(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
2004 年11 月4 日 (04.11.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/095124 A1

(51) 国際特許分類[7]: G02F 1/39

(21) 国際出願番号: PCT/JP2004/005803

(22) 国際出願日: 2004 年4 月22 日 (22.04.2004)

(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2003-117055 2003 年4 月22 日 (22.04.2003) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 学校法人日本大学 (NIHON UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒1028275 東京都千代田区九段南四丁目８番２４号 Tokyo (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 井上 修一郎 (INOUE, Shuichiro) [JP/JP]; 〒1028275 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 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 役 昌明, 外 (YEN, Masaaki et al.); 〒1690073 東京都新宿区百人町２丁目２番４１－３０５号 エンテック特許事務所 Tokyo (JP).

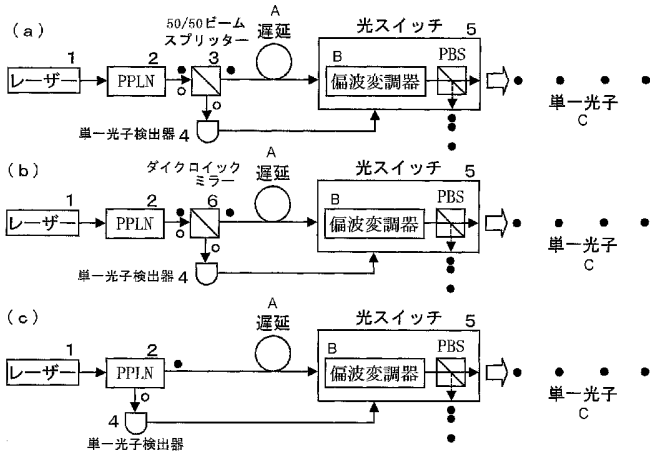
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, 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, LS, MW, MZ, SD, SL,

[続葉有]

(54) Title: SINGLE-PHOTON GENERATOR

(54) 発明の名称: 単一光子発生装置



(57) Abstract: A single-photon generator for generating a single photon with high efficiency at a constant frequency. A CW semiconductor laser (1) emits a laser beam of wavelength 780nm. A photon of wavelength 780nm is divided into two photons of wavelengths 1550 and 1570nm by means of a non-degenerate waveguide PPLN (2). A dichroic mirror (6) separates the two photons. A gate-operation single-photon detector (4) detects one of the photons and generates a detection signal. An LN polarization modulator is operated with the detection signal. An optical switch (5) composed of the LN polarization modulator and a polarized beam splitter rotates the polarization of the other photon by 90° and outputs the photon in a given direction. With this, only one photon can be taken out in the direction of the travel at a frequency of several hundreds of kilohertz. Two photons of different wavelengths are produced by spontaneous parametric down-conversion by a non-degenerate waveguide PPLN, the photons are separated by a dichroic mirror, one of the photons is detected by a gate-operation single-photon detector, and the output of the other photon is controlled by a high-speed LN polarization modulator. Therefore, a single photon can be efficiently produced at a constant frequency.

[続葉有]

WO 2004/095124 A1

SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
- 国際調査報告書
- 請求の範囲の補正の期限前の公開であり、補正書受領 の際には再公開される。

２文字コード及び他の略語については、定期発行される各*PCT*ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約: 単一光子発生装置により、一定の周期で効率よく単一光子を発生させる。ＣＷ半導体レーザー１で、波長７８０nmのレーザー光を発生する。波長７８０nmの光子を、非縮退導波路型ＰＰＬＮ２で、波長１５５０nmと１５７０nmの２つの光子に変換する。ダイクロイックミラー６で、２つの光子を分離する。ゲート動作の単一光子検出器４で、一方の光子を検出する。この検出信号により、ＬＮ偏波変調器を動作させる。ＬＮ偏波変調器と偏光ビームスプリッターにより構成される光スイッチ５で、もう一方の光子の偏光を９０度回転させ一定方向に出力する。これにより、光子１個だけを数百kHzの周期で進行方向に取り出すことができる。非縮退導波路型ＰＰＬＮによる自発パラメトリック下方変換によって波長の異なる２つの光子を発生させ、それらをダイクロイックミラーで分離し、ゲート動作の単一光子検出器で一方の光子を検出し、高速ＬＮ偏波変調器により他方の光子の出力を制御するので、一定の周期で効率よく単一光子を発生できる。

明 細 書

単一光子発生装置

技術分野

本発明は、単一光子発生装置に関し、特に、レーザー光を非線形光学結晶に当てて自発パラメトリック下方変換によって生成した２つの光子から単一光子を分離する単一光子発生装置に関する。

背景技術

現在、暗号鍵の配布には公開鍵暗号が広く使用されている。将来的には、原理的に盗聴・解読が不可能な暗号技術が必要となる。量子暗号は、原理的に盗聴・解読が不可能な暗号技術であり、この暗号鍵配布の問題を完全に解決することができる。また、「無相互作用測定」を利用すれば、「光を当てずに物を見る」ことが可能である。この無相互作用測定を並行的に行い、光を当てずに物を見る「無相互作用イメージング」が実現できる。量子暗号や無相互作用測定では、光子の量子力学的な性質を用いるために、単一光子発生技術が必要となる。

従来、光子源として、単一光子レベルまで減衰された光パルスが用いられてきた。この光源では、光子統計がポアッソン分布に従うため、同一パルス中に２個以上の光子が含まれる確率が存在する。量子暗号通信は、光子１個を伝送することで安全性を確保するため、ビームスプリッターアタック等の盗聴の可能性がある。量子暗号における単一光子発生は、レーザーからの光パルスを平均光子数が0.1個になるまで減衰することにより行なわれてきた。この方法では、単一光子は全パルスの10%にしか存在しないため、鍵配布率は低い。これを改善するためには平均光子数を上げればよいが、１パルスに含まれる光子数がポアソン分布に従うため、同じパルス内に２個以上の光子が存在する確率が増加してしまう。そのため量子暗号の安全性が破綻してしまう。

従来の他の単一光子源の例として、量子ドットによるものがある。これは、極低温下での動作や、1550nm帯の光子発生が困難であることから、量子暗号通信へ

の応用は難しい。そのため、単一光子の発生には、非線形光学過程である自発パラメトリック下方変換（Spontaneous Parametric Down Conversion: SPDC）が広く使用されている。このSPDCでは、エネルギーの高い光子を、エネルギーの低い２つの光子に変換する。以下、パラメトリック下方変換により発生する光子対を用いる単一光子源について説明する。

自発パラメトリック下方変換（SPDC）とは、非線形光学結晶の２次の非線形性を利用して、波長変換を行うものである。波長λ_0の光子は、エネルギー保存則と運動量保存則（位相整合条件）

$$hc/\lambda_0 = hc/\lambda_1 + hc/\lambda_2$$

$$k_p = k_s + k_i$$

を満たしながら、波長λ_1の光子と波長λ_2の光子へ変換される。ここで、ｈはプランク定数であり、ｃは光速である。$\lambda_1 = \lambda_2 = 2\lambda_0$の場合は、縮退パラメトリック下方変換と呼ばれる。$\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 2\lambda_0$の場合は非縮退パラメトリック下方変換と呼ばれる。

位相整合方法には２種類ある。１つは、ベータバリウムボレート（Beta Barium Borate： BBO）、ニオブ酸リチウム（Lithium Niobate： LN）バルク結晶の角度位相整合である。これは結晶の光軸に対するポンプ光の入射方向を調節することにより、位相整合条件を満たす。光子対を構成する光子は、アイドラー光子とシグナル光子と呼ばれる。シグナル光子とアイドラー光子が同一偏光を持ち、また、これらがポンプ光の偏光と直交する形をとるものをタイプI位相整合と呼ぶ。一方、シグナル光子とアイドラー光子の持つ偏光が直交するものをタイプII位相整合と呼ぶ。もう一つの位相整合方法は、擬似位相整合（Quasi Phase Matching： QPM）である。これは、結晶に周期的な分極反転構造を設けることにより、擬似位相整合を達成する。そして、ポンプ光と同じ偏光を持ったシグナル光子とアイドラー光子が発生する。これは、タイプ０位相整合と呼ばれる。波長1550nmが出力可能なものとして、LNに分極反転構造を設けたPPLN（Periodically Poled Lithium Niobate）がある。

自発パラメトリック下方変換により発生する光子対、つまりシグナル光子とアイドラー光子は、完全な時間相関を持つ。第１４図に示すように、光子検出器D

$_1$によりアイドラー光子が検出されたとすると、この検出信号は、シグナル光子が存在するタイミングの情報を持つ。よって、光子検出器D_1で光子が検出された時のみ光スイッチを開くことで、正確に相関のある光子が出力できる。この方法をポストセレクションと呼ぶ。

以下、従来の単一光子発生技術の例をいくつかあげる。特許文献１に開示された「単一光子発生装置」は、パルス内にただ１つの光子を発生させるものである。第１５図（ａ）に示すように、発生時刻に相関をもつ、シグナル光子とアイドラー光子からなる光子対を、光子対源で発生する。光子対源では、擬似位相整合型非線型光学媒質をレーザー光でポンプして、縦横の偏光をもつ蛍光対を発生する。光子検出器で、アイドラー光子の入射を検出する。クロック発生器のクロックによって規定される一定時間内に、特定の回数を下回る回数のみ、ゲート装置を開閉するための信号を、ゲート装置制御部で生成する。ゲート装置制御部からの信号に応じて、ゲート装置を開閉する。

特許文献２に開示された「量子暗号を使用したキー分配用システム」は、単一光子を用いてキー配布を行う量子暗号システムであり、単一光子を発生するために、第１５図（ｂ）に示すような単一光子発生装置を使用する。レーザーは、KDP等の非線型結晶をポンプする。結晶によるパラメトリック下方向変換で、２つの光子ビームを発生する。１つのビームの光子は、光検出器により検出され、単一の光子が通過するように、シャッターを開くゲートをトリガする。非特許文献１に開示された「光子対を用いる量子鍵配布システム」では、第１５図（ｃ）に示すような単一光子発生装置を使用する。この相関光子源（CPS）は、自発パラメトリック下方変換（SPDC）を利用して相関光子対を発生する。光子対のうちのアイドラー光子が検出器に到達したときにのみ、検出器でゲートをトリガして、シグナル光子を送出する。

非特許文献２に開示された「単一光子発生装置」は、第１６図（ａ）に示すように、非線形結晶を用いた下方変換器を配列する。各下方変換器は光子対を生成することができる。各下方変換器には、光子検出器が設けられている。光子検出器で光子を検出すると、光スイッチをトリガして、光子を出力する。非特許文献３に開示された「蓄積型単一光子発生装置」は、第１６図（ｂ）に示すように、

蓄積型の下方変換器を用いて、単一光子を擬似的にオンデマンドで発生できる光子源である。光子対がパラメトリック下方変換器から発生する。光子検出器からの検出信号により光スイッチを制御して、光子を蓄積ループに蓄える。必要なときに光スイッチを開いて、光子を取り出すことができる。

特許文献１：特開2000-292821号公報

特許文献２：特表平8-505019号公報

非特許文献１：Z. Walton, A.V. Sergienko, M. Atature, B.E.A. Saleh, and M.C. Teichl, "Performance of Photon-Pair Quantum Key Distribution System", J. Mod. Opt. Vol.48, No.14, pp.2055-2063, (Apr. 22, 2001).

非特許文献２：A. L. Migdall, D. Branning, S. Castelletto and M. Ware, "Single Photon Source with Individualized Single Photon Certifications", Proc. of the SPIE Vol.4821, pp.455-465, (2002).

非特許文献３：T.B. Pittman, B.C. Jacobs, and J.D. Franson, "Single Photons on Pseudo-Demand from Stored Parametric Down-Conversion", Phys. Rev. A66, 042303 (2002).

発明の開示

しかし、従来の単一光子発生装置では、一定の周期で効率よく単一光子を発生させることができないという問題があった。本発明は、一定の周期で効率よく単一光子を発生させることを目的とする。

上記の課題を解決するために、本発明では、単一光子発生装置を、CWレーザー光源と、レーザー光源からの１つの光子を同じ波長の２つの光子に変換する導波路型擬似位相整合$LiNbO_3$と、２つの光子を分離するビームスプリッターと、分離された一方の光子を検出するゲート動作の単一光子検出器と、分離された他方の光子を入力して単一光子検出器の検出信号で制御される光スイッチとを具備する構成とした。

このように構成したことにより、自発パラメトリック下方変換（レーザー光と結晶との非線形光学過程）で生成した２つの光子を、光スイッチにより、一定の偏光方向を持つ光子１個を高い確率で、効率よく分離して、単一光子を発生させ

ることができる。量子暗号に利用すれば、高いビットレートで、しかも長距離にわたる鍵配布を実現できる。

図面の簡単な説明

第１図は、本発明の実施例における単一光子発生装置の概念図である。

第２図は、Ｐ(ｎ')のＴ$_s$／Ｔ$_d$に対する依存性を示す図である。

第３図は、Ｔ$_s$／Ｔ$_d$＝0.2のときの光子数分布を示す図である。

第４図は、光子対発生装置の概念図である。

第５図は、パワーメーターにより測定した出力パワーとポンプ波長の関係を示す図である。

第６図は、ＲＴ$_d$＝1.44の時の実験結果を示す図である。

第７図は、実験値と計算値との比較を示す表である。

第８図は、ポストセレクションする方の光子検出器のゲート時間を長く取る方法を示す図である。

第９図は、アバランシェ信号を検出して制御信号を生成する回路の図である。

第１０図は、制御信号の波形を示す図である。

第１１図は、導波路型PPLNを用いた単一光子発生装置の概念図である。

第１２図は、１nsの制御信号を入力した場合と５nsの制御信号を入力した場合の比較を示す図である。

第１３図は、制御信号発生率が6，30，37，41kHzであるときの光子検出器Ｄ$_2$の検出確率を示す図である。

第１４図は、従来の自発パラメトリック下方変換による単一光子発生装置の概念図である。

第１５図は、従来の単一光子発生装置の概念図である。

第１６図は、従来の他の単一光子発生装置の概念図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明を実施するための最良の形態について、第１図～第１３図を参照しながら詳細に説明する。

本発明の実施例は、自発パラメトリック下方変換によって２つの光子を発生し、LN偏波変調器を用いる光スイッチで単一光子を選択的に通過させる単一光子発生装置である。

第１図は、本発明の実施例における単一光子発生装置の概念図である。第１図において、レーザー１は、波長775nmのCW半導体レーザーである。PPLN２は、波長775nmの光子を波長1550nmの２つの光子に変換する導波路型PPLN（バルク型擬似位相整合$LiNbO_3$）である。ビームスプリッター３は、２つの光子を分離する手段である。ゲート動作の単一光子検出器４は、ある時間間隔だけ光子１つを検出できるセンサーである。光スイッチ５は、LN偏波変調器と偏光ビームスプリッターにより構成される光スイッチである。これ以外の構成の光スイッチを用いることもできる。ダイクロイックミラー６は、波長の異なる光子を分離するミラーである。APDは、アバランシェフォトダイオードである。D_1, D_2は、光子検出器である。DM_1, DM_2は、ダイクロイックミラーである。L_1, L_2, L_3は、レンズである。SMFは、シングルモードファイバーである。

上記のように構成された本発明の実施例における単一光子発生装置の動作を説明する。単一光子発生装置は、第１図（ａ）に示すように、波長775nmのCW半導体レーザー１と、PPLN２と、光スイッチ５により構成されている。ここで、光スイッチ５は、LN偏波変調器と偏光ビームスプリッターにより構成されている。導波路型擬似位相整合$LiNbO_3$（非線形結晶）を、波長775nmのCW半導体レーザー１でポンプし、自発パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学過程により、波長1550nmの相関光子対を連続的に発生させる。

導波路型PPLNによる光子対発生を説明する。自発パラメトリック下方変換による光子対を用いた単一光子の発生率を上げるためには、光子対の発生率（Ｒ）を上げることが重要となる。そこで、下方変換素子として導波路型PPLN（以下PPLN-WG）を用いる。PPLN-WGは、バルク結晶に比べて光子対の発生率が高い。この理由として以下の２つが挙げられる。１つは、導波路構造を持つことから高いポンプパワー密度を保ったまま相互作用長を長く取ることが可能な点である。もう一つは、擬似位相整合を利用していることから、無機材料の中で最も大きい非線形光学定数d_{33}を利用できる点である。また、PPLN-WGは波長775nmのポンプにより

1550nmの光子対を発生することが可能である。

導波路型PPLN２（波長775nmの光子を波長1550nmの２つの光子に変換するもの）では、高い変換効率を得るために、数mW程度の出力を有する、波長775nmのCW半導体レーザー１で、導波路型PPLN２をポンプする。このとき、フォトリフラクティブ効果による変換効率の低下を防ぐために、導波路型PPLN２の温度はオーブンにより125℃～150℃に保つ。発生した波長1550nmの光子対の一方は、ゲート幅20ns程度（単一光子検出器のデッドタイム）で動作させた単一光子検出器４で検出する。この検出信号により、LN偏波変調器を動作させる。もう一方の光子の偏光を90度回転させることにより、光子１個だけを数百kHzの周期で進行方向に取り出す。このとき、LN偏波変調器は、光子検出信号のジッター時間（200ps）程度だけ動作させるため、５GHz程度で変調可能なものを使用する。

このようにして、パラメトリック下方変換により発生させた光子対の片方を検出（ポストセレクト）したときのみ、もう一方の光子を通過させる光スイッチ５を用いて、単一光子源を実現する。ポストセレクト用の光子検出器４（波長1550nm用）の時間分解能は100ps程度であることから、光スイッチ５の限界は約２GHzである。この下で最適な光子対の発生率は2.5×10^{8}個/ｓである。これ以上発生率を上げても、２個以上の光子を同時にスイッチしてしまう確率が高くなるだけである。この発生率を実現するために、下方変換素子として導波路型PPLN２を用い、波長775nmのCWレーザーでポンプすることにより、波長1550nmの光子対を発生させる。ポンプ光の出力が1mW程度のとき、先の光子対発生率が確保できる。

PPLN２により発生した光子対は、同じ方向に発生しているため、ビームスプリッター３により強制的に分離する。波長1550nm用の光子検出器４は、ゲート動作させるが、このゲート幅は通常、暗計数抑圧のため１nsと狭い。しかし、ポストセレクトできる確率をあげるために、20nsに広げる。この間に平均５個の光子が入射する。ゲート開始から初めての検出信号が出力されると、検出器４は、検出回路の受動クエンチング効果により、この後に入射する光子が検出されることはない。この検出信号を、光スイッチ５の制御信号として用いる。光スイッチ５には、PPLN２により出力される光子対が一定の偏光方向を持つことから、偏光ビームスプリッターを用いた偏光スイッチを採用する。偏光は、帯域10GHzの偏光コン

トローラーにより制御される。量子効率が約25％で、20nsあたりの暗計数率が約6×10^{-4}の単一光子検出器４を用いた場合、40％の確率で、ゲート時間内に光子を１つだけ入れることができる。光子が２個以上入る確率は、１％に抑えられる。これは、平均光子数0.1まで減衰された光パルスと同等レベルである。

第１図（ｂ）に示す単一光子発生装置では、PPLN２として、波長775nmの光子を波長1530nmと1570nmの２つの光子に変換できる非縮退導波路型PPLNを用いる。ゲート光子検出を、異なる波長で行うことができ、光子の利用効率を高めることができる。これにより、縮退導波路型PPLNよりもさらに高い単一光子発生率を実現することができる。50／50ビームスプリッター３の代わりに、ダイクロイックミラー６を用いる。

第１図（ｃ）に示す単一光子発生装置では、波長775nmの光子を、２つの光子に変換する。それらを、ポンプ光を含む平面上の異なる方向に発生できるバルク型PPLNを用いる。これにより、光子対を空間的に分離することができ、光子の利用効率を高めることができる。50／50ビームスプリッターは必要なくなる。

従来のように単に減衰させた光パルスの光子統計は、ポアソン分布に従う。しかし、この実施例の場合では、光子対の片方をポストセレクトしたときのみ、もう片方の光子を切り出すため、光子数ゆらぎを、ポアソン分布よりも抑圧することができる。また、光スイッチは、偏光状態を利用するものであるため、高い確率で光子１個を分離できる。そして、放出される光子は、一定の偏光方向を持つため、非常に扱いやすい光源である。光スイッチによる単一光子源では、２個以上の光子が同時に放出される確率を抑え、かつ高い確率で単一光子を放出することが可能となる。

以下、本発明の単一光子発生装置の動作実験の結果を説明する。まず、光子対の生成について説明する。光子検出器D_1の測定時間T_dの間に存在するアイドラー光子の数がｎ個である確率は、

$$P(n)=\{\exp(-RT_d)\}(RT_d)^n/(n!)$$

となる。ここで、Ｒは光子対の発生率である。光スイッチは、アイドラー光子が検出された時のみ開ける。よって、光スイッチを開けた時、シグナル光子は必ず出力される。光スイッチを開く時間をT_sとすると、この時間にシグナル光子の

数がｎ'である確率は、

$P(0)=0$

$P(n')=F(n')/\{\Sigma_{m=1}^{\infty}F(m)\}$

$F(m)=\{\exp(-RT_s)\}(RT_s)^m/(m!)$

となる。ここで、$RT_d=1$となるようにすると（つまり、時間T_dに平均で１対の光子対が発生する）、$RT_s=T_s/T_d$となる。

第２図に、Ｐ(ｎ')のT_s/T_dに対する依存性を示す。また、第３図に、$T_s/T_d=0.2$のときの光子数分布を示す。第２図から明らかなように、T_s/T_dを小さくすれば、多数個のシグナル光子を出力する確率を抑圧することが可能となる。この多光子抑圧方法では、光子対が連続的に発生しているため、この光源から出力される光子を制御、検出する際には、ポストセレクションの際の光子検出信号が必ず必要となる。また実際には、系による光損失や光子検出器の暗計数により、Ｐ(０)が存在する（$P(0)\neq 0$）。

第４図は、光子対発生装置の概念図である。第４図に示すように、波長が777nmで、平均パワーが５mWで、線幅が30kHzのCWレーザー（NEW FOCUS Tunable Diode Laser）から出力されたポンプ光は、レンズL_1により、結晶長30mmのPPLN-WGへ導入される。光損傷を防ぐために、PPLN-WGの温度は70℃と、高く設定されている。縮退パラメトリック下方変換により、波長1554nmの光子対（シグナル光子とアイドラー光子）が連続的に発生する。この出力は、レンズL_2によりコリメートされ、ダイクロイックミラーDM_1, DM_2により、ポンプ光は遮断される。実験（１）では、ダイクロイックミラーDM_1, DM_2を透過した出力光子を、パワーメーターへと導く。実験（２）では、出力光子対を、レンズL_3により、シングルモードファイバー（SMF）へ導く。その後、シグナル光子とアイドラー光子は、50／50シングルモードカップラーにより分離され、光子検出器D_1, D_2により検出される。光子検出器には、ペルチェ素子により－48℃まで冷却されたInGaAs/InP-APD（EPITAXX EPM239-BA）をゲート動作させるものを用いる。光子検出器D_1, D_2からの検出信号は、カウンター（STANFORD RESEARCH SYSTEM SSR400）によって、同時計数される。このとき、光子検出器D_1, D_2へのゲート電圧（パルス幅は約１ns）は、遅延発生器（STANFORD RESEARCH SYSTEM SDG535）によって遅延される。

実験（１）では、ポンプ光の波長を変化させた時の、1550nm帯の出力パワーを測定した。このとき、導波路に結合されるポンプパワーは1.5mWである。第５図に、パワーメーターにより測定した出力パワーと、ポンプ波長の関係を示す。波長777.2nmにおいてピークが見て取れる。これは、用いたPPLN-WG（70℃）の位相整合波長が777.2nmであることを意味する。オフセットの成分は、実験系のバックグラウンドと、パワーメーターのドリフト電流によるものである。ピークの高さからわかるように、およそ500pWの波長1554nmの光出力が得られている。実験（２）では、ポンプ光の波長を777.2nmに固定し、PPLN-WGから発生した波長1554nmの光子対を、単一光子検出器を用いて測定した。光子検出器D_1, D_2のゲートを200kHzで動作させた時の計数率は、1.6×10^{4}（シングル計数）である。

ここで、パワーメーターから見積もった光子対の平均発生率と、単一光子検出器の計数について説明する。波長1554nmの光子１個が持つエネルギーは、

$$w_{ph}=h\nu=hc/\lambda=6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}/(1554\times10^{-9})=1.29\times10^{-19}$$

となる。ここで、光子対の発生率をＲとし、ゲート幅をT_dとすると、ゲート時間内に入射する光子のパワーWgは、

$$Wg=\Sigma_{n=2,4,6,\cdots\infty}[\{\exp(-RT_d)\}(RT_d)^{n/2}/((n/2)!)]nw_p$$

と表せる。実験（１）の結果より、$Wg=5\times10^{19}$ [W/ns] であるから、１nsのゲート時間に含まれる平均の光子対の数RT_dは、およそ２である。

一方、入射する平均の光子対の数がRT_dの時の、光子検出器が検出信号を出力する確率は、

$$P_{av}=\Sigma_{m=0,2,4,6,\cdots\infty}[\{\exp(-RT_d)\}(RT_d)^{m/2}/(n!)]$$
$$\times\Sigma_{n=1}^{m}\{{}_nC_m(1/2^m)[1-(1-T\eta_{1,2})^n]\}$$

と表せる。ここで、Ｔは系の損失であり、$\eta_{1,2}$は、光子検出器D_1, D_2それぞれの量子効率である。この計算式に、$RT_d=2$を代入すると、ゲート１つあたりに検出信号を出力する確率は0.076となり、ゲートの繰り返し周波数200kHzを考慮すると、計数率の計算値は1.5×10^{4}となる。ここで、$\eta_{1,2}=0.2$、$T=0.2$とした。計算値と実験値は良く一致している。

次に、同時計数率について説明する。１つのゲートあたりの同時計数確率を表す計算式は、

$$P_{cc}=\Sigma_{m=0,2,4,6,\cdots}^{\infty}[\{\exp(-RT_d)\}(RT_d)^{m/2}/(n!)]$$
$$\times\Sigma_{n=1}^{m}\{{}_nC_m(1/2^m)[1-(1-T\eta_1)^n][1-(1-T\eta_2)^{m-n}]\}$$

とかける。この式には、相関のない光子どうしの同時計数も含まれてしまっている。そこで、相関のない光子による同時計数確率を求める。これは、２つの独立事象が同時に起こる確率であるから、光子検出器D_1, D_2のシングル計数の積で書ける。よって、相関のない光子による同時計数は、

$$P_{cp}=(\Sigma_{m=0,2,4,6,\cdots}^{\infty}\{[\exp(-RT_d)](RT_d)^{m/2}/(n!)\}$$
$$\times\Sigma_{n=1}^{m}({}_nC_m)(1/2^m)[1-(1-T\eta_1)^n])$$
$$\times(\Sigma_{m=0,2,4,6,\cdots}^{\infty}\{[\exp(-RT_d)](RT_d)^{m/2}/(n!)\}$$
$$\times\Sigma_{n=1}^{m}({}_nC_m)(1/2^m)[1-(1-T\eta_2)^n])$$

と表せる。よって、相関のある光子どうしによる同時計数確率は、$P_{cc}-P_{cp}$となる。

第６図に、$RT_d=1.44$の時の実験結果を示す。遅延時間が４nsのとき、同時計数率が増加している。これは、相関を持つ光子どうしの同時計数が現れたからである。逆に、それ以外の遅延時間においては、ある一定の同時計数が残っている。これは、相関のない光子どうしによる同時計数である。P_{cc}の式は遅延時間４nsの同時計数確率を示し、P_{cp}の式はその他の遅延時間における同時計数確率を示す。これらの式により求めた計算値との比較を、第７図の表にあわせて示す。ここで、$\eta_{1,2}=0.2$、$R=1.44$、$T_d=1$ns、$T=0.15$とした。この表から、計算値と実験値の良い一致を見ることができる。しかし、光子検出器に印加するゲートが１nsと短いため、同時計数確率が非常に小さい。

PPLN-WGから発生する光子対を用いて1550nm帯の単一光子源を実現するためには、1550nm帯単一光子検出器が必要となる。この検出器は通常、ゲート動作されるが、このゲート幅は１nsと非常に短い。そのため、ポストセレクトする確率が小さい。この結果、単一光子発生率が低くなってしまう。これを改善するためには、ポストセレクションする確率を大きくする方法が必要となる。そこで、ポストセレクションする方の光子検出器のゲート時間を長く取る。第８図に示すように、光子検出器D_1のゲート時間を長く取ることにより、ゲート中に入射する平均光子数が増加する。これにより、光スイッチを開くトリガ信号を出力する確率を大きく

することが可能となる。そして、ゲートが入力されてから初めてトリガ信号を出力したときのみ、光スイッチを開ける（短い時間のみ）。

1550nm帯単一光子検出器に使用している検出回路は、受動クエンチング機能（時定数をゲート時間以上にする必要がある）があるため、１度検出信号を出力すると、同じゲート内で再び検出信号を出力することはない。この方法では、光子検出器D_1における１ゲートあたりの検出確率が１となると、光子検出器D_1のゲートの周期に準じて、パルス的に光子を切り出すことが可能となる。しかし、光子が切り出されるタイミングは、厳密には、光子検出器D_1に採用するゲート時間だけの不確定さを持つこととなる。

光子対の片方を検出した際、アバランシェフォトダイオード（APD）から出力される検出信号、つまりアバランシェ信号の立ち上がりは、光子対のもう片方の光子の存在するタイミングの情報を持つ。よって、アバランシェ信号の立ち上がり時間を正確に読み取り、これをもとに、正確な時間に光スイッチを開く制御信号を出力する制御回路が重要となる。APDは、光子吸収してからアバランシェを起こすまでの応答時間に、100～200ps（APDに印加する電圧による）のジッターを持つ。よって、この分解能を減少させることなく制御信号を作成できるとすると、１GHzを超える光スイッチを実現することができる。

立ち上がり時間が500ps以下で、ジッターが100ps以下の超高速コンパレーター（High-Speed comparator；MAXIM MAX9691）を用いて、第９図に示すアバランシェ信号の検出系を作成した。また、このコンパレーターからの出力がECLレベル（L-level＝－1.7V，H-level＝－0.7V）であるため、出力レベルを、光スイッチの制御信号や光子検出器のゲートとして使用できるレベルへ変換、整形を行う回路（pulse circuit）を作成した。波長1550nm、パルス幅50psのパルスレーザーを用いて、この回路の試験を行った。単一光子検出器のゲート幅は20nsとし、ゲート開始から10ns後に光パルスを入射した。このときの制御回路からの出力を、1GHz帯域のオシロスコープ（LeCroy LC574AL）を用いて測定した。第１０図に示すように、出力信号は、立ち上がり、立下りともに600ps程度であり、ジッターは200ps程度である。オシロスコープの帯域を考慮すると、立ち上がりは、さらに鋭い可能性もある。また、Ｈ－レベルの継続時間は500psであるから、実際のパルス

幅は、およそ1.5nsとなる。また、出力電圧は最大で10V（50Ωの終端抵抗が駆動可能）の出力が可能である。実際に制御信号として用いる時には、高周波用プログラマブル減衰器を用いて電圧値を調節する。

第１１図に、単一光子発生装置の概念図を示す。PPLN-WGを、波長777.2nmのCWレーザーでポンプすることにより発生した1554nmの光子対は、単一モードファイバー（SMF）へと導かれる。50／50ファイバーカップラーにより、検出モード（d-mode）と出力モード（o-mode）の２つに分けられる。検出モードの光子は、光子検出器D_1で検出される。光子検出器D_1は、50nsと長いゲートにより駆動される（long-gate mode）。長いゲートを採用していることから、アフターパルスの発生率が高いため、ゲートの繰り返し周波数は50kHzとした。光子検出器D_1からの検出信号は、超高速コンパレーターにより閾値検出され、これからの出力は遅延がかけられた後に、パルス整形回路により、パルス幅が約１nsで、電圧が4.5Vの制御信号へと変換される。

一方、出力モードの光子は、制御信号をゲートとした光子検出器D_2により検出される。光子検出器D_2の光子検出結果は、制御信号の時間幅のみを見たものとなるので、光スイッチと制御信号を用いて出力される光子を検出するのと等価となる。光子検出器D_1, D_2は、InGaAs/InP-APD（EPITAXX EPM239BA）を、ペルチェ素子により－48℃まで冷却したものを用いる。光子検出器D_1の量子効率η_1は20％であり、暗計数確率は2×10^{-3}/50nsである。また、光子検出器D_2の量子効率η_2は20％であり、暗計数確率は2×10^{-4}/1nsである。

この実験系において重要な点は、光子対の片方が光子検出器へ入射したタイミングに、正確に制御回路からの制御信号がD_2に印加されるか否かである。制御信号を遅延させたときの光子検出器D_2の計数率を測定した。第１２図に、光子検出器D_2へ１nsの制御信号を入力した場合と、５nsの制御信号を入力した場合の比較を示す。遅延時間６nsにおいて、ピークを見ることができる。これは、相関を持つ光子が光子検出器D_2へ入射する正確な時間に、制御信号が印加されていることを示す。１nsに対して５nsの時の方が全体的な計数率が大きい。これは、５nsのほうが入射する平均光子数が多いため、相関がない光子に対する計数が増加したためである。相関のある光子による計数率の増加量は、１nsの場合、５ns

の場合共に同じである。これは、１nsと短い制御信号においても、相関のある光子の存存する時間を正確に押えることが可能であることを示す。

光子検出器D_1において、全てのゲートで検出信号を出力することができれば、50nsのジッターはあるものの、ゲートの繰り返し周波数分の制御信号を取り出すことができる。これは、パルス的な光源が可能となることを示唆する。これを実現するためには、光子検出器D_1の計数率が飽和するぐらい、光子対の発生率を上げればよい。ポンプ光強度を上げることにより光子対の発生率を増加させ、光子検出器D_2への制御信号発生率(光子検出器D_1の検出信号発生率)に対する光子検出器D_2の計数率を測定した。

第１３図に、制御信号発生率が６，30，37，41kHzであるときの光子検出器D_2の検出確率を示す。ここで、光子検出器D_1のゲートの繰り返し周波数は50kHzであるので、制御信号発生率41kHzの場合は、光子検出器D_1の計数率は80％以上である。制御信号の発生率が増加するにつれて、光子検出器D_2での計数確率は増加する。しかし、相関のない光子による計数確率のみが増加し、相関をもつ光子による計数確率に増加はない。これは、相関を持つ光子による計数確率は制御信号の発生率には依存せず、系の光損失のみで決定される。よって、光子対の発生率を増加させると、制御信号幅（光子検出器D_2のゲート幅）へ相関のない光子が入射する確率のみが増加したからである。

第１３図より、相関のある光子による計数確率は、平均1.3％となっている。光子検出器D_2の量子効率を考慮すると、制御信号が出力された時、およそ7％の確率で相関のある光子を出力できている。制御信号の発生率が６kHzであるときは、相関のない光子による計数が、ほぼ無視できるレベルまで抑圧できているのに対して、相関のある光子は正確に出力可能となっている。つまり、光子１個を正確に７％の確率で出力できることになる。一方で、制御信号の発生率が30kHz以上となると、相関のない光子による出力確率が無視できない。しかしながら、多光子出力確率を固定したまま、平均光子数を増加させることが可能となる（つまり、光子１個の出力確率のみが増加する）。

制御信号発生率が37kHzである時を例に挙げる。光子検出器D_2の量子効率(２０％)を補正すると、相関のある光子の影響により、全体の出力平均光子数は0.1

6である。一方、相関のない光子によるものは0.1である。光子数分布は、パラメトリック下方変換の時にポアッソン分布以上に広がってしまうが、ここでは損失が多いために、ポアッソン分布で近似する。その仮定では、多光子が出力される確率は、平均光子数0.1のポアッソン分布程度となる。この結果は、多光子出力確率が、およそ４dB改善されたことに対応する。

この例では、シグナル光子とアイドラー光子の波長が同じである縮退自発パラメトリック下方変換を用いているために、シグナル光子とアイドラー光子の分岐を、ファイバーカップラーを用いて行っている。よって、１／２の確率でシグナル光子とアイドラー光子の両方が、同じポートへ導かれてしまう。その結果、この事象に関しては、正確に相関する光子を出力することはできない。そこで、非縮退のパラメトリック下方変換（例えば1550nmと1560nm）を用いれば、シグナル光子とアイドラー光子を高効率に分けることができ、相関する光子の出力確率が２倍となる。また、ファイバーへの結合部分では７dB程度の大きな損失がある。そのため、損失の最適化を行えば、相関光子の出力確率はさらに増加する。以上が改善されれば、低い光子対発生率において光子検出器D_1の計数率の飽和が容易となり、パルス的に光子を発生することが可能である。

上記のように、本発明の実施例では、単一光子発生装置を、自発パラメトリック下方変換によって２つの光子を発生し、LN偏波変調器を用いる光スイッチで単一光子を選択的に通過させる構成としたので、効率よく単一光子を発生できる。

産業上の利用可能性

本発明の単一光子発生装置は、量子暗号用の光通信装置として最適である。また、無相互作用測定のための単一光子発生装置としても好適である。

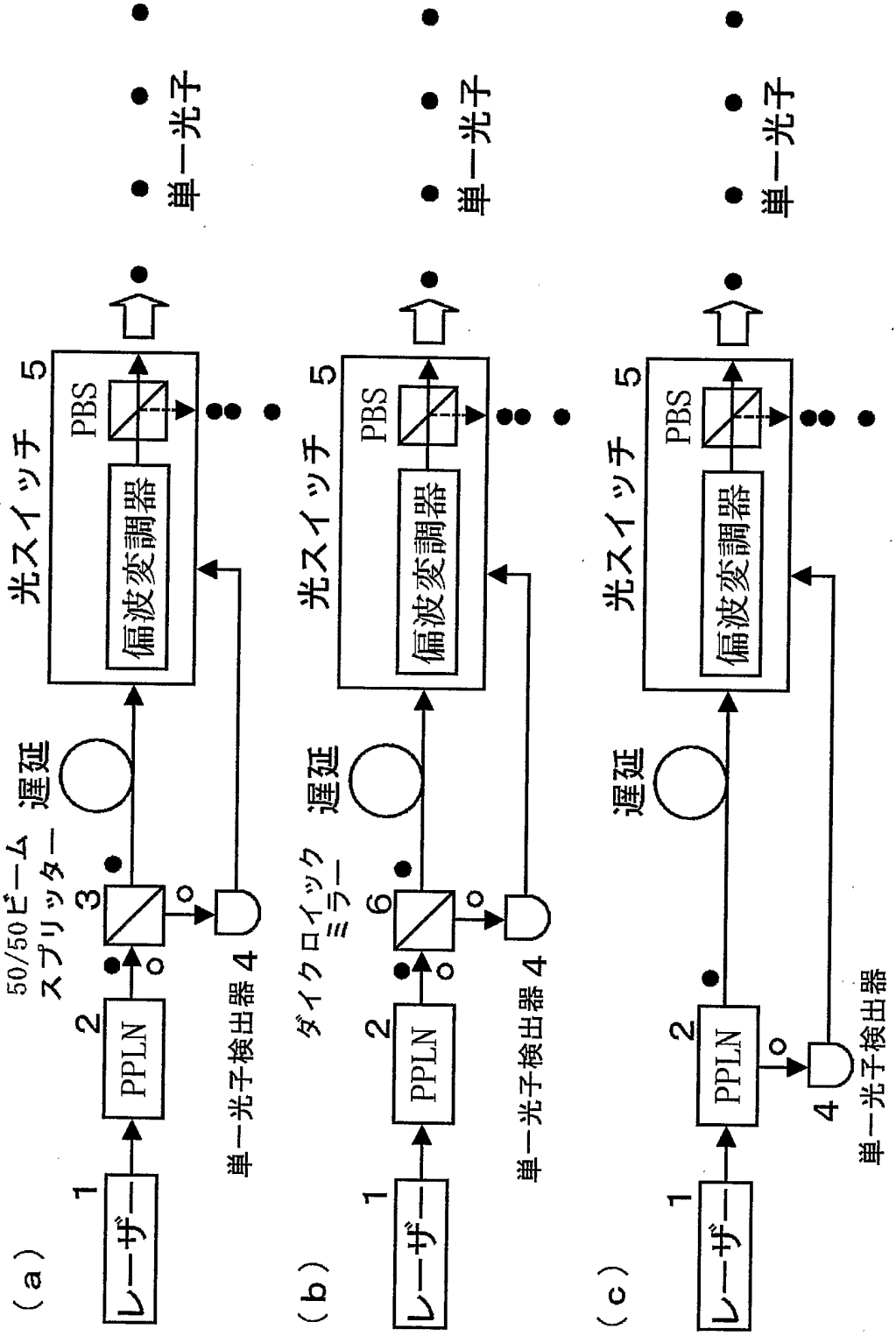
請 求 の 範 囲

１．レーザー光源と、前記レーザー光源からの１つの光子を同じ波長の２つの光子に変換する導波路型擬似位相整合$LiNbO_3$と、２つの光子を分離するビームスプリッターと、分離された一方の光子を検出する単一光子検出器と、分離された他方の光子を入力して前記単一光子検出器の検出信号で制御される光スイッチとを具備することを特徴とする単一光子発生装置。

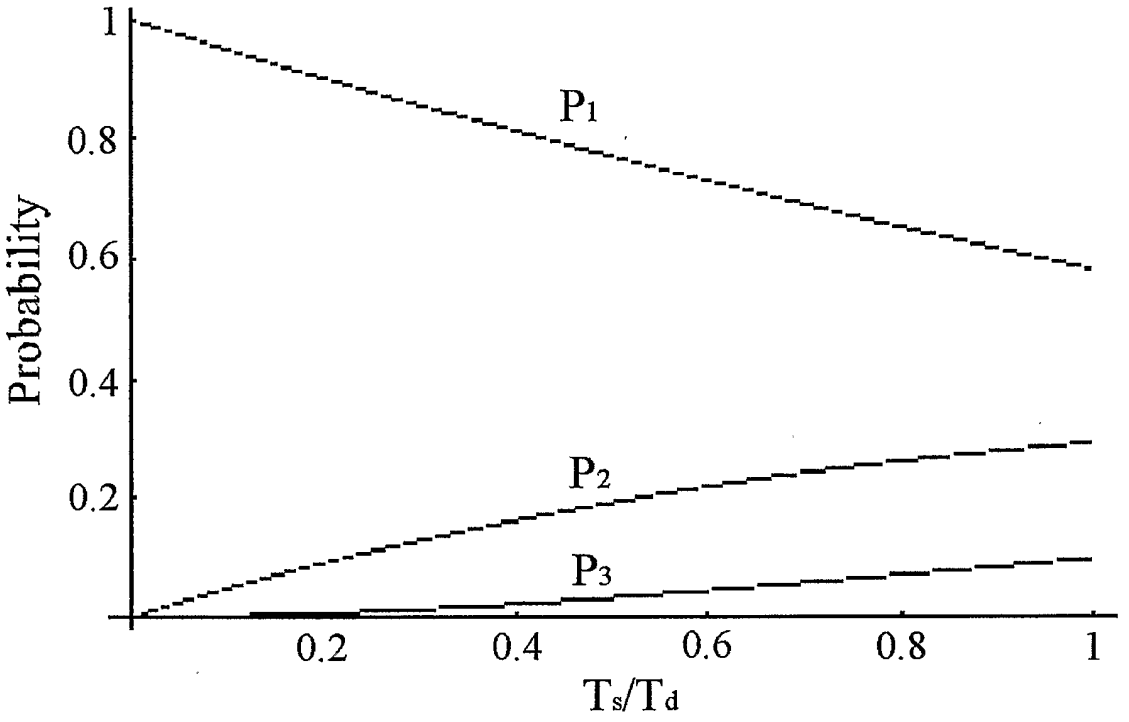
２．レーザー光源と、前記レーザー光源からの１つの光子を異なる波長の２つの光子に変換する非縮退導波路型擬似位相整合$LiNbO_3$と、異なる波長の２つの光子を分離するダイクロイックミラーと、分離された一方の光子を検出する単一光子検出器と、分離された他方の光子を入力して前記単一光子検出器の検出信号で制御される光スイッチとを具備することを特徴とする単一光子発生装置。

３．レーザー光源と、前記レーザー光源からの１つの光子を２つの光子に変換して異なる方向に出力するバルク型擬似位相整合$LiNbO_3$と、一方の光子を検出する単一光子検出器と、分離された他方の光子を入力して前記単一光子検出器の検出信号で制御される光スイッチとを具備することを特徴とする単一光子発生装置。

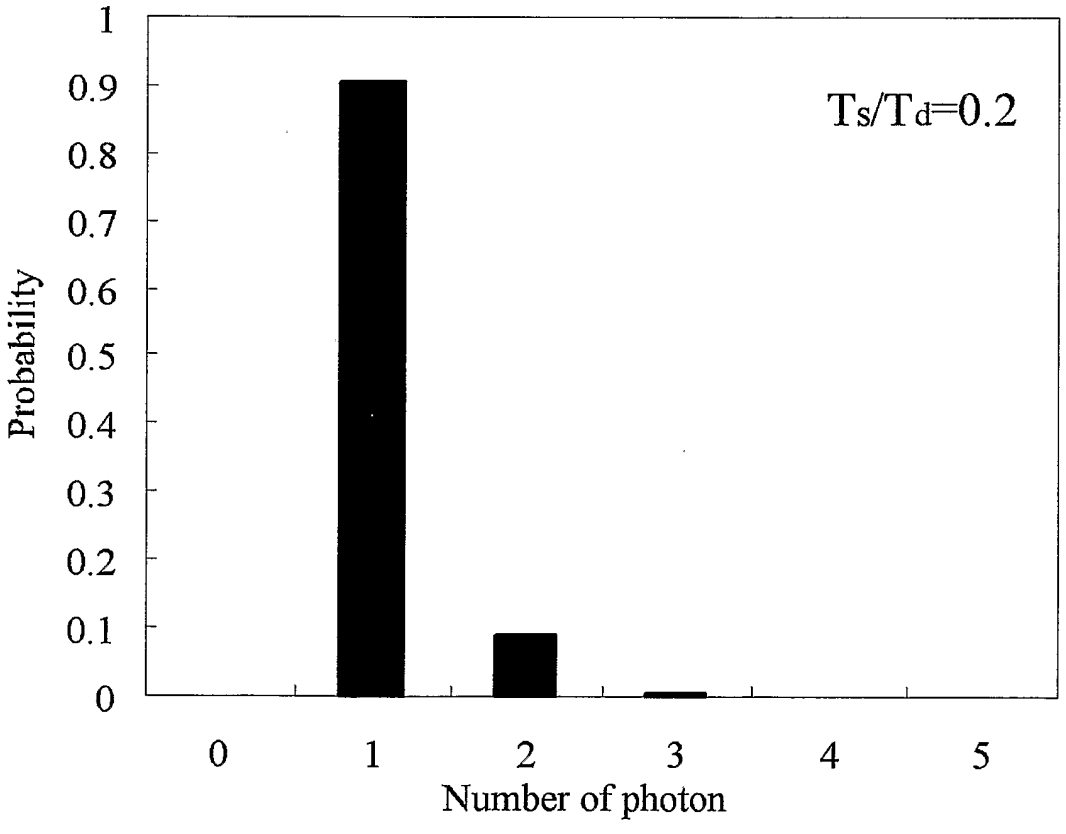
第１図


（ａ）
レーザー
1
PPLN
2
50/50ビームスプリッター
3
遅延
光スイッチ
5
PBS
偏波変調器
単一光子
単一光子検出器
4
（ｂ）
レーザー
1
PPLN
2
ダイクロイックミラー
6
遅延
光スイッチ
5
PBS
偏波変調器
単一光子
単一光子検出器
4
（ｃ）
レーザー
1
PPLN
2
遅延
光スイッチ
5
PBS
偏波変調器
単一光子
4
単一光子検出器

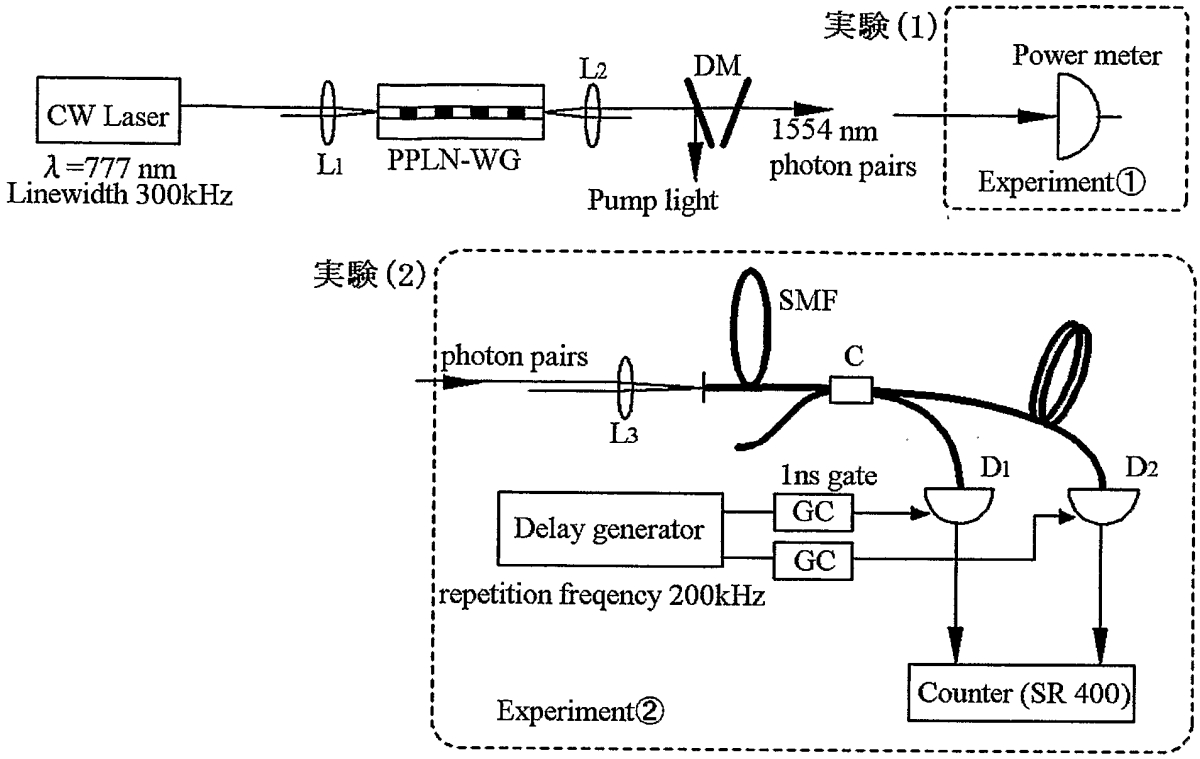
第２図


1
0.8
0.6
0.4
0.2
Probability
P1
P2
P3
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Ts/Td

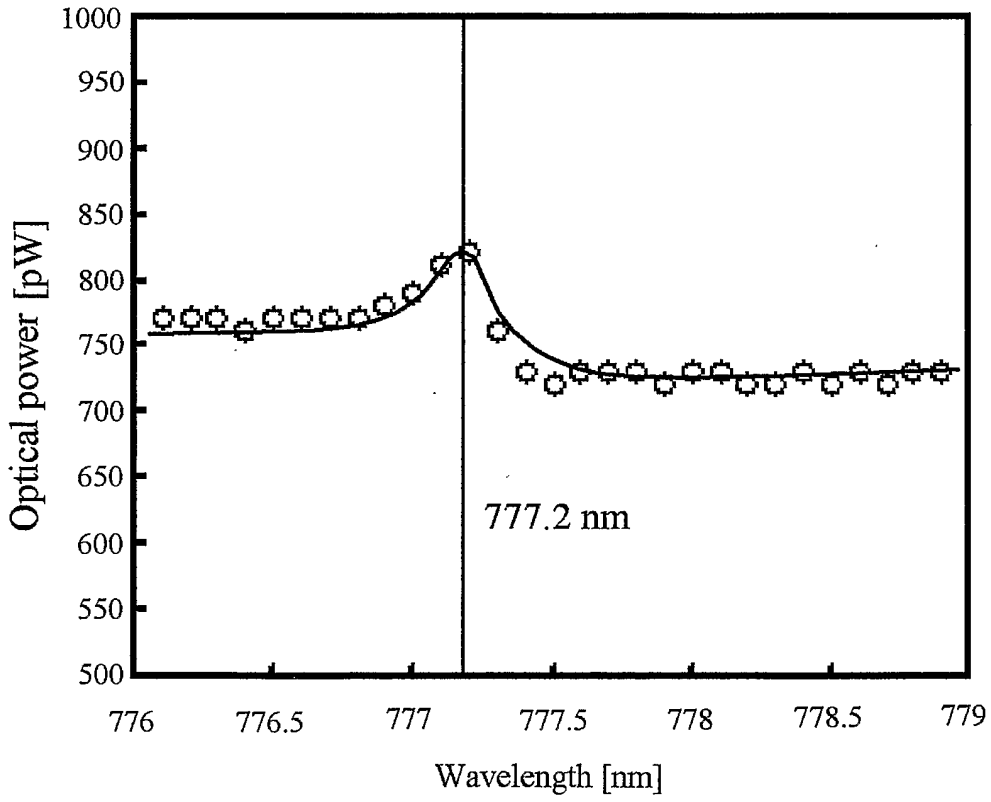
第３図


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Probability
Ts/Td=0.2
0
1
2
3
4
5
Number of photon

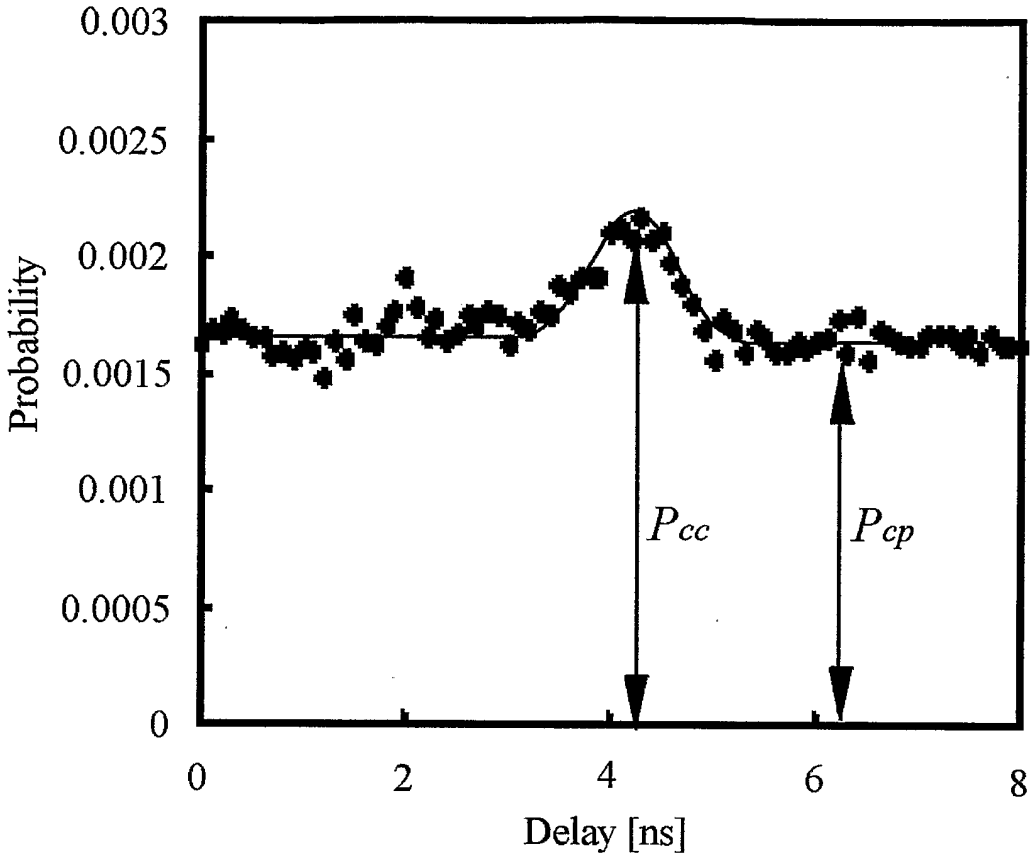
第４図


実験(1)
Power meter
CW Laser
λ=777 nm
Linewidth 300kHz
L1
PPLN-WG
L2
DM
1554 nm
photon pairs
Pump light
Experiment①
実験(2)
SMF
photon pairs
C
L3
1ns gate
D1
D2
Delay generator
GC
GC
repetition freqency 200kHz
Counter (SR 400)
Experiment②

第５図


1000
950
900
850
800
750
700
650
600
550
500
Optical power [pW]
777.2 nm
776
776.5
777
777.5
778
778.5
779
Wavelength [nm]

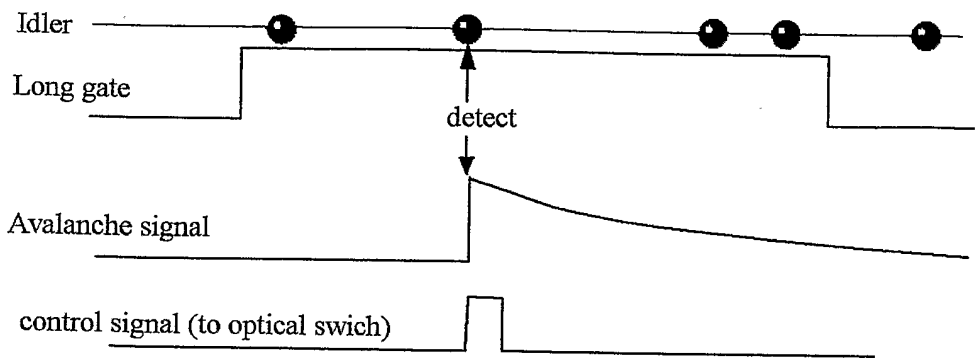
第６図



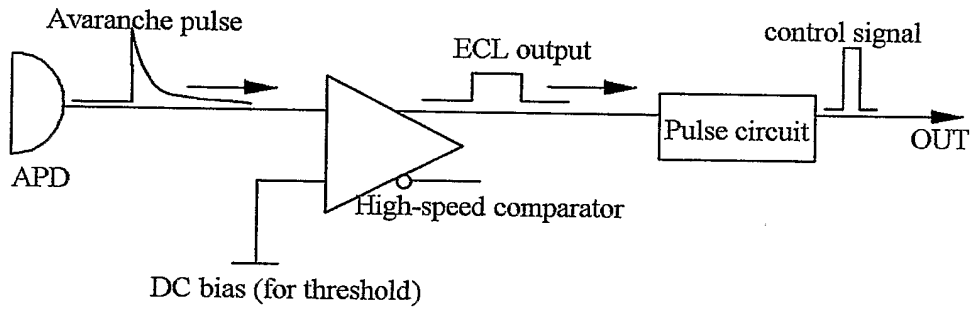
第７図

	計算値	実験値
P_{cc}	2.36×10^{-3}	2.15×10^{-3}
P_{cp}	1.76×10^{-3}	1.60×10^{-3}
P_{cc}-P_{cp}	6.0×10^{-4}	5.5×10^{-4}

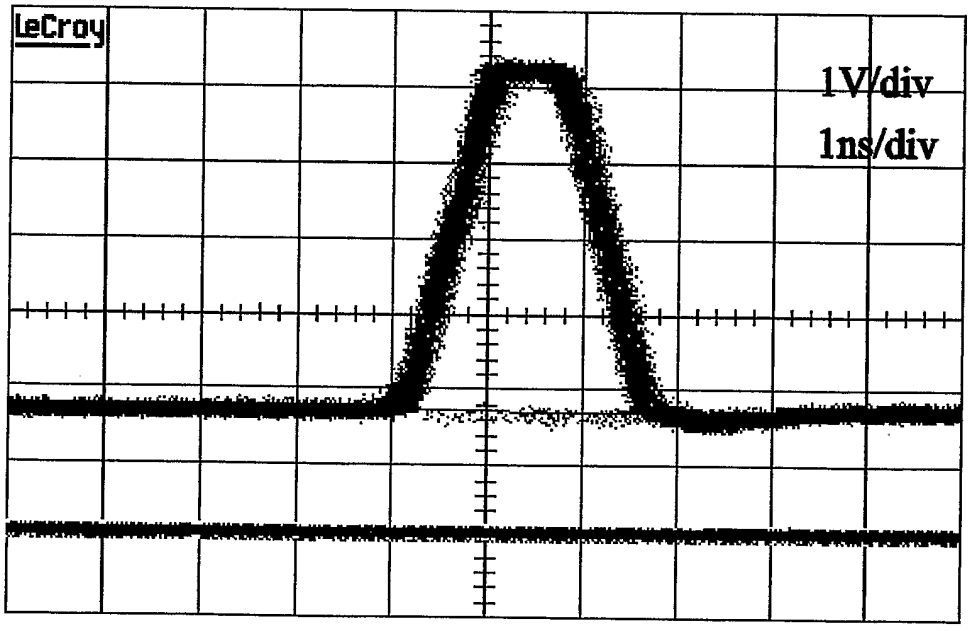
第８図


Idler
Long gate
detect
Avalanche signal
control signal (to optical swich)

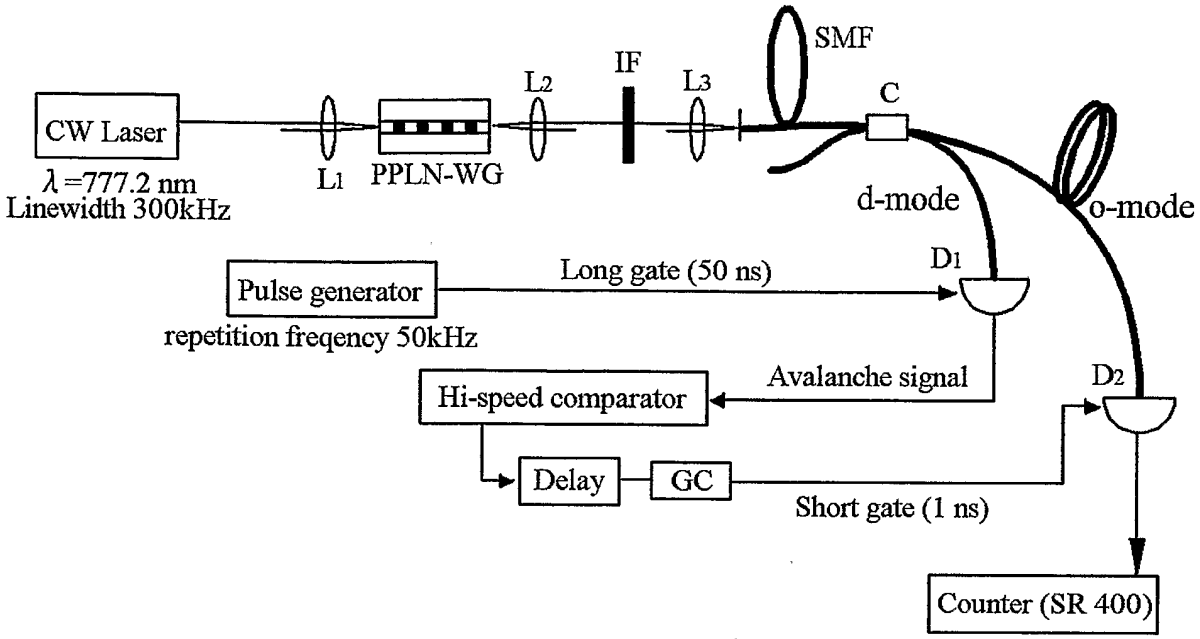
第９図


Avaranche pulse
ECL output
control signal
Pulse circuit
OUT
APD
High-speed comparator
DC bias (for threshold)

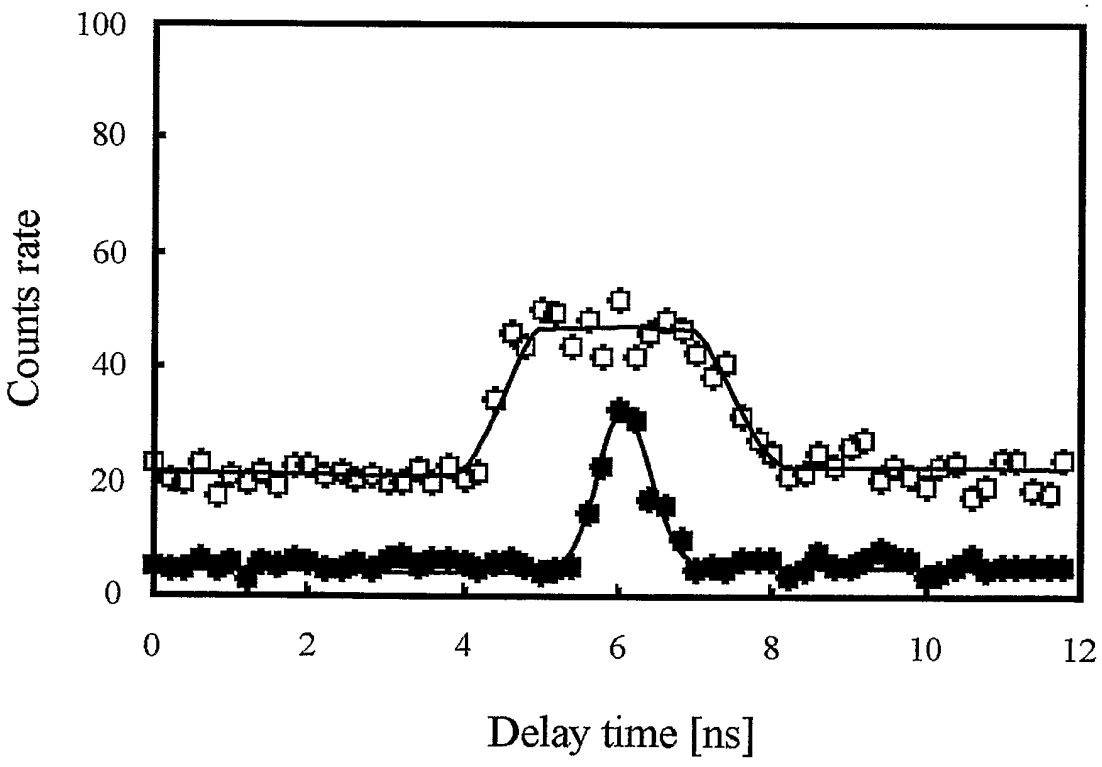
第１０図


LeCroy
1V/div
1ns/div

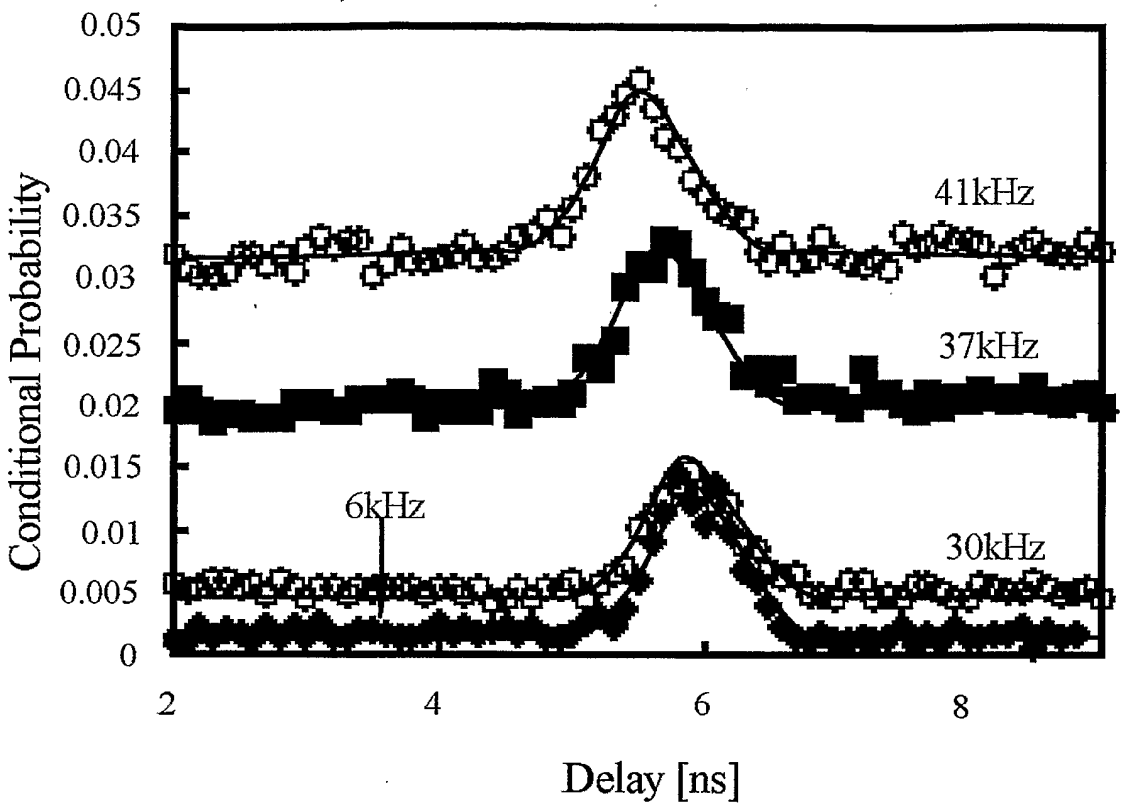
第１１図


CW Laser
λ=777.2 nm
Linewidth 300kHz
L1
PPLN-WG
L2
IF
L3
SMF
C
d-mode
o-mode
D1
D2
Pulse generator
repetition freqency 50kHz
Long gate (50 ns)
Avalanche signal
Hi-speed comparator
Delay
GC
Short gate (1 ns)
Counter (SR 400)

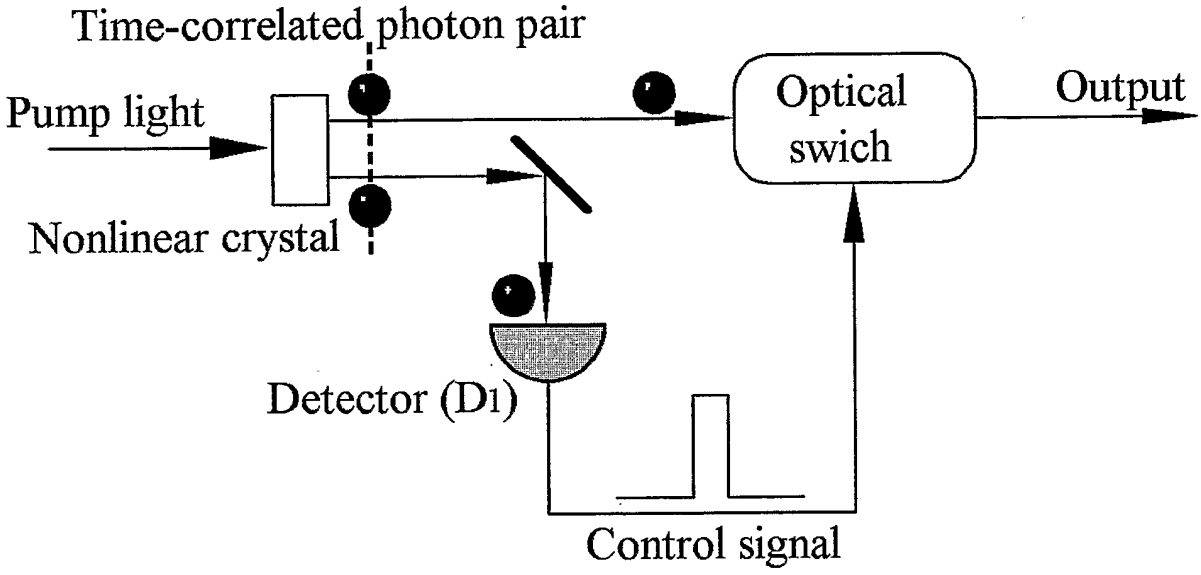
第１２図


Counts rate
100
80
60
40
20
0
0
2
4
6
8
10
12
Delay time [ns]

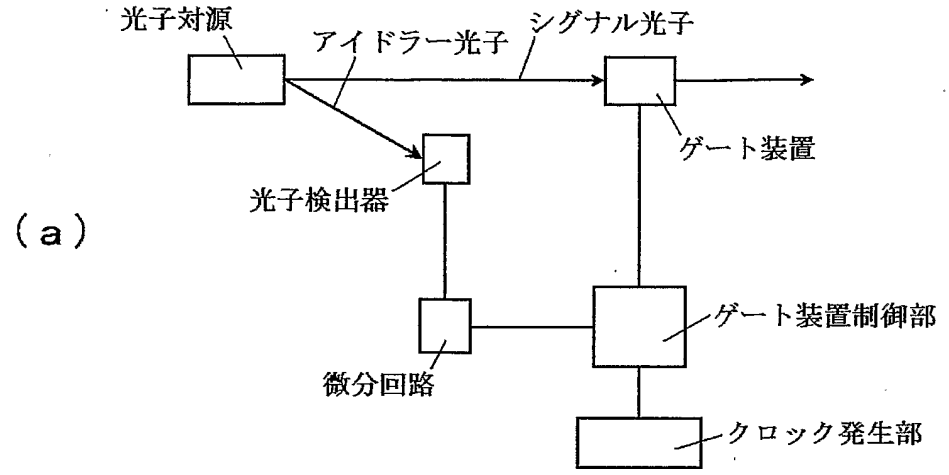
第１３図

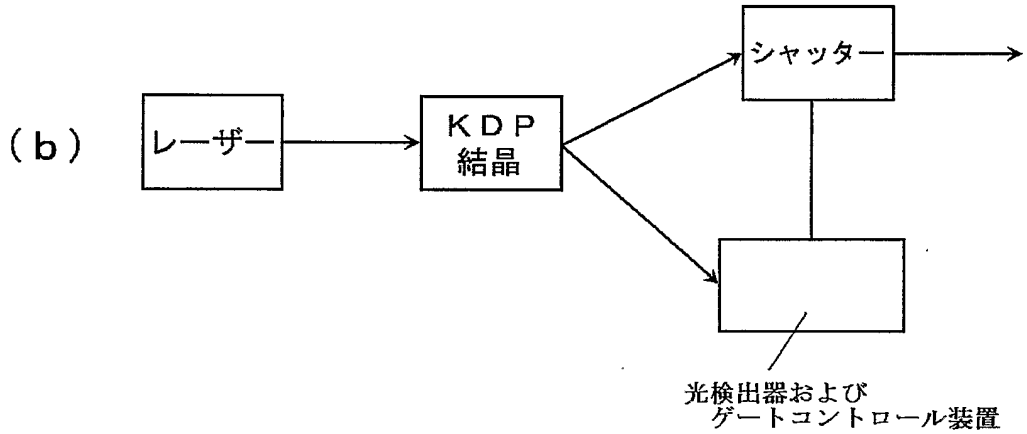

0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
Conditional Probability
41kHz
37kHz
6kHz
30kHz
2
4
6
8
Delay [ns]

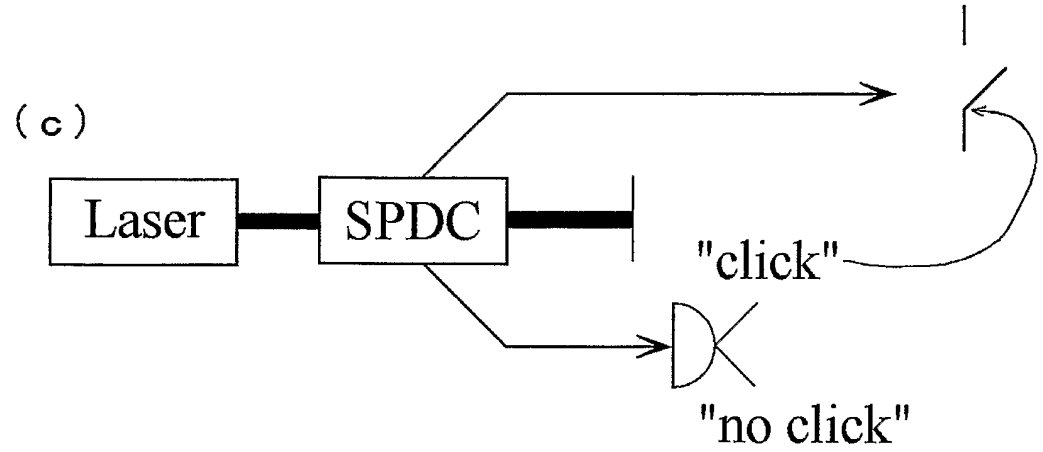
第１４図


Time-correlated photon pair
Pump light
Nonlinear crystal
Optical swich
Output
Detector (D1)
Control signal

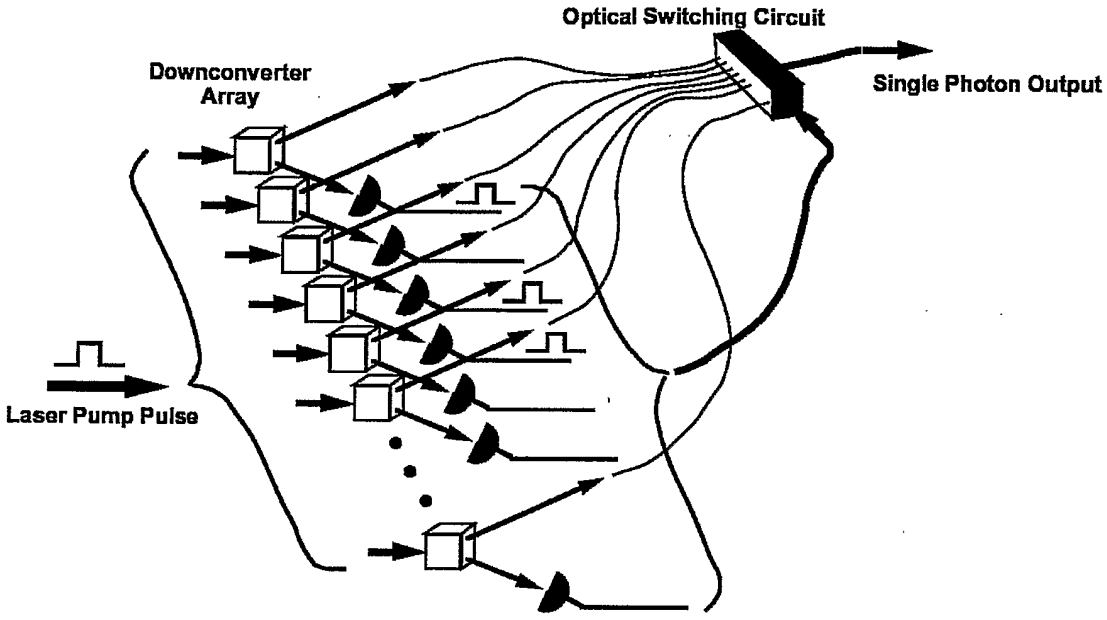
第１５図


光子対源
アイドラー光子
シグナル光子
ゲート装置
光子検出器
（ａ）
ゲート装置制御部
微分回路
クロック発生部

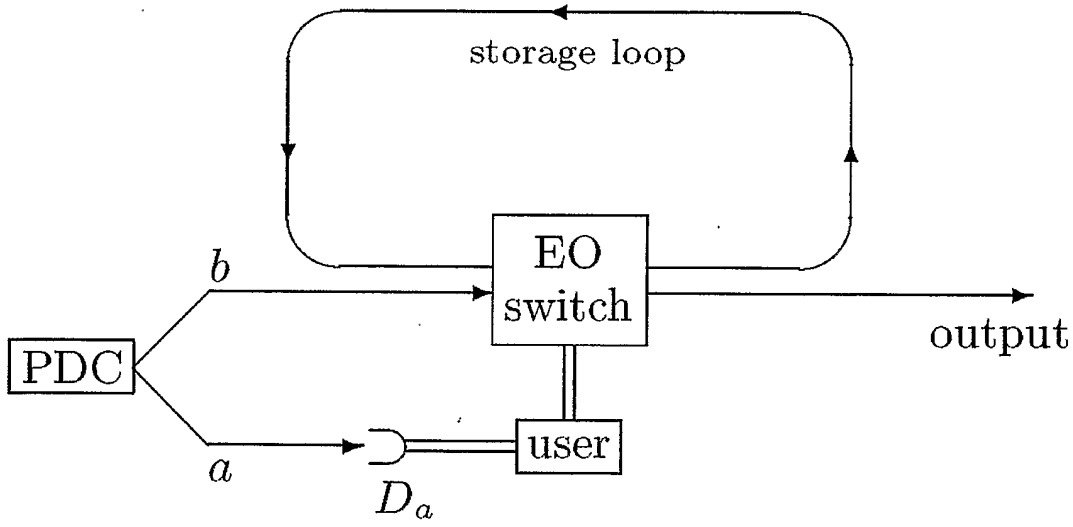

シャッター
（ｂ）
レーザー
ＫＤＰ
結晶
光検出器および
ゲートコントロール装置


（ｃ）
Laser
SPDC
"click"
"no click"

第１６図


Optical Switching Circuit
Downconverter Array
Single Photon Output
Laser Pump Pulse

（ａ）


storage loop
EO switch
b
PDC
output
a
user
D_a

（ｂ）

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2004/005803

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl[7] 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)
Int.Cl[7] G02F1/39, H04B10/00

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2004	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2004

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2000-292821 A (Mitsubishi Electric Corp.), 20 October, 2000 (20.10.00), & WO 00/62123 A & EP 1091240 A & CA 2334256 A & AU 4520800 A & NO 20006280 A & CN 1388660 A	1-3
Y	Pittman, T.B. et al., Single photons on pseudo demand from stored parametric down-conversion, Physical Review, A66(2002), 04-2303-1-042303-7	1-3
Y	Shigehiko MORI et al., "Doharogata PPLN o Mochiita 1550nm-tai Sokan Koshitsui no Hassei", Dai 50 Kai Oyo Butsurigaku Kankei Rengo Koenka Koen Yokoshu, No.3, 28p-YR-7, p.1115	1-3

☒ 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 28 July, 2004 (28.07.04)	Date of mailing of the international search report 24 August, 2004 (24.08.04)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2004)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2004/005803

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Mason, J.M. et al., Efficient generation of tunable photon pairs at 0.8 and 1.6μm, Optics Letters, Vol.27, No.23, 01 December, 2002 (01.12.02), pages 2115 to 2117	2,3

国際調査報告

国際出願番号　PCT／JP2004／005803

A.　発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int. Cl⁷　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））

Int. Cl⁷　G02F1／39　H04B10／00

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	1971－2004年
日本国登録実用新案公報	1994－2004年
日本国実用新案登録公報	1996－2004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）

IEEE
JICST

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	関連する請求の範囲の番号
Y	JP 2000-292821 A (三菱電機株式会社) 2000.10.20 & WO 00/62123 A & EP 1091240 A & CA 2334256 A & AU 4520800 A & NO 20006280 A & CN 1388660 A	1-3
Y	Pittman, T.B. et al Single photons on pseudodemand from stored parametric down-conversion, Physical Revew, A66 (2002) 042303-1 - 042303-7	1-3

☒ 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 28. 07. 2004	国際調査報告の発送日 24. 8. 2004
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA／JP） 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　2X　9316 電話番号　03－3581－1101　内線　3293

Ｃ（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求の範囲の番号
Y	森茂彦、他４名　導波路型PPLNを用いた1550nm帯相関光子対の発生、第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、No. 3, 28p-YR-7, p. 1115	1-3
Y	Mason, J. M. et al. Efficient generation of tunable photon pairs at 0.8 and 1.6 μm, Optics Letters, Vol. 27, No. 23 (01. 12. 2002) p. 2115-2117	2, 3