

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4264735号
(P4264735)

(45) 発行日 平成21年5月20日(2009.5.20)

(24) 登録日 平成21年2月27日(2009.2.27)

(51) Int. Cl. F 1
G 0 2 F 1/35 (2006.01) G 0 2 F 1/35

請求項の数 2 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2004-71909 (P2004-71909)	(73) 特許権者	899000057 学校法人日本大学
(22) 出願日	平成16年3月15日(2004.3.15)		東京都千代田区九段南四丁目8番24号
(65) 公開番号	特開2005-258232 (P2005-258232A)	(74) 代理人	100099254 弁理士 役 昌明
(43) 公開日	平成17年9月22日(2005.9.22)	(74) 代理人	100100918 弁理士 大橋 公治
審査請求日	平成19年3月1日(2007.3.1)	(74) 代理人	100105485 弁理士 平野 雅典
		(74) 代理人	100108729 弁理士 林 紘樹
		(72) 発明者	井上 修一郎 東京都千代田区九段南四丁目8番24号 学校法人日本大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏光エンタングルド光子対発生装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を分岐する偏光ビームスプリッターと、前記偏光ビームスプリッターに接続され第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNとを組み込んだ偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計とを具備し、前記第1の導波路型PPLNと前記第2の導波路型PPLNを、第1の方向に回るビームは前記第1の導波路型PPLNをポンプし、第2の方向に回るビームは前記第2の導波路型PPLNをポンプするように、フェムト秒パルスレーザーからの光でポンプすることにより、波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を発生させることを特徴とする偏光エンタングルド光子対発生装置。

【請求項 2】

フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を透過するとともに、波長 $\lambda/2$ の偏光エンタングルド状態にある光子対を反射するダイクロイックミラーと、前記ダイクロイックミラーを透過した光を分岐する無偏光ビームスプリッターと、前記無偏光ビームスプリッターに接続され第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNとを組み込んだ偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計とを具備し、前記サニャック干渉計を双方向に回るビームのそれぞれの第1の偏光成分は前記第1の導波路型PPLNをポンプし、第2の偏光成分は前記第2の導波路型PPLNをポンプするように、前記第1の導波路型PPLNと前記第2の導波路型PPLNを両側からフェムト秒パルスレーザーからの光でポンプすることにより、波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を発生させることを特徴とする偏光エンタ

10

20

ングルド光子対発生装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、偏光エンタングルド光子対発生装置に関し、特に、導波路型PPLNと光ファイバーサニャック干渉計とで構成した偏光エンタングルド光子対発生装置に関する。

【背景技術】

【0002】

1984年のCharles Bennet (IBM) 等による量子暗号プロトコルの開発、1994年のPeter Shor (AT&T) による量子計算アルゴリズムの発表を契機として、量子情報処理に関する研究が精力的に進められている。中でも、量子暗号は既に実用化の水準に達しており、通信波長帯 (波長1550nm) での既設光ファイバーを用いた実験も行われている。これらの実験では、単一光子レベルまで減衰させたレーザー光が用いられているが、光子の非局所性を利用した高度な量子情報通信 (量子テレポーテーションなど) を実用化するためには、エンタングルド (絡み合わせ) 状態にある光子対が必要となる。このエンタングルド状態にある光子対は非線形光学過程である自然パラメトリック下方変換によって発生できる。

10

【0003】

量子情報通信の研究分野では、ベル状態を用いた量子暗号・量子テレポーテーションなどの原理証明実験が、主に波長700~800nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を用いて行われてきた。その理由は、この波長帯では量子効率が高く、しかもダークカウントが少ない単一光子検出器が市販されていること、BBOなどの高効率下方変換が可能な結晶と高出力ポンプレーザーとしてアルゴンレーザー (波長351nm) やチタンサファイアレーザーの第二高調波 (波長400nm付近) を使用できることにある。

20

【0004】

波長1550nmのエンタングルド光子対の発生に関する研究は、これまで2件報告されている。それらは、周期分極擬似位相整合シリカファイバーを利用したもの (サザンプトン大学) と、分散シフトファイバーによる四光波混合を利用したもの (ノースウエスタン大学) である。ポンプ出力1mWに対する1秒間あたりの光子対発生率はそれぞれ、1.7と500である。波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を、フェムト秒パルスレーザーにより発生させた実験はまだ報告されていない。

30

【0005】

図3に、フェムト秒レーザーによる波長800nmの偏光エンタングルド状態発生に用いられた光学系を示す。この系では、2つのBBO結晶で発生した光子対をコヒーレントに重ね合わせるために、マッハツェンダー干渉計の腕の長さを調整し安定化する必要がある。また、アライメントが困難であるため、期待される光子対の発生率および高い純度のエンタングルメントは得られていない。

【0006】

特許文献1に開示された「もつれ合い光子対発生装置」は、もつれ合った状態の光子対を、ビーム状に収束して高効率に発生できるもつれ合い光子対発生装置である。図4に示すように、垂直偏光、他方が水平偏光に固定された「もつれ合っていない」状態で、光子対をビーム状に発生させるBBOなどを用いた偏光確定光子対発生装置を2つ直列に配置する。それら2つの装置の中間に、偏光を90度回転させる1/2波長板を挿入する。ポンプ光を入射することにより、2つの偏光確定光子対発生装置でそれぞれ発生された水平偏光と垂直偏光の光子ビームを、異なる偏光同士で重ね合わせる。従来よりも高い効率で、もつれ合った光子対ビームを発生させることができる。

40

【0007】

非特許文献1に開示された光子対発生装置は、図5に示すように、2つのPPLN導波器を使用して、波長1550nmの偏光相関光子対を発生する装置である。2光子干渉実験において、同時検出率は、0.53kHzである。非特許文献2に開示された光子対発生装置は、図6に示すように、サニャック干渉計を使用して、偏光エンタングルド光子対のパルスが発生す

50

る装置である。

【特許文献1】特開2003-228091号公報

【非特許文献1】A. Yoshizawa, R. Kaji and H. Tsuchida, "Generation of polarization-entangled photon pairs at 1550nm using PPLN waveguides", Electron. Lett., vol. 39, pp.621-622. (3 April 2003).

【非特許文献2】B. S. Shi, A. Tomita, "Generation of Pulsed Polarization Entangled Photon Pair Using a Sagnac Interferometer", Phys. Rev. A (2004).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかし、従来の光子対発生装置では、光ファイバーにおけるこの波長帯の光損失は2dB/kmと大きく、長距離伝送は不可能であるという問題があった。

【0009】

本発明の目的は、上記従来の問題を解決して、量子情報通信の実用化のために、光ファイバーにおける光損失が最小となる波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を効率よく発生させることである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記の課題を解決するために、本発明では、偏光エンタングルド光子対発生装置を、フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を分岐する偏光ビームスプリッターと、偏光ビームスプリッターに接続され第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNとを組み込んだ偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計とを具備し、第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNを、第1の方向に回るビームは第1の導波路型PPLNをポンプし、第2の方向に回るビームは記第2の導波路型PPLNをポンプするように、フェムト秒パルスレーザーからの光でポンプすることにより、波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を発生させる構成とした。

【発明の効果】

【0011】

本発明では、上記のように構成したことにより、波長1550nmの純度の高い偏光エンタングルド状態にある光子対を効率よく発生させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

以下、本発明を実施するための最良の形態について、図1と図2を参照しながら詳細に説明する。

【実施例1】

【0013】

本発明の実施例1は、フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を偏光ビームスプリッターで分岐し、偏光ビームスプリッターに接続された偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計に組み込んだ第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNとを、第1の方向に回るビームは第1の導波路型PPLNをポンプし、第2の方向に回るビームは記第2の導波路型PPLNをポンプするように、フェムト秒パルスレーザーからの光でポンプすることにより、波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を発生させる偏光エンタングルド光子対発生装置である。

【0014】

本発明の実施例1における偏光エンタングルド光子対発生装置の構成を説明する。図1は、本発明の実施例1における偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図である。図1において、フェムト秒パルス1は、パルス幅がフェムト秒程度のレーザー光パルスである。偏光ビームスプリッター(PBS)2は、複屈折性の結晶によって光線束を2つに分離する光学素子である。第1導波路型PPLN3と第2導波路型PPLN4は、光通信における波長変換素子として開発された導波路型PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)である。

10

20

30

40

50

偏波保存ファイバー 5 は、光の振動面(偏波面)を一定の方向に保ちながら光を伝搬させる単一モードの光ファイバーである。干渉フィルター 6 は、干渉効果によって透過エネルギーのスペクトル成分を部分的に制御するフィルターである。複屈折性結晶 7 は、屈折率が光線の伝播方向によって異なる異常偏光と、伝播方向によって異なる常偏光が存在する、複屈折を起こす結晶である。

【 0 0 1 5 】

50/50カップラー 8 は、光ファイバーを接合して、入射光を50%ずつに分岐するようにした光学素子である。半波長板 9 は、入射光に 0° の位相差を与え、光の電界の振動方向が波長板の光軸に対し 0° の方位角で入射した時に振動方向を 90° 回転させる光学素子である。45° の方位角で入射した時に最大の回転角90° を得る。円偏光の光が入射した場合は、光の振動方向を反対回りに変える。グラントムソンアナライザー10は、入射した非偏光の光のうち、異常光線(s偏光の光)を出射し、常光線(p偏光の光)を吸収する光学素子である。単一光子検出器11は、単一の光子を検出できる感度の光検出器である。同時計測器12は、2つの単一光子検出器で同時に光子を検出したとき応答する計測器である。

10

【 0 0 1 6 】

上記のように構成された本発明の実施例 1 における偏光エンタングルド光子対発生装置の動作を説明する。最初に、図 1 を参照しながら、動作の概略を説明する。光通信における波長変換素子として開発された導波路型PPLNを、偏波保存ファイバー 5 で構成されたサニャック干渉計に組み込み、これを、時計回りのビームはPPLN 4 をポンプし、反時計回りのビームはPPLN 3 をポンプするように、フェムト秒レーザーからの光でポンプすることにより、純度の高い偏光エンタングルド状態にある光子対を高効率で発生させる。

20

【 0 0 1 7 】

フェムト秒パルスによる相関光子対の発生方法を説明する。偏光エンタングルド状態にある光子対を用いた高度な量子情報通信を行うためには、特定の時刻に光子対を発生させるなければならない。このため、超短パルスレーザーによって波長変換素子をポンプする必要がある。そこで、フェムト秒チタンサファイアレーザーで、導波路型PPLNをポンプすることにより、光子対を発生させる。導波路型PPLNは、できる限り大きな光子対発生率を得るため、長さ50mmとする。ポンプ光の導波路への結合と、発生した光子対の収集を効率よく行うために、導波路に偏波保存ファイバーを取り付けたものを使用する。

【 0 0 1 8 】

サニャック干渉計による偏光エンタングルド状態にある光子対の発生方法を説明する。導波路型PPLNによる自然パラメトリック下方変換では、ポンプ光の偏光と同じ偏光をもつ光子対が発生する。そのため、直交した2つの偏光に関するエンタングルド状態を発生させるためには、2個の導波路型PPLNを、偏光が直交したポンプ光で、それぞれポンプする必要がある。また、純度の高いエンタングルド状態を生成するためには、各導波路型PPLNで発生した光子対を、コヒーレントに重ね合わせる必要がある。

30

【 0 0 1 9 】

図 1 に示すように、光ファイバーで構成したサニャック干渉計を採用し、2つの導波路型PPLN(位相整合の方向を直交させて配置する)で発生した光子対のコヒーレントな重ね合わせを自動的に行う。発生した光子対に同じ経路を通過させることにより、干渉計の腕の長さの調整と安定化の問題を回避することができる。さらに、サニャック干渉計を、光ファイバーで構成することにより、自由空間において、レンズによりポンプ光と発生した光子対を収集する場合の色収差が引き起こすアライメントの問題も回避することができる。

40

【 0 0 2 0 】

偏光エンタングルド状態の純度の評価方法を説明する。上記の方法で発生させた偏光エンタングルド状態にある光子対を、50/50カップラー 8 により2つに分け、グラントムソンアナライザー10を用いて偏光相関を測定し、エンタングルメントの純度を評価する。さらに、2つの異なった偏光をもつ光子対の位相差および偏光状態を複屈折性結晶 7 と半波長板 9 で調整することにより、4つのベル状態が生成可能であることを確認できる。こ

50

で、光学部品はすべてファイバーオプティクスを使用する。

【0021】

このようにして、導波路型波長変換素子を用いて、波長1550nmの純度の高い偏光エンタングルメント状態にある光子対を、フェムト秒パルスレーザーにより効率よく発生させる。発生した光子対は、光ファイバーにより出力されるので、長距離ファイバーを通信路とした量子情報通信に最適である。導波路型PPLNによる光子対発生実験で得た発生率は13,600である。導波路型PPLNによる光子対発生率は、他の方法に比べて格段に効率が良い。

【0022】

導波路型PPLNは、変換効率が非常に高いため、低出力半導体パルスレーザーでポンプした場合でも、1パルスあたり2～3組の光子対が発生する可能性が高い。1パルスあたり多数の光子対が発生すると、偏光エンタングルメントの純度を低下させる原因となる。そのため、1パルスあたり1組の光子対が発生するように、レーザー出力を調整する必要がある。

【0023】

上記のように、本発明の実施例1では、偏光エンタングルメント光子対発生装置を、フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を偏光ビームスプリッターで分岐し、偏光ビームスプリッターに接続された偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計に組み込んだ第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNとを、第1の方向に回るビームは第1の導波路型PPLNをポンプし、第2の方向に回るビームは記第2の導波路型PPLNをポンプするように、フェムト秒パルスレーザーからの光でポンプすることにより、波長1550nmの偏光エンタングルメント状態にある光子対を発生させる構成としたので、純度の高い偏光エンタングルメント状態にある光子対を高効率で発生させることができる。

【実施例2】

【0024】

本発明の実施例2は、フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を、ダイクロイックミラーを透過させ、透過光を無偏光ビームスプリッターで分岐し、偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計に組み込まれた第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNを、フェムト秒パルスレーザーからの光で両側からポンプして、波長1550nmの偏光エンタングルメント状態にある光子対発生させ、ダイクロイックミラーで反射させて取り出す偏光エンタングルメント光子対発生装置である。

【0025】

本発明の実施例2における偏光エンタングルメント光子対発生装置の構成を説明する。図2は、本発明の実施例2における偏光エンタングルメント光子対発生装置の概念図である。図2において、ダイクロイックミラー13は、入射光のある特定域の光を反射し、その他の光を透過することによって、入射光を分離するミラーである。無偏光ビームスプリッター(NPBS)14は、偏光状態に関係なく光を分岐するビームスプリッターである。その他の構成は、実施例1と同じである。

【0026】

上記のように構成された本発明の実施例2における偏光エンタングルメント光子対発生装置の動作を説明する。サニャック干渉計による偏光エンタングルメント状態にある光子対のうちのひとつの発生方法である。導波路型PPLNは、導波路のどちら側からポンプしても、相関光子対を発生させることができる。この特徴を利用して、サニャック干渉計を、図2のように構成する。ここで、サニャック干渉計のループを反時計回りに伝播するポンプ光の水平成分は、第1の導波路型PPLN3で光子対を発生させ、垂直成分は、第2の導波路型PPLN4で光子対を発生させる。時計回りのポンプ光に関しても同様である。この干渉計の特徴は、2つのエンタングルメント状態にある光子対が、無偏光ビームスプリッター(NPBS)14で干渉することにある。サニャック干渉計の2つの出力の偏光相関を、グラントムソナライザー10で測定することにより、発生したエンタングルメント状態の性質および純度を詳細に調べることができる。4つのベル状態が生成可能である。

【0027】

上記のように、本発明の実施例で2は、偏光エンタングルド光子対発生装置を、導波路型PPLNを、フェムト秒パルスレーザーからの45度偏光を、ダイクロイックミラーを透過させ、透過光を無偏光ビームスプリッターで分岐し、偏波保存光ファイバーで構成されたサニャック干渉計に組み込まれた第1の導波路型PPLNと第2の導波路型PPLNを、フェムト秒パルスレーザーからの光で両側からポンプして、波長1550nmの偏光エンタングルド状態にある光子対を発生させ、ダイクロイックミラーで反射させて取り出す構成としたので、純度の高い偏光エンタングルド状態にある光子対を高効率で発生させることができる。

【産業上の利用可能性】

【0028】

本発明の偏光エンタングルド光子対発生装置は、長距離ファイバーを通信路とした量子情報通信の光子対を発生するための装置として最適である。

10

【図面の簡単な説明】

【0029】

【図1】本発明の実施例1における偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図、

【図2】本発明の実施例2における偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図、

【図3】従来例1の偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図、

【図4】従来例2の偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図、

【図5】従来例3の偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図、

【図6】従来例4の偏光エンタングルド光子対発生装置の概念図である。

【符号の説明】

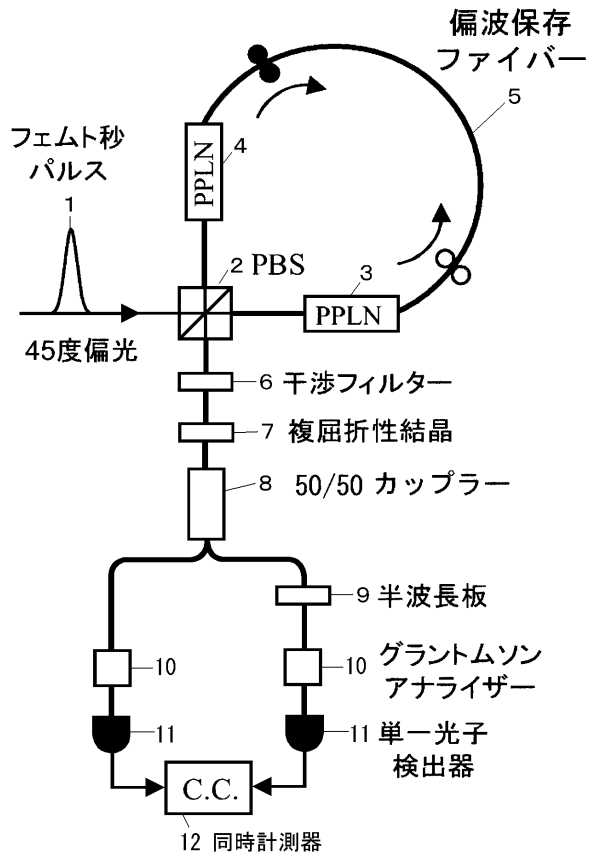
20

【0030】

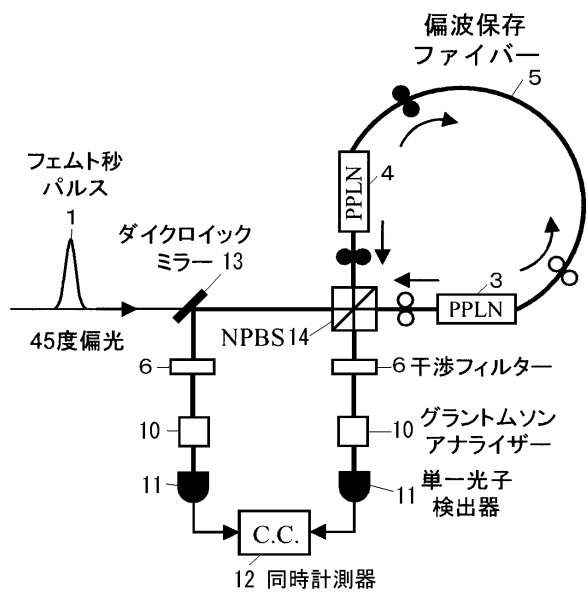
- 1 フェムト秒パルス
- 2 偏光ビームスプリッター (PBS)
- 3 第1導波路型PPLN
- 4 第2導波路型PPLN
- 5 偏波保存ファイバー
- 6 干渉フィルター
- 7 複屈折性結晶
- 8 50/50カップラー
- 9 半波長板
- 10 グラントムソンアナライザー
- 11 単一光子検出器
- 12 同時計測器
- 13 ダイクロイックミラー
- 14 無偏光ビームスプリッター (NPBS)

30

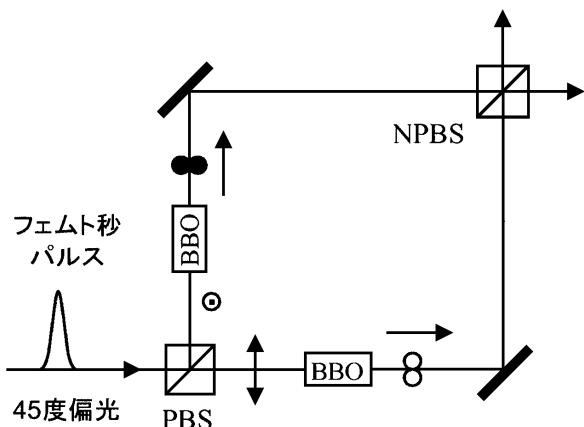
【図1】



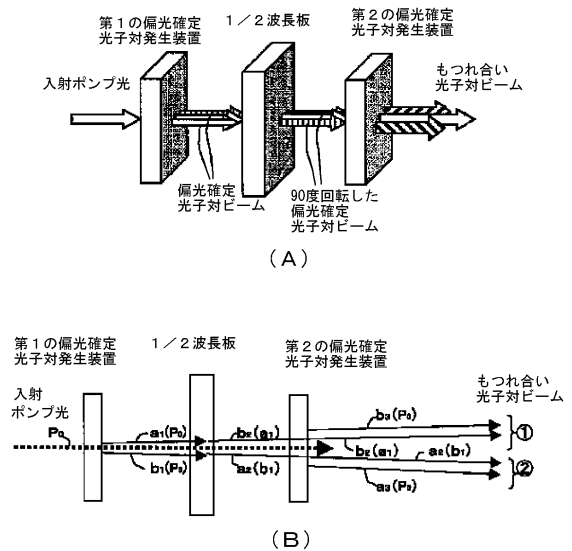
【図2】



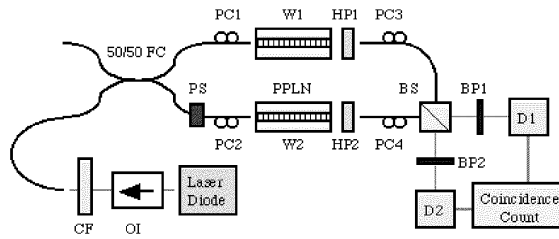
【図3】



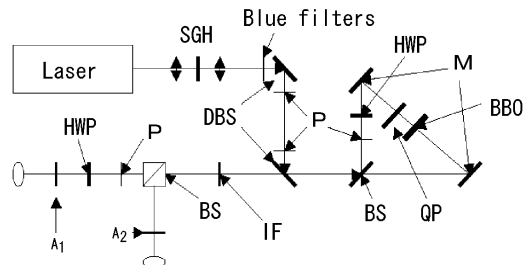
【図4】



【 図 5 】



【 図 6 】



DBS : dichroic mirror which transmits 800nm light and reflects 400nm light;
 BS : 50/50 beamsplitter;
 HWP : half waveplate;
 P : pinhole;
 IF : interference filter;
 A₁ : polarizer;
 A₂ : polarizer;
 M : mirror;
 QP : quartz plate.

フロントページの続き

審査官 河原 正

(56)参考文献 Electron.Lett. , 2 0 0 3年 4月 , Vol.39, No.7 , 621-622
Physical Review A , 2 0 0 1年 5月 , Vol.63 , 060301
Physical Review A , 2 0 0 4年 1月 , Vol.69 , 013803

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B名)

G 0 2 F 1 / 3 5 - 1 / 3 9