

(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  
2010年12月9日(09.12.2010)

PCT

(10) 国際公開番号  
WO 2010/140661 A1

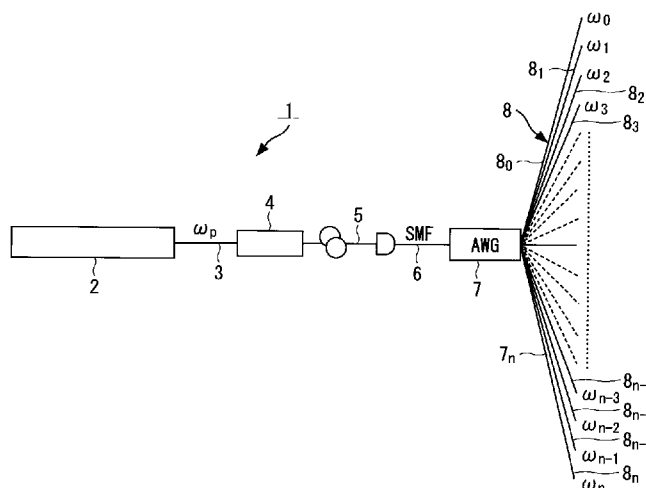
- (51) 国際特許分類:  
G02F 1/35 (2006.01) H04L 9/12 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/059461
- (22) 国際出願日: 2010年6月3日(03.06.2010)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2009-134293 2009年6月3日(03.06.2009) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人科学技術振興機構(JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY) [JP/JP]; 〒3320012 埼玉県川口市本町4-1-8 Saitama (JP).
- (72) 発明者: および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 清水 亮介 (SHIMIZU Ryosuke) [JP/JP]; 〒9840827 宮城県仙台市若林区南小泉2-6-11-301 Miyagi (JP). 枝松 圭一 (EDAMATSU Keiichi) [JP/JP]; 〒9811245 宮城県名取市ゆりが丘2-24-7 Miyagi (JP).
- (74) 代理人: 平山 一幸 (HIRAYAMA Kazuyuki); 〒1600022 東京都新宿区新宿2-3-10 新宿御苑ビル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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR GENERATING POLARIZATION-ENTANGLED PHOTON PAIR

(54) 発明の名称: 偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法

【図1】



(57) Abstract: Disclosed is a device (1) for generating wavelength-multiplexed polarization-entangled photon pairs which comprises a pump light source (2), a quantum-entangled photon pair generator (4) into which pump light (3) emitted from the pump light source (2) is led, and a wave separator (7) into which parametric photon pairs (5) having multiplexed wavelengths emitted from the quantum-entangled photon pair generator (4) are led, wherein the quantum-entangled photon pair generator (4) is constituted of a nonlinear optical crystal (11) and generates wavelength-multiplexed polarization-entangled photon pairs through type-II phase matching with respect to the pump light (3). The nonlinear optical crystal (11) can be formed from lithium tantalate having a periodically poled structure (11A), and the wave separator (7) can be an arrayed-waveguide grating. Thus, wavelength-multiplexed polarization-entangled photon pairs (5) can be generated by such simple device.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2010/140661 A1



添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

---

波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置 (1) は、ポンプ光源 (2) と、ポンプ光源 (2) から出射したポンプ光 (3) を入射する量子もつれ光子対生成体 (4) と、量子もつれ光子対生成体 (4) から出射する波長が多重されたパラメトリック光子対 (5) を入射する分波器 (7) と、を含み、量子もつれ光子対生成体 (4) は非線形光学結晶 (11) からなり、ポンプ光 (3) に対してタイプ I I の位相整合によって波長多重の偏光量子もつれ光子対を生成する。非線形光学結晶 (11) として、周期分極反転構造 (11 A) を有しているタンタル酸リチウムから形成することができ、分波器 (7) にはアレイ導波路回折格子を用いることができ、波長多重された偏光量子もつれ光子対 (5) を簡単な装置で発生させることができる。

## 明 細 書

### 発明の名称： 偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法 技術分野

[0001] 本発明は、偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法に関する。さらに、詳しくは、本発明は、波長を多重にすることができる、偏光量子もつれ光子対の生成装置及び生成方法に関する。

### 背景技術

[0002] 近年、電子商取引や電子メール等による情報通信技術の進展が著しく、これに伴い情報伝送における暗号技術についても鋭意研究開発が行われている。暗号技術の一つとして、量子暗号が注目を集めている。

[0003] 量子暗号では、量子力学におけるハイゼンベルグの不確定性原理により、物理現象によって安全性が保証される。不確定性原理では、観測によってその状態は変化するため、通信が盗聴、つまり観測されると必ずそれが明らかになり、それに応じて通信を遮断するなどの処置が可能のため、盗聴が物理学的に不可能とされる。また、粒子を複製することも不確定性原理によって不可能である。

[0004] 量子暗号における重要な要素として量子テレポーテーションがあげられる。量子テレポーテーションは、粒子の量子的な情報だけを別の場所に移す技術である。量子テレポーテーションは、量子の絡み合い、即ち量子もつれを利用して、光子同士が情報をやり取りすることにより実現される。量子もつれの状態にある光子対は、一方の量子状態が決まると他方の量子状態も決まるという性質があり、この性質は2光子間の距離に依存しない。

[0005] 上記量子テレポーテーションの技術では、量子もつれの状態にある光子対が必要不可欠である。量子もつれの状態にある光子対の生成方法は種々知られている。例えば、特許文献1には、半導体物質へ2個の親光子を照射して、二光子共鳴励起によって角運動量が0の状態の励起子分子を生成し、生成した励起子分子を2個の光子に同時に分裂させて、量子もつれの光子対を生

成することが開示されている。

- [0006] 量子もつれとして、2光子の偏光を用いた量子もつれ状態も利用されている。偏光を用いた2量子ビット（2光子）の量子もつれ状態として、下記（1）式及び（2）式に示す四つの状態が知られている。

[数1]

$$|\Psi^\pm\rangle_{12} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_1|V\rangle_2 \pm |V\rangle_1|H\rangle_2) \quad (1)$$

[数2]

$$|\Phi^\pm\rangle_{12} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_1|H\rangle_2 \pm |V\rangle_1|V\rangle_2) \quad (2)$$

ここで、 $|H\rangle_i$ は第1偏光（H）を持つ光子がモード*i*（*i*は1又は2）に存在することを表わし、 $|V\rangle_i$ は第2偏光（V）を持つ光子がモード*i*'（*i*'は1又は2）に存在することを表わしている。光子のモード*i*、*i*'を決定する物理量として、光子の光路や角周波数が考えられる。

- [0007] （パラメトリック下方変換を用いた2光子の生成方法）

2光子状態を生成するための物理過程として、自発パラメトリック下方変換過程がしばしば用いられる。自発パラメトリック下方変換過程では、非線形光学結晶中に入射した一つの角周波数 $\omega_p$ 及び波数ベクトル $k_p$ を有しているポンプ光子が、ある確率で角周波数 $\omega_s$ 及び波数ベクトル $k_s$ を有しているシグナル光子と角周波数 $\omega_i$ 及び波数ベクトル $k_i$ を有しているアイドラー光子との光子対に変換される。この際、自発パラメトリック下方変換過程が引き起こされるための位相整合条件として、下記（3）式の角周波数条件と下記（4）式の運動量保存則とが同時に満足される必要がある。角周波数条件は、エネルギー保存則とも呼ばれている。

[数3]

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (3)$$

[数4]

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i \quad (4)$$

[0008] 位相整合条件には、各々の光子の偏光によって以下の3種類が存在する。

(a) タイプ0の位相整合条件

ポンプ光子とシグナル光子とアイドラー光子の偏光が全て同一の場合を、タイプ0の位相整合条件と呼んでいる。

(b) タイプIの位相整合条件

シグナル光子とアイドラー光子とが同一の偏光を有し、ポンプ光子がこれらと直交した偏光状態を有する場合を、タイプIの位相整合条件と呼んでいる。

(c) タイプIIの位相整合条件

シグナル光子とアイドラー光子との偏光が直交しており、ポンプ光子がどちらか一方の偏光を有する場合、タイプIIの位相整合条件と呼んでいる。

[0009] (波長帯域制限フィルターによる偏光量子もつれ状態の純度向上方法について)

自発パラメトリック下方変換過程により生成されたシグナル光子とアイドラー光子は広帯域にわたる波長スペクトルを持つ。一般に、広帯域なスペクトルを持つシグナル光子とアイドラー光子とを用いると、2光子のコヒーレンス時間が短くなり、偏光量子もつれを劣化させる場合がある。そこで、生成された偏光量子もつれ光子対の純度を上げるため、観測するシグナル光子、アイドラー光子のスペクトルを波長帯域制限フィルターによって制限する方法がある。通常、波長帯域制限に使われるフィルターは誘電体多層膜構造による干渉フィルターが用いられる。この種の干渉フィルターでは構造の設計により任意の中心波長、帯域幅の光を透過させることができるが、一度に透過できる波長帯は一種類に限られてしまう。そのため、これまでの方法ではスペクトル帯域の狭い、つまり狭帯域のパラメトリック光子対を生成することに興味が注がれていた。

[0010] 真空中での光の速度を $c$ とすると、光子の角周波数 $\omega$ と波長 $\lambda$ は、下記（5）式で表わされる。光子の角周波数 $\omega$ を指定すれば、波長 $\lambda$ は下記関係式から求まるので、以下では、角周波数と波長をほぼ同じ意味で用いる。これは、理論的には角周波数が扱いやすく、実験的には波長が扱いやすいためである。

[数5]

$$\omega = 2\pi c / \lambda \quad (5)$$

[0011] （既存の偏光量子もつれ状態の生成方法について）

2光子が同一の角周波数を持つ偏光量子もつれ状態の生成方法としては幾つかの手法が報告されている（例えば、非特許文献1参照）。この非特許文献1に開示の方法では、二つの光子の角周波数は同一であり区別がつかないため、光子の光路によってモードを決定している。つまり、二つの光子は別々の光路に放出されなければならない。

[0012] 一方で、角周波数の違った2光子により偏光量子もつれ状態を生成する方法も提案されている。この方法では角周波数によって光子のモードを区別しているため、二つの光子が同一の光路上に存在していても良い。

[0013] このような、角周波数の異なる2光子より構成される偏光量子もつれ光子対の生成方法として、非特許文献2にはタイプ0又はタイプIのパラメトリック下方変換を利用する方法が報告されている。非特許文献2では、同一の偏光状態を有する2光子を発生させるタイプ0又はタイプIの位相整合条件の非線形光学結晶を互いに90度回転させて直列に並べる方法で、光子対の生成が実現されている。この場合、二つの結晶に同一のポンプ光源からの光を照射し、ポンプ光と同軸方向に角周波数の異なる2光子（ $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ）を生成させる。しかし、この方法では同一の性質を持つ二つの結晶を用意し、精密に並べなければならないという複雑さを伴う。

[0014] 非特許文献4には、タイプ0又はタイプIのパラメトリック下方変換と干渉計とを利用する方法が報告されている。この方法では、同一の偏光状態を

有する2光子を発生させるタイプ0又はタイプ1の位相整合条件の一つの非線形光学結晶を干渉計中に配置して、偏光量子もつれ光子対を生成する。しかし、この方法では干渉計を利用するため、装置の構成に複雑さを伴う。非特許文献5には、タイプ0の位相整合条件下での光子対生成が報告されている。

[0015] 特許文献2には、単一の結晶中に2種類の周期分極反転構造を作製する方法が開示されている。この方法では、タイプ0とタイプ1という異なる位相整合条件を用いるため、各々の位相整合条件に対応する周期分極反転構造において発生する2光子の生成効率のバランスを取りにくいという欠点を持つ。各々の周期分極反転構造からの2光子の生成効率のバランスが悪いと、量子もつれの度合いが低下するという結果を招く。

[0016] 非特許文献3には、光ファイバー中で起こる3次の非線形光学現象である4光波混合過程を利用した方法が報告されている。この方法では、偏光量子もつれ状態を生成するために光ファイバーを干渉計中に設置しなければならないため、装置を構成するにあたり複雑さを伴う。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0017] 特許文献1：特開2005-309012号公報  
特許文献2：特開2007-114464号公報

#### 非特許文献

[0018] 非特許文献1：P. G. Kwiat et al., "New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs", Phys. Rev. Lett., Vol. 75, 4337, 1995  
非特許文献2：M. Pelton et al., "Bright, single-spatial-mode source of frequency non-degenerate, polarization-entangled photon pairs using periodically poled KTP," Opt. Express, Vol. 12, 3573, 2004  
非特許文献3：H. Takesue and Kyo Inoue, "Generation of polarization-entangled photon pairs and violation of Bell's inequality using spontaneous four-wave mixing in a fiber loop", Phys. Rev., Vol. A 70, 03180

2, 2004

非特許文献4 : H. C. Lim, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, and K. Kikuchi, "Stable source of high quality telecom-band polarization-entangled photon-pairs based on a single, pulse-pumped, short PPLN waveguide", Opt. Express, Vol. 16, 12460, 2008

非特許文献5 : M. B. Nasr, S. Carrasco, B. E. A Saleh, A. V. Sergienko, M. C. Teich, J. P. Torres, L. Torner, D. S. Hum, and M. M. Fejer, "Ultrabroadband biphotons generated via chirped quasi-phase matched optical parametric down-conversion," Phys. Rev. Lett. Vol. 100, p. 183601, 2008

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0019] 偏光量子もつれ光子対を生成させる従来の方法では、狭帯域のパラメトリック光子対を利用するために、任意の中心周波数を持つ透過帯域フィルターを使用することによりパラメトリック光子対のスペクトル帯域を制限していた。誘電体多層膜構造による干渉フィルターでは、構造の設計により任意の中心波長、帯域幅の光を透過させることができるが、一度に透過できる波長帯は一種類に限られてしまう。このため、透過帯域外のパラメトリック蛍光はフィルターによりブロックされ、偏光量子もつれ光子の生成には使用されていなかった。

[0020] 本発明は上記課題に鑑み、フィルターによってブロックされ、従来利用されていなかったパラメトリック光子対も利用し、波長を多重にすることができる、偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法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

[0021] 上記目的を達成するため、本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置は、ポンプ光源と、ポンプ光源から出射したポンプ光が入射される量子もつれ光子対生成体と、量子もつれ光子対生成体から出射され、波長多重されたパラメトリック光子対が入射される分波器と、を含み、量子もつれ光子



対生成体が非線形光学結晶からなり、ポンプ光に対してタイプ I I の位相整合によって波長多重の偏光量子もつれ光子対を生成することを特徴とする。

[0022] 上記構成において、非線形光学結晶は、好ましくは周期分極反転構造を有している。

周期分極反転構造の分極反転周期は、好ましくは、非線形光学結晶の光軸方向で徐々に変化する線形チャープ構造を有している。非線形性結晶は、好ましくはタンタル酸リチウムからなる。分波器は、好ましくはアレイ導波路回折格子からなる。

[0023] 上記構成によれば、ポンプ光源と非線形性結晶からなる量子もつれ光子対生成体とを有する簡易な光源によって、波長多重された偏光量子もつれ光子対を容易に発生させることができる。

[0024] 本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法は、非線形性結晶からなる量子もつれ光子対生成体を形成し、量子もつれ光子対生成体へ角周波数が $\omega_p$ のポンプ光を照射し、ポンプ光と量子もつれ光子対生成体内で発生させるシグナル光とアイドラー光との間でタイプ I I の位相整合を行い、互いに偏光が直交し、かつ、波長が多重された偏光量子もつれ光子対を生成し、波長が多重された偏光量子もつれ光子対を、角周波数が $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-2}, \omega_{n-1}, \omega_n$ となるように分波し、波長多重された各一对の偏光量子もつれ光子対を、下記(6)式で表わされるエネルギー保存則を満たす角周波数関係とすることを特徴とする。

[数6]

$$\begin{aligned}
 \omega_p &= \omega_0 + \omega_n \\
 &= \omega_1 + \omega_{n-1} \\
 &= \omega_2 + \omega_{n-2} \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

[0025] 上記構成において、非線形光学結晶に周期が $\Lambda$ の周期分極反転構造をポンプ光の光軸方向に形成し、周期 $\Lambda$ を下記(7)式を満足する周期とし、ポン

プ光と量子もつれ光子対生成体内で発生させるシグナル光とアイドラー光との間で、擬似位相整合を行うことができる。

[数7]

$$k_p = k_s + k_i + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (7)$$

ここで、 $k_p$ 、 $k_s$ 、 $k_i$ は、それぞれ、非線形光学結晶中に入射したポンプ光の波数ベクトル、非線形光学結晶内で発生するシグナル光の波数ベクトル、非線形光学結晶内で発生するアイドラー光の波数ベクトルである。

[0026] 非線形光学結晶をタンタル酸リチウムとしてもよい。分波を、アレイ導波路回折格子を用いて行ってもよい。

### 発明の効果

[0027] 本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法によれば、波長多重された偏光量子もつれ光子対を簡単な装置で発生させることができ、量子暗号通信等の量子情報通信技術において、情報量を増大させることができる。

### 図面の簡単な説明

[0028] [図1]本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置の構成を模式的に示す図である。

[図2]ポンプ光源と量子もつれ光子対生成体との関係を模式的に示す図である。

[図3]非線形光学結晶の変形例の構造を示す斜視図である。

[図4]アレイ導波路回折格子の構造を模式的に示す斜視図である。

[図5]量子もつれ光子対生成体で発生した波長多重のパラメトリック光子対からなる光が、アレイ導波路回折格子で分波される様子を模式的に示す図である。

[図6]タンタル酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体から出射されるパラメトリック光子対のスペクトルを示す図である。

[図7]図6に示したパラメトリック光子対が、アレイ導波路回折格子を通過し

た後のスペクトルを示す図である。

[図8]比較例のニオブ酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体から出射されるパラメトリック光子対のスペクトルを示す図である。

[図9]実施例のタンタル酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体から出射されるパラメトリック光子対のスペクトルを示し、(A)は常光線を、(B)は異常光線を示す。

[図10]図9に示したパラメトリック光子対の波長相関を示す図である。

### 符号の説明

- [0029]
- 1 : 波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置
  - 2 : ポンプ光源
  - 3 : ポンプ光源から出射したポンプ光
  - 4 : 波長多重の量子もつれ光子対生成体
  - 5 : 波長が多重されたパラメトリック光子対
  - 6 : 第1の光ファイバー
  - 7 : アレイ導波路回折格子
  - 8 : 第2の光ファイバー
  - 11 : 非線形光学結晶
  - 11A : 周期分極反転構造
  - 12 : 非線形光学結晶の変形例
  - 12A : 周期分極反転構造
  - 15 : 半導体基板
  - 16 : 絶縁膜
  - 17 : 入力導波路
  - 18 : 第1のレンズ導波路
  - 19 : アレイ導波路
  - 21 : 第2のレンズ導波路
  - 22 : 出力導波路

### 発明を実施するための形態

[0030] 以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。

図1は本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置1の構成を模式的に示す図である。図1に示すように、波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置1は、ポンプ光源2と、ポンプ光源2から出射したポンプ光3が入射される波長多重の量子もつれ光子対生成体4と、量子もつれ光子対生成体4から出射した光が入射される第1の光ファイバー6と、第1の光ファイバー6に接続される分波器7と、分波器7に接続される第2の光ファイバー8と、を含んで構成されている。第1の光ファイバー6には、量子もつれ光子対生成体4から出射した波長が多重されたパラメトリック光子対5が入射する。

ここで、量子もつれ光子対生成体4と第1の光ファイバー6との間にはレンズのような集光手段を配置してもよい。

[0031] (ポンプ光源2)

ポンプ光源2は、ポンプ光3を発生するレーザである。ポンプ光3の角周波数を $\omega_p$ とする。ポンプ光3の偏光は、図示しない偏光子等によって直線偏光とされている。

[0032] (量子もつれ光子対生成体4)

量子もつれ光子対生成体4は、非線形光学結晶からなる。角周波数 $\omega_p$ を持つポンプ光3が非線形光学結晶に入射されると、自発パラメトリック下方変換過程によって偏光が直交する2光子を発生する。この発生した2光子は、広帯域スペクトルを有している。この際、非線形光学結晶によって偏光が直交した2光子を発生させるためには、タイプI Iの位相整合条件を利用する。タイプI Iの位相整合条件で得られる偏光状態は、 $oeo$ 又は $eoo$ と表記する。ここで、 $oeo$ 等の表記法は、 $o$ が当該光が常光 (ordinary ray)、 $e$ が異常光 (extra-ordinary ray) であることを表わしており、アイドラー光子、シグナル光子、ポンプ光3の順番にパラメトリック過程に寄与する光の偏光を示している。 $oeo$ は、アイドラー光子及びポンプ光3の偏光が常光、かつ、シグナル光子の偏光が異常光であることを示している。同様に

、 $e_o o$ は、シグナル光子及びポンプ光3の偏光が常光、かつ、アイドラー光子の偏光が異常光であることを示している。

[0033] (非線形光学結晶の擬似位相整合法)

任意の波長において、タイプ I I の位相整合条件を満たす方法として擬似位相整合法が知られている。擬似位相整合法は、非線形光学結晶 1 1 において、2次の非線形感受率を周期的に変調することによって、位相整合条件を満たす方法である。2次の非線形感受率の周期的な変調方法としては、非線形光学結晶の有している自発分極を周期的に反転させた所謂周期分極反転法を用いることができる。

[0034] (周期分極反転構造を施した非線形光学結晶)

図2は、ポンプ光源2と量子もつれ光子対生成体4との関係を模式的に示す図である。図2に示すように、量子もつれ光子対生成体4は、非線形光学結晶 1 1 からなり、非線形光学結晶 1 1 の内部には、周期が $\Lambda$ の周期分極反転構造 1 1 A を有している。周期 $\Lambda$ は、斜線で示した領域 1 1 B の分極と、隣り合う領域 1 1 A との分極とが互いに反対方向、つまり交番的に分極状態が反転している。

[0035] 非線形光学結晶 1 1 の内部に周期分極反転構造 1 1 A を形成するには、自発分極した非線形光学結晶 1 1 を用意し、斜線で示した領域 1 1 B を自発分極とは反対の極性とすることによって形成することができる。例えば、非線形光学結晶 1 1 の表面側の斜線で示した領域 1 1 B に共通電極を形成し、非線形光学結晶 1 1 の裏面側に裏面電極を形成する。共通電極と裏面電極との間に自発分極とは逆向きの電圧を印加して分極を行った後、共通電極及び裏面電極を剥離して、非線形光学結晶 1 1 からなる量子もつれ光子対生成体4を形成することができる。

[0036] 周期分極反転構造 1 1 A の量子もつれ光子対生成体4の運動量保存則は、(4)式を変形して、下記(7)式で表わされる。

[数8]

$$k_p = k_s + k_i + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (7)$$

ここで、 $k_p$ は非線形光学結晶 11 中に入射したポンプ光 3 の波数ベクトルを、 $k_s$ は非線形光学結晶 11 内で発生するシグナル光の波数ベクトルを、 $k_i$ は非線形光学結晶 11 内で発生するアイドラー光の波数ベクトルを、 $\Lambda$ は非線形光学結晶 11 の 2 次の非線形感受率の変調周期を表わしている。

[0037] 量子もつれ光子対生成体 4 においては、角周波数  $\omega_p$  及び波数ベクトル  $k_p$  のポンプ光 3 が入射することによって、ポンプ光 3 の進行方向と同軸方向（コリニア配置とも呼ばれている。）に、互いの偏光が直交した複数の光子対を発生させる。非線形光学結晶 11 の分極反転周期  $\Lambda$  は、(7) 式と後述する (8) 式で表わされるエネルギー保存則とが満足されるように調整される。

[0038] 光のマルチモード性を利用する広帯域な波長分布を持つパラメトリック光子対 5 を生成するためには、一般に相互作用長を短くするために薄い非線形光学結晶 11 を利用する必要がある。しかし、相互作用長を短くするとパラメトリック光子対 5 の生成効率が低下してしまう。本発明の量子もつれ光子対生成体 4 は、相互作用長が長くても、広帯域な波長分布を有しているパラメトリック光子対 5 が生成可能な周期分極反転構造 11 A を施した非線形光学結晶 11 を用いることができる。このような非線形光学結晶 11 の材料としては、タンタル酸リチウム ( $\text{LiTaO}_3$ ) 等を挙げることができる。

[0039] (周期分極反転構造を施した非線形光学結晶の変形例)

他にも、タイプ I I の自発パラメトリック下方変換において相互作用長を長くし、なおかつスペクトルの広帯域化を図る方法としては分極反転周期を徐々に変化させることによって広げることでも対応可能である。

図 3 は、非線形光学結晶の変形例 12 の構造を示す斜視図である。

図 3 に示すように、非線形光学結晶の変形例 12 の周期分極反転構造 12 A の分極反転周期  $\Lambda'$  は、非線形光学結晶の変形例 12 の左側から右側に沿って、 $\Lambda' A \cdots \Lambda' 1 \cdots \Lambda' N$  と徐々に線形に変化するように構成されている。このような周期分極反転構造 12 A は、線形チャープ構造とも呼ばれている。この場合、非線形光学結晶の変形例 12 の周期分極反転構造の分

極反転周期 $\Lambda'$ は、(7)式で表される運動量保存則及び後述する(8)式で表わされるエネルギー保存則が満足されるように調整される。

[0040] 上記の分極反転周期 $\Lambda'$ は光軸方向に徐々に変化している。このため、シグナル光子とアイドラー光子の中心波長は、ポンプ光子の波長と分極反転周期 $\Lambda'$ の大凡の平均値 $\Lambda'_{av}$ を調整することにより決めることができる。さらに、シグナル光子とアイドラー光子の帯域幅は、非線形光学結晶の変形例12の両端の周期の差、つまり、 $(|\Lambda'_{A}-\Lambda'_{N}|)$ を所定の値とすることで調整できる。

[0041] 非線形光学結晶の変形例12の分極反転周期 $\Lambda'$ は徐々に変化する線形チャープ構造を有しているので、ポンプ光に対してタイプI Iの位相整合が可能であり、光子対生成の広帯域化をはかることができる。このため、非線形光学結晶の変形例12は、波長多重の偏光量子もつれ光子対生成のための量子もつれ光子生成体4として使用可能である。非線形光学結晶12の材料としては、タンタル酸リチウム、ニオブ酸リチウム結晶(LiNbO<sub>3</sub>)やチタン酸リン酸カリウム結晶(KTiOPO<sub>4</sub>)が挙げられる。

[0042] (第1の光ファイバー6)

第1の光ファイバー6は、量子もつれ光子対生成体4で発生した波長が多重されたパラメトリック光子対5をアレイ導波路回折格子7に伝送する。

[0043] (アレイ導波路回折格子7)

図4は、分波器7の一例としてアレイ導波路回折格子の構造を模式的に示す斜視図である。アレイ導波路回折格子7は、AWG (Arrayed-Waveguide Grating)とも呼ばれている。図4に示すように、アレイ導波路回折格子7は、Si (シリコン)等の半導体基板15上に形成された絶縁膜16中に形成されている入力導波路17と、入力導波路17に接続される第1のレンズ導波路18と、第1のレンズ導波路18の出力端に接続されるアレイ導波路19と、アレイ導波路19の出力端に接続される第2のレンズ導波路21と、第2のレンズ導波路21の出力端に接続される出力導波路22と、から構成されている。ここで、第1のファイバー6は、入射導波路数と同数の光ファ

ファイバーが束状に構成されていてもよい。

[0044] 図5は、量子もつれ光子対生成体4で発生した波長多重のパラメトリック光子対5からなる光5が、アレイ導波路回折格子7で分波される様子を模式的に示す図である。アレイ導波路回折格子7において、第1の光ファイバー6から入射された波長多重光5が、第1のレンズ導波路18を介して三角プリズムの作用を有しているアレイ導波路19に入射し、波長毎に分波された光が出力導波路22から出射され、これらの分波された波長毎の光が別々の第2の光ファイバー8（8<sub>0</sub>～8<sub>n</sub>）へ導光される。

[0045] （第2の光ファイバー8）

第2の光ファイバー8は、アレイ導波路回折格子7の出力導波路22に接続されている。アレイ導波路回折格子7がn+1個の出力導波路を備えている場合、n+1個の出力導波路の各々に第2の光ファイバー8<sub>0</sub>～8<sub>n</sub>が接続される。第2の光ファイバー8の本数はn+1本であり、各第2の光ファイバー8の中心角周波数は、 $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-2}, \omega_{n-1}, \omega_n$ である。

[0046] 本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置1の動作について説明する。

上記したように、量子もつれ光子対生成体4における自発パラメトリック下方変換過程では、エネルギー保存則を満たすように生成されるために、この関係を満たす任意のファイバーチャンネル1及びmにパラメトリック光子対5を形成する二つの光子は導かれる。このとき、エネルギー保存則を満たす角周波数条件は、下記（8）式の関係で表わされる。（8）式を満たす任意のファイバーチャンネル1及びmに、パラメトリック光子対5を形成する二つの光子が導かれる。

[数9]

$$\omega_p = \omega_1 + \omega_m \quad (8)$$

[0047] ここで、二つの光子の偏光は直交しているが、アレイ導波路回折格子7は



偏光によって光子を分割しないため、出力側の光ファイバーチャンネル 8 に出力される光子の偏光状態は決定されない。つまり、エネルギー保存則を満たす二つの光ファイバーチャンネルから出力される 2 光子は、下記 (9) 式で表わされる偏光量子もつれ状態を形成する。

[数10]

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{\omega_1} |V\rangle_{\omega_m} + |V\rangle_{\omega_1} |H\rangle_{\omega_m} \right) \quad (9)$$

ここで、 $|H\rangle_{\omega_i}$  ( $i$  は 1 又は  $m$ ) は第 1 偏光 (H) を持つ光子が  $\omega_i$  の角周波数を有しており、周波数が  $\omega_i$  又は  $\omega_m$  であることを示している。 $|V\rangle_{\omega_i}$  ( $i$  は 1 又は  $m$ ) は第 2 偏光 (V) を持つ光子が  $\omega_i$  の角周波数を有しており、角周波数が  $\omega_i$  又は  $\omega_m$  であることを示している。

[0048] (9) 式は、光子のモード  $i$  を決定する物理量が、光子の角周波数であることを示している。第 1 偏光 (H) と第 2 偏光 (V) の向きは、互いに直交している。つまり、(9) 式で表わされる偏光量子もつれ状態は、周波数モードを利用した偏光量子もつれ状態を表わす。

[0049] 次に、各光ファイバーチャンネルの中心角周波数が、下記 (6) 式の関係を満たしているとする。

[数11]

$$\begin{aligned} \omega_p &= \omega_0 + \omega_n \\ &= \omega_1 + \omega_{n-1} \\ &= \omega_2 + \omega_{n-2} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \end{aligned} \quad (6)$$

[0050] このとき、エネルギー保存則を満たす 2 光子、例えば図 1 に示すように、角周波数が  $\omega_0$  と  $\omega_n$  の対は、下記 (10) 式で表わされる偏光量子もつれ状態を形成する。これらの角周波数  $\omega_0$ ,  $\omega_n$  を有する 2 光子対は、それぞれ光ファイバーチャンネル  $8_0$ ,  $8_n$  に入射されている。

[数12]

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle_{0,n} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{\omega_0} |V\rangle_{\omega_n} + |V\rangle_{\omega_0} |H\rangle_{\omega_n} \right), \\
 |\psi\rangle_{1,n-1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{\omega_1} |V\rangle_{\omega_{n-1}} + |V\rangle_{\omega_1} |H\rangle_{\omega_{n-1}} \right), \\
 |\psi\rangle_{2,n-2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |H\rangle_{\omega_2} |V\rangle_{\omega_{n-2}} + |V\rangle_{\omega_2} |H\rangle_{\omega_{n-2}} \right), \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

例えば、(10)式の第1式において、 $|H\rangle_{\omega_i}$  ( $i$ は0又は $n$ )は第1偏光(H)を持つ光子が $\omega_i$ の角周波数を有しており、角周波数が $\omega_0$ 又は $\omega_n$ であることを示している。 $|V\rangle_{\omega_i}$  ( $i$ は0又は $n$ )は第2偏光(V)を持つ光子が $\omega_i$ の角周波数を有しており、角周波数が $\omega_0$ 又は $\omega_n$ であることを示している。

[0051] (波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置1の設計例)

量子もつれ光子対生成体4において、ポンプ光3に対してタイプIIの位相整合を実現するための計算を行った。具体的には、非線形光学結晶11に形成する周期分極反転構造11Aの計算を行った。非線形光学結晶11としては、タンタル酸リチウム(LiTaO<sub>3</sub>)及びニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)を用い、(7)式を用いて、擬似位相整合の計算を行った。

ここで、非線形光学結晶11の光軸方向の長さ(素子長とも呼ぶ)は40mmとした。非線形光学結晶11としてタンタル酸リチウムを用い、ポンプ光3の波長を792nmとした場合、分極反転構造の周期 $\Lambda$ は(7)式から19.4 $\mu$ mと求まった。

[0052] 図6は、タンタル酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体4から出射されるパラメトリック光子対5のスペクトルを計算した図である。図6の横軸は波長(nm)であり、縦軸は光強度(任意目盛)である。量子もつれ光子対生成体4の光軸方向の長さは40mmであり、分極反転構造の周期 $\Lambda$ は19.4 $\mu$ mであり、ポンプ光3の波長は792nmである。

図6から明らかなように、タンタル酸リチウムからなる量子もつれ光子対

生成体 4 へ波長 792 nm のポンプ光 3 を入射した際に、出射されるパラメトリック光子対 5 のスペクトルの半値全幅は、12.6 nm 程度まで広がっていることが分かる。

[0053] 図 6 に示したパラメトリック光子対 5 のスペクトルは、中心波長 1584 nm、チャンネル間隔 0.8 nm、各チャンネルの透過帯域半値全幅 0.4 nm のアレイ導波路回折格子 7 を通過させた後に生じるパラメトリック光子対 5 のスペクトルの計算値である。

[0054] 図 7 は、図 6 に示したパラメトリック光子対 5 が、アレイ導波路回折格子 7 を通過した後のスペクトルを示す図である。図 7 の横軸及び縦軸は図 6 と同じである。

図 7 から明らかなように、パラメトリック光子対 5 をアレイ導波路回折格子 7 を通過させることで、パラメトリック光子対 5 は、大凡 40 チャンネルのスペクトルに分解されることが分かる。ここで、1584 nm を中心に対称な波長を持つ光ファイバーチャンネル 8 に出力される 2 光子は偏光量子もつれ状態を形成している。

[0055] (比較例)

非線形光学結晶 11 としてニオブ酸リチウムを用いた比較例について説明する。この場合の素子長は 40 mm である。(7) 式から、ポンプ光 3 の波長が 792 nm のときの分極反転構造の周期  $\Lambda$  は、9.6  $\mu\text{m}$  となった。

図 8 は、比較例のニオブ酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体 4 から出射されるパラメトリック光子対 5 のスペクトルを計算した図である。図 8 の横軸及び縦軸は図 6 と同じである。

図 8 から明らかなように、ニオブ酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体 4 へ波長 792 nm のポンプ光 3 を入射した際に出射されるパラメトリック光子対 5 のスペクトルの半値全幅は、0.7 nm 程度であることが分かる。典型的なアレイ導波路回折格子 7 のチャンネル間隔 (channel spacing) が 0.8 nm (100 GHz) 程度であることを考慮すると、ニオブ酸リチウム結晶を用いた量子もつれ光子対生成体 4 では、波長多重化には不適當

であることが分かる。

[0056] 本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置 1 によれば、単一の波長  $\omega_p$  を有しているポンプ光 3 を波長多重の量子もつれ光子対生成体 4 へ照射し、量子もつれ光子対生成体 4 によって偏光が直交した 2 光子が、広帯域スペクトルを持つように発生させることができる。これらの 2 光子対からなる広帯域スペクトルは、波長が多重化されている。この広帯域スペクトルをアレイ導波路回折格子 7 を通過させるだけで、波長多重の偏光量子もつれ光子対を多数のチャンネルのスペクトルに分波することができる。

[0057] 本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置 1 は、ポンプ光 3 を発生させるポンプ光源 2 と、波長多重の量子もつれ光子対生成体 4 と、アレイ導波路回折格子 7 と、を含んで構成されている。ポンプ光 3 と波長多重の量子もつれ光子対生成体 4 は、偏光が直交し広帯域スペクトルを有する光子から構成される光子対を生成するための 2 光子光源となる。このため、本発明の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置 1 は、複数の結晶の組み合わせや干渉計を用いる従来の方法と比較すると、構成の簡略化と偏光量子もつれ光源の波長多重化とを同時に達成可能である。

[0058] 従来、フィルターによってブロックされ、利用されていなかったパラメトリック光子対 5 も、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術を用いることにより、偏光量子もつれ光子対として利用可能であり、偏光量子もつれ光子対の波長分割多重伝送技術へ応用できる。

## 実施例 1

[0059] 以下、実施例により本発明をさらに詳細に説明する。

波長多重量子もつれ光子対生成体 4 を、非線形光学結晶 11 としてタンタル酸リチウムを用いて作製した。波長多重量子もつれ光子対生成体 4 の光軸方向の長さは 40 mm とし、光軸方向に沿って周期分極反転構造 11A を形成した。分極反転構造の周期  $\Lambda$  は、18.5  $\mu\text{m}$ , 19.5  $\mu\text{m}$ , 20.5  $\mu\text{m}$ , 21.5  $\mu\text{m}$  と種々に変えた。

[0060] 作製した量子もつれ光子対生成体 4 へ波長が 792 nm のポンプ光 3 を照

射して、量子もつれ光子対生成体4から生成される光スペクトルを測定した。なお、ポンプ光3の光源として波長792.0nmに設定されたCW発振のチタンサファイアレーザーを用いた。

図9は、実施例のタンタル酸リチウムからなる量子もつれ光子対生成体4から出射されるパラメトリック光子対5のスペクトルを示す図であり、(A)が常光線を、(B)が異常光線を示す。図9の横軸は波長(nm)であり、縦軸は光強度(任意目盛)である。常光線と異常光線との偏光状態は直交している。量子もつれ光子対生成体4の分極反転構造の周期は21.5 $\mu$ mである。

図9から明らかなように、分極反転構造の周期が21.5 $\mu$ mの量子もつれ光子対生成体4から出射されるパラメトリック光子対5の常光及び異常光は、周波数に対して類似の強度を有しており、観測されたパラメトリック光子対5のスペクトル幅は、半値全幅でおおよそ29nmであり、図6及び図7に示した計算結果から予測されるスペクトルの半値全幅である12.6nmの2倍以上のスペクトル帯域を持つパラメトリック光子対5を生成できることが判明した。

[0061] これにより、中心波長1584nm、チャンネル間隔0.8nm、各チャンネルの透過帯域半値全幅0.4nmのアレイ導波路回折格子7を通過させた後のパラメトリック光子対5は、大凡80チャンネルのスペクトルに分解されることが分かる。

なお、分極反転構造の周期19.4 $\mu$ m近傍の量子もつれ光子対生成体4からのパラメトリック光子対5は、観測されなかった。

[0062] 次に、パラメトリック光子対5の波長相関を測定した。

図10は、図9に示したパラメトリック光子対5の波長相関を示す図である。図10において、横軸は常光線の波長(nm)であり、縦軸は異常光線の波長(nm)である。図に示す白い部分ほど光子対の強度が高いことを表わしている。

図10から明らかなように、パラメトリック光子対5の波長相関は、ポン

プ光3の2倍の波長である1584nmを中心にエネルギー保存則を満たすように光子対が対称に分布していることが分かる。

[0063] 上記結果から、ポンプ光源2とパラメトリック光子対5とからなる光源によって発生した光子対を、例えば128チャンネルのアレイ導波路回折格子7へ導き、波長多重分割をすることで、アレイ導波路回折格子7の出力側で対をなす80チャンネル間で偏光量子もつれ光子対が得られることが判明した。

[0064] 本発明は、上記実施例に限定されることなく、特許請求の範囲に記載した発明の範囲内で種々の変形が可能であり、それらも本発明の範囲内に含まれることはいうまでもない。例えば、上記実施の形態で説明した、非線形光学結晶11、12の材料、素子長や分極反転周期 $\Lambda$ 、 $\Lambda'$ は、波長多重の度合いに応じて適宜に調整できることは勿論である。

## 請求の範囲

- [請求項1]           ポンプ光源と、  
                  上記ポンプ光源から出射したポンプ光が入射される量子もつれ光子対生成体と、  
                  上記量子もつれ光子対生成体から出射される波長が多重されたパラメトリック光子対が入射される分波器と、  
                  を含み、  
                  上記量子もつれ光子対生成体が非線形光学結晶からなり、上記ポンプ光に対してタイプ I I の位相整合によって波長多重の偏光量子もつれ光子対を生成するようにした、波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置。
- [請求項2]           前記非線形光学結晶が、周期分極反転構造を有している、請求項 1 に記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置。
- [請求項3]           前記周期分極反転構造の分極反転周期は、前記非線形光学結晶の光軸方向で徐々に変化する線形チャープ構造を有している、請求項 2 に記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置。
- [請求項4]           前記非線形光学結晶が、タンタル酸リチウムからなる、請求項 1 ～ 3 の何れかに記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置。
- [請求項5]           前記分波器が、アレイ導波路回折格子からなる、請求項 1 に記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成装置。
- [請求項6]           非線形光学結晶からなる量子もつれ光子対生成体を形成し、 上記量子もつれ光子対生成体へ角周波数が $\omega_p$ のポンプ光を照射し、  
                  上記ポンプ光と上記量子もつれ光子対生成体内で発生させるシグナル光とアイドラー光との間でタイプ I I の位相整合を行い、互いに偏光が直交し、かつ、波長が多重された偏光量子もつれ光子対を生成し、  
                  、  
                  上記波長が多重された偏光量子もつれ光子対を、角周波数が $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\dots$ 、 $\omega_{n-2}$ 、 $\omega_{n-1}$ 、 $\omega_n$ となるように分波し、

上記波長多重された各一对の偏光量子もつれ光子対を、下記（6）式で表わされるエネルギー保存則を満たす角周波数関係とする、波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法。

[数1]

$$\begin{aligned}\omega_p &= \omega_0 + \omega_n \\ &= \omega_1 + \omega_{n-1} \\ &= \omega_2 + \omega_{n-2} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot\end{aligned}\quad (6)$$

[請求項7] 前記非線形光学結晶に周期が $\Lambda$ の周期分極反転構造を、前記ポンプ光の光軸方向に形成し、

上記周期 $\Lambda$ を、下記（7）式を満足する周期とし、

前記ポンプ光と前記量子もつれ光子対生成体内で発生させる前記シグナル光と前記アイドラ光との間で擬似位相整合を行う、請求項6に記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法。

[数2]

$$k_p = k_s + k_i + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (7)$$

ここで、 $k_p$ 、 $k_s$ 、 $k_i$ は、それぞれ、前記非線形光学結晶中に入射したポンプ光の波数ベクトル、前記非線形光学結晶内で発生するシグナル光の波数ベクトル、前記非線形光学結晶内で発生するアイドラ光の波数ベクトルである。

[請求項8] 前記周期分極反転構造の分極反転周期を、前記非線形光学結晶の光軸方向で徐々に変化する線形チャープ構造とする、請求項7に記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法。

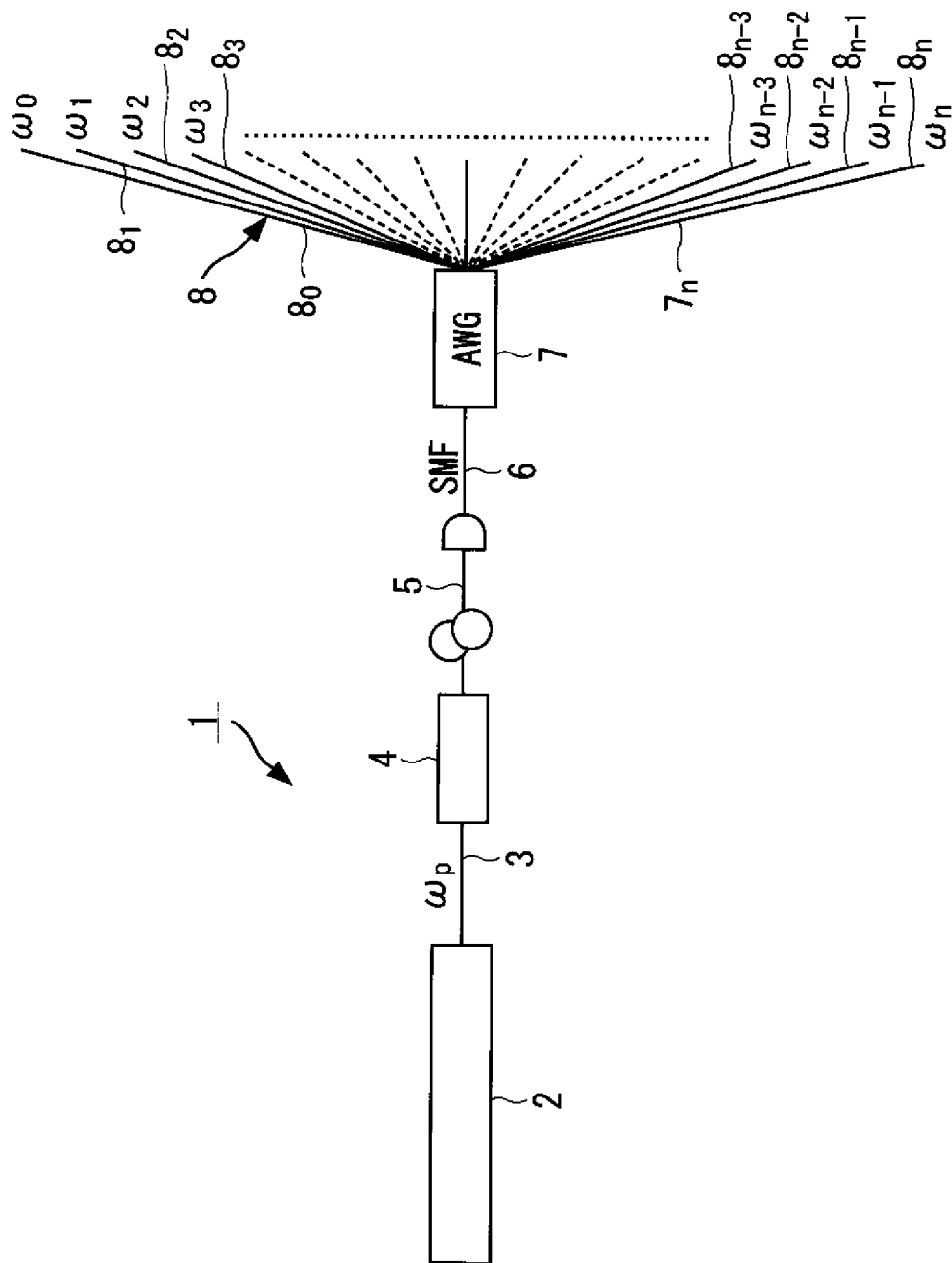
[請求項9] 前記非線形光学結晶を、タンタル酸リチウムとする、請求項6ないし8の何れかに記載の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法。

[請求項10] 前記分波を、アレイ導波路回折格子を用いて行う、請求項6に記載

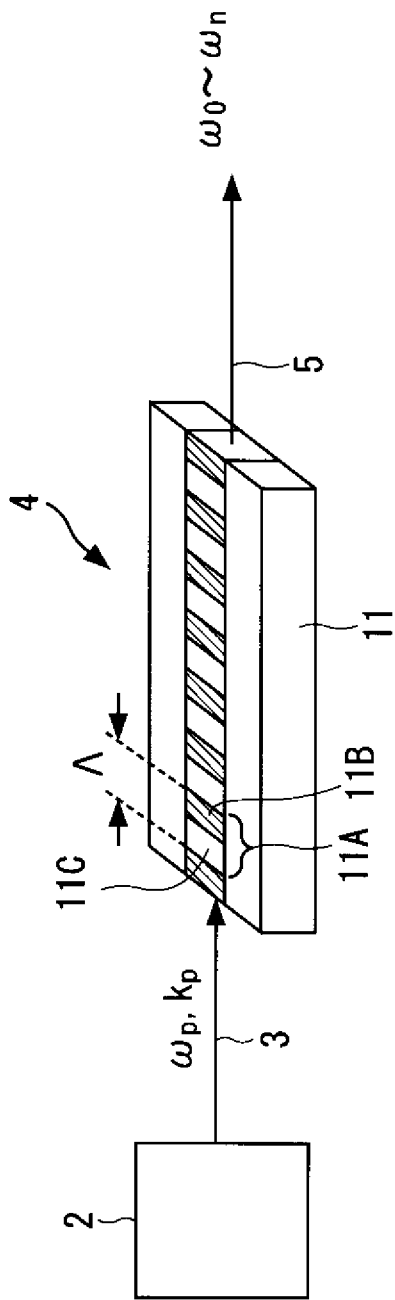


の波長多重偏光量子もつれ光子対の生成方法。

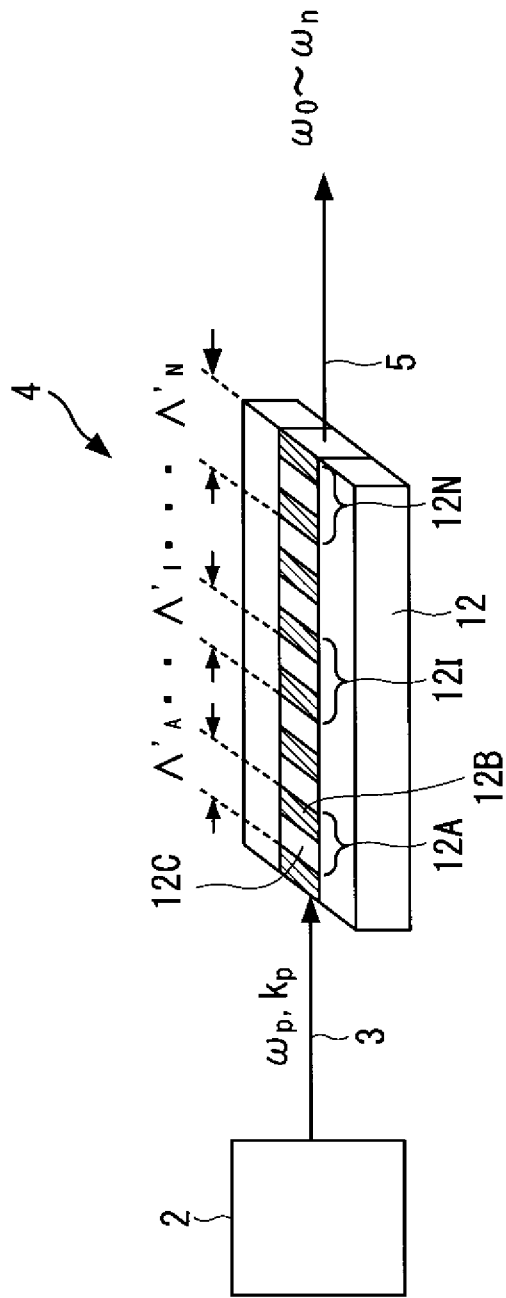
[図1]



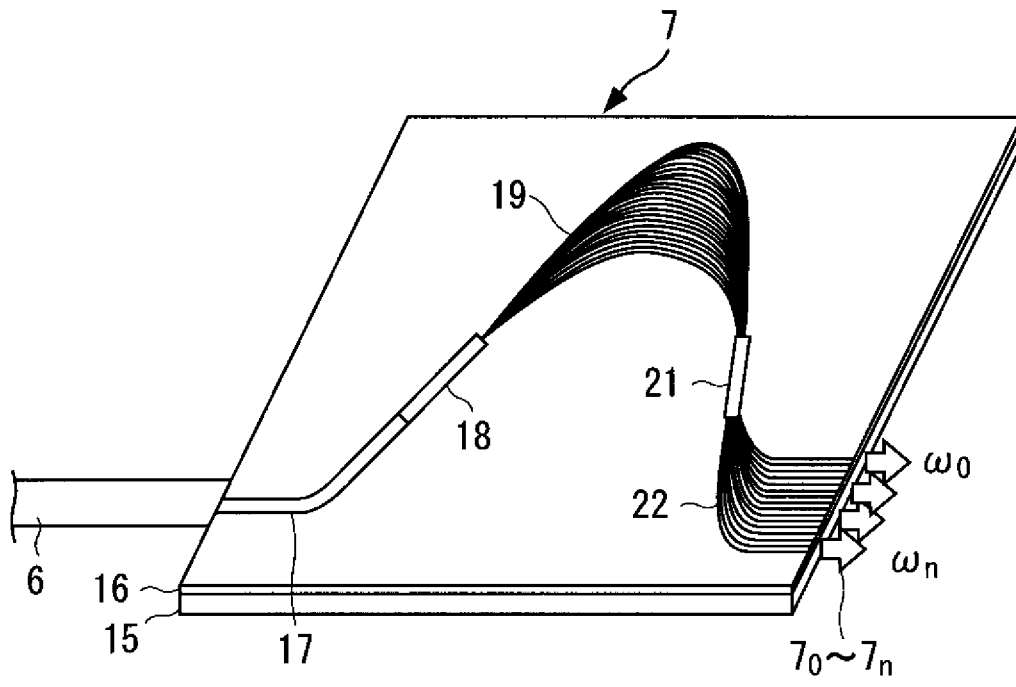
[図2]



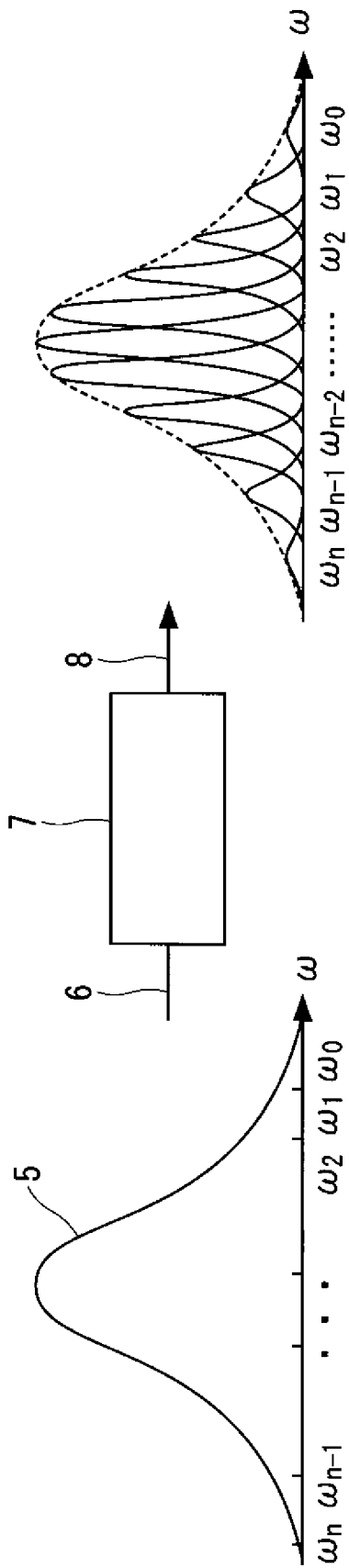
[図3]



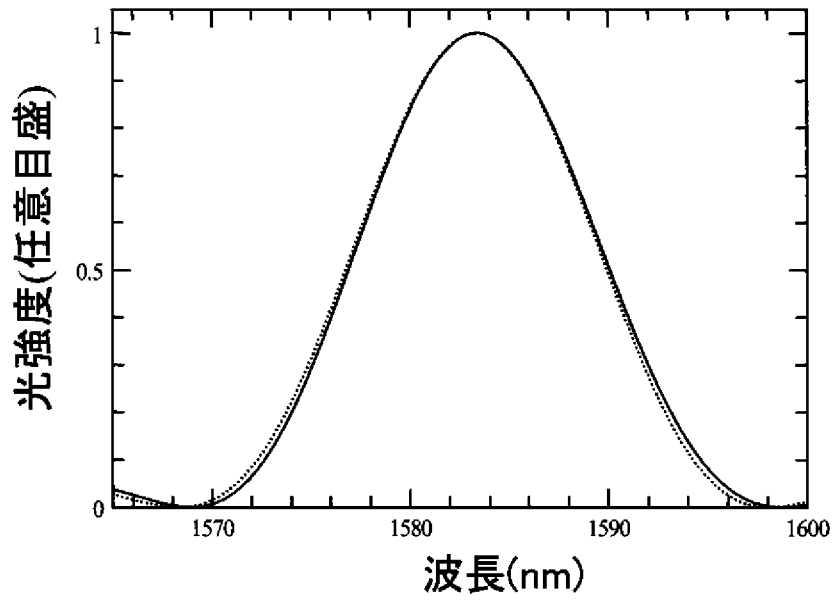
[図4]



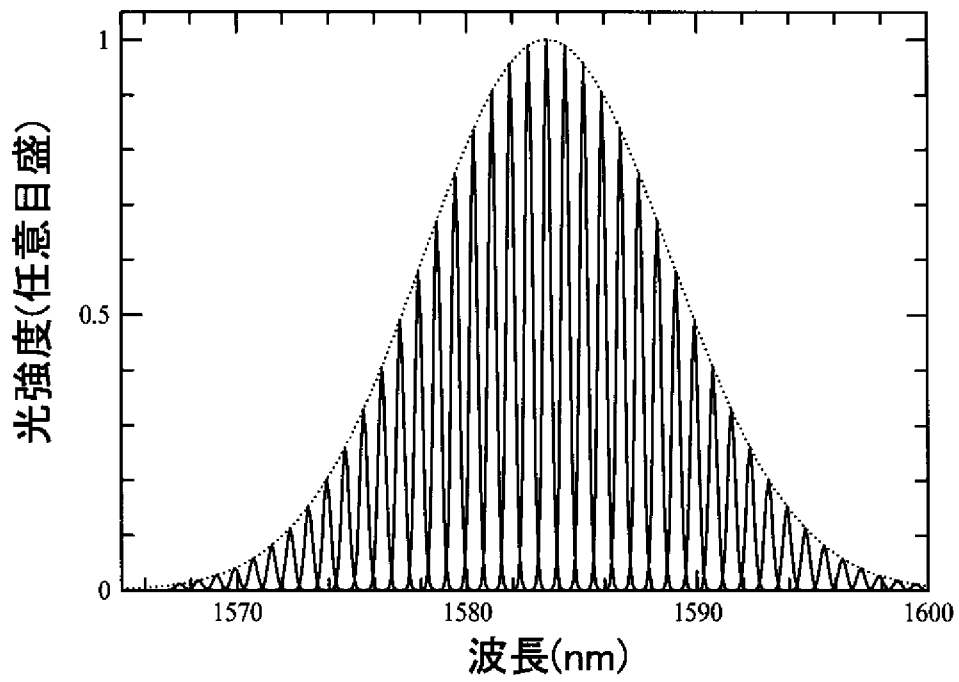
[図5]



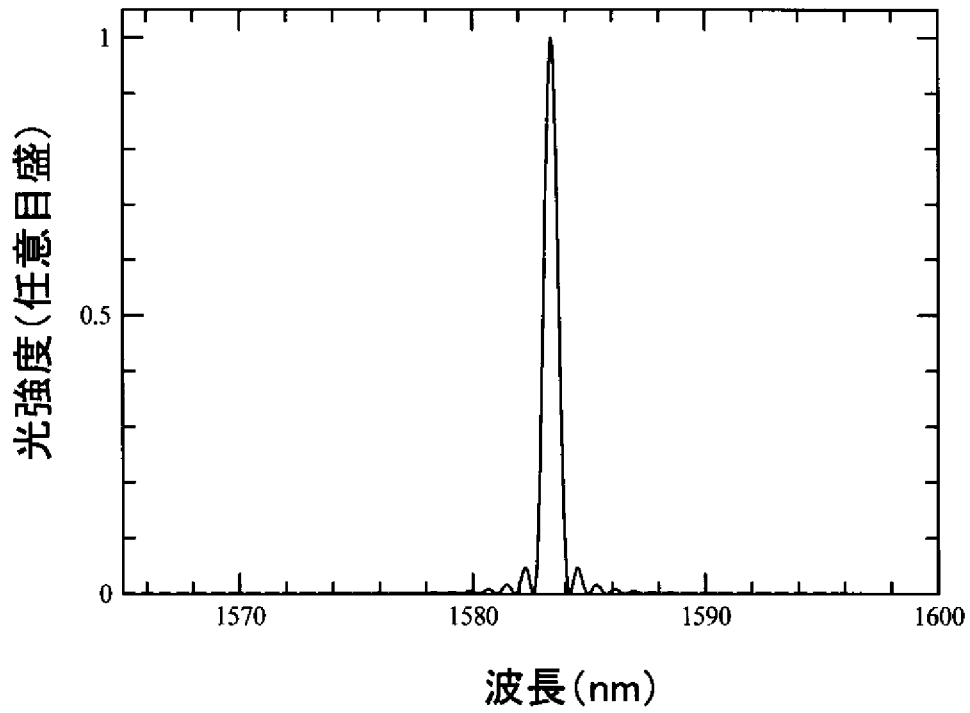
[図6]



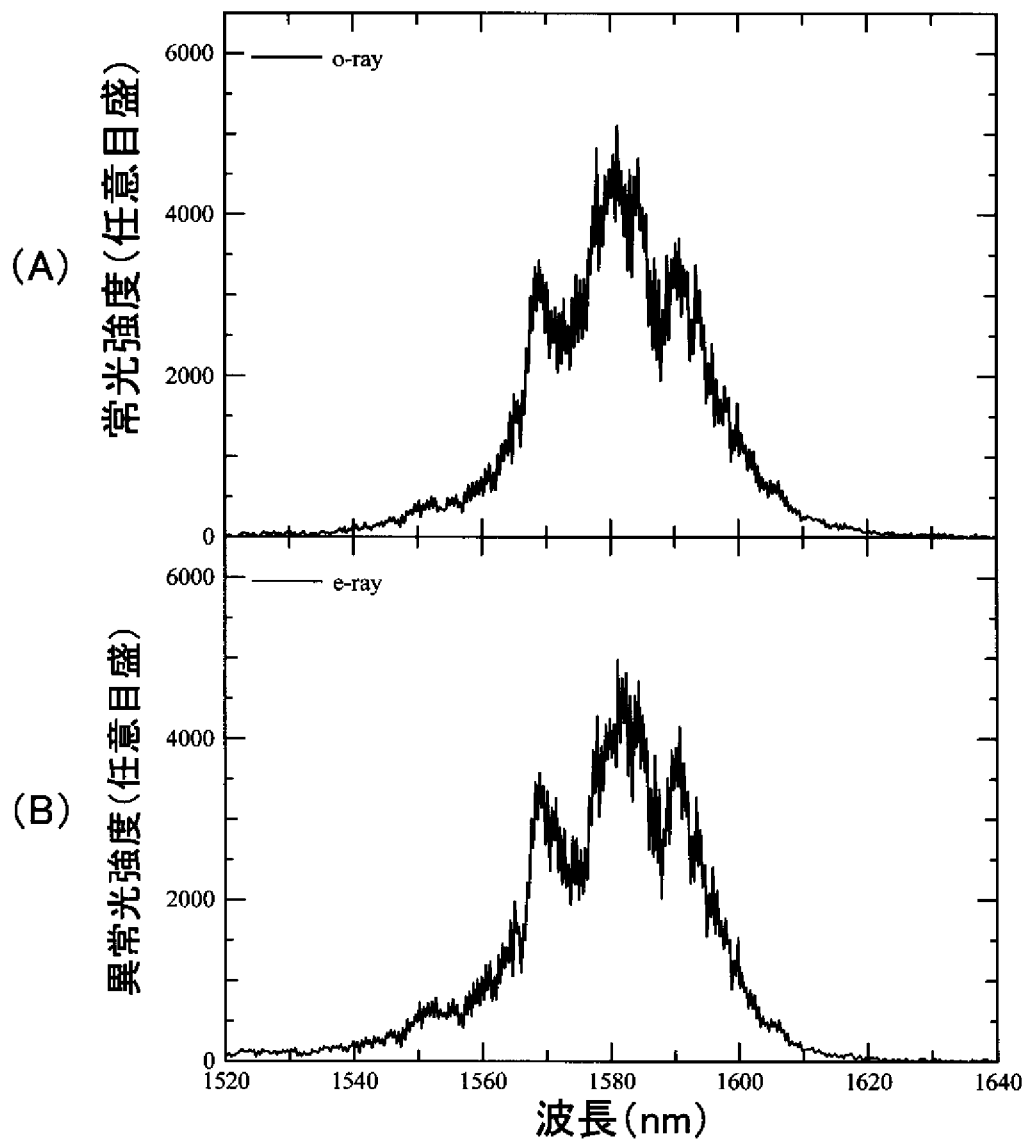
[図7]



[図8]

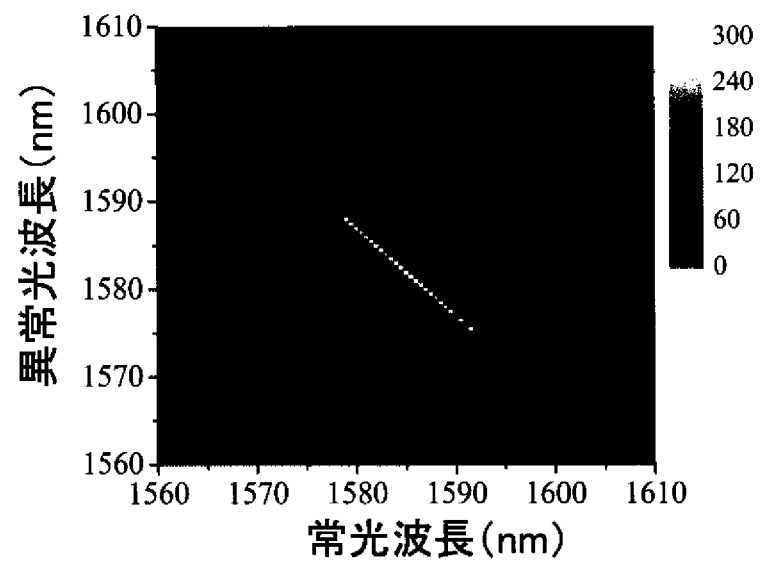


[図9]





[図10]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/059461

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F1/35(2006.01) i, H04L9/12(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)

G02F1/35, H04L9/12

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2010

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2010 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2010

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JDreamII), AIP-Journal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages  | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| Y         | Han Chuen Lim et al., Wavelength-multiplexed distribution of highly entangled photon-pairs over optical fiber, OPTICS EXPRESS, 2008.12.22, Vol.16, No.26, 22099-22104   | 1-10                  |
| Y         | P.S.K.Lee et al., Increased polarization-entangled photon flux via thinner crystals, Physical Review A, 2004.10.22, 70, 043818-1 - 043818-4   | 1-10                  |
| Y         | Hiroshi SUZUKI et al., "Generation of polarization entangled photon pairs using PPLN under the type-II phase matching condition", Abstracts of the Meeting of the Physical Society of Japan, 25 August 2008 (25.08.2008), vol.63, no.2, 141 | 2-4, 7-9              |

 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

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
09 July, 2010 (09.07.10)Date of mailing of the international search report  
20 July, 2010 (20.07.10)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/059461

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| Y         | Magued B.Nasr et al., Ultrabroadband Biphotons Generated via Chirped Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Down-Conversion, Physical Review Letters, 2008.05.09, 100, 183601-1 - 183601-4 | 3, 4, 8, 9            |
| P, Y      | Ryusuke Shimizu et al., High-flux and broadband biphoton sources with controlled frequency entanglement, OPTICS EXPRESS, 2009.09.14, Vol.17, No.19, 16385-16393                            | 1-10                  |
| A         | JP 2007-318445 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.),<br>06 December 2007 (06.12.2007),<br>paragraphs [0014] to [0018], [0030] to [0032]<br>(Family: none)                              | 1-10                  |

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02F1/35(2006.01)i, H04L9/12(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. G02F1/35, H04L9/12

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 | 1971-2010年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1996-2010年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1994-2010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(JDreamII) AIP-Journal

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>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<br>請求項の番号 |
|-----------------|---|----------------|
| Y               | Han Chuen Lim et al., Wavelength-multiplexed distribution of highly entangled photon-pairs over optical fiber, OPTICS EXPRESS, 2008.12.22, Vol.16, No.26, 22099-22104 | 1-10           |
| Y               | P. S. K. Lee et al., Increased polarization-entangled photon flux via thinner crystals, Physical Review A, 2004.10.22, 70, 043818-1 - 043818-4                        | 1-10           |

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

09.07.2010

国際調査報告の発送日

20.07.2010

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)

佐藤 宙子

2 X

9 3 1 6

電話番号 03-3581-1101 内線 3294

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |  |                |
|-----------------------|--|----------------|
| 引用文献の<br>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<br>請求項の番号 |
| Y                     | 鈴木寛史 他, Type-II PPLN を用いた量子もつれ光子対発生, 日本物理学会講演概要集, 2008.08.25, Vol.63, No.2, 141  | 2-4, 7-9       |
| Y                     | Magued B.Nasr et al., Ultrabroadband Biphotons Generated via Chirped Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Down-Conversion, Physical Review Letters, 2008.05.09, 100, 183601-1 - 183601-4 | 3, 4, 8, 9     |
| PY                    | Ryusuke Shimizu et al., High-flux and broadband biphoton sources with controlled frequency entanglement, OPTICS EXPRESS, 2009.09.14, Vol.17, No.19, 16385-16393                            | 1-10           |
| A                     | JP 2007-318445 A (日本電信電話株式会社) 2007.12.06, 【0014】 - 【0018】, 【0030】 - 【0032】 (ファミリーなし)   | 1-10           |