つ以上の周波数を有するポンプ光を光ファイバに入力するレーザ光源 (6) とを備える。複数の共振器は、共通の共振光路における四光波混合過程またはパラメトリック変換のエネルギー保存則および位相整合条件を満たす。

明 細 書

発明の名称：量子波長変換器、伝令付き単一光子源

技術分野

[0001] 本開示は量子波長変換器、および当該量子波長変換器を備えた伝令付き単一光子源に関する。

背景技術

[0002] 光子の波長を変換する量子波長変換技術として、パラメトリック下方変換、または四光波混合過程等を含む非線形光学過程によって実現する手法が一般に知られている。これらの非線形光学過程は光子対の生成にも用いられ、また、伝令付き単一光子源の動作原理として重要でもある。

[0003] 非特許文献1および非特許文献2は、上述した量子波長変換をKTP結晶等の非線形光学結晶バルクを用いて実現する手法を開示する。また、非特許文献3および非特許文献4は、上述した量子波長変換をPPLN導波路等の非線形光学結晶導波路を用いて実現する手法を開示する。さらに、非特許文献5および非特許文献6は、上述した量子波長変換を、チップ上リング型微小共振器を用いて実現する手法を開示する。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1：J. Huang and P. Kumar, “Observation of quantum frequency conversion” Phys. Rev. Lett. 68, 2153 (1992).

非特許文献2：Z. Y. Ou and L. Mandel, “Violation of Bell’s Inequality and Classical Probability in a Two-Photon Correlation Experiment” Phys. Rev. Lett. 61, 50 (1988).

非特許文献3：B. Albrecht et al., “A waveguide frequency converter connecting rubidium-based quantum memories to the telecom C-band” Nature Commun. 5, 3376 (2014).

非特許文献4：M. Bock et al., “Highly efficient heralded single-photo

n source for telecom wavelengths based on a PPLN waveguide” Opt. Express 24, 23992 (2016).

非特許文献5: A. Singh et al., “Quantum frequency conversion of a quantum dot single-photon source on a nanophotonic chip” Optica 6, 563 (2019).

非特許文献6: R. Wakabayashi et al., “Time-bin entangled photon pair generation from Si micro-ring resonator” Opt. Express 23, 1103 (2015).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 非特許文献 1 から 6 に記載された量子波長変換技術に用いられる、非線形光学結晶バルク、非線形光学結晶導波路、およびリング型微小共振器は、何れも光ファイバとの結合が困難である。このため、非特許文献 1 から 6 に記載された技術を用いた量子波長変換器を、例えば、光子を伝搬させる量子チャンネルに光ファイバを用いる装置に導入する場合、当該光ファイバと量子波長変換器とを結合するための機構を要する。したがって、上記量子波長変換器は、当該量子波長変換器を備える装置の複雑化を招来する。

課題を解決するための手段

[0006] 上記の課題を解決するために、本開示の一態様に係る量子波長変換器は、少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、前記光ファイバと接続し、少なくとも 1 つ以上の周波数を有するポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、前記複数の共振器は、第 1 共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第 1 共振器と、第 2 共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第 2 共振器と、第 3 共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第 3 共振器と、前記第 1 共振周波数 ω_1 、前記第 2 共振周波数 ω_2 、および前記第 3 周波数の何れとも異なる第 4 共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第 4 共振器とを含み、 n_i を前記第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形

パラメータ、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数1]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(1)$$

[数2]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

上記（１）式および（２）式が成立する。

[0007] 本開示の他の一態様に係る量子波長変換器は、少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、前記複数の共振器は、第１共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第１共振器と、第３共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第３共振器と、前記第１共振周波数 ω_1 および第３共振周波数 ω_3 の双方と異なる第４共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第４共振器とを含み、 n_i を前記第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形パラメータ、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数3]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 = 0 \quad \dots(3)$$

[数4]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(4) \end{aligned}$$

上記（３）式および（４）式が成立する。

[0008] 本開示の他の一態様に係る量子波長変換器は、少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、前記複数の共振器は、第１共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第１共振器と、第２共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第２共振器と、前記第１共振周波数 ω_1

および前記第 2 共振周波数 ω_2 の双方と異なる第 4 共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第 4 共振器とを含み、 n_i を前記第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形パラメータ、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数5]

$$\Delta\omega = \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(5)$$

[数6]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(6) \end{aligned}$$

上記（５）式および（６）式が成立する。

発明の効果

[0009] 本開示の一態様によれば、光ファイバへの結合が容易であり、光ファイバを用いた量子デバイスに導入する場合にも、当該量子デバイスの複雑化を低減できる量子波長変換器を達成する。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]本開示の実施形態 1 に係る量子波長変換器の概略平面図、および共振器構造体の概略拡大図である。

[図2]本開示の実施形態 1 に係る単一光子源の概略拡大図である。

[図3]本開示の実施形態 1 に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図4]本開示の実施形態 2 に係る量子波長変換器の概略平面図、および共振器構造体の概略拡大図である。

[図5]本開示の実施形態 2 に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図6]本開示の実施形態 3 に係る量子波長変換器の概略平面図、および共振器

構造体の概略拡大図である。

[図7]本開示の実施形態3に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図8]本開示の実施形態4に係る量子波長変換器の概略平面図、および共振器構造体の概略拡大図である。

[図9]本開示の実施形態4に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図10]本開示の実施形態5に係る量子波長変換器の概略平面図、および共振器構造体の概略拡大図である。

[図11]本開示の実施形態5に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図12]本開示の実施形態6に係る伝令付き単一光子源の概略平面図である。

[図13]本開示の実施形態6に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図14]本開示の実施形態7に係る伝令付き単一光子源の概略平面図である。

[図15]本開示の実施形態7に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

[図16]本開示の実施形態8に係る伝令付き単一光子源の概略平面図である。

[図17]本開示の実施形態8に係る共振器構造体における光子の入出力を表す模式図、および共振器構造体におけるエネルギー遷移を表すエネルギーダイヤグラムである。

発明を実施するための形態

[0011] 〔実施形態1〕

＜量子波長変換器＞

本実施形態に係る量子波長変換器は、例えば、入力された特定の波長を有する単一光子の波長を変換し、当該波長とは異なる波長を有する単一光子を出力することにより、単一光子の波長を変換する装置である。特に、本実施形態に係る量子波長変換器は、単一光子源からの単一光子と、レーザ光源からのポンプ光とを、共通の共振光路を有する複数の共振器を含む共振器構造体に入力することにより、当該共振器構造体から波長変換後の単一光子を出力する装置である。

[0012] 本実施形態に係る量子波長変換器、および当該量子波長変換器が備える共振器構造体について、図1を参照し説明する。図1は、本実施形態に係る量子波長変換器2の概略平面図、および、当該概略平面図のうち、量子波長変換器2が備える共振器構造体4について拡大して示す概略図である。

[0013] 図1に示すように、量子波長変換器2は、共振器構造体4と、レーザ光源6と、単一モードの光ファイバ8とを備える。さらに、量子波長変換器2は、単一光子源10と、ダイクロイックミラー12と、光終端器14とを備える。なお、図1は、後述する方法により量子波長変換器2によって生成された、波長変換後の単一光子が入力される量子デバイスXについても示す。本実施形態に係る量子波長変換器2は、後に詳述するが、単一光子源10から共振器構造体4に入力された単一光子を、量子デバイスXが必要とする波長の単一光子に変換する量子波長変換器を例に挙げて説明する。

[0014] ＜共振器構造体＞

共振器構造体4は、図1に示すように、ナノ光ファイバ部16と、当該ナノ光ファイバ部16にテーパ部18を介して接続する両端部8Aを含む。ここで、例えば、両端部8Aは、量子波長変換器2が備える光ファイバ8の一部である。また、ナノ光ファイバ部16は、光ファイバ8の一部をセラミックヒータ、または酸素水炎等を含む種々の加熱方法により加熱しつつ、加熱部分を両端から引張する等の手法により、光ファイバ8の当該加熱部分に形成される。換言すれば、共振器構造体4は、光ファイバ8の一部としてナ

ノ光ファイバ部 16 および両端部 8A を含む。

[0015] 共振器構造体 4 は、さらに、両端部 8A またはナノ光ファイバ部 16 の内部に、共通 F B G (fiber Bragg grating : ファイバブラッグ格子) 20、第 1 F B G 22、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、および第 4 F B G 28 を含む。特に、本実施形態においては、両端部 8A が含む、光子が伝搬するコア部 30 と当該コア部 30 の周囲におけるクラッド部 32 とのうち、コア部 30 に上述した各 F B G が形成されている。

[0016] 共通 F B G 20、第 1 F B G 22、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、および第 4 F B G 28 は、特定の周波数を有する光子の一部を反射する。本明細書において、第 1 F B G 22 は第 1 共振周波数 ω_1 、第 2 F B G 24 は第 2 共振周波数 ω_2 、第 3 F B G 26 は第 3 共振周波数 ω_3 、第 4 F B G 28 は第 4 共振周波数 ω_4 、それぞれの周波数を有する光子の一部を反射する。また、共通 F B G 20 は、第 1 共振周波数 ω_1 、第 2 共振周波数 ω_2 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 の何れの周波数を有する光子も一部を反射する。

[0017] なお、本実施形態において、第 1 共振周波数 ω_1 、第 2 共振周波数 ω_2 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 は、何れも互いに異なる周波数である。換言すれば、本実施形態において、少なくとも、第 4 共振周波数 ω_4 は、第 1 共振周波数 ω_1 、第 2 共振周波数 ω_2 、および第 3 共振周波数 ω_3 の何れの周波数とも異なっている。

[0018] 本実施形態において、ナノ光ファイバ部 16 の両端に形成された 2 つの両端部 8A のうち、一方に共通 F B G 20 が形成され、他方に第 1 F B G 22、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、および第 4 F B G 28 が形成されている。したがって、共通 F B G 20 と、第 1 F B G 22、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、および第 4 F B G 28 とのそれぞれの間には、少なくともナノ光ファイバ部 16 の光子の伝搬路を含む共通の光路が形成されている。

[0019] したがって、共振器構造体 4 には、共通 F B G 20 と、第 1 F B G 22、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、および第 4 F B G 28 とのそれぞれによ

って、第1共振器34、第2共振器36、第3共振器38、および第4共振器40が形成される。ここで、本実施形態において、第1共振器34、第2共振器36、第3共振器38、および第4共振器40は、それぞれ、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する。換言すれば、共振器構造体4が含む各共振器においては、対応する共振周波数を有する光子が共振する。

[0020] 特に、第1共振器34、第2共振器36、第3共振器38、および第4共振器40は、少なくとも光ファイバ8の一部であるナノ光ファイバ部16の光子の伝搬路を、共通の共振光路として有する。換言すれば、共振器構造体4は、少なくとも一部が共通の共振光路を有する複数の共振器を含む。

[0021] さらに、当該複数の共振器は、それぞれの共振周波数を反射帯域に含む一対のファイバブラッグ格子をそれぞれ有する。特に、共通FBG20は、複数の共振器の間において同一のファイバブラッグ格子として形成されている。なお、共振器構造体4が含む複数の共振器が有するファイバブラッグ格子のうち、少なくとも一つが共通FBG20であってもよい。

[0022] 本実施形態においては、上述の通り、一方の両端部8Aに、第1FBG22、第2FBG24、第3FBG26、および第4FBG28が個別に形成されている。このため、本実施形態においては、第1共振器34、第2共振器36、第3共振器38、および第4共振器40のそれぞれの共振器長である L_1 、 L_2 、 L_3 、および L_4 を独立して設計することができる。

[0023] なお、本実施形態においては、第1FBG22、第2FBG24、第3FBG26、および第4FBG28が個別に形成されているが、これに限られない。例えば、本実施形態においては、両端部8Aの一方に、連続したファイバブラッグ格子を形成し、当該ファイバブラッグ格子の複数の位置のそれぞれにチャープを形成してもよい。これにより、本実施形態においては、ファイバブラッグ格子の各チャープを形成した位置において特定波長の光子を反射させることにより、各共振器を形成してもよい。

[0024] <レーザ光源、単一光子源>

図1の量子波長変換器2の平面図の参照に戻ると、レーザ光源6は、光ファイバ8を介して共振器構造体4の各共振器に、少なくとも一つ以上の周波数を有するポンプ光を入力するための光源である。例えば、レーザ光源6は、複数の周波数帯を含むポンプ光を生成してもよく、あるいは、特定の周波数を含む複数のポンプ光を生成してもよい。特に、本実施形態において、レーザ光源6は、第2共振周波数 ω_2 を有する第1ポンプ光PL1と、第3共振周波数 ω_3 を有する第2ポンプ光PL2とを生成し、第1ポンプ光PL1および第2ポンプ光PL2を共振器構造体4の各共振器に入力する。

[0025] 次いで、単一光子源10について、図2を参照して詳細に説明する。図2は、図1に示す量子波長変換器2の概略平面図のうち、量子波長変換器2が備える単一光子源10について拡大して示す概略図である。図2に示すように、単一光子源10は、共振器構造体4が含む各構成のうち、ナノ光ファイバ部16、および当該ナノ光ファイバ部16とテーパー部18を介して接続する両端部8Aを含む。

[0026] ただし、単一光子源10は、共振器構造体4が含む各ファイバブラッグ格子のうち、一方の両端部8Aのコア部30に共通FBG20を含み、他方の両端部8Aのコア部30に第1FBG22のみを含む。このため、単一光子源10は、共振器構造体4が含む各共振器のうち、第1共振器34のみを含む。

[0027] さらに、単一光子源10は、ナノ光ファイバ部16上に形成された量子系42を備える。量子系42は、少なくとも、基底準位と当該基底準位よりも上位の準位である励起準位とを含み、例えば、原子、イオン、窒素欠陥を有するダイヤモンド、および量子ドット等を含む。また、本実施形態において、量子系42の基底準位と励起準位との準位差は、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーに相当する。

[0028] 単一光子源10は、例えば、量子系42の基底準位と励起準位との間の状態遷移を用いて、第1共振周波数 ω_1 を有する単一光子を生成してもよい。この場合、単一光子源10は、例えば、量子系42の基底準位と励起準位との

間の状態遷移を引き起こすコントロール光を量子系42に照射可能な図示しないレーザ光源を含んでもよい。

[0029] 単一光子源10は、例えば、量子系42と第1共振器34との結合により、基底準位と励起準位との間の状態遷移に伴う単一光子の自然放出が強調されるパーセル効果に基づき、第1共振周波数 ω_1 を有する単一光子を第1共振器34中に生成してもよい。換言すれば、上述したレーザ光源からのコントロール光により量子系42の状態を励起させ、再び基底状態に戻る際に単一光子が生じることを利用し、単一光子源10は単一光子を生成してもよい。

[0030] あるいは、単一光子源10は、振幅が0から次第に上昇するコントロール光を量子系42に照射することにより単一光子を第1共振器34に生成してもよい。この場合、コントロール光の振幅の時間変化を制御することにより、単一光子の波形を制御できる。

[0031] 図1の参照に戻ると、単一光子源10は光ファイバ8を介して共振器構造体4と接続する。このため、単一光子源10は生成した第1共振周波数 ω_1 を有する単一光子を、入力単一光子IFとして共振器構造体4の各共振器に入力する。量子波長変換器2は、レーザ光源6からの第1ポンプ光PL1および第2ポンプ光PL2と、単一光子源10からの入力単一光子IFと、を混合して共振器構造体4の各共振器に入力するための合流器44を備えていてもよい。

[0032] <四光波混合過程>

以上より、本実施形態において、共振器構造体4の各共振器には、レーザ光源6からの第1ポンプ光PL1および第2ポンプ光PL2と、単一光子源10からの入力単一光子IFと、が入力される。本実施形態において、共振器構造体4は、入力された第1ポンプ光PL1、第2ポンプ光PL2、および入力単一光子IFによる四光波混合過程により、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFを生成する。本実施形態において、出力光子OFは単一光子である。

[0033] 共振器構造体4による出力光子OFの生成について、図3を参照してより

詳細に説明する。図3は、共振器構造体4における光子の入出力を説明するための模式図4Aと、共振器構造体4において生じる状態遷移を表すエネルギーダイアグラムD1である。

[0034] 図3の模式図4Aに示す通り、共振器構造体4には、第1共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子IF、第2共振周波数 ω_2 を有する第1ポンプ光PL1、および第3共振周波数 ω_3 を有する第2ポンプ光PL2が入力される。この結果、後述の方法により、模式図4Aに示す通り、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFが共振器構造体4から出力される。

[0035] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 について、以下の式(1)および式(2)が成立する。

[数7]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(1)$$

[数8]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

上記2式において、 n_i は第*i*共振周波数 ω_i の光に対するナノ光ファイバ部16の内部における実効屈折率である。また、上記2式において、 c は光速、 γ はナノ光ファイバ部16の非線形係数、 P はレーザ光源6からのポンプ光の合計強度である。

[0036] ここで、共振器構造体4の各共振器の共通光路に含まれるナノ光ファイバ部16において、図3のエネルギーダイアグラムD1に示すように、基底準位 g と励起準位 e とを仮想的に設定する。また、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差を、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーと第2共振周波数 ω_2 を有する光子のエネルギーとの合計値と略同一とする。なお、上記式(1)から、 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差は、第3共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第4共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0037] 上記2式が成立する場合、ナノ光ファイバ部16においては、単一入力光子IF、第1ポンプ光PL1、および第2ポンプ光PL2によって、エネルギーダイヤグラムD1に示す状態遷移が生じる。具体的には、単一入力光子IFおよび第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから励起準位eへの励起が生じる。また、当該励起と併せて、第2ポンプ光PL2によって、励起準位eから2準位の中間への遷移が生じる。結果として、第2ポンプ光PL2のエネルギーと、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差との差に相当するエネルギーを有する、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFが生成される。

[0038] 以上により、ナノ光ファイバ部16においては四光波混合過程が発生する。換言すれば、本実施形態に係る共振器構造体4の各共振器は、共通の共振光路であるナノ光ファイバ部16における四光波混合過程のエネルギー保存則および位相整合条件を満たしている。ここで、上記2式のうち、式(1)は四光波混合過程のエネルギー保存則を表し、式(2)は四光波混合過程の位相整合条件を表す。

[0039] ここで、ナノ光ファイバ部16を共通の共振光路として含む共振器構造体4の各共振器は、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 を有する光と結合する。このため、共振器構造体4の各共振器により、ナノ光ファイバ部16における上述の四光波混合過程は促進され、共振器構造体4における出力光子OFの生成が促進される。

[0040] <フリースペクトルレンジの設計>

ここで、共振器構造体4の各共振器の共振条件は、 $(n_i \cdot \omega_i \cdot L_i / c) + \phi_i = m_i \cdot \pi$ と表される。当該共振条件の式において、cは光速、 n_i は第i共振器中の群屈折率、 L_i は第i共振器の共振器長、 ϕ_i は第i共振周波数 ω_i を有する光子を反射するファイバブラッグ格子における当該光子の位相変化、 m_i は自然数である。ここで、一般に、 n_i および ϕ_i は光子の周波数に依存し得る。このため、共振器長 L_i が同一であり、共振器構造体4が含む

ファイバブラッグ格子の分散を無視する場合、共振器構造体4の各共振器の共振条件を満たす第 i 共振周波数 ω_i において、上記式(2)は一般には成立しない。

[0041] そこで、本実施形態においては、共振器構造体4の各共振器の共振器長 L_i を個別に設計し、あるいは、当該各共振器が有するファイバブラッグ格子によって付加される分散を考慮して、当該各共振器の設計を行う。これにより、本実施形態においては、上記式(2)が成立するように、共振器構造体4の各共振器の設計を行う。例えば、上述の通り、共通FBG20に対し、第1FBG22、第2FBG24、第3FBG26、および第4FBG28を個別に形成することにより、各共振器の共振器長 L_i を個別に設計可能とする。

[0042] これにより、各共振器において、共振条件である $(n_i \cdot \omega_i \cdot L_i / c) + \phi_i = m_i \cdot \pi$ を満たす共振器長 L_i を個別に設計できる。なお、上記式(2)が満たされる限り、共振器構造体4が含む各共振器の共振器長 L_i は特に限定されない。したがって、共振器構造体4が含む各共振器の共振器長 L_i の大小関係は、図1等に示す大小関係には限定されない。

[0043] このため、本実施形態に係る共振器構造体4は、上記式(2)を満たすように各共振器の設計を行うことが容易となる。また、共振器構造体4は、各共振器の一对のファイバブラッグ格子のうち一方を個別に形成しているため、温度変化または振動等の外乱に対し、各共振器に対する共振器長 L_i の安定化を独立して行うことができる。

[0044] <ダイクロイックミラー、光終端器>

以上により、共振器構造体4は第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFを生成する。図1の参照に戻ると、共振器構造体4から出力された出力光子OFは光ファイバ8を介してダイクロイックミラー12に入射する。ただし、共振器構造体4からは、単一光子源10からの単一入力光子IF、レーザ光源6からの第1ポンプ光PL1、および第2ポンプ光PL2も出射し、ダイクロイックミラー12に入射する。

- [0045] ダイクロイックミラー 12 は、特定周波数の光子を透過または反射するミラーである。本実施形態において、ダイクロイックミラー 12 は、透過した光子が量子デバイス X に入射し、反射した光子が光終端器 14 に入射するように設置される。なお、本実施形態に係る量子波長変換器 2 は、透過または反射する光子の周波数が互いに異なる複数のダイクロイックミラー 12 を備えていてもよい。
- [0046] 本実施形態において、ダイクロイックミラー 12 は、第 1 共振周波数 ω_1 、第 2 共振周波数 ω_2 、および第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子を反射し、第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子を透過する。したがって、ダイクロイックミラー 12 は、第 1 共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子 I F、第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 1 ポンプ光 P L 1、および第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光 P L 2 を反射し、光終端器 14 に入射させる。また、ダイクロイックミラー 12 は、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F を透過させて、量子デバイス X に入射させる。換言すれば、ダイクロイックミラー 12 は、共振器構造体 4 から出射した光子のうち、量子デバイス X に入射する光子を、出力光子 O F のみに限定する。
- [0047] なお、本実施形態に係る量子波長変換器 2 は、ダイクロイックミラー 12 に代えて、共振器構造体 4 から出射した光を波長ごとに異なる方向に回折させる回折格子を備えていてもよい。また、本実施形態に係る量子波長変換器 2 は、ダイクロイックミラー 12 に代えて、共振器構造体 4 から出射した光を分波する WDM フィルタを備えていてもよい。
- [0048] 光終端器 14 は、例えば、入射した光子のエネルギーを熱等のエネルギーに変換することにより、当該光子を反射または分散等させることなく消失させるための光学素子である。光終端器 14 により、量子波長変換器 2 は、共振器構造体 4 から出射した単一入力光子 I F、第 1 ポンプ光 P L 1、および第 2 ポンプ光 P L 2 が外部に出射することを低減する。
- [0049] ただし、量子波長変換器 2 は、光終端器 14 に代えてさらに他の共振器構造体 4 を備えていてもよく、当該共振器構造体 4 にダイクロイックミラー 1

2が反射した光子を入射させてもよい。これにより、量子波長変換器2は、複数の共振器構造体4のそれぞれにおいて、出力光子OFを生成してもよい。

[0050] <実施形態1のまとめ>

本実施形態に係る量子波長変換器2は、単一光子源10が生成した第1共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子IFを、当該第1共振周波数 ω_1 と異なる周波数である第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFに変換することができる。また、量子波長変換器2は、量子デバイスXに出力光子OFを入力する。これにより、量子波長変換器2は、単一光子源10が生成する光子の周波数と、量子デバイスXが必要とする光子の周波数との間に差異があっても、単一光子源10が生成する光子の周波数を変換して量子デバイスXに入力することができる。

[0051] 本実施形態においては、例えば、図3のエネルギーダイアグラムD1に示すように、第4共振周波数 ω_4 を他の共振周波数の何れよりも低い周波数とした。しかしながら、これに限られず、第4共振周波数 ω_4 は何れかの共振周波数よりも大きくともよい。本実施形態においては、例えば、第4共振周波数 ω_4 を第3共振周波数 ω_3 よりも大きくしてもよい。本実施形態においては、上記式(1)および式(2)を満たすように、第1ポンプ光PL1と第2ポンプ光PL2との周波数、および共振器構造体4が含む各共振器の共振器長等の設計を変更することにより、第4共振周波数 ω_4 の変更を実現してもよい。

[0052] 本実施形態に係る量子波長変換器2は、ポンプ光等が入力され、波長変換後の光子を生成する各共振器の共通の共振光路を、光ファイバ8の一部として含む。このため、波長変換前の光子を出射する量子デバイス、または、波長変換後の光子を必要とする量子デバイスが光ファイバを有していた場合においても、本実施形態に係る量子波長変換器2は、当該光ファイバとの結合を容易に実現する。したがって、量子波長変換器2は、光ファイバを含む量子デバイスに組み込んだ場合においても、当該量子デバイスの構造の複雑化

を低減する。

[0053] なお、量子波長変換器 2 は、単一光子源 10 が生成する単一入力光子 1 F の波長を変換するが、これに限られない。例えば、量子波長変換器 2 は、量子コンピュータにおける量子演算ユニット、または、量子通信器における量子中継器から出力された、第 1 共振周波数 ω_1 を有する光子の波長を変換してもよい。あるいは、量子波長変換器 2 は、他の量子波長変換器 2 が生成した出力光子 OF の波長をさらに変換してもよい。

[0054] 一般に、量子系として原子を備える量子演算ユニットまたは量子中継器において、当該原子と光子とを相互作用させる場合、原子における十分なコヒーレンス時間の確保のために、原子の基底準位とその直上の励起準位との遷移が利用される場合が多い。この場合、一般に、原子と光子とを相互作用させるために、当該光子の波長は $1\ \mu\text{m}$ 未満であることが求められる。

[0055] 一方、ある量子演算ユニットにおける演算に利用した光子を利用してさらなる演算を行うために、当該光子を他の量子演算ユニットに伝搬させるために、または、複数の量子中継器の間における光子の伝搬のために、一般に単一モードの光ファイバが用いられる。ここで、一般に、光ファイバ中における光子の損失を十分に低減するために、当該光ファイバを伝搬する光子の波長は $1.3\ \mu\text{m}$ 以上 $1.6\ \mu\text{m}$ 以下の波長帯である通信波長帯に含まれる場合が多い。

[0056] 本実施形態に係る量子波長変換器 2 は、例えば、上述した量子演算ユニットまたは量子中継器から出力され、波長が $1\ \mu\text{m}$ 未満の光子を、 $1.3\ \mu\text{m}$ 以上 $1.6\ \mu\text{m}$ 以下の波長を有する光子に変換し、光ファイバ中を伝搬させてもよい。次いで、他の量子波長変換器 2 が、当該光ファイバ中を伝搬する光子を、再び $1\ \mu\text{m}$ 未満の波長を有する光子に変換した後、他の量子演算ユニットまたは量子中継器に入力してもよい。この場合、量子波長変換器 2 によって、複数の量子演算ユニットまたは量子中継器における光子の低損失の伝搬が実現する。

[0057] 本実施形態において、共振器構造体 4 の各共振器における共通の共振光路

は、両端部 8 A よりも径の小さいナノ光ファイバ部 1 6 を含む。このため、モード断面積が小さいことにより、ナノ光ファイバ部 1 6 においては、光ファイバ 8 の他の部分よりも、上述した四光波混合過程が有意に発生する。したがって、本実施形態に係る量子波長変換器 2 は、単一入力光子 I F から出力光子 O F への変換効率を向上させることができる。

[0058] 本実施形態において、共振器構造体 4 の各共振器は、一对のファイバブラッグ格子を有する。このため、量子波長変換器 2 は、一对のミラー等の光学素子、または、リング共振器等を備える場合と比較して、共振器構造体 4 の各共振器を簡素に構成できる。さらに、複数の共振器の間において、ファイバブラッグ格子の少なくとも一部は、同一の共通 F B G 2 0 である。このため、量子波長変換器 2 は、共振器ごとに独立した一对のファイバブラッグ格子を備える場合と比較して、共振器構造体 4 の各共振器をより簡素に構成できる。なお、各共振器の一对のファイバブラッグ格子のうち、一方を共通とし、他方を個々に形成することにより、量子波長変換器 2 は、上述の通り、各共振器の共振器長の設計をより容易とできる。

[0059] なお、量子波長変換器 2 は、単一入力光子 I F の代わりに、レーザ光源 6 から出射した第 1 共振周波数 ω_1 のポンプ光を共振器構造体 4 に入力してもよい。この場合、レーザ光源 6 から出射した各ポンプ光の強度を十分に強くすることにより、共振器構造体 4 は、第 4 共振周波数 ω_4 を有するコヒーレントな光子を生成する。換言すれば、量子波長変換器 2 は、光パラメトリック発振器としても機能してよい。なお、本実施形態に限られず、本明細書に記載された各実施形態に係る量子波長変換器は、レーザ光源からのポンプ光から第 4 共振周波数 ω_4 を有するコヒーレントな光子を生成する光パラメトリック発振器としても機能してよい。

[0060] [実施形態 2]

<パラメトリック下方変換を利用した波長変換>

図 4 は、本実施形態に係る量子波長変換器 4 6 の概略平面図、および、当該概略平面図のうち、量子波長変換器 4 6 が備える共振器構造体 4 8 につい

て拡大して示す概略図である。本実施形態に係る量子波長変換器 4 6 は、前実施形態に係る量子波長変換器 2 と比較して、共振器構造体 4 に代えて共振器構造体 4 8 を備える点においてのみ構成が異なる。なお、以降の実施形態において、特に説明しない限り、異なる実施形態の間において同一の構成を有し、または同一の機能を果たす部材については、同一の部材番号を付し、その詳細な説明を省略する。

[0061] 本実施形態に係る共振器構造体 4 8 は、前実施形態に係る共振器構造体 4 と比較して、第 2 F B G 2 4 および第 2 共振器 3 6 を備えていない点において構成が異なる。このため、共振器構造体 4 8 は、第 1 共振周波数 ω_1 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 をそれぞれ共振周波数として有する、第 1 共振器 3 4、第 3 共振器 3 8、および第 4 共振器 4 0 を含む。また、共振器構造体 4 8 は、第 1 共振器 3 4、第 3 共振器 3 8、および第 4 共振器 4 0 の共通の共振光路として、少なくともナノ光ファイバ部 1 6 を含む。

[0062] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光 P L 2 を共振器構造体 4 8 に入力し、第 1 ポンプ光 P L 1 を出射しない。したがって、本実施形態に係る共振器構造体 4 8 には、レーザ光源 6 からの第 2 ポンプ光 P L 2 と、単一光子源 1 0 が生成する単一入力光子 I F とが入力される。本実施形態において、共振器構造体 4 8 は、入力された第 2 ポンプ光 P L 2、および入力単一光子 I F によるパラメトリック下方変換により、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F を生成する。

[0063] 共振器構造体 4 8 による出力光子 O F の生成について、図 5 を参照してより詳細に説明する。図 5 は、共振器構造体 4 8 における光子の入出力を説明するための模式図 4 8 A と、共振器構造体 4 8 において生じる状態遷移を表すエネルギーダイヤグラム D 2 である。

[0064] 図 5 の模式図 4 8 A に示す通り、共振器構造体 4 8 には、第 1 共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子 I F、および第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光 P L 2 が入力される。この結果、後述の方法により、模式図 4 8 A に示す通り、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F が共振器構造体 4 8 から出

力される。本実施形態においても、出力光子 OF は単一光子である。

[0065] ここで、本実施形態においては、第 1 共振周波数 ω_1 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 について、上述した式 (1) および式 (2) を、以下の式 (3) および式 (4) に読み替えた式が成立する。

[数9]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 = 0 \quad \dots(3)$$

[数10]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(4) \end{aligned}$$

ここで、本実施形態においては、図 5 のエネルギーダイアグラム D 2 に示すように、ナノ光ファイバ部 16 における基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差を、第 1 共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーと略同一とする。なお、上記式 (3) から、 $\omega_1 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差は、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0066] 上記 2 式が成立する場合、ナノ光ファイバ部 16 においては、単一入力光子 IF、および第 2 ポンプ光 PL 2 によって、エネルギーダイアグラム D 2 に示す状態遷移が生じる。具体的には、単一入力光子 IF によって、基底準位 g から励起準位 e への励起が生じる。また、当該励起と併せて、第 2 ポンプ光 PL 2 によって、励起準位 e から 2 準位の中間への遷移が生じる。結果として、第 2 ポンプ光 PL 2 のエネルギーと、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差との差に相当するエネルギーを有する、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF が生成される。

[0067] 以上により、ナノ光ファイバ部 16 においてはパラメトリック下方変換が発生する。換言すれば、本実施形態に係る共振器構造体 48 の各共振器は、共通の共振光路であるナノ光ファイバ部 16 におけるパラメトリック下方変換のエネルギー保存則および位相整合条件を満たしている。ここで、上記 2 式のうち、式 (3) はパラメトリック下方変換のエネルギー保存則を表し、

式（４）はパラメトリック下方変換の位相整合条件を表す。

[0068] ここで、３次の非線形光学効果である四光波混合過程は、反転対称性を有する物質中であっても有意に発生するのと比較して、２次の非線形光学効果であるパラメトリック下方変換は、反転対称性を有さない物質中において有意に発生する。一般に、例えば、単一モードの光ファイバがシリカガラスからなる場合、当該光ファイバは反転対称性を有する。しかしながら、ナノ光ファイバにおいては、構造として反転対称性を有さない表面の効果が顕著となり、２次の非線形光学効果が観測される。したがって、本実施形態に係る共振器構造体４８のように、ナノ光ファイバ部１６を共通の共振光路に含む各共振器においては、四光波混合過程のみならず、パラメトリック下方変換についても有意に発生する。

[0069] 以上により、共振器構造体４８は第４共振周波数 ω_4 を有する出力光子ＯＦを生成する。図４の参照に戻ると、共振器構造体４８から出力された出力光子ＯＦはダイクロイックミラー１２を透過して量子デバイスＸに入射する。また、共振器構造体４８からの単一入力光子ＩＦ、および第２ポンプ光ＰＬ２は、ダイクロイックミラー１２において反射し光終端器１４に入射し消失する。

[0070] 本実施形態に係る量子波長変換器４６は、量子波長変換器２と同じく、単一光子源１０が生成する第１共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子ＩＦを、第４共振周波数 ω_4 を有する出力光子ＯＦに変換し、量子デバイスＸに入力することができる。また、量子波長変換器４６の共振器構造体４８は、量子波長変換器２の共振器構造体４と比較して、第２共振器３６を含まないため、含む共振器の個数が１つ少ない。したがって、量子波長変換器４６は、量子波長変換器２と比較して、より簡素に共振器構造体４８を構成でき、また、共振器構造体４８の設計をより容易とする。量子波長変換器４６は、パラメトリック下方変換を用いて光子の波長を変換するため、量子波長変換器２と比較して、共振器構造体４８に入力する単一光子をより長波長低周波数の光子に変換したい場合に有用である。

[0071] 〔実施形態3〕

＜パラメトリック上方変換を利用した波長変換＞

図6は、本実施形態に係る量子波長変換器50の概略平面図、および、当該概略平面図のうち、量子波長変換器50が備える共振器構造体52について拡大して示す概略図である。本実施形態に係る量子波長変換器50は、実施形態1に係る量子波長変換器2と比較して、共振器構造体4に代えて共振器構造体52を備える点においてのみ構成が異なる。

[0072] 本実施形態に係る共振器構造体52は、共振器構造体4と比較して、第3 F B G 26および第3共振器38を備えていない点において構成が異なる。このため、共振器構造体52は、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、および第4共振周波数 ω_4 をそれぞれ共振周波数として有する、第1共振器34、第2共振器36、および第4共振器40を含む。また、共振器構造体52は、第1共振器34、第2共振器36、および第4共振器40の共通の共振光路として、少なくともナノ光ファイバ部16を含む。

[0073] また、本実施形態において、レーザ光源6は、第2共振周波数 ω_2 を有する第1ポンプ光P L 1を共振器構造体52に入力し、第2ポンプ光P L 2を出射しない。したがって、本実施形態に係る共振器構造体52には、レーザ光源6からの第1ポンプ光P L 1と、単一光子源10が生成する単一入力光子I Fとが入力される。本実施形態において、共振器構造体52は、入力された第1ポンプ光P L 1、および入力単一光子I Fによるパラメトリック上方変換により、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子O Fを生成する。

[0074] 共振器構造体52による出力光子O Fの生成について、図7を参照してより詳細に説明する。図7は、共振器構造体52における光子の入出力を説明するための模式図52 Aと、共振器構造体52において生じる状態遷移を表すエネルギーダイヤグラムD 3である。

[0075] 図7の模式図52 Aに示す通り、共振器構造体52には、第1共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子I F、および第2共振周波数 ω_2 を有する第1ポンプ光P L 1が入力される。この結果、後述の方法により、模式図52 Aに示

す通り、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFが共振器構造体52から出力される。本実施形態においても、出力光子OFは単一光子である。

[0076] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、および第4共振周波数 ω_4 について、上述した式(1)および式(2)を、以下の式(5)および式(6)に読み替えた式が成立する。

[数11]

$$\Delta\omega = \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(5)$$

[数12]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(6) \end{aligned}$$

ここで、本実施形態においては、図7のエネルギーダイアグラムD3に示すように、ナノ光ファイバ部16における基底準位gと励起準位eとのエネルギー差を、第4共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとも略同一とする。なお、上記式(5)から、 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_4$ が成立するため、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差は、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーと第2共振周波数 ω_2 を有する光子のエネルギーとの合計値と略同一である。

[0077] 上記2式が成立する場合、ナノ光ファイバ部16においては、単一入力光子IF、および第1ポンプ光PL1によって、エネルギーダイアグラムD3に示す状態遷移が生じる。具体的には、単一入力光子IFおよび第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから励起準位eへの励起が生じる。結果として、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差に相当するエネルギーを有する、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFが生成される。

[0078] 以上により、ナノ光ファイバ部16においてはパラメトリック上方変換が発生する。換言すれば、本実施形態に係る共振器構造体52の各共振器は、共通の共振光路であるナノ光ファイバ部16におけるパラメトリック上方変換のエネルギー保存則および位相整合条件を満たしている。ここで、上記2式のうち、式(5)はパラメトリック上方変換のエネルギー保存則を表し、式(6)はパラメトリック上方変換の位相整合条件を表す。

[0079] ここで、パラメトリック上方変換は、パラメトリック下方変換と同じく 2 次の非線形光学効果であるため、反転対称性を有さない物質中において有意に発生する。しかしながら、構造として反転対称性を有さない表面の効果が顕著となるナノ光ファイバ部 16 においては、パラメトリック上方変換についても有意に発生する。

[0080] 以上により、共振器構造体 52 は第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF を生成する。図 6 の参照に戻ると、共振器構造体 52 から出力された出力光子 OF はダイクロイックミラー 12 を透過して量子デバイス X に入射する。また、共振器構造体 52 からの単一入力光子 IF、および第 1 ポンプ光 PL1 は、ダイクロイックミラー 12 において反射し光終端器 14 に入射し消失する。

[0081] 本実施形態に係る量子波長変換器 50 は、量子波長変換器 2 と同じく、単一光子源 10 が生成する第 1 共振周波数 ω_1 を有する単一入力光子 IF を、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF に変換し、量子デバイス X に入力することができる。また、量子波長変換器 50 の共振器構造体 52 は、量子波長変換器 2 の共振器構造体 4 と比較して、第 3 共振器 38 を含まないため、含む共振器の個数が 1 つ少ない。したがって、量子波長変換器 50 は、量子波長変換器 2 と比較して、より簡素に共振器構造体 52 を構成でき、また、共振器構造体 52 の設計をより容易とする。量子波長変換器 50 は、パラメトリック上方変換を用いて光子の波長を変換するため、量子波長変換器 2 および量子波長変換器 46 と比較して、共振器構造体 52 に入力する単一光子をより短波長高周波数の光子に変換したい場合に有用である。

[0082] [実施形態 4]

<ポンプ光の波長変換>

図 8 は、本実施形態に係る量子波長変換器 54 の概略平面図、および、当該概略平面図のうち、量子波長変換器 54 が備える共振器構造体 56 について拡大して示す概略図である。本実施形態に係る量子波長変換器 54 は、実施形態 1 に係る量子波長変換器 2 と比較して、共振器構造体 4 に代えて共振

器構造体 5 6 を備え、単一光子源 1 0 を備えていない点においてのみ構成が異なる。このため、量子波長変換器 5 4 は合流器 4 4 を備えていなくともよい。

[0083] 本実施形態に係る共振器構造体 5 6 は、共振器構造体 4 8 と比較して、各共振器の共振器長の大小関係を除いて同一の構成を有する。特に、本実施形態においては L_1 よりも L_3 の方が長い。例えば、共振器構造体 5 6 は、共振器構造体 4 において、第 2 F B G 2 4 を第 1 F B G 2 2 と同一とすることにより、第 1 共振器 3 4 を第 2 共振器 3 6 と同一としたものに相当する。この場合、本実施形態においては、第 2 共振周波数 ω_2 を第 1 共振周波数 ω_1 と同一とみなせる。

[0084] このため、共振器構造体 5 6 は、第 1 共振周波数 ω_1 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 をそれぞれ共振周波数として有する、第 1 共振器 3 4、第 3 共振器 3 8、および第 4 共振器 4 0 を含む。また、共振器構造体 5 6 は、第 1 共振器 3 4、第 3 共振器 3 8、および第 4 共振器 4 0 の共通の共振光路として、少なくともナノ光ファイバ部 1 6 を含む。

[0085] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 および第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光 P L 2 を共振器構造体 5 6 に入力する。なお、本実施形態において、第 2 共振周波数 ω_2 を第 1 共振周波数 ω_1 と同一とみなせるため、第 1 ポンプ光 P L 1 は第 1 共振周波数 ω_1 を有するとみなせる。本実施形態において、共振器構造体 5 6 は、入力された第 1 ポンプ光 P L 1、および第 2 ポンプ光 P L 2 による四光波混合過程により、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F を生成する。

[0086] 共振器構造体 5 6 による出力光子 O F の生成について、図 9 を参照してより詳細に説明する。図 9 は、共振器構造体 5 6 における光子の入出力を説明するための模式図 5 6 A と、共振器構造体 5 6 において生じる状態遷移を表すエネルギーダイアグラム D 4 である。

[0087] 図 9 の模式図 5 6 A に示す通り、共振器構造体 5 6 には、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1、および第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポ

ンプ光 PL 2 が入力される。この結果、後述の方法により、模式図 5 6 A に示す通り、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF が共振器構造体 5 6 から出力される。本実施形態においては、出力光子 OF は単一光子であってもよく、あるいは、共振器構造体 5 6 から略同時に射出した複数の光子を含んでもよい。

[0088] ここで、本実施形態においては、第 1 共振周波数 ω_1 、第 3 共振周波数 ω_3 、および第 4 共振周波数 ω_4 について、上述した式 (1) および式 (2) において、 $\omega_1 = \omega_2$ とした式が成立する。

[0089] ここで、本実施形態においては、図 9 のエネルギーダイアグラム D 4 に示すように、ナノ光ファイバ部 1 6 における基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差を、第 1 共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーの 2 倍と略同一とする。なお、上記式 (5) から、 $2\omega_1 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差は、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0090] 上記 2 式が成立する場合、ナノ光ファイバ部 1 6 においては、第 1 ポンプ光 PL 1、および第 2 ポンプ光 PL 2 によって、エネルギーダイアグラム D 4 に示す状態遷移が生じる。具体的には、第 1 ポンプ光 PL 1 によって、基底準位 g から、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差の半分のエネルギーまで励起が生じ、さらに第 1 ポンプ光 PL 1 による励起が連続して発生する。このため、第 1 ポンプ光 PL 1 によって、基底準位 g から励起準位 e への励起が生じる。この基底準位 g から励起準位 e への励起は、第 1 ポンプ光 PL 1 の強度に比例してより効率よく発生する。

[0091] また、当該励起と併せて、第 2 ポンプ光 PL 2 によって、励起準位 e から 2 準位の間へへの遷移が生じる。結果として、第 2 ポンプ光 PL 2 のエネルギーと、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差との差に相当するエネルギーを有する、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF が生成される。

[0092] 以上により、ナノ光ファイバ部 1 6 においては四光波混合過程が発生する

。換言すれば、本実施形態に係る共振器構造体 5 6 の各共振器は、共通の共振光路であるナノ光ファイバ部 1 6 における四光波混合過程のエネルギー保存則および位相整合条件を満たしている。なお、本実施形態における四光波混合過程は、実施形態 1 における四光波混合過程において、 $\omega_1 = \omega_2$ とした場合に相当する縮退四光波混合過程である。ただし、本実施形態における縮退四光波混合過程は、実施形態 1 における非縮退四光波混合過程と同じく、3 次の非線形光学効果であるため、光ファイバ 8 中において有意に発生する。

[0093] 以上により、共振器構造体 5 6 は第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF を生成する。図 8 の参照に戻ると、共振器構造体 5 6 から出力された出力光子 OF はダイクロイックミラー 1 2 を透過して量子デバイス X に入射する。また、共振器構造体 5 6 からの第 1 ポンプ光 PL 1、および第 2 ポンプ光 PL 2 は、ダイクロイックミラー 1 2 において反射し光終端器 1 4 に入射し消失する。

[0094] 本実施形態に係る量子波長変換器 5 4 は、レーザ光源 6 からのポンプ光の波長を変換することにより、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF を生成し、量子デバイス X に入力することができる。

[0095] また、量子波長変換器 5 4 の共振器構造体 5 6 は、量子波長変換器 2 の共振器構造体 4 と比較して、第 2 共振器 3 6 を含まないため、含む共振器の個数が 1 つ少ない。したがって、量子波長変換器 5 4 は、量子波長変換器 2 と比較して、より簡素に共振器構造体 5 6 を構成でき、また、共振器構造体 5 6 の設計をより容易とする。

[0096] [実施形態 5]

<二次高調波発生器>

図 1 0 は、本実施形態に係る量子波長変換器 5 8 の概略平面図、および、当該概略平面図のうち、量子波長変換器 5 8 が備える共振器構造体 6 0 について拡大して示す概略図である。本実施形態に係る量子波長変換器 5 8 は、前実施形態に係る量子波長変換器 5 4 と比較して、共振器構造体 5 6 に代え

て共振器構造体 60 を備える点においてのみ構成が異なる。

- [0097] 本実施形態に係る共振器構造体 60 は、共振器構造体 4 と比較して、第 2 F B G 24、第 3 F B G 26、第 2 共振器 36、および第 3 共振器 38 を備えていない点において構成が異なる。例えば、共振器構造体 60 は、共振器構造体 52 において、第 2 F B G 24 を第 1 F B G 22 と同一とすることにより、第 1 共振器 34 を第 2 共振器 36 と同一としたものに相当する。この場合、本実施形態においては、第 2 共振周波数 ω_2 を第 1 共振周波数 ω_1 と同一とみなせる。
- [0098] このため、共振器構造体 60 は、第 1 共振周波数 ω_1 、および第 4 共振周波数 ω_4 をそれぞれ共振周波数として有する、第 1 共振器 34、および第 4 共振器 40 を含む。また、共振器構造体 60 は、第 1 共振器 34、および第 4 共振器 40 の共通の共振光路として、少なくともナノ光ファイバ部 16 を含む。
- [0099] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 を共振器構造体 56 に入力する。なお、本実施形態において、第 2 共振周波数 ω_2 を第 1 共振周波数 ω_1 と同一とみなせるため、第 1 ポンプ光 P L 1 は第 1 共振周波数 ω_1 を有するとみなせる。本実施形態において、共振器構造体 60 は、入力された第 1 ポンプ光 P L 1 によるパラメトリック上方変換により、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F を生成する。
- [0100] 共振器構造体 60 による出力光子 O F の生成について、図 11 を参照してより詳細に説明する。図 11 は、共振器構造体 60 における光子の入出力を説明するための模式図 60 A と、共振器構造体 60 において生じる状態遷移を表すエネルギーダイヤグラム D 5 である。
- [0101] 図 11 の模式図 60 A に示す通り、共振器構造体 60 には、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 が入力される。この結果、後述の方法により、模式図 60 A に示す通り、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 O F が共振器構造体 60 から出力される。本実施形態においては、出力光子 O F は単一光子であってもよく、あるいは、共振器構造体 56 から略同時に射出した

複数の光子を含んでもよい。

[0102] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、および第4共振周波数 ω_4 について、上述した式(5)および式(6)において、 $\omega_1 = \omega_2$ とした式が成立する。

[0103] ここで、本実施形態においては、図11のエネルギーダイアグラムD5に示すように、ナノ光ファイバ部16における基底準位gと励起準位eとのエネルギー差を、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーの2倍と略同一とする。なお、上記式(5)から、 $2\omega_1 = \omega_4$ が成立するため、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差は、第4共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとも略同一である。

[0104] 上記2式が成立する場合、ナノ光ファイバ部16においては、第1ポンプ光PL1によって、エネルギーダイアグラムD5に示す状態遷移が生じる。具体的には、第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差の半分のエネルギーまで励起が生じる。ここで、第1ポンプ光PL1の強度が十分に強い場合には、さらに第1ポンプ光PL1による励起が連続して発生する。このため、第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから励起準位eへの励起が生じる。結果として、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差に相当するエネルギーを有する、第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFが生成される。

[0105] 以上により、ナノ光ファイバ部16においてはパラメトリック上方変換が発生する。換言すれば、本実施形態に係る共振器構造体60の各共振器は、共通の共振光路であるナノ光ファイバ部16におけるパラメトリック上方変換のエネルギー保存則および位相整合条件を満たしている。

[0106] 以上により、共振器構造体60は第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子OFを生成する。図10の参照に戻ると、共振器構造体60から出力された出力光子OFはダイクロイックミラー12を透過して量子デバイスXに入射する。また、共振器構造体60からの第1ポンプ光PL1は、ダイクロイックミラー12において反射し光終端器14に入射し消失する。

[0107] 本実施形態に係る量子波長変換器 58 は、レーザ光源 6 からのポンプ光の波長を変換することにより、第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子 OF を生成し、量子デバイス X に入力することができる。特に、第 4 共振周波数 ω_4 は第 1 共振周波数 ω_1 の 2 倍であるため、共振器構造体 60 において生じるパラメトリック上方変換は、いわゆる 2 次高調波発生である。換言すれば、量子波長変換器 58 は、レーザ光源 6 からのポンプ光の周波数の 2 倍の周波数を有する出力光子 OF を生成する、2 次高調波発生器として機能する。

[0108] また、量子波長変換器 58 の共振器構造体 60 は、量子波長変換器 2 の共振器構造体 4 と比較して、第 2 共振器 36 および第 3 共振器 38 を含まないため、含む共振器の個数が 2 つ少ない。したがって、量子波長変換器 58 は、量子波長変換器 2 と比較して、より簡素に共振器構造体 60 を構成でき、また、共振器構造体 60 の設計をより容易とする。

[0109] [実施形態 6]

<伝令付き単一光子源>

上述した各実施形態に係る共振器構造体を含む量子波長変換器を用いて、レーザ光源からのポンプ光の波長変換を行うことにより、光子対の生成および伝令付き単一光子の生成を行うことができる。以下、量子波長変換器を備えた、本実施形態に係る伝令付き単一光子源について説明する。図 12 は、本実施形態に係る伝令付き単一光子源 62 の概略平面図である。

[0110] 図 12 に示すように、伝令付き単一光子源 62 は、量子波長変換器 64 と、ダイクロイックミラー 66 と、単一光子検出器 68 と、第 1 出力光ファイバ 70 と、第 2 出力光ファイバ 72 とを備える。量子波長変換器 64 は、実施形態 1 に係る量子波長変換器 2 と比較して、単一光子源 10 を備えていない点においてのみ構成が異なる。

[0111] ただし、本実施形態において、ダイクロイックミラー 12 は、第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子に加えて、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子も透過させる。さらに、本実施形態に係るダイクロイックミラー 12 は、第 1 共振周波数 ω_1 および第 2 共振周波数 ω_2 を有する光子を反射する。このため、光終端

器 1 4 には、ダイクロイックミラー 1 2 において反射した第 1 共振周波数 ω_1 および第 2 共振周波数 ω_2 を有する光子が入射する。

[0112] ダイクロイックミラー 6 6 は、ダイクロイックミラー 1 2 と比較して、第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子を透過させ、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子を反射する点においてのみ構成が異なる。ダイクロイックミラー 6 6 は、ダイクロイックミラー 1 2 を透過した光子が入射するように配置される。

[0113] 単一光子検出器 6 8 は、入射した単一光子を検出するための素子である。単一光子検出器 6 8 は、ダイクロイックミラー 6 6 において反射した光子が入射するように配置される。このため、単一光子検出器 6 8 は、ダイクロイックミラー 6 6 において反射した第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子を検出する。

[0114] 本実施形態において、量子デバイス X には、ダイクロイックミラー 6 6 を透過した光子が入射するように配置される。このため、単一光子検出器 6 8 は、ダイクロイックミラー 1 2 を透過した第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子が入射する。

[0115] 第 1 出力光ファイバ 7 0 および第 2 出力光ファイバ 7 2 は、単一モードの光ファイバであり、光ファイバ 8 と同一の構成を備えていてもよい。第 1 出力光ファイバ 7 0 は、ダイクロイックミラー 6 6 において反射した光子が入射するように配置され、第 2 出力光ファイバ 7 2 は、ダイクロイックミラー 6 6 を透過した光子が入射するように配置される。

[0116] したがって、第 1 出力光ファイバ 7 0 は、ダイクロイックミラー 6 6 において反射した第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子を、単一光子検出器 6 8 まで伝搬させる。また、第 2 出力光ファイバ 7 2 は、ダイクロイックミラー 6 6 を透過した第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子を、量子デバイス X まで伝搬させる。

[0117] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 および第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 2 ポンプ光 P L 2 を共振器構造体 4 に入力する。

[0118] 本実施形態において、共振器構造体4は、後述の方法により、入力されたポンプ光による四光波混合過程により、第3共振周波数 ω_3 を有する第1出力光子OF1および第4共振周波数 ω_4 を有する第2出力光子OF2を生成する。換言すれば、共振器構造体4は、入力されたポンプ光から、互いに波長の異なる光子対を生成する。本実施形態に係るレーザ光源6が出射する第1ポンプ光PL1と第2ポンプ光PL2とは、共振器構造体4の各共振器の光子寿命をパルス長とするパルス波が連続したものとみなすことができる。ここで、本実施形態においては、第1ポンプ光PL1と第2ポンプ光PL2とのそれぞれの一つのパルス波から、上記光子対が一つ生成される確率を、1よりも十分に小さい p とする。なお、レーザ光源6は、第1ポンプ光PL1および第2ポンプ光PL2として、各共振周波数を有するパルス波を断続的に出射してもよい。

[0119] 共振器構造体4における光子対の生成について、図13を参照してより詳細に説明する。図13は、共振器構造体4における光子の入出力を説明するための模式図4Bと、共振器構造体4において生じる状態遷移を表すエネルギーダイアグラムD6である。

[0120] 図13の模式図4Bに示す通り、共振器構造体4には、第1共振周波数 ω_1 を有する第1ポンプ光PL1、および第2共振周波数 ω_2 を有する第2ポンプ光PL2が入力される。この結果、後述の方法により、模式図4Bに示す通り、第3共振周波数 ω_3 を有する第1出力光子OF1および第4共振周波数 ω_4 を有する第2出力光子OF2が共振器構造体4から出力される。

[0121] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、第2共振周波数 ω_2 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 について、上述した式(1)および式(2)が成立する。本実施形態においても、ナノ光ファイバ部16において仮想的に基底準位 g と励起準位 e とを設定する。本実施形態において、図13のエネルギーダイアグラムD6に示すように、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差は、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーと第2共振周波数 ω_2 を有する光子のエネルギーとの合計値と略同一とする。

なお、上記式（１）から、 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位 g と励起準位 e とのエネルギー差は、第３共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第４共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0122] 上記２式が成立する場合、ナノ光ファイバ部１６においては、第１ポンプ光 $PL1$ 、および第２ポンプ光 $PL2$ によって、エネルギーダイアグラム $D6$ に示す状態遷移が生じる。具体的には、第１ポンプ光 $PL1$ および第２ポンプ光 $PL2$ によって、基底準位 g から励起準位 e への励起が生じる。

[0123] また、当該励起と併せて、励起準位 e から基底準位 g への状態遷移が生じる。ここで、共振器構造体４は、共振周波数として第３共振周波数 ω_3 を有する第３共振器３８と、共振周波数として第４共振周波数 ω_4 を有する第４共振器４０とを有する。このため、エネルギーダイアグラム $D6$ に示すように、ナノ光ファイバ部１６においては、はじめに励起準位 e から基底準位 g に向かって第３共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギー分だけ状態遷移が生じる。さらに、第４共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギー分だけ状態遷移が生じることにより、励起準位 e から基底準位 g への状態遷移が生じる。

[0124] したがって、本実施形態に係るナノ光ファイバ部１６においては、エネルギーダイアグラム $D6$ に示すように四光波混合過程が有意に発生する。上述した四光波混合過程に伴い、共振器構造体４の第３共振器３８には、第３共振器３８と結合し第３共振周波数 ω_3 を有する光子が有意に生成される。また、上述した四光波混合過程に伴い、共振器構造体４の第４共振器４０には、第４共振器４０と結合し第４共振周波数 ω_4 を有する光子が、上述した第３共振周波数 ω_3 を有する光子と略同時に生成される。

[0125] したがって、共振器構造体４において上述した四光波混合過程が生じた場合、第３共振器３８からは第１出力光子 $OF1$ が出射し、第４共振器４０からは第２出力光子 $OF2$ が出射する。図１２の参照に戻ると、共振器構造体４から出射した第１出力光子 $OF1$ は、ダイクロイックミラー１２を透過し、ダイクロイックミラー６６において反射することにより、第１出力光ファ

イバ70を伝搬し、単一光子検出器68によって検出される。また、共振器構造体4から出射した第2出力光子OF2は、ダイクロイックミラー12およびダイクロイックミラー66を共に透過することにより、第2出力光ファイバ72を伝搬し、量子デバイスXに入射する。

[0126] ここで、上述した通り、四光波混合過程により各ポンプ光の一つのパルス波から一つの光子対が生成される確率は p である。このため、四光波混合過程により各ポンプ光から二つの光子対が同時に生成される確率は p の二乗となる。このため、単一光子検出器68が光子を検出した際に、二つの光子が量子デバイスXに入射する確率は、1よりも十分に小さくなる。換言すれば、単一光子検出器68が光子を検出した際、量子デバイスXに入射する光子は、1に十分近い確率にて単一光子である。具体的に、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した際に、第2出力光子OF2が複数の光子を含む確率は、1よりも十分に小さい。換言すれば、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した際に、第2出力光子OF2は、1に十分近い確率にて、単一光子である。

[0127] 上述した理由から、本実施形態において、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した場合、ほぼ確実に第2出力光子OF2が量子デバイスXに入射している。加えて、第2出力光子OF2は、1に十分近い確率にて単一光子である。ゆえに、伝令付き単一光子源62は、アイドラー光子である第1出力光子OF1の検出を伝令として、シグナル光子である第2出力光子OF2を生成する伝令付き単一光子源として機能する。量子デバイスXは、例えば、量子暗号通信器等、伝令が付いた単一光子を必要とする量子通信器を含むデバイスであってもよい。

[0128] 本実施形態に係る伝令付き単一光子源62は、アイドラー光子である第1出力光子OF1と、シグナル光子である第2出力光子OF2とを生成に、共振器構造体4を含む量子波長変換器64を用いる。このため、伝令付き単一光子源62は、量子波長変換器2と同一の理由から、光ファイバを含む量子デバイスに組み込んだ場合においても、当該量子デバイスの構造の複雑化を

低減する。

[0129] 〔実施形態 7〕

＜縮退四光波混合過程を用いる伝令付き単一光子源＞

図 1 4 は、本実施形態に係る伝令付き単一光子源 7 4 の概略平面図である。図 1 2 に示すように、伝令付き単一光子源 7 4 は、伝令付き単一光子源 6 2 と比較して、量子波長変換器 6 4 に代えて、実施形態 4 に係る量子波長変換器 5 4 を備える点においてのみ構成が異なる。ただし、本実施形態において、量子波長変換器 5 4 が備えるダイクロイックミラー 1 2 は、第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子に加えて、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子も透過させ、第 1 共振周波数 ω_1 および第 2 共振周波数 ω_2 を有する光子は反射する。

[0130] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 を共振器構造体 4 に入力する。本実施形態において、共振器構造体 4 は、後述の方法により、入力されたポンプ光による四光波混合過程により、第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 出力光子 O F 1 および第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 出力光子 O F 2 を生成する。

[0131] したがって、本実施形態においては、前実施形態において、第 2 共振周波数 ω_2 を第 1 共振周波数 ω_1 と同一としたものとみなせる。また、本実施形態に係る伝令付き単一光子源 7 4 は、伝令付き単一光子源 6 2 において、第 2 共振器 3 6 を第 1 共振器 3 4 と同一とし、第 2 ポンプ光 P L 2 を第 1 ポンプ光 P L 1 と同一としたものに相当する。

[0132] 共振器構造体 5 6 における光子対の生成について、図 1 5 を参照してより詳細に説明する。図 1 5 は、共振器構造体 5 6 における光子の入出力を説明するための模式図 5 6 B と、共振器構造体 5 6 において生じる状態遷移を表すエネルギーダイヤグラム D 7 である。

[0133] 図 1 5 の模式図 5 6 B に示す通り、共振器構造体 5 6 には、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 が入力される。この結果、後述の方法により、模式図 5 6 B に示す通り、第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 出力光子 O F 1 および第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 出力光子 O F 2 が共振器構造体 4 か

ら出力される。

[0134] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 について、上述した式(1)および式(2)において、 $\omega_1 = \omega_2$ とした式が成立する。なお、本実施形態においては、ナノ光ファイバ部16における基底準位gと励起準位eとのエネルギー差を、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーの2倍と略同一とする。なお、上記式(1)から、 $2\omega_1 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差は、第3共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第4共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0135] 上記2式が成立する場合、ナノ光ファイバ部16においては、第1ポンプ光PL1によって、エネルギーダイアグラムD7に示す状態遷移が生じる。具体的には、第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差の半分のエネルギーまで励起が生じる。ここで、第1ポンプ光PL1の強度が十分に強い場合には、さらに第1ポンプ光PL1による励起が連続して発生する。このため、第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから励起準位eへの励起が生じる。

[0136] また、当該励起と併せて、励起準位eから基底準位gへの状態遷移が生じる。本実施形態においても、前実施形態において説明した理由と同一の理由から、エネルギーダイアグラムD7に示すように四光波混合過程が有意に発生する。本実施形態に係るナノ光ファイバ部16において生じる四光波混合過程は、前実施形態に係るナノ光ファイバ部16において生じる四光波混合過程において、 $\omega_1 = \omega_2$ とした縮退四光波混合過程に相当する。当該縮退四光波混合過程に伴い、共振器構造体4の第3共振器38には第3共振周波数 ω_3 を有する光子が、共振器構造体4の第4共振器40には第4共振周波数 ω_4 を有する光子が略同時に生成される。

[0137] 第1ポンプ光PL1は、共振器構造体4の各共振器の光子寿命をパルス長とするパルス波が連続したものとみなすことができる。ここで、本実施形態においては、第1ポンプ光PL1の一つのパルス波から光子対が一つ生成さ

れる確率を、1よりも十分に小さい p とする。この場合、本実施形態においても、第1ポンプ光 $PL1$ から四光波混合過程により二つの光子対が同時に生成される確率は p の二乗となる。このため、単一光子検出器68が光子を検出した際に、二つの光子が量子デバイス X に入射する確率は、1よりも十分に小さくなる。換言すれば、本実施形態においても、単一光子検出器68が光子を検出した際、量子デバイス X に入射する光子は、1に十分近い確率にて単一光子である。具体的に、単一光子検出器68が第1出力光子 $OF1$ を検出した際に、第2出力光子 $OF2$ が複数の光子を含む確率は1よりも十分に小さい。換言すれば、単一光子検出器68が第1出力光子 $OF1$ を検出した際に、第2出力光子 $OF2$ は、1に十分近い確率にて単一光子である。

[0138] したがって、共振器構造体4において上述した四光波混合過程が生じた場合、第3共振器38からは第1出力光子 $OF1$ が出射し、第4共振器40からは第2出力光子 $OF2$ が出射する。図14の参照に戻ると、共振器構造体56から出射した第1出力光子 $OF1$ は、単一光子検出器68によって検出され、また、共振器構造体56から出射した第2出力光子 $OF2$ は、量子デバイス X に入射する。

[0139] 本実施形態においても、前実施形態において説明した理由と同一の理由から、共振器構造体56から光子対が生成され、単一光子検出器68が第1出力光子 $OF1$ を検出した場合、量子デバイス X にはほぼ確実に第2出力光子 $OF2$ が入力される。加えて、本実施形態においても、第2出力光子 $OF2$ は、は、1に十分近い確率にて単一光子である。したがって、伝令付き単一光子源74は、アイドラー光子である第1出力光子 $OF1$ の検出を伝令として、シグナル光子である第2出力光子 $OF2$ を生成する伝令付き単一光子源として機能する。

[0140] 本実施形態に係る伝令付き単一光子源74は、アイドラー光子である第1出力光子 $OF1$ と、シグナル光子である第2出力光子 $OF2$ とを生成に、共振器構造体56を含む量子波長変換器54を用いる。このため、伝令付き単一光子源74は、量子波長変換器2と同一の理由から、光ファイバを含む量

子デバイスに組み込んだ場合においても、当該量子デバイスの構造の複雑化を低減する。

[0141] また、伝令付き単一光子源 7 4 の共振器構造体 5 6 は、伝令付き単一光子源 6 2 の共振器構造体 4 と比較して、第 2 共振器 3 6 を含まないため、含む共振器の個数が 1 つ少ない。したがって、伝令付き単一光子源 7 4 は、伝令付き単一光子源 6 2 と比較して、より簡素に共振器構造体 5 6 を構成でき、また、共振器構造体 5 6 の設計をより容易とする。

[0142] [実施形態 8]

＜パラメトリック下方変換を用いる伝令付き単一光子源＞

図 1 6 は、本実施形態に係る伝令付き単一光子源 7 6 の概略平面図である。図 1 6 に示すように、伝令付き単一光子源 7 6 は、伝令付き単一光子源 6 2 と比較して、量子波長変換器 6 4 に代えて、量子波長変換器 7 8 を備える点において構成が異なる。量子波長変換器 7 8 は、実施形態 2 に係る量子波長変換器 4 6 と比較して、単一光子源 1 0 を備えていない点においてのみ構成が異なる。ただし、本実施形態において、量子波長変換器 7 8 が備えるダイクロイックミラー 1 2 は、第 4 共振周波数 ω_4 を有する光子に加えて、第 3 共振周波数 ω_3 を有する光子も透過させ、第 1 共振周波数 ω_1 および第 2 共振周波数 ω_2 を有する光子は反射する。

[0143] また、本実施形態において、レーザ光源 6 は、第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光 P L 1 を共振器構造体 4 に入力する。本実施形態において、共振器構造体 4 8 は、後述の方法により、入力されたポンプ光によるパラメトリック下方変換により、第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 出力光子 O F 1 および第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 出力光子 O F 2 を生成する。

[0144] 共振器構造体 4 8 における光子対の生成について、図 1 7 を参照してより詳細に説明する。図 1 7 は、共振器構造体 4 8 における光子の入出力を説明するための模式図 4 8 B と、共振器構造体 4 8 において生じる状態遷移を表すエネルギーダイヤグラム D 8 である。

[0145] 図 1 7 の模式図 4 8 B に示す通り、共振器構造体 4 8 には、第 1 共振周波

数 ω_1 を有する第1ポンプ光PL1が入力される。この結果、後述の方法により、模式図48Bに示す通り、第3共振周波数 ω_3 を有する第1出力光子OF1および第4共振周波数 ω_4 を有する第2出力光子OF2が共振器構造体4から出力される。

[0146] ここで、本実施形態においては、第1共振周波数 ω_1 、第3共振周波数 ω_3 、および第4共振周波数 ω_4 について、上述した式(3)および式(4)が成立する。なお、本実施形態においては、ナノ光ファイバ部16における基底準位gと励起準位eとのエネルギー差を、第1共振周波数 ω_1 を有する光子のエネルギーと略同一とする。なお、上記式(3)から、 $\omega_1 = \omega_3 + \omega_4$ が成立するため、基底準位gと励起準位eとのエネルギー差は、第3共振周波数 ω_3 を有する光子のエネルギーと第4共振周波数 ω_4 を有する光子のエネルギーとの合計値とも略同一である。

[0147] 上記2式が成立する場合、ナノ光ファイバ部16においては、第1ポンプ光PL1によって、エネルギーダイアグラムD7に示す状態遷移が生じる。具体的には、第1ポンプ光PL1によって、基底準位gから励起準位eへの励起が生じる。

[0148] また、当該励起と併せて、励起準位eから基底準位gへの状態遷移が生じる。本実施形態においても、前実施形態において説明した理由と同一の理由から、エネルギーダイアグラムD8に示すようにパラメトリック下方変換が有意に発生する。上述したパラメトリック下方変換に伴い、共振器構造体4の第3共振器38には第3共振周波数 ω_3 を有する光子が、共振器構造体4の第4共振器40には第4共振周波数 ω_4 を有する光子が略同時に生成される。

[0149] 第1ポンプ光PL1は、共振器構造体4の各共振器の光子寿命をパルス長とするパルス波が連続したものとみなすことができる。ここで、本実施形態においては、第1ポンプ光PL1の一つのパルス波から光子対が一つ生成される確率を、1よりも十分に小さいpとする。この場合、本実施形態においても、第1ポンプ光PL1からパラメトリック下方変換により二つの光子対が同時に生成される確率はpの二乗となる。このため、単一光子検出器68

が光子を検出した際に、二つの光子が量子デバイスXに入射する確率は、1よりも十分に小さくなる。換言すれば、本実施形態においても、単一光子検出器68が光子を検出した際、量子デバイスXに入射する光子は、1に十分近い確率にて単一光子である。具体的に、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した際に、第2出力光子OF2が複数の光子を含む確率は、1よりも十分に小さい。換言すれば、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した際に、第2出力光子OF2は、1に十分近い確率にて単一光子である。

[0150] したがって、共振器構造体4において上述したパラメトリック下方変換が生じた場合、第3共振器38からは第1出力光子OF1が出射し、第4共振器40からは第2出力光子OF2が出射する。図16の参照に戻ると、共振器構造体48から出射した第1出力光子OF1は、単一光子検出器68によって検出され、また、共振器構造体48から出射した第2出力光子OF2は、量子デバイスXに入射する。

[0151] 本実施形態においても、前実施形態において説明した理由と同一の理由から、共振器構造体56から光子対が生成され、単一光子検出器68が第1出力光子OF1を検出した場合、量子デバイスXにはほぼ確実に第2出力光子OF2が入力される。加えて、本実施形態においても、第2出力光子OF2は、1に十分近い確率にて単一光子である。したがって、伝令付き単一光子源76は、アイドラー光子である第1出力光子OF1の検出を伝令として、シグナル光子である第2出力光子OF2を生成する伝令付き単一光子源として機能する。

[0152] 本実施形態に係る伝令付き単一光子源76は、アイドラー光子である第1出力光子OF1と、シグナル光子である第2出力光子OF2とを生成に、共振器構造体48を含む量子波長変換器78を用いる。このため、伝令付き単一光子源76は、量子波長変換器2と同一の理由から、光ファイバを含む量子デバイスに組み込んだ場合においても、当該量子デバイスの構造の複雑化を低減する。

[0153] また、伝令付き単一光子源 7 6 の共振器構造体 4 8 は、伝令付き単一光子源 6 2 の共振器構造体 4 と比較して、第 2 共振器 3 6 を含まないため、含む共振器の個数が 1 つ少ない。したがって、伝令付き単一光子源 7 6 は、伝令付き単一光子源 6 2 と比較して、より簡素に共振器構造体 4 8 を構成でき、また、共振器構造体 4 8 の設計をより容易とする。

[0154] (付記事項)

上述した実施形態の全部または一部は、以下のように表現することもできる。

[0155] (態様 1)

少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、少なくとも 1 つ以上の周波数を有するポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、

前記複数の共振器は、第 1 共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第 1 共振器と、第 2 共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第 2 共振器と、第 3 共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第 3 共振器と、前記第 1 共振周波数 ω_1 、前記第 2 共振周波数 ω_2 、および前記第 3 共振周波数 ω_3 の何れとも異なる第 4 共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第 4 共振器とを含み、

n_i を第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数13]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(1)$$

[数14]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

上記 (1) 式および上記 (2) 式が成立する量子波長変換器。

[0156] (態様 2)

前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 1 ポンプ光と、前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光とを、前記光ファイバに入力し、

前記第 4 共振器から前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる態様 1 に記載の量子波長変換器。

[0157] (態様 3)

前記第 1 共振周波数 ω_1 が前記第 2 共振周波数 ω_2 と同一であり、

前記第 1 共振器が前記第 2 共振器と同一であり、

前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光と、前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光とを、前記光ファイバに入力し、

前記第 4 共振器から前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる態様 1 に記載の量子波長変換器。

[0158] (態様 4)

少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、

前記複数の共振器は、第 1 共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第 1 共振器と、第 3 共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第 3 共振器と、前記第 1 共振周波数 ω_1 および第 3 共振周波数 ω_3 の双方と異なる第 4 共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第 4 共振器とを含み、

n_i を第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数15]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 = 0 \quad \cdots(3)$$

[数16]

$$\begin{aligned}\Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(4)\end{aligned}$$

上記（３）式および上記（４）式が成立する量子波長変換器。

[0159] （態様５）

前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第１共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第３共振周波数 ω_3 を有する前記ポンプ光を前記光ファイバに入力し、

前記第４共振器から前記第４共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる態様４に記載の量子波長変換器。

[0160] （態様６）

少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、

前記複数の共振器は、第１共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第１共振器と、第２共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第２共振器と、前記第１共振周波数 ω_1 および前記第２共振周波数 ω_2 の双方と異なる第４共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第４共振器とを含み、

n_i を第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数17]

$$\Delta\omega = \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(5)$$

[数18]

$$\begin{aligned}\Delta\kappa &= \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(6)\end{aligned}$$

上記（５）式および上記（６）式が成立する量子波長変換器。

[0161] （態様７）

前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第１共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第２共振周波数 ω_2 を有する前記ポンプ光を前記光ファイバに入力し、

前記第４共振器から前記第４共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる態様６に記載の量子波長変換器。

[0162] （態様８）

前記第１共振周波数 ω_1 が前記第２共振周波数 ω_2 と同一であり、

前記第１共振器が前記第２共振器と同一であり、

前記レーザ光源が、前記第１共振周波数 ω_1 を有する第１ポンプ光を、前記光ファイバに入力し、

前記第４共振器から前記第４共振周波数 ω_4 を有する態様６に記載の量子波長変換器。

[0163] （態様９）

前記光ファイバは、ナノ光ファイバ部と、前記ナノ光ファイバ部よりも径が大きく、前記ナノ光ファイバ部の両端とテーパ部を介して接続する両端部とを含み、前記共振光路の少なくとも一部が前記ナノ光ファイバ部に位置する態様１から８の何れか１項に記載の量子波長変換器。

[0164] （態様１０）

前記複数の共振器は、それぞれの共振周波数を反射帯域に含む一対のファイバブラッグ格子をそれぞれ有する態様１から８の何れか１項に記載の量子波長変換器。

[0165] （態様１１）

少なくとも一つの前記ファイバブラッグ格子は、他の何れかの前記ファイバブラッグ格子と同一である態様１０に記載の量子波長変換器。

[0166] （態様１２）

態様 1 に記載の量子波長変換器と、

前記光ファイバと接続し、前記第 3 共振器から出射した前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 単一出力光子を伝搬させる第 1 出力光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、前記第 4 共振器から出射した前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 単一出力光子を伝搬させる第 2 出力光ファイバと、

前記第 1 出力光ファイバと接続し、前記第 1 単一出力光子を検出する単一光子検出器とをさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光と、前記第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 2 ポンプ光とを、前記光ファイバに入力する伝令付き単一光子源。

[0167] (態様 1 3)

前記第 1 共振周波数 ω_1 が前記第 2 共振周波数 ω_2 と同一であり、

前記第 1 共振器が前記第 2 共振器と同一であり、

前記第 2 ポンプ光が前記第 1 ポンプ光と同一である態様 1 2 に記載の伝令付き単一光子源。

[0168] (態様 1 4)

態様 4 に記載の量子波長変換器と、

前記光ファイバと接続し、前記第 3 共振器から出射した前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 単一出力光子を伝搬させる第 1 出力光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、前記第 4 共振器から出射した前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 単一出力光子を伝搬させる第 2 出力光ファイバと、

前記第 1 出力光ファイバと接続し、前記第 1 単一出力光子を検出する単一光子検出器とをさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する前記ポンプ光を前記光ファイバに入力する伝令付き単一光子源。

[0169] (態様 1 5)

前記光ファイバは、ナノ光ファイバ部と、前記ナノ光ファイバ部よりも径が大きく、前記ナノ光ファイバ部の両端とテーパ部を介して接続する両端

部とを含み、前記共振光路の少なくとも一部が前記ナノ光ファイバ部に位置する態様 1 2 から 1 4 の何れか 1 項に記載の伝令付き単一光子源。

[0170] (態様 1 6)

前記複数の共振器は、それぞれの共振周波数を反射帯域に含む一対のファイバブラッグ格子をそれぞれ有する態様 1 2 から 1 4 の何れか 1 項に記載の伝令付き単一光子源。

[0171] (態様 1 7)

少なくとも一つの前記ファイバブラッグ格子は、他の何れかの前記ファイバブラッグ格子と同一である態様 1 6 に記載の伝令付き単一光子源。

[0172] 本開示は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本開示の技術的範囲に含まれる。さらに、各実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を組み合わせることにより、新しい技術的特徴を形成することができる。

符号の説明

- [0173] 2 量子波長変換器
 4 共振器構造体
 6 レーザ光源
 8 光ファイバ
 1 6 ナノ光ファイバ部
 1 8 テーパー部
 2 0 共通 F B G
 2 2 第 1 F B G
 2 4 第 2 F B G
 2 6 第 3 F B G
 2 8 第 4 F B G
 3 4 第 1 共振器
 3 6 第 2 共振器

- 3 8 第3共振器
- 4 0 第4共振器
- 6 2 伝令付き単一光子源
- 6 8 単一光子検出器
- 7 0 第1出力光ファイバ
- 7 2 第2出力光ファイバ

請求の範囲

[請求項1] 少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、少なくとも1つ以上の周波数を有するポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、

前記複数の共振器は、第1共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第1共振器と、第2共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第2共振器と、第3共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第3共振器と、前記第1共振周波数 ω_1 、前記第2共振周波数 ω_2 、および前記第3共振周波数 ω_3 の何れとも異なる第4共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第4共振器とを含み、

n_i を第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数1]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(1)$$

[数2]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(2) \end{aligned}$$

上記(1)式および上記(2)式が成立する量子波長変換器。

[請求項2] 前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第1共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第2共振周波数 ω_2 を有する第1ポンプ光と、前記第3共振周波数 ω_3 を有する第2ポンプ光とを、前記光ファイバに入力し、

前記第4共振器から前記第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる請求項1に記載の量子波長変換器。

[請求項3] 前記第 1 共振周波数 ω_1 が前記第 2 共振周波数 ω_2 と同一であり、
 前記第 1 共振器が前記第 2 共振器と同一であり、
 前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光と、前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 2 ポンプ光とを、前記光ファイバに入力し、
 前記第 4 共振器から前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する出力光子を出射させる請求項 1 に記載の量子波長変換器。

[請求項4] 少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、
 前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、
 前記複数の共振器は、第 1 共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第 1 共振器と、第 3 共振周波数 ω_3 を共振周波数に有する第 3 共振器と、前記第 1 共振周波数 ω_1 および第 3 共振周波数 ω_3 の双方と異なる第 4 共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第 4 共振器とを含み、
 n_i を第 i 共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数3]

$$\Delta\omega = \omega_3 + \omega_4 - \omega_1 = 0 \quad \dots(3)$$

[数4]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 + \gamma P \\ &= n_3 \frac{\omega_3}{c} + n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(4) \end{aligned}$$

上記 (3) 式および上記 (4) 式が成立する量子波長変換器。

[請求項5] 前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、
 前記レーザ光源が、前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する前記ポンプ光

を前記光ファイバに入力し、

前記第4共振器から前記第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子を射出させる請求項4に記載の量子波長変換器。

[請求項6] 少なくとも一部に共通の共振光路を有する複数の共振器を内部に含む光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、ポンプ光を前記光ファイバに入力するレーザ光源とを備え、

前記複数の共振器は、第1共振周波数 ω_1 を共振周波数に有する第1共振器と、第2共振周波数 ω_2 を共振周波数に有する第2共振器と、前記第1共振周波数 ω_1 および前記第2共振周波数 ω_2 の双方と異なる第4共振周波数 ω_4 を共振周波数に有する第4共振器とを含み、

n_i を第*i*共振周波数 ω_i の光に対する前記光ファイバの内部における実効屈折率、 c を光速、 γ を前記光ファイバの非線形係数、 P を前記ポンプ光の強度として、

[数5]

$$\Delta\omega = \omega_4 - \omega_1 - \omega_2 = 0 \quad \dots(5)$$

[数6]

$$\begin{aligned} \Delta\kappa &= \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 + \gamma P \\ &= n_4 \frac{\omega_4}{c} - n_1 \frac{\omega_1}{c} - n_2 \frac{\omega_2}{c} + \gamma P = 0 \quad \dots(6) \end{aligned}$$

上記(5)式および上記(6)式が成立する量子波長変換器。

[請求項7] 前記光ファイバと接続し、前記複数の共振器に前記第1共振周波数 ω_1 を有する入力光子を前記光ファイバに入力する単一光子源をさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第2共振周波数 ω_2 を有する前記ポンプ光を前記光ファイバに入力し、

前記第4共振器から前記第4共振周波数 ω_4 を有する出力光子を射出させる請求項6に記載の量子波長変換器。

[請求項8] 前記第1共振周波数 ω_1 が前記第2共振周波数 ω_2 と同一であり、

前記第 1 共振器が前記第 2 共振器と同一であり、

前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光を、前記光ファイバに入力し、

前記第 4 共振器から前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する請求項 6 に記載の量子波長変換器。

[請求項 9] 前記光ファイバは、ナノ光ファイバ部と、前記ナノ光ファイバ部よりも径が大きく、前記ナノ光ファイバ部の両端とテーパ部を介して接続する両端部とを含み、前記共振光路の少なくとも一部が前記ナノ光ファイバ部に位置する請求項 1 から 8 の何れか 1 項に記載の量子波長変換器。

[請求項 10] 前記複数の共振器は、それぞれの共振周波数を反射帯域に含む一対のファイバブラッグ格子をそれぞれ有する請求項 1 から 8 の何れか 1 項に記載の量子波長変換器。

[請求項 11] 少なくとも一つの前記ファイバブラッグ格子は、他の何れかの前記ファイバブラッグ格子と同一である請求項 10 に記載の量子波長変換器。

[請求項 12] 請求項 1 に記載の量子波長変換器と、
前記光ファイバと接続し、前記第 3 共振器から出射した前記第 3 共振周波数 ω_3 を有する第 1 単一出力光子を伝搬させる第 1 出力光ファイバと、

前記光ファイバと接続し、前記第 4 共振器から出射した前記第 4 共振周波数 ω_4 を有する第 2 単一出力光子を伝搬させる第 2 出力光ファイバと、

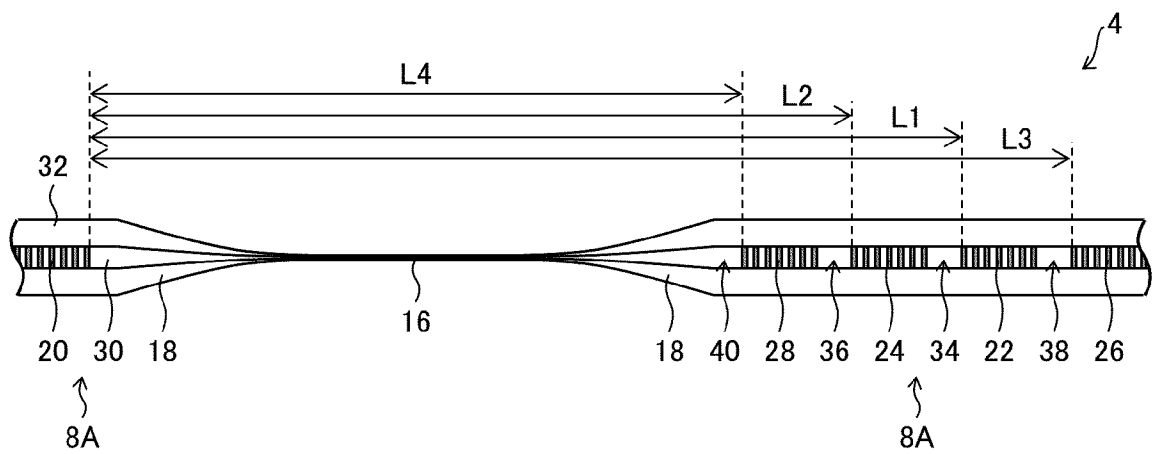
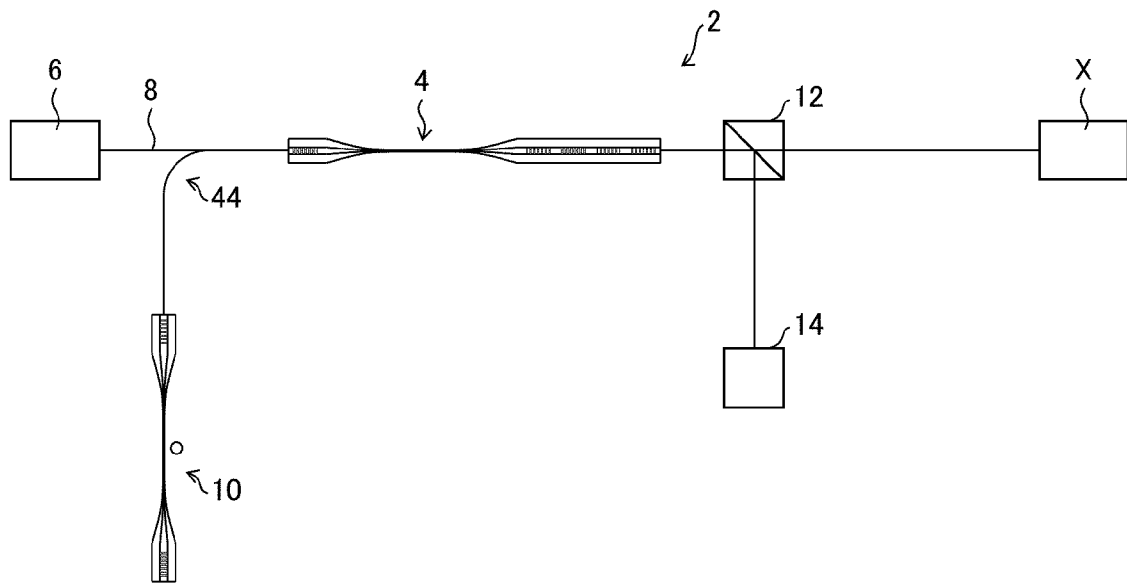
前記第 1 出力光ファイバと接続し、前記第 1 単一出力光子を検出する単一光子検出器とをさらに備え、

前記レーザ光源が、前記第 1 共振周波数 ω_1 を有する第 1 ポンプ光と、前記第 2 共振周波数 ω_2 を有する第 2 ポンプ光とを、前記光ファイバに入力する伝令付き単一光子源。

- [請求項13] 前記第1共振周波数 ω_1 が前記第2共振周波数 ω_2 と同一であり、
前記第1共振器が前記第2共振器と同一であり、
前記第2ポンプ光が前記第1ポンプ光と同一である請求項12に記載の伝令付き単一光子源。
- [請求項14] 請求項4に記載の量子波長変換器と、
前記光ファイバと接続し、前記第3共振器から出射した前記第3共振周波数 ω_3 を有する第1単一出力光子を伝搬させる第1出力光ファイバと、
前記光ファイバと接続し、前記第4共振器から出射した前記第4共振周波数 ω_4 を有する第2単一出力光子を伝搬させる第2出力光ファイバと、
前記第1出力光ファイバと接続し、前記第1単一出力光子を検出する単一光子検出器とをさらに備え、
前記レーザ光源が、前記第1共振周波数 ω_1 を有する前記ポンプ光を前記光ファイバに入力する伝令付き単一光子源。
- [請求項15] 前記光ファイバは、ナノ光ファイバ部と、前記ナノ光ファイバ部よりも径が大きく、前記ナノ光ファイバ部の両端とテーパ部を介して接続する両端部とを含み、前記共振光路の少なくとも一部が前記ナノ光ファイバ部に位置する請求項12から14の何れか1項に記載の伝令付き単一光子源。
- [請求項16] 前記複数の共振器は、それぞれの共振周波数を反射帯域に含む一対のファイバブラッグ格子をそれぞれ有する請求項12から14の何れか1項に記載の伝令付き単一光子源。
- [請求項17] 少なくとも一つの前記ファイバブラッグ格子は、他の何れかの前記ファイバブラッグ格子と同一である請求項16に記載の伝令付き単一光子源。

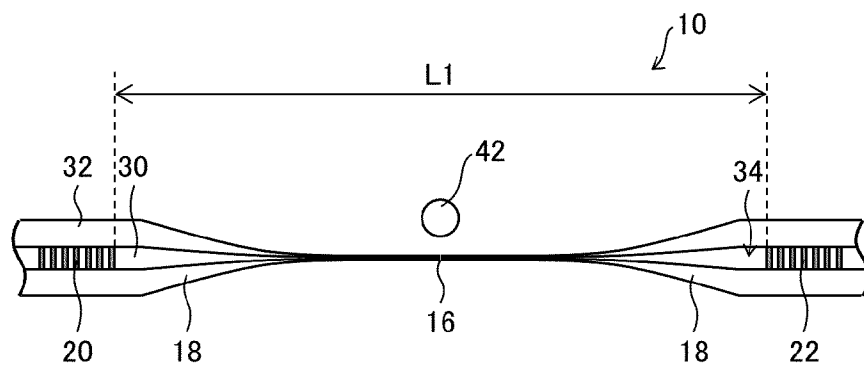
[図1]

図 1



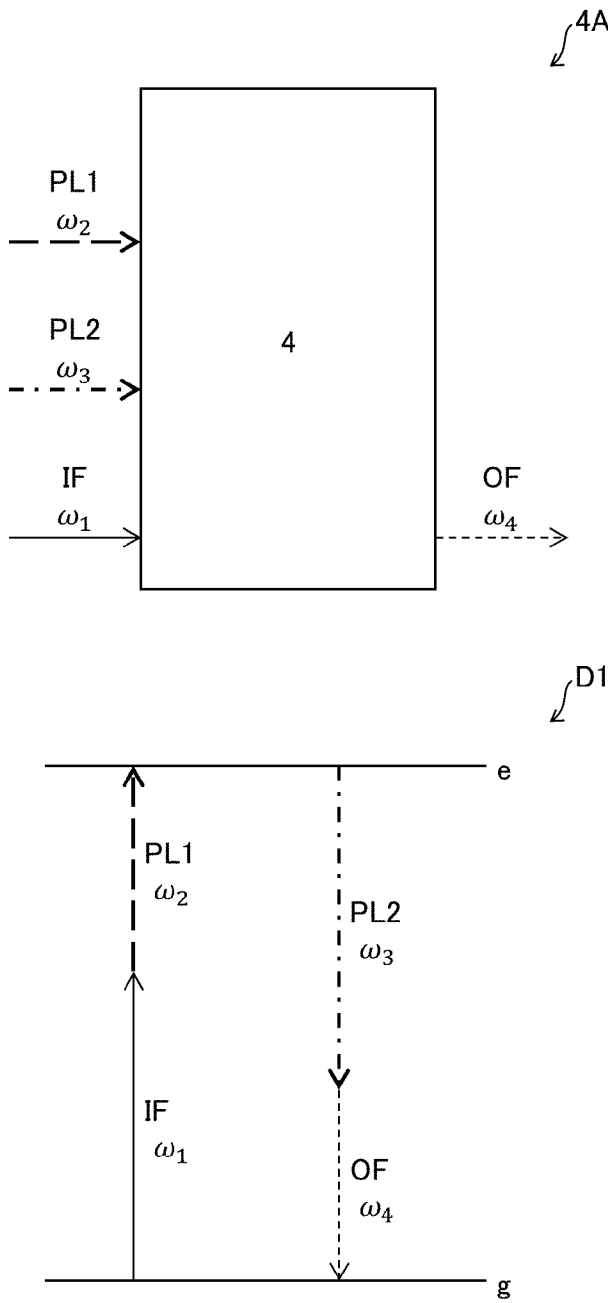
[図2]

図 2



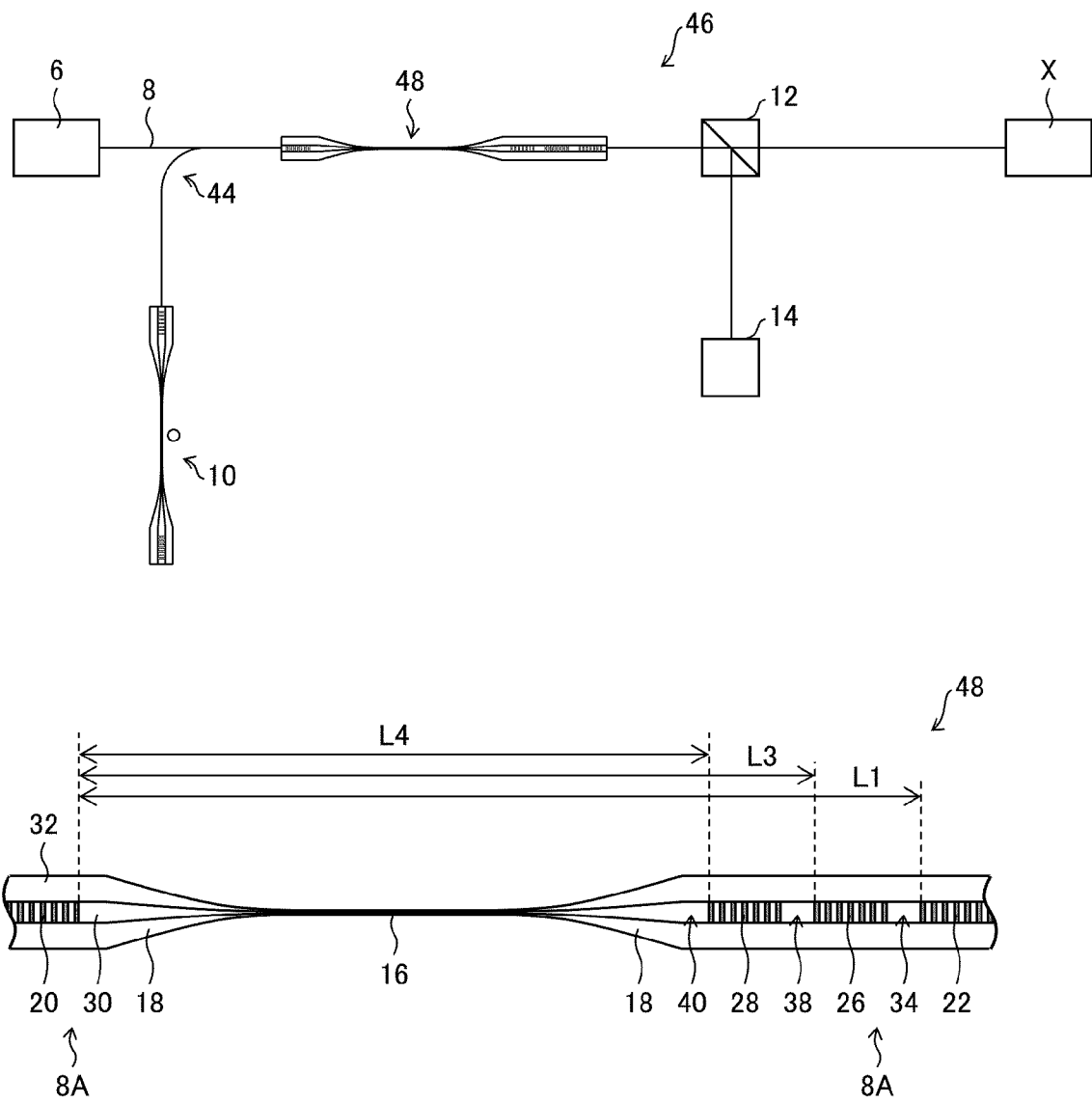
[図3]

図 3



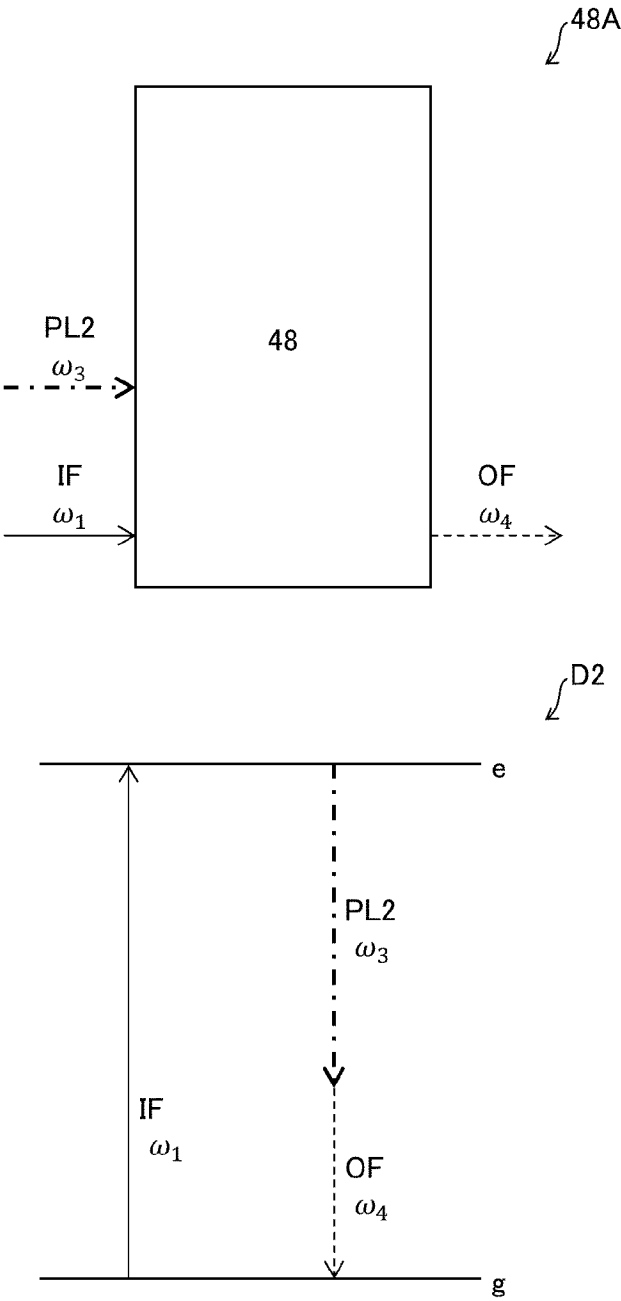
[図4]

図 4



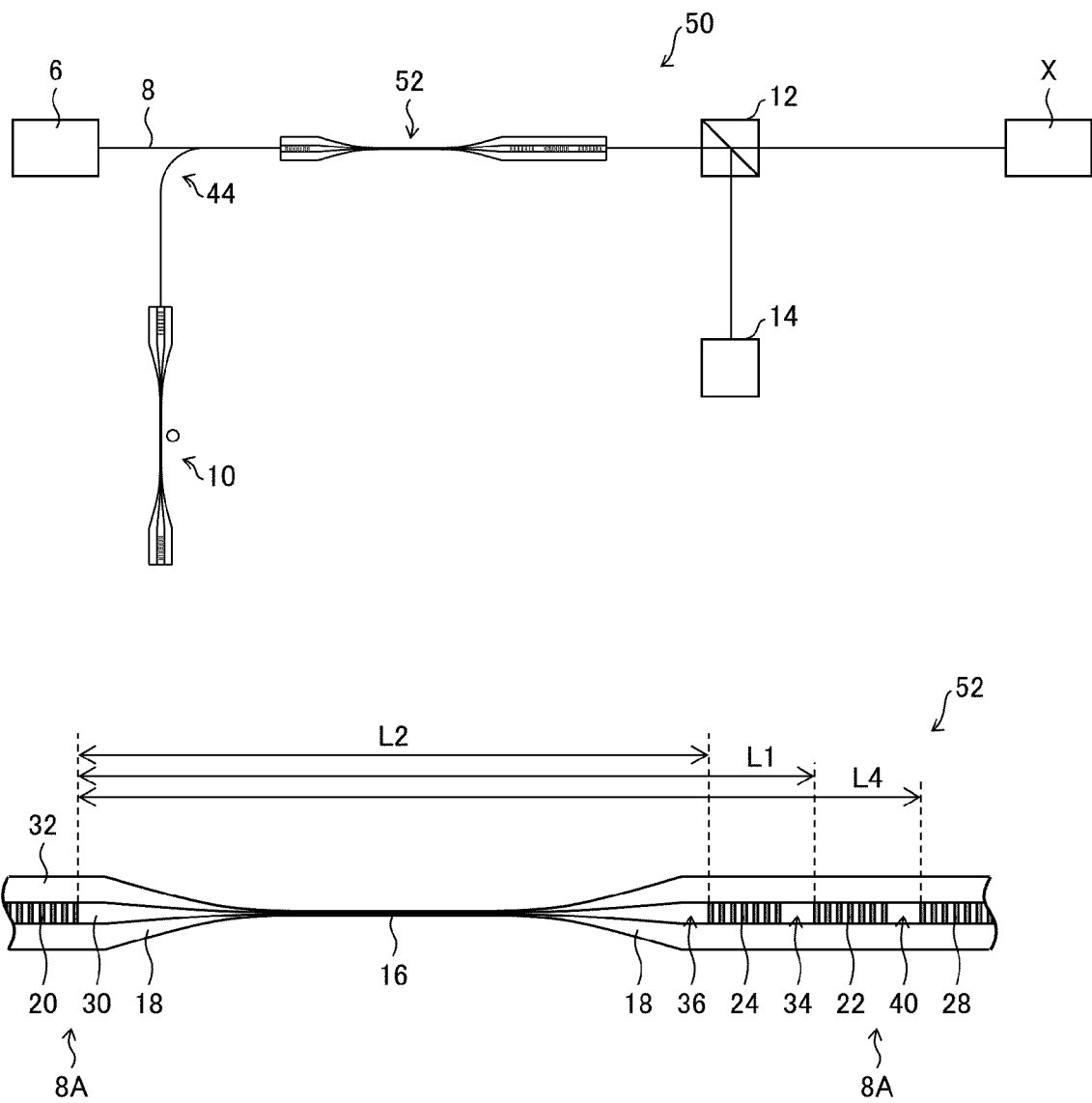
[図5]

図 5



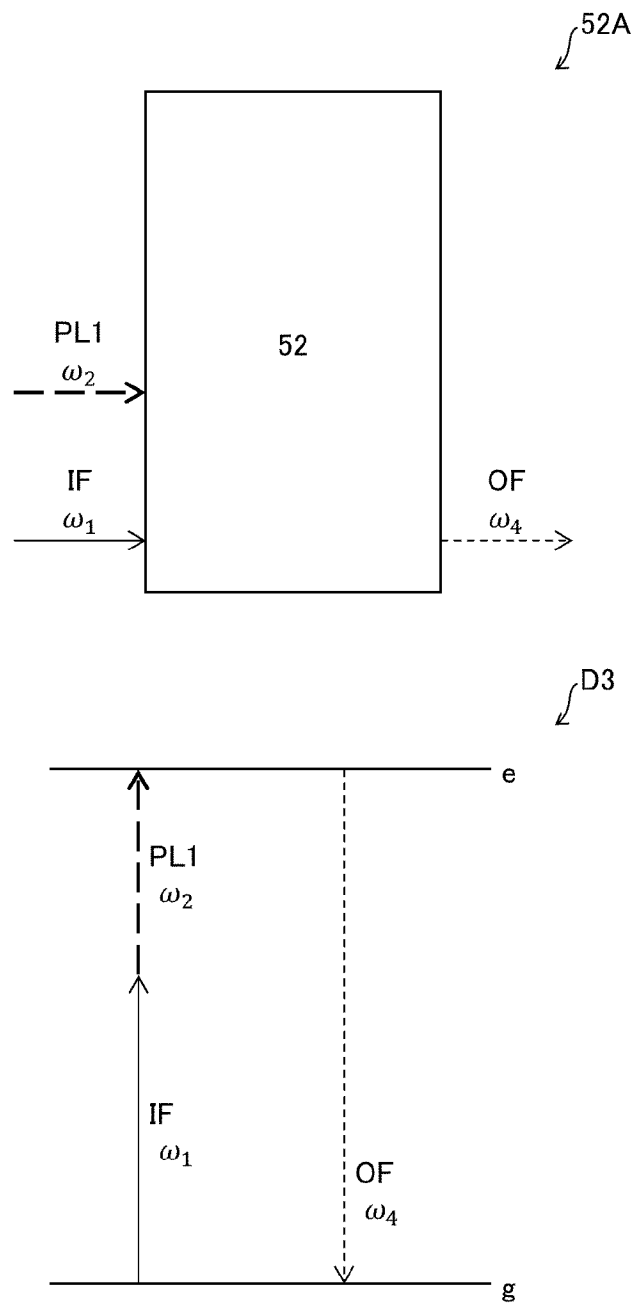
[図6]

图 6



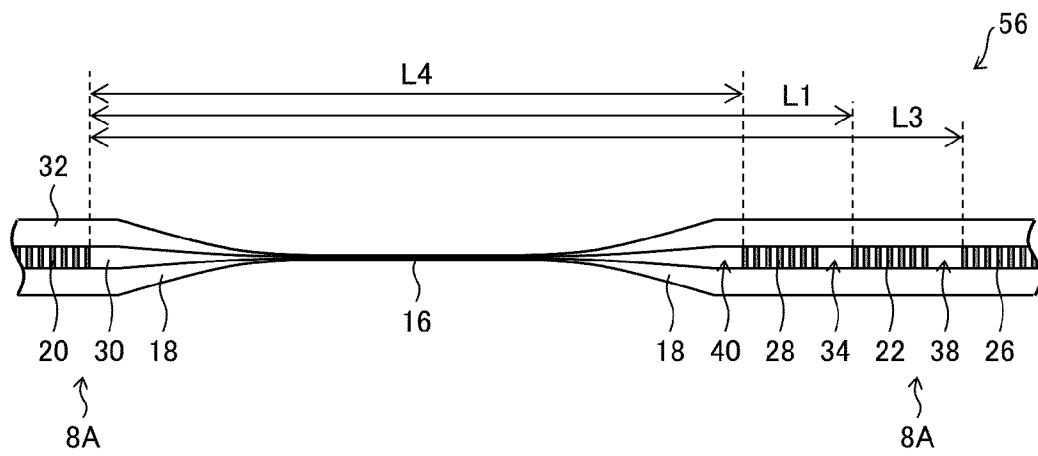
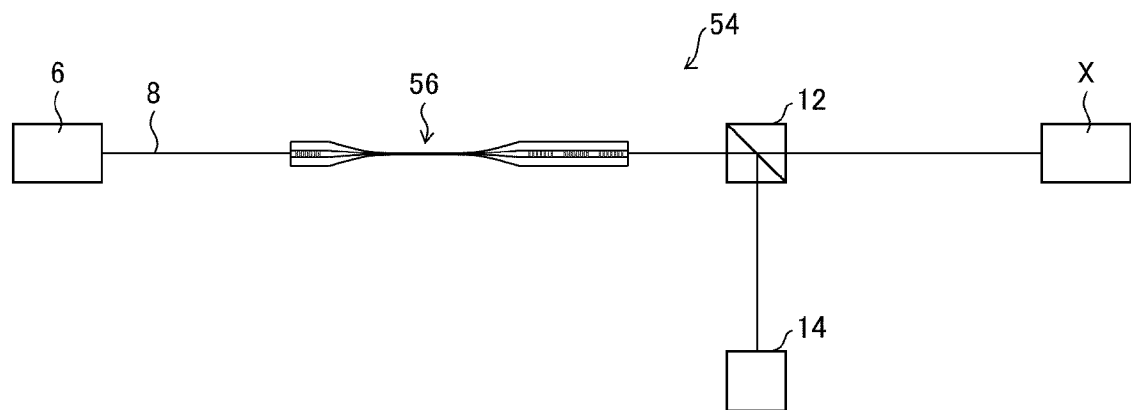
[図7]

図 7



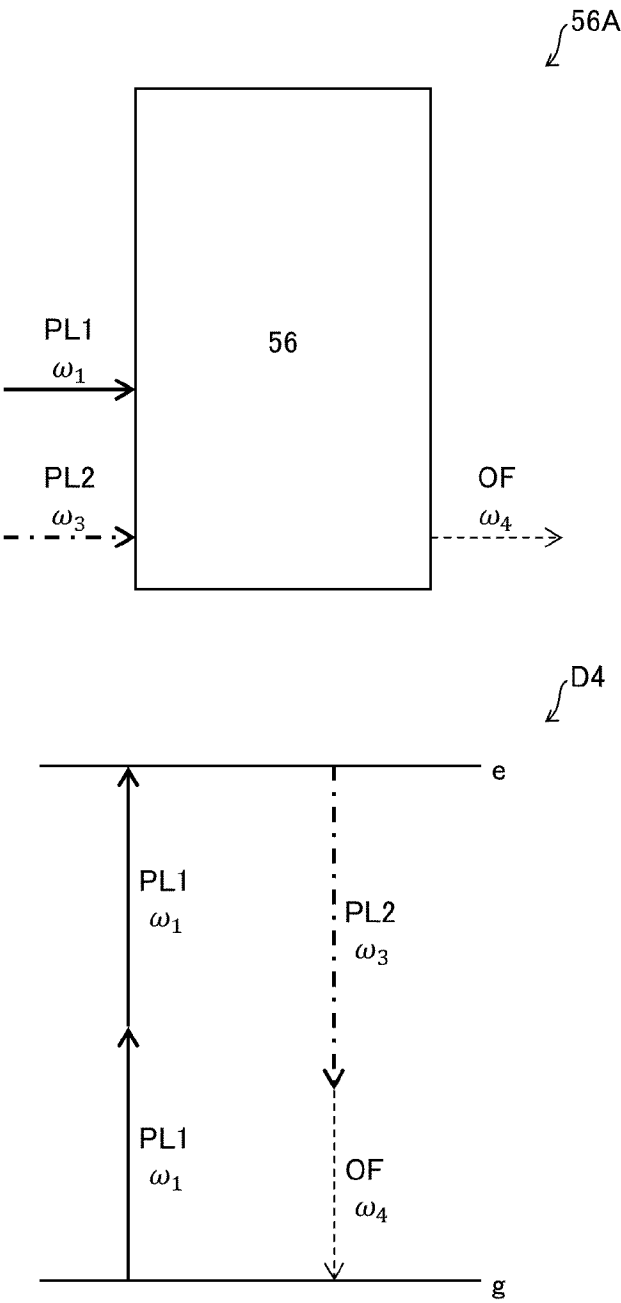
[図8]

図 8



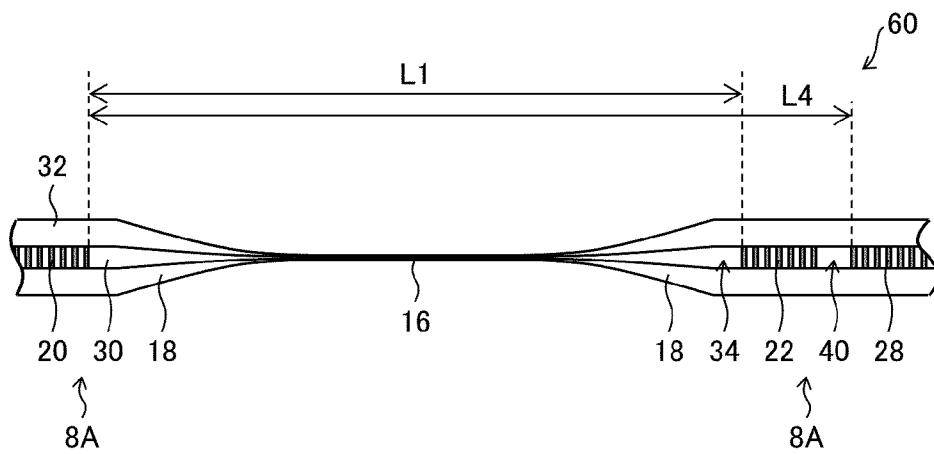
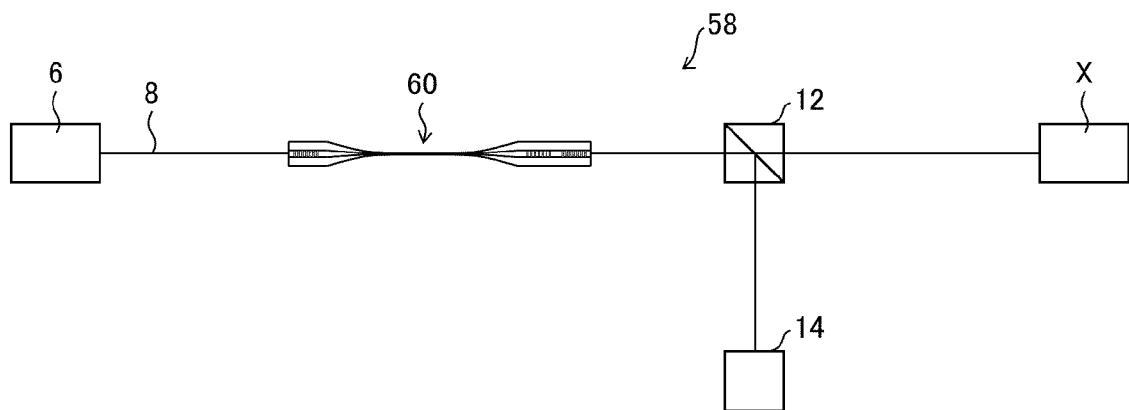
[図9]

図 9



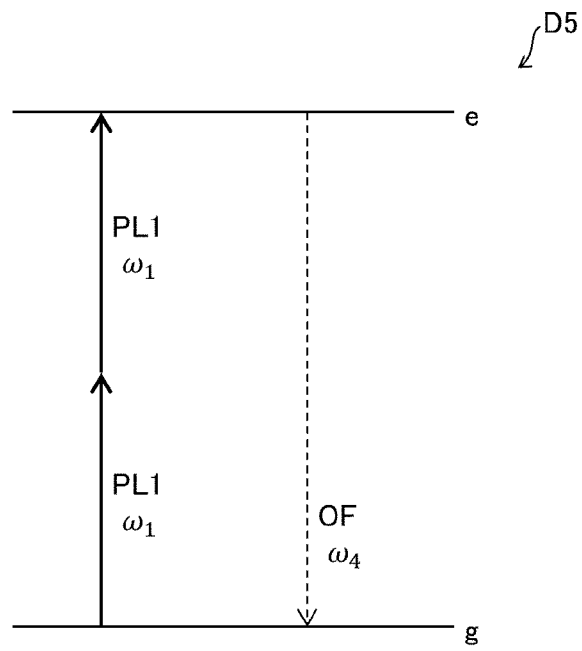
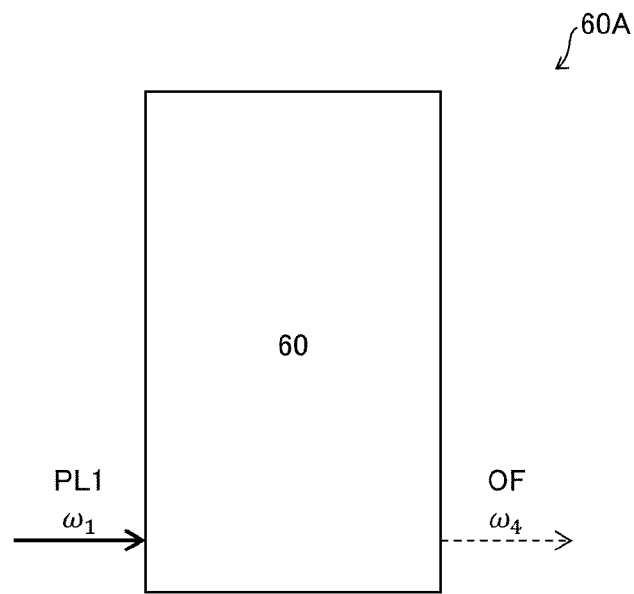
[図10]

図 10



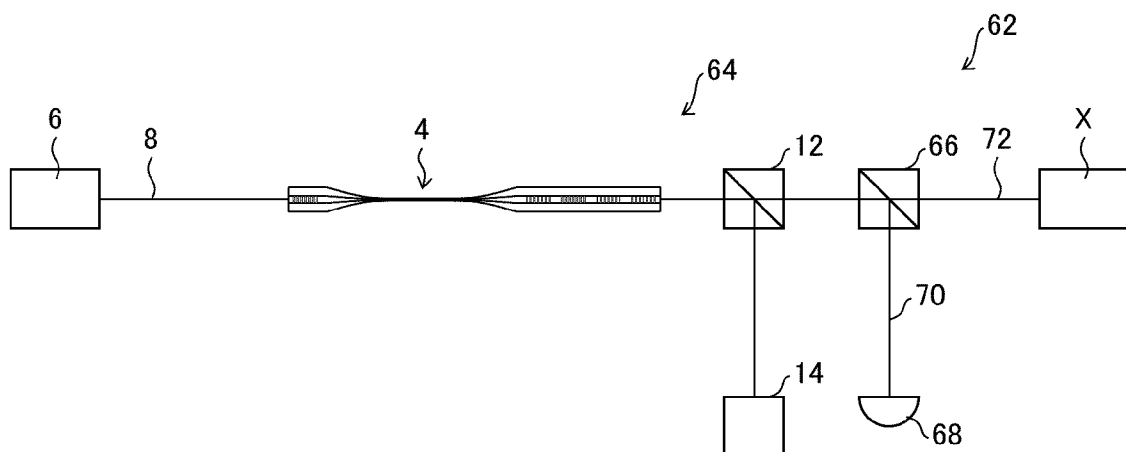
[図11]

図 11



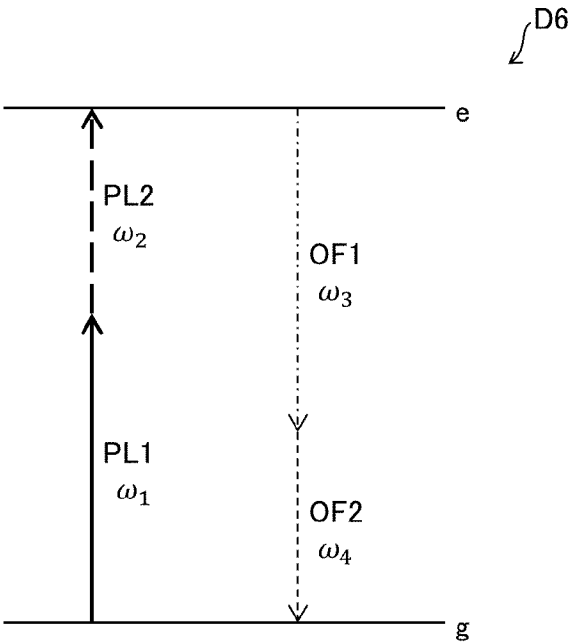
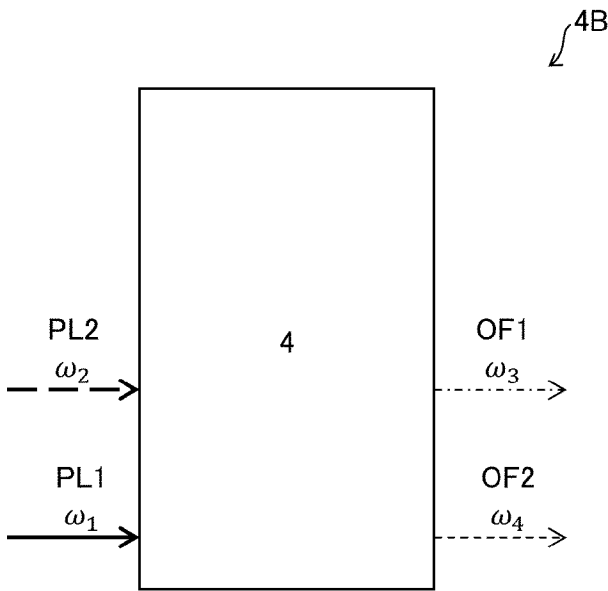
[図12]

図 12



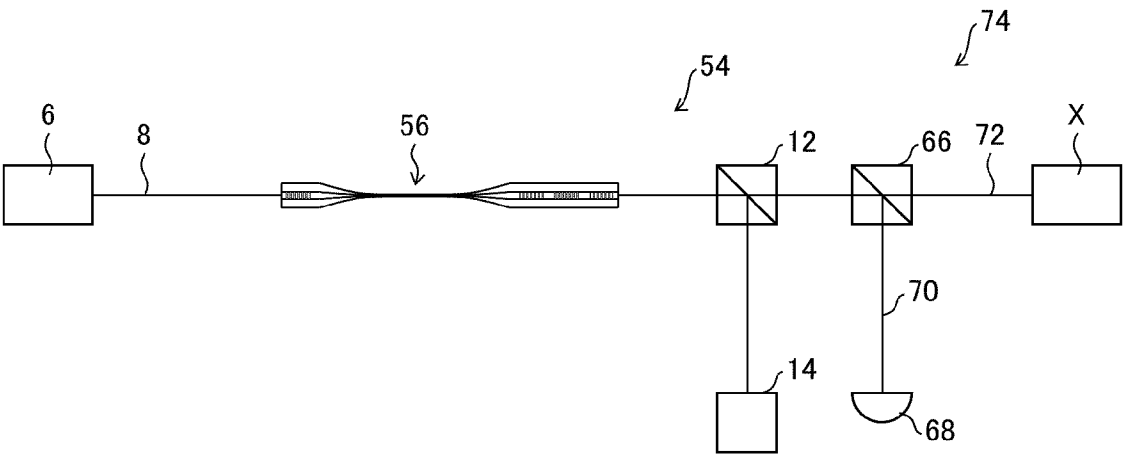
[図13]

図 13

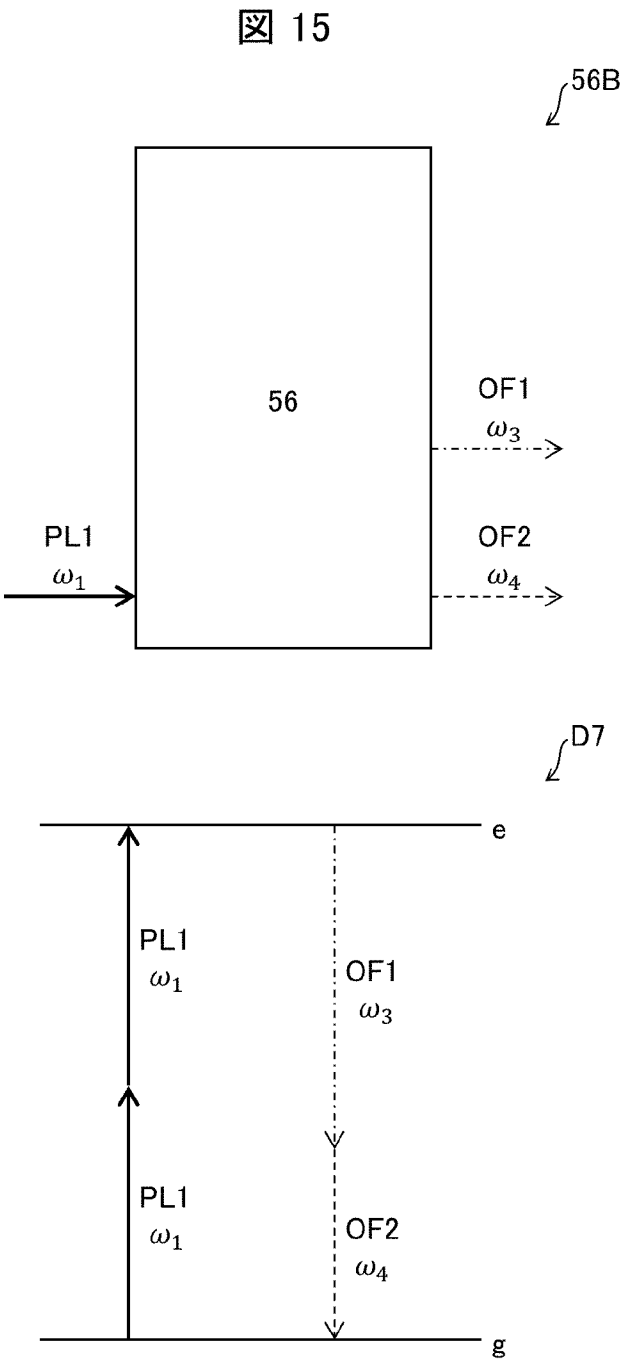


[図14]

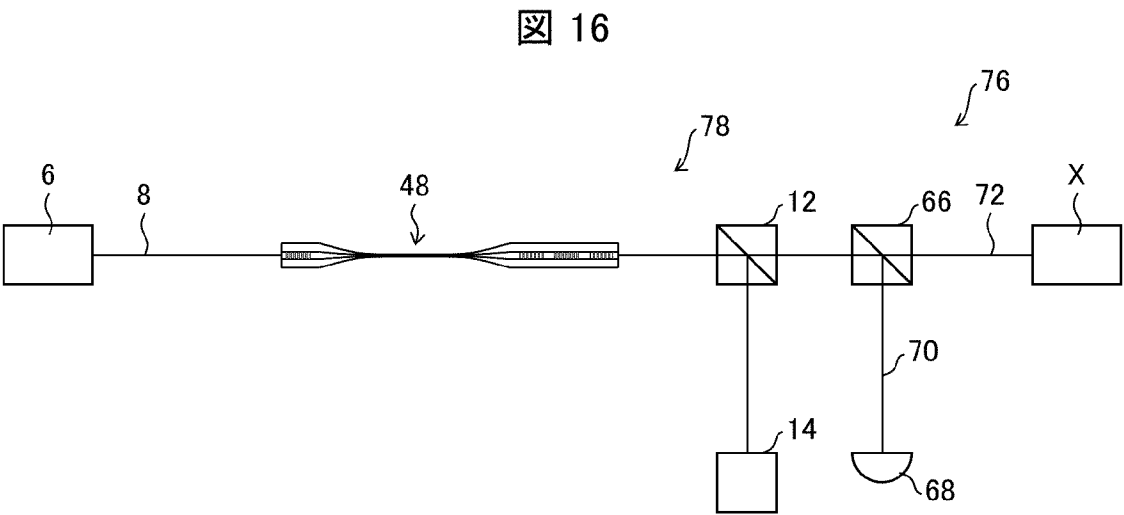
図 14



[図15]

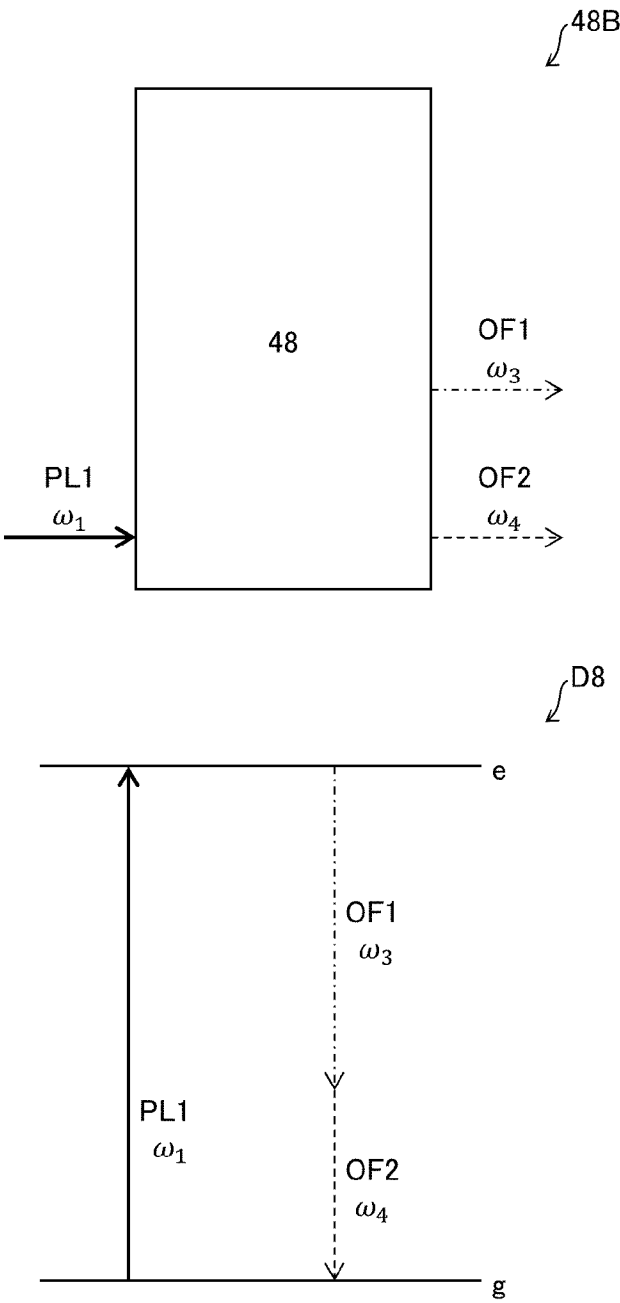


[図16]



[図17]

図 17



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/016812

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G02F 1/383**(2006.01)i; **G02F 1/39**(2006.01)i

FI: G02F1/383; G02F1/39

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)

G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00

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)

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2020/0183250 A1 (NOTCHWAY SOLUTIONS, LLC) 11 June 2020 (2020-06-11) entire text, all drawings	1-17
A	CN 101546086 A (GUIZHOU UNIVERSITY) 30 September 2009 (2009-09-30) entire text, all drawings	1-17
A	JP 2007-271725 A (FUJITSU LTD) 18 October 2007 (2007-10-18) entire text, all drawings	1-17
A	WO 2022/009950 A1 (WASEDA UNIVERSITY) 13 January 2022 (2022-01-13) entire text, all drawings	1-17
A	US 9500930 B1 (SANDIA CORPORATION) 22 November 2016 (2016-11-22) entire text, all drawings	1-17
A	CHENG, Chinyao et al. Quantum frequency conversion based on resonant four-wave mixing. PHYSICAL REVIEW A. 15 February 2021, vol. 103, pp. 023711-1 to 023711-7 entire text, all drawings	1-17

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ 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

25 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/JP2023/016812

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US	2020/0183250	A1	11 June 2020	WO 2018/106765 A1	
CN	101546086	A	30 September 2009	(Family: none)	
JP	2007-271725	A	18 October 2007	(Family: none)	
WO	2022/009950	A1	13 January 2022	US 2023/204863 A1	
				EP 4181031 A1	
				CN 115803283 A	
US	9500930	B1	22 November 2016	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02F 1/383(2006.01)i; G02F 1/39(2006.01)i FI: G02F1/383; G02F1/39		
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）） G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00 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） JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore		
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
A	US 2020/0183250 A1 (NOTCHWAY SOLUTIONS, LLC) 11.06.2020 (2020 - 06 - 11) 全文, 全図	1-17
A	CN 101546086 A (GUIZHOU UNIVERSITY) 30.09.2009 (2009 - 09 - 30) 全文, 全図	1-17
A	JP 2007-271725 A (富士通株式会社) 18.10.2007 (2007 - 10 - 18) 全文, 全図	1-17
A	WO 2022/009950 A1 (学校法人早稲田大学) 13.01.2022 (2022 - 01 - 13) 全文, 全図	1-17
A	US 9500930 B1 (SANDIA CORPORATION) 22.11.2016 (2016 - 11 - 22) 全文, 全図	1-17
A	CHENG, Chin-Yao et al., Quantum frequency conversion based on resonant four-wave mixing, PHYSICAL REVIEW A, 2021.02.15, Vol. 103, pp. 023711-1 - 023711-7 全文, 全図	1-17
☐ 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 07.07.2023	国際調査報告の発送日 25.07.2023	
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） 山本 元彦 2L 3914 電話番号 03-3581-1101 内線 3295	

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/JP2023/016812

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
US	2020/0183250	A1	11.06.2020	WO	2018/106765	A1	
CN	101546086	A	30.09.2009	(ファミリーなし)			
JP	2007-271725	A	18.10.2007	(ファミリーなし)			
WO	2022/009950	A1	13.01.2022	US	2023/204863	A1	
				EP	4181031	A1	
				CN	115803283	A	
US	9500930	B1	22.11.2016	(ファミリーなし)			