

(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
2009年11月5日(05.11.2009)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2009/133877 A1

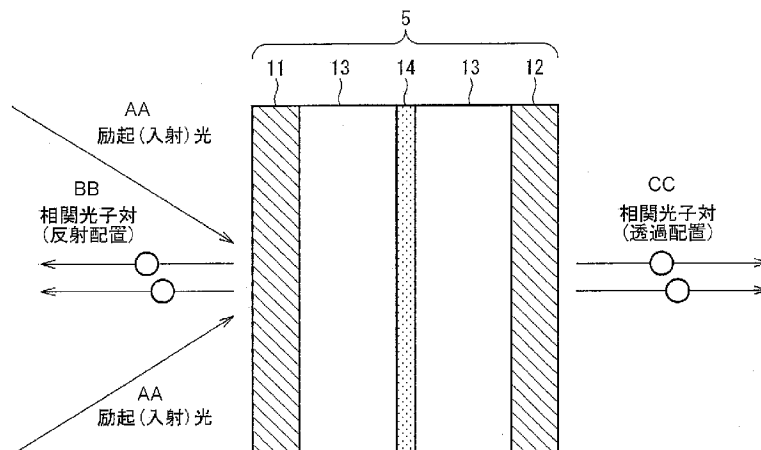
- (51) 国際特許分類:
G02F 1/35 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2009/058333
- (22) 国際出願日: 2009年4月28日(28.04.2009)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2008-119854 2008年5月1日(01.05.2008) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 公立大学法人大阪府立大学(Public University Corporation Osaka Prefecture University) [JP/JP]; 〒5998531 大阪府堺市中区学園町1番1号 Osaka (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 大島 悟郎 (OOHATA, Goro). 岡 寿樹 (OKA, Hisaki). 石原一 (ISHIHARA, Hajime).
- (74) 代理人: 特許業務法人原謙三国際特許事務所 (HARAKENZO WORLD PATENT & TRADE-MARK); 〒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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, 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, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, 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, 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 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,

[続葉有]

(54) Title: PHOTON PAIR GENERATOR AND PHOTON PAIR PRODUCTION METHOD

(54) 発明の名称: 光子対生成装置および光子対生成方法

[図1]



AA... EXCITATION (INCIDENT) LIGHT
BB... CORRELATED PHOTON PAIRS (REFLECTION CONFIGURATION)
CC... CORRELATED PHOTON PAIRS (TRANSMISSION CONFIGURATION)

(57) Abstract: A photon pair generator, which produces correlated photon pairs by hyper-parametric scattering, is constituted so that an optical rectifier shines light beams of the same wavelength from two mutually different directions into an optical resonator, and the optical resonator emits two correlated photons of mutually different wavelengths in the same direction. Thus is provided a photon pair generator that makes it possible to realize the production of correlated photon pairs with a simple configuration.

(57) 要約: ハイパーパラメトリック散乱によって相関光子対を生成する光子対生成装置において、光整形部が、同じ波長の光ビームを、光共振器に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、光共振器が、相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されている。これにより、相関光子対の生成をより簡素な構成で実現することを可能とする光子対生成装置を提供することができる。



WO 2009/133877 A1

GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, 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 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：光子対生成装置および光子対生成方法

技術分野

[0001] 本発明は、量子相関光子対を生成する光子対生成装置に関するものである。

背景技術

[0002] 1984年のCharles Bennetらによる量子暗号プロトコルなどの発案を契機として、これまで量子暗号通信の実現に向けた研究が盛んに行われている。特に、量子的相関を有する光子対（いわゆる量子もつれ光子対）の生成は、光子対自身の非局所相関を生かした暗号プロトコルや、量子テレポーテーションの原理を利用した量子中継器などに必須であり、光による量子情報通信の要素技術として大変重要である。

[0003] 量子相関光子対の生成がある程度効率よく実現されるようになったのは、パラメトリック下方変換を用いた方法が開発されてからである。この方法は、非線形光学結晶に高出力レーザ光を照射させ、二次の非線形光学過程を利用して光子対を得るものである。現在までこの方法を利用して応用実験が行われているが、生成効率が良くない、短波長の光子対の生成が困難である、多光子の生成が困難であるなどの欠点があり、半導体などを用いた新たな生成方法が必要とされている。

[0004] このような状況において、2004年に枝松圭一らは、半導体CuClバルク結晶の共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程を用いて、短波長の相関光子対の生成を実現している（非特許文献1、特許文献1参照）。またさらに、安食博志らは、半導体ナノ結晶を共振器に埋め込んだ構造を提案し、これを用いることによって光子対生成効率を数桁上げることが可能としている（非特許文献2、特許文献2参照）。

[0005] 半導体バルク結晶における共鳴ハイパーパラメトリック散乱を用いた相関光子対の生成は、従来のパラメトリック下方変換を用いた方法に比べて、電

子の共鳴準位を用いることで高効率な生成が可能であり、さらに短波長の相関光子対が得られる点が最大の特徴であり長所である。そのような利点を保ちつつ、デバイス化の観点ではより望ましい半導体ナノ結晶を用いて、相関光子対をより高効率に生成させることを提案したのが安食らの提案であった。

- [0006] この提案では、共振器において形成される共振器ポラリトン状態（励起子と共振器光子との混成状態）を積極的に利用する方法で相関光子対を取り出すことになる。まず、二種類の励起光を同軸で試料に垂直に入射させる。一つ目の励起ビームの波長を、共振器ポラリトンの下枝に対応する波長に調節し、もう一つのビームの波長を試料のパラメータで決まる別の波長に調整する。このように、二波長の光を二粒子励起状態を生成するためのエネルギーとして利用する。生成された光子対はそれぞれ所定の出射角度で出射面の法線方向に対して対称な方向に出射される。出射された光子対は、それぞれの出射角度に対応した位置に設けられる検出器によって検出される。

先行技術文献

特許文献

- [0007] 特許文献1：日本国公開特許公報「特開2005-309012公報（2005.11.4公開）」
特許文献2：日本国公開特許公報「特開2007-219314公報（2007.8.30公開）」

非特許文献

- [0008] 非特許文献1：K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, Nature, 431, 167 (2004).
非特許文献2：H. Ajiki and H. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 053401 (2007).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0009] 上記従来の構成では、光共振器に対して、励起光としてそれぞれ波長が異なる2つの光ビームを照射する構成となっている。よって、それぞれ波長が異なる光ビームを出射する光源を2種類設ける必要があった。このように種類の異なる光源を2つ設ける場合、構成要素の増大によるコストの増大、および装置の大型化を招くとともに、2つの光ビームの波長制御が比較的困難であるという問題があった。
- [0010] また、光共振器から出射される2つの相関光子はそれぞれ異なる方向に進行するようになっている。よって、それぞれの相関光子を検出する光子検出器を、それぞれの相関光子の進行方向に合わせた位置に配置する必要があり、この位置精度を保つことが比較的困難であるという問題があった。
- [0011] また、上記従来の構成では、光共振器に対して2種類の励起光を同軸で入射させているがこの際に、一つ目の励起光の波長を共振器ポラリトンの下枝に対応する波長に調節し、もう一つの励起光の波長を試料のパラメータで決まる別の波長に調整している。このような構成の場合、原理的に、相関光子の2つの出射角度は比較的小さいものとなる。例えば安食博志らの提案では半波長共振器を仮定すると、出射角度は約4.5°である。この場合、それぞれの相関光子を独立して検出する光検出器を2つ設けたとしても、検出すべきではない方の相関光子を検出してしまうなどにより、2つの相関光子を互いに的確に分離して検出することが比較的困難となるという問題があった。
- [0012] また、励起光は、その一部は光共振器5での作用により相関光子に変換されるが、大部分はそのまま光共振器5を透過することになる。ここで従来の構成では、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との差も比較的小さいことになるので、励起光と相関光子とを互いに分離して検出することも比較的困難となるという問題があった。
- [0013] さらに、上記従来の構成の場合、励起光の光子および相関光子ともに下枝の共振器ポラリトンに関連した状態となっていることにより、励起光の光子のエネルギーと相関光子のエネルギーとの差が比較的小さいものとなる。例

例えば安食博志らの提案では半波長共振器を仮定すると、エネルギー差は約 4.5 meV (0.5 nm) である。この場合、励起光の光子と相関光子とを、フィルタなどの簡素な構成で確実に分離することが困難であり、分光器などの大がかりな装置が必要となるという問題があった。

[0014] 本発明は、上記の問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、ハイパーパラメトリック散乱によって相関光子対を生成する光子対生成装置において、相関光子対の生成をより簡素な構成で実現することを可能とする光子対生成装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0015] 本発明に係る光子対生成装置は、上記課題を解決するために、光を出射する光源と、上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、上記光整形部から出射された光ビームによって2個の光子を取り入れ、該2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材とを備え、上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されている。

[0016] また、本発明に係る光子対生成方法は、光を出射する光源から出射された光ビームを光整形部によって整形する光整形処理と、相関光子対生成部材が、上記光整形部から出射された光ビームによって2個の光子を取り入れ、該2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成処理とを有し、上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構

成されている方法である。

- [0017] 上記の構成または方法によれば、相関光子対生成部材に照射する2つの励起光が同じ波長でよいことになる。よって、互いに波長が異なる2つの光ビームを照射する従来の構成と比較して、光源の構成をより簡素にすることが可能となる。
- [0018] また、上記の構成では、2つの励起光をそれぞれ異なる方向から相関光子対生成部材に照射する必要があるが、これを実現するための構成としては、詳細は後述するが、比較的簡素な構成で実現できる。
- [0019] また、相関光子対生成部材から出射される2つの相関光子は、互いに波長が異なるとともに、それぞれ同じ方向に進行するようになっている。よって、従来必要とされた、相関光子の進行方向に合わせて光検出部の位置を設定するというような調整困難な構成をなくすことができ、より簡素で作成しやすい構成とすることができる。なお、互いに異なる波長の2つの相関光子を分離する手段としては、例えばビームスプリッタや波長選択フィルタなどの簡素な構成によって実現することができる。
- [0020] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記光源から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振器をさらに備え、上記相関光子対生成部材が、上記光共振器の内部に含まれている構成としてもよい。
- [0021] 上記の構成では、相関光子対生成部材が光共振器に含まれた構成となっている。相関光子対生成部材は、上記のように、共鳴ハイパーパラメトリック散乱によって相関光子対を生成する部材である。ここで、光共振器は、光源から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める機能を有している。このような機能を有する光共振器に相関光子対生成部材が含まれていることによって、相関光子対生成部材に対して、より強度が強まった光子を作用させることが可能となる。したがって、相関光子対生成部材を単独で用いる場合と比較して、より相関光子対の生成効率を向上させることが可能となる。

[0022] また、本発明に係る光子対生成装置は、光を出射する光源と、上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、上記光整形部から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振器とを備え、上記光共振器が、取り入れた2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材を含んでいるとともに、励起子の共鳴エネルギーと共振器に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーとの差を示す離調度と、励起子分子の束縛エネルギーとが同じになるように設定されており、上記光整形部が、上記光共振器に入射する2個の光子と、上記光共振器から出射する2個の相関光子との間で位相整合条件が満たされるように、光を上記光共振器に照射する構成である。

[0023] また、本発明に係る光子対生成方法は、光を出射する光源から出射された光ビームを光整形部によって整形する光整形処理と、光共振器が、上記光整形部から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振処理とを有し、上記光共振器が、取り入れた2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材を含んでいるとともに、励起子の共鳴エネルギーと共振器に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーとの差を示す離調度と、励起子分子の束縛エネルギーとが同じになるように設定されており、上記光整形部が、上記光共振器に入射する2個の光子と、上記光共振器から出射する2個の相関光子との間で位相整合条件が満たされるように、光を上記光共振器に照射する方法である。

[0024] 上記の構成または方法によれば、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との角度差を従来よりも広くすることができる。よって、励起光の光子と相関光子との分離、および、2つの相関光子同士の分離を容易に実現することができる。

[0025] また、上記の構成によれば、励起光の光子のエネルギーと相関光子のエネ

ルギーとの差を比較的大きくすることができる。よって、分光器などの構成を用いることなく、波長選択フィルタなどの簡素な構成によって励起光の光子と相関光子との分離を実現することができる。

[0026] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、上記光共振器が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されていてもよい。

[0027] 上記の構成によれば、相関光子対生成部材に照射する2つの励起光が同じ波長でよいことになる。よって、互いに波長が異なる2つの光ビームを照射する従来の構成と比較して、光源の構成をより簡素にすることが可能となる。

[0028] また、上記の構成では、2つの励起光をそれぞれ異なる方向から相関光子対生成部材に照射する必要があるが、これを実現するための構成としては、詳細は後述するが、比較的簡素な構成で実現できる。

[0029] また、相関光子対生成部材から出射される2つの相関光子は、互いに波長が異なるとともに、それぞれ同じ方向に進行するようになっている。よって、従来必要とされた、相関光子の進行方向に合わせて光検出部の位置を設定するというような調整困難な構成をなくすことができ、より簡素で作成しやすい構成とすることができる。なお、互いに異なる波長の2つの相関光子を分離する手段としては、例えばビームスプリッタや波長選択フィルタなどの簡素な構成によって実現することができる。

[0030] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記光共振器が、当該光共振器におけるRabi分裂量が励起子分子の束縛エネルギーより大きくなるように構成されていてもよい。

[0031] 上記の構成によれば、励起子と、光共振器中の光子とが強く結合したときの結合の大きさを示すRabi分裂量が、励起子分子の束縛エネルギーより大きくなるように構成されているので、相関光子対の生成効率を高くするこ

とができる。R a b i 分裂量が励起子分子束縛エネルギーよりも小さい領域では急激な効率の減少を招くが、大きい領域は効率も高く、また大きな出射角度が確保できる。

[0032] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記相関光子対生成部材が、量子井戸、量子細線、または量子ドットである構成としてもよい。

[0033] 上記の構成によれば、量子井戸、量子細線、量子ドットといったナノ結晶によって相関光子対生成部材が構成されるので、ナノオーダの微細な構成によって光子対生成装置を構成することが可能となる。したがって、例えば相関光子対を利用した量子コンピュータなどに適用する場合に、高度な集積化を実現することができる。

[0034] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記光整形部が、入射光整形レンズとマスクとを含んでおり、上記光源から出射された所定の光領域を有する光ビームを上記入射光整形レンズに照射するとともに、上記マスクを該光ビームの光領域中に配置することによって2つの光ビームに分断し、これにより上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から光ビームを照射する構成としてもよい。

[0035] 上記の構成によれば、レンズおよびマスクという極めて簡素な構成によって、光源から出射される1つの光ビームを2つの光ビームに変換し、かつ、2つの光ビームを相関光子対生成部材に対してそれぞれ別の方向から照射する構成を実現することができる。

[0036] また、本発明に係る光子対生成装置は、上記の構成において、上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材の光入射面の法線方向に対して線対称となる互いに異なる2つの方向から照射するとともに、上記光共振器が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子を、上記相関光子対生成部材の光出射面の法線方向に出射するように構成されていてもよい。

発明の効果

[0037] 本発明に係る光子対生成装置は、以上のように、光を出射する光源と、上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、上記光整形部から出射された光ビームによって2個の光子を取り入れ、該2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材とを備え、上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されている。これにより、従来の構成と比較して、光源の構成をより簡素にすることが可能となるという効果を奏する。また、相関光子の進行方向に合わせて光検出部の位置を設定するというような調整困難な構成をなくすことができ、より簡素で作成しやすい構成とすることができるという効果を奏する。

[0038] また、本発明に係る光子対生成装置は、光を出射する光源と、上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、上記光整形部から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振器とを備え、上記光共振器が、取り入れた2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材を含んでいるとともに、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとが同じになるように設定されており、上記光整形部が、上記光共振器に入射する2個の光子と、上記光共振器から出射する2個の相関光子との間で位相整合条件が満たされるように、光を上記光共振器に照射する構成である。これにより、励起光の光子と相関光子との分離、および、2つの相関光子同士の分離を容易に実現することができるという効果を奏する。また、分光器などの構成を用いることなく、波長選択フィルタなどの簡素な構成によって励起光の光子と相関光子との分離を実現することができるという効果を奏する。

図面の簡単な説明

[0039] [図1]本発明の一実施形態に係る光子対生成装置が備える光共振器の概略構成を示す図である。

[図2]本実施形態に係る光子対生成システムの概略構成を示すブロック図である。

[図3]光共振器における励起子活性媒質の概略構成例を示す斜視図である。

[図4]光共振器における共振器ポラリトンの分散関係の例を示すグラフである。

。

[図5]光共振器における共振器ポラリトンの分散関係の例を示すグラフである。

。

[図6]相関光子の生成効率を共振器QED (Quantum Electrodynamics) の理論を用いて算出した結果を示すグラフである。

[図7]励起光を光共振器に入射させる部分の構成、および2つの相関光子を分離する構成の具体例を示す図である。

[図8]励起光を光共振器に入射させる部分の構成、および2つの相関光子を分離する構成の別の具体例を示す図である。

[図9]励起光を光共振器に入射させる部分の構成のさらに別の具体例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0040] 本発明の一実施形態について図面に基づいて説明すると以下の通りである。

。

[0041] (光子対生成システムの構成)

図2は、本実施形態に係る光子対生成システム1の概略構成を示すブロック図である。同図に示すように、光子対生成システム1は、光子対生成装置2、第1光子検出器3A、および第2光子検出器3Bを備えた構成となっている。光子対生成装置2は、偏光に関して量子相関した光子対(相関光子対)を出射する装置である。第1光子検出器3Aは、光子対生成装置2から出射された2つの光子のうち一方の光子を検出する装置であり、第2光子検出器3Bは、光子対生成装置2から出射された2つの光子のうち他方の光子を

検出する装置である。このようなシステムによれば、第1光子検出器3Aで検出される光子の量子状態が決定した瞬間に、第2光子検出器3Bで検出される光子は一対一に対応した量子状態に決定される。このように空間を隔てた二者間、第1光子検出器3Aと第2光子検出器3Bとの間で、一対一に対応した情報を秘匿しながらにして共有することができることから、量子情報通信を実現することが可能となる。

[0042] 光子対生成装置2は、光源4、光共振器5、光分離部6、および光整形部7を備えた構成となっている。

[0043] 光源4は、励起（入射）光として必要な性質すなわち所定の波長、パルス幅、繰り返し周期、などを有した光を作り出すレーザ光源を備えている。またさらに、非線形結晶などの光学部品を用いてレーザ光源から得られた光を所定の性質に変化させてもよい。レーザ光源としては、例えば垂直共振器型面発光レーザ（VCSEL：Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser）が挙げられる。

[0044] 光整形部7は、光源4から出射された光ビームを整形して光共振器5に入射させるものである。この光整形部7の構成の具体例については後述する。

[0045] 光共振器5は、励起光を内部で共振させるとともに、共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程により、偏光に関して量子相関した光子対（相関光子対）を出射する。この光共振器5の構成の詳細については後述する。

[0046] 光分離部6は、光共振器5から出射された光子対のそれぞれの光子を分離する構造、および、光共振器5から出射された光子対と光源4から光共振器5に照射された光子とを分離する構造の少なくとも一方を備えている構成である。この光分離部6の構成の具体例については後述する。

[0047] 図1は、光共振器5の構成例を示している。同図に示すように、光共振器5は、第1および第2反射鏡11・12、スペーサ層13、および、励起子活性媒質（相関光子対生成部材）14を備えている。

[0048] 第1および第2反射鏡11・12は、目的の波長で光を反射し、光共振器として用いることが可能なミラーであればどのような材料のミラーを用いて

もよい。例えば、屈折率の異なる透明媒質を光学波長の $1/4$ の厚さで交互に積層した構造、すなわちDBR (Distributed Bragg Reflector) を用いることができる。

[0049] これらの第1および第2反射鏡11・12に挟まれた領域に共振空間領域としてのスペーサ層13が設けられている。そして、スペーサ層13の内部に、励起子活性媒質14が設けられている。

[0050] 励起子活性媒質14は、厚さにしてnmオーダー(10~100nm)の薄膜によって構成されており、本実施形態では、膜厚10~100nmのCuCl結晶を用いるが、共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程による相関光子対の生成が可能な材料であればどのような材料であってもよい。

[0051] 励起子活性媒質14の材料として、上記CuCl結晶以外の別の例としては、無機有機複合半導体が挙げられる。無機有機複合半導体は、励起子と励起子分子との束縛エネルギーが非常に大きくなるという特徴を有している。例えば、無機有機複合半導体としての $(C_4H_9NH_3)_2PbBr_4$ の励起子分子束縛エネルギーは60meVであり、現存する無機半導体のどれよりも大きな値を持っている。よって、このような無機有機複合半導体を用いれば、光共振器5の設計の自由度が高まると共に、信号の増強率が高まるという効果が期待できる。

[0052] 上記の例では、励起子活性媒質14は、第1および第2反射鏡11・12の面に平行な薄膜として形成されているが、これに限定されるものではない。図3の(a)~(c)は、励起子活性媒質14の構成例を示している。同図の(a)は、励起子活性媒質14が薄膜として形成されている例を示しており、(b)は、励起子活性媒質14が複数の細線状の構造によって構成されている例を示しており、(c)は、励起子活性媒質14が複数のドット状の構造によって構成されている例を示している。

[0053] (b)の構成では、複数の細線状の構造が、第1および第2反射鏡11・12の面に平行な面内において、互いに平行で所定の間隔で配置されている。この細線状の構造は、量子細線であることが好ましいが、これに限定され

るものではない。

[0054] また、(c)の構成では、複数のドット状の構造が、第1および第2反射鏡11・12の面に平行な面内において、互いに所定の間隔でマトリクス状に配置されている。このドット状の構造は、量子ドットであることが好ましいが、これに限定されるものではない。

[0055] また、図示はしていないが、励起子活性媒質14は、第1および第2反射鏡11・12の面に平行な複数の薄膜が、薄膜の面に垂直な方向に並んで配置されている構成であってもよい。また、励起子活性媒質14が少なくとも1枚の薄膜によって構成される場合、この薄膜は量子井戸であることが好ましいが、これに限定されるものではない。

[0056] (相関光子対の生成)

前記したように、励起子活性媒質14に特定の波長をもつレーザ光を照射すると、2光子吸収によって励起子分子が共鳴的に生成される。なお、光によって価電子帯から取り除かれた電子状態は正の荷電粒子(正孔)と見なすことができる。この正孔と伝導帯に励起した電子による束縛状態を励起子という。また、励起子分子とは、2つの励起子が束縛した状態となっているものを示す。

[0057] そして、この励起子分子が消滅する過程で異なる方向に放出される2個の光子は、偏光に関して量子相関した状態となる。すなわち、これにより相関光子対が生成される。(量子)相関光子対とは、エンタングルド光子対ともいい、量子力学的にもつれあった状態の光子対を示している。

[0058] このような散乱過程(共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程)は、励起子活性媒質14単体に対して光を照射しても生じうる。しかしながら、励起子活性媒質14単体の場合、光との相互作用が小さくなるために、相関光子対の生成効率が低くなる。

[0059] そこで、本実施形態の光子対生成装置2は、上記のように、光共振器5の内部に励起子活性媒質14を設けた構成としている。この励起子活性媒質14および光共振器5を適切な条件(詳細は後述する)で設計することによつ

て、励起子活性媒質 14 単体を用いる構成と比較して、共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程による相関光子対の生成を格段に効率良く行うことが可能となる。

[0060] 光共振器 5 を用いることによって相関光子対の生成効率が增大する原理は、基本的に、光共振器 5 中の平均 1 光子あたりの電場強度が非常に強くなることに基づいている。詳しく説明すると、まず、光共振器 5 に対して光が入射すると、共振により光共振器 5 内における光が特定のモードとなり、光の電場強度が増大することになる。ここで、光共振器 5 内における光のモードには様々なものがあり、そのモードに依存して電場強度が高くなる位置が存在する。この電場強度が高くなる位置に励起子活性媒質 14 を設けることによって、共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程による相関光子対の生成効率を高めることが可能となる。

[0061] 例えば、光共振器 5 内における光のモード（共振器モード）のうち、最も振動数が小さい共振器モードの場合、スペーサ層 13 の中心近傍で電場強度が最も高くなる。すなわち、このスペーサ層 13 の中心近傍に励起子活性媒質 14 を設けることによって相関光子対の生成効率を高めることが可能となる。

[0062] 光共振器 5 内において生成された相関光子は、励起光の入射面とは反対側の面から出射される場合（透過配置）と、励起光の入射面と同じ側の面から出射される場合（反射配置）とがある。本実施形態では、基本的には透過配置を想定しているが、反射配置で出射された相関光子を検出する構成としてもよい。

[0063] なお、光共振器 5 を用いずに、励起子活性媒質 14 に直接励起光を照射する構成としても、相関光子対を生成することは可能である。ただし、光共振器 5 を用いる場合と比較して、相関光子対の生成効率は著しく低下することになる。例えば励起子活性媒質 14 の厚みを同じとし、材質を CuCl とした場合、光共振器 5 を用いる場合の生成効率は、光共振器 5 を用いる場合の生成効率の 10^5 倍程度となる。

[0064] (光子対生成装置の詳細構成)

次に、光子対生成装置 2 の構成の詳細について説明する。以下では、光子対生成装置 2 の構成のうち、光共振器 5 に照射する励起光の設計、および、光共振器 5 の構造の設計について、2 種類の設計指針を説明する。

[0065] (第 1 の設計指針)

前記したように、従来の構成では、それぞれ波長が異なる光ビームを出射する光源を 2 種類設ける必要があった。よって、構成要素の増大によるコストの増大、および装置の大型化を招くとともに、2 つの光ビームの波長制御が比較的困難であるという問題があった。

[0066] また、光共振器から出射される 2 つの相関光子はそれぞれ異なる方向に進行するようになっている。よって、それぞれの相関光子を検出する光子検出器を、それぞれの相関光子の進行方向に合わせた位置に配置する必要があり、この位置精度を保つことが比較的困難であるという問題があった。

[0067] これに対して、本実施形態では、励起光として互いに波長が等しい 2 つの光ビームを光共振器 5 に対してそれぞれ別の方向から照射する構成となっている。また、光共振器 5 の構造が、出射する 2 つの相関光子が同一の方向に進行するように設計されている。以下に、この構成についてより詳細に説明する。

[0068] まず、励起光の光共振器 5 に対する入射角度について説明する。2 つの励起光は、光共振器 5 における第 1 反射鏡 11 の外側面に対して照射される。この際に、第 1 の励起光は、励起子活性媒質 14 によって構成される薄膜の面（励起子活性媒質面）の法線方向に対して所定の角度で入射するとともに、第 2 の励起光は、励起子活性媒質面の法線方向を対称軸として、第 1 の励起光の入射方向の線対称な角度で入射する。すなわち、2 つの励起光は、励起子活性媒質面の法線方向を中心として互に対称となる方向から光共振器 5 に対して入射することになる。なお、励起子活性媒質面と、第 1 反射鏡 11 の外側面とは互いに平行となっているので、2 つの励起光は、第 1 反射鏡 11 の外側面の法線方向を中心として互に対称となる方向から光共振器 5

に対して入射することになる。

[0069] 次に、光共振器 5 の設計について説明する。光共振器 5 は、上記したように、2つの励起光が互いに異なる方向から入射すると、共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程を内部で生じさせ、互いに異なる波長の2つの相関光子を同一の方向に出射させるような構造となっている。図4は、このような構造の光共振器5における共振器ポラリトンの分散関係を示すグラフである。同図において、横軸は、光共振器5に入射する励起光の光子の入射角度、または、光共振器5から出射される相関光子の出射角度(°)を示しており、縦軸は、対応するポラリトンのエネルギー(eV)を示している。また、UPBは上枝の共振器ポラリトンを示しており、LPBは下枝の共振器ポラリトンを示しており、E_xは励起子状態のエネルギーを示しており、B_xは励起子分子状態のエネルギーを示している。

[0070] このような状態に設計されている光共振器5に対して、B_x/2に対応する波長の励起光の2つの光子を、入射角度がそれぞれおよそ±26°となるように入射させると、一度励起子分子の状態となった後に、一方が上枝の共振器ポラリトン、他方が下枝の共振器ポラリトンへと再分裂する。このとき、図4に示すように、上枝の共振器ポラリトンに分裂した相関光子、および、下枝の共振器ポラリトンに分裂した相関光子は、互いに光子エネルギーが異なる一方、出射角度はともに0°となる。すなわち、互いに異なる波長の2つの相関光子が同一の方向に出射することになる。

[0071] 上記のように光共振器5を設計する際のパラメータとしては、励起子活性媒質14の材質、第1および第2反射鏡11・12の材質、励起子活性媒質14を構成する薄膜の厚み、光共振器5の厚み(第1反射鏡11の外側面から第2反射鏡12の外側面までの距離)、スペーサ層13の材質、光共振器5中における励起子活性媒質14の配置位置、励起子活性媒質14を多層構造にした場合の層の数、励起子活性媒質14を薄膜構造以外の構造とした場合の形状およびサイズ、などが挙げられる。これらのパラメータを適宜設計するとともに、該設計に適した角度で励起光を入射させることによって、互

いに異なる波長の2つの相関光子を同一の方向に出射させることが可能となる。

[0072] 上記の構成によれば、光共振器5に照射する2つの励起光が同じ波長でよいことになるので、互いに波長が異なる2つの光ビームを照射する従来の構成と比較して、光源4の構成をより簡素にすることが可能となる。なお、上記の構成では、2つの励起光をそれぞれ別の方向から光共振器5に照射する必要があるが、これを実現するための構成は比較的簡素な構成で実現できる。このような構成の具体例については後述する。

[0073] また、光共振器5から出射される2つの相関光子は、互いに波長が異なるとともに、それぞれ同じ方向に進行するようになっている。よって、同じ方向に進行した相関光子をまずビームスプリッタによって2つに分け、それぞれ波長選択フィルタなどで必要とする相関光子を抽出することによって2つの相関光子をそれぞれ検出することが可能となる。よって、従来必要とされた、相関光子の進行方向に合わせて光検出部の位置を設定するというような調整困難な構成をなくすことができ、より簡素で作成しやすい構成とすることができる。

[0074] (第2の設計指針)

前記したように、従来の構成では、光共振器に対して2種類の励起光を同軸で入射させているがこの際に、一つ目の励起光の波長を共振器ポラリトンの下枝に対応する波長に調節し、もう一つの励起光の波長を試料のパラメータで決まる別の波長に調整している。このような構成の場合、原理的に、相関光子の2つの出射角度は比較的小さいものとなる。この場合、それぞれの相関光子を独立して検出する光検出器を2つ設けたとしても、検出すべきではない方の相関光子を検出してしまうなどにより、2つの相関光子を互いに的確に分離して検出することが比較的困難となるという問題があった。

[0075] また、従来の構成では、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との差も比較的小さいことになるので、励起光と相関光子とを互いに分離して検出することも比較的困難となるという問題があった。

- [0076] さらに、上記の従来の構成の場合、励起光の光子のエネルギーと相関光子のエネルギーとの差が比較的小さいものとなる。よって、励起光の光子と相関光子とを、フィルタなどの簡素な構成で確実に分離することが困難であり、分光器などの大がかりな装置が必要となるという問題があった。
- [0077] これに対して、本実施形態では、光共振器 5 を、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとが等しくなるような構造とするとともに、位相整合条件を満たすように励起光を光共振器 5 に対して入射させる構成となっている。以下に、この構成についてより詳細に説明する。
- [0078] 図 5 は、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとが等しくなるように構成された光共振器 5 における共振器ポラリトンの分散関係を示すグラフである。この図 5 は基本的には前記した図 4 と同様のグラフであり、共通する部分については説明を省略する。
- [0079] 離調度とは、光共振器 5 内で生成される励起子の共鳴エネルギーと、光共振器 5 に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーとの差を示している。図 5 において、A で示す破線が共振器に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーに対応するものであり、B で示す破線が励起子の共鳴エネルギーに対応するものである。同図に示すように、入射角が 0° の場合における励起子の共鳴エネルギーと物質系の共鳴エネルギーとの差 ΔE が離調度に対応する。ここで、励起子の共鳴エネルギーが物質系の共鳴エネルギーよりも低くなっており、これが離調度が負である状態を示している。
- [0080] また、励起子分子の束縛エネルギーは、励起子状態のエネルギー E_x の 2 倍のエネルギーと、励起子分子状態のエネルギー B_x との差によって表される。すなわち、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとが等しい場合、 $\Delta E = 2E_x - B_x$ という関係になっている。このような関係であれば、共振器に閉じ込められた光子と $B_x/2$ との差と、 $B_x/2$ と入射角が 0° の場合における励起子の共鳴エネルギーとの差とが等しくなる。また、さらにこのような関係であれば、入射角が 0° において、上枝の共振器ポラリトンと $B_x/2$ との差と、 $B_x/2$ と下枝の共振器ポラリトンとの差とが等しく

なる。

- [0081] 以上のように設計されている光共振器5に対して照射する励起光を次のように設定する。まず、励起光の波長を、 $B \times / 2$ のエネルギーに対応する波長とする。また、励起光の入射角度を、 $B \times / 2$ のエネルギーに対応する下枝の共振器ポラリトンの入射角の値とする。図5に示す例では、入射角度をそれぞれおよそ $\pm 26^\circ$ とする。このように励起光を光共振器5に照射すると、励起光は一度励起子分子の状態となった後に、一方が上枝の共振器ポラリトン、他方が下枝の共振器ポラリトンへと再分裂する。このとき、図5に示すように、上枝の共振器ポラリトンに分裂した相関光子、および、下枝の共振器ポラリトンに分裂した相関光子は、互いに光子エネルギーが異なる一方、出射角度はともに 0° となる。すなわち、入射側の励起光と、出射側の相関光子との間で、横軸で示される運動量、および、縦軸で示されるエネルギーが保存されており、位相整合条件を満たしていることになる。
- [0082] 上記のように光共振器5を設計する際のパラメータとしては、励起子活性媒質14の材質、第1および第2反射鏡11・12の材質、励起子活性媒質14を構成する薄膜の厚み、光共振器5の厚み（第1反射鏡11の外側面から第2反射鏡12の外側面までの距離）、スペーサ層13の材質、光共振器5中における励起子活性媒質14の配置位置、励起子活性媒質14を多層構造にした場合の層の数、励起子活性媒質14を薄膜構造以外の構造とした場合の形状およびサイズ、などが挙げられる。これらのパラメータを適宜設計することによって、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとを等しくすることができる。
- [0083] 上記の構成によれば、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との角度差を従来よりも広くすることができる。具体的には、上記した例では 26° 程度であったが、光共振器5の設計に応じて $15 \sim 30^\circ$ 程度にすることができる。よって、励起光の光子と相関光子との分離、および、2つの相関光子同士の分離を容易に実現することができる。
- [0084] また、上記の構成によれば、励起光の光子のエネルギーと相関光子のエネ

ルギーとの差を比較的大きくすることができる。よって、分光器などの構成を用いることなく、波長選択フィルタなどの簡素な構成によって励起光の光子と相関光子との分離を実現することができる。

[0085] なお、上記の例では、励起光として、波長の等しい光子をそれぞれ別の方向から光共振器5に入射させ、波長の異なる2つの相関光子を同じ方向に出射させる構成となっているが、これを逆にしてもよい。すなわち、励起光として、波長の異なる2つの光子を同じ方向から光共振器5に入射させ、波長の等しい相関光子をそれぞれ別の方向に出射させる構成とすることもできる。

[0086] この構成の場合でも、光共振器5を上記のように設計しておけば、上記した位相整合条件を満たすことが可能である。すなわち、図5において、入射角度を 0° とした場合の上枝の共振器ポラリトンのエネルギーを励起光の一方の光子のエネルギーとし、下枝の共振器ポラリトンのエネルギーを励起光の他方の光子のエネルギーとすることによって、出射角度がそれぞれおよそ $\pm 26^\circ$ となる相関光子を出射させることができる。よって、上記の構成と同様に、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との角度差を従来よりも広くすることができるという効果、および、励起光の光子のエネルギーと相関光子のエネルギーとの差を比較的大きくすることができるという効果を奏することになる。

[0087] 図6は、光共振器5を、離調度と励起子分子の束縛エネルギーとが等しくなるような構造とするとともに、位相整合条件を満たすように励起光を光共振器5に対して入射させる構成とした場合の、相関光子の生成効率を共振器 QED (Quantum Electrodynamics) の理論を用いて算出した結果を示している。同図において、横軸の ka/π が励起光の入射角度に対応するパラメータであり、縦軸は共振器を用いた場合の相関光子の生成効率 $G^{(2)}$ を、共振器がない場合の相関光子の生成効率 $G^{(2)}_{\text{bar}}$ で規格化したものである。同図に示す生成効率の計算結果の前提となる条件は、励起子系の条件として、光共振器系の条件として、ラビ分裂量 $=50\text{meV}$ 、Q値 $=100$ 、入射光の条件

として、パルス幅 = 130 fs 、強度 = $10^9 \text{ photon/pulse/cm}^{-2}$ である。

[0088] 同図に示すように、励起光の入射角度を、 $B \times / 2$ のエネルギーに対応する下枝の共振器ポラリトンの入射角の値とした場合、生成効率は非常に高くなり、共振器構造にしない場合に比べて 10^5 倍を超える効率が得られる。

[0089] なお、共振器ポラリトンのパラメータとしては、 $Rabi$ 分裂量が挙げられる。 $Rabi$ 分裂量とは、励起子と、光共振器中の光子とが強く結合したときの結合の大きさを示しており、上記した光共振器5を設計する際のパラメータによって変化するものである。この $Rabi$ 分裂量は、励起子分子の束縛エネルギーより大きくすることが好ましい。 $Rabi$ 分裂量の値が小さすぎると、光子対生成効率が著しく低減する。また、励起光の入射角度の大きさは $Rabi$ 分裂量に対応させる必要がある。一方、励起光の入射角度は、光子対生成装置2の構成（例えば、後述する入射光整形レンズ21の NA ）によって決まるものである。つまり、光子対生成装置2の励起光を光共振器5に入射させる構成によって対応可能な $Rabi$ 分裂量の上限が決まることになる。

[0090] （光子対生成装置の具体的構成例）

次に、光子対生成装置2の具体的な構成例について説明する。図7は、励起光を光共振器5に入射させる部分の構成、および2つの相関光子を分離する構成の具体例を示している。同図に示す例では、光源4から出射された互いに平行に進行する2つの励起光が、光整形部7の部分構成としての入射光整形レンズ21の屈折作用により進行方向を曲げられ、光共振器5に入射するようになっている。すなわち、入射光整形レンズ21の集光効果を利用して、2つの光ビームを光共振器5に対してそれぞれ別の方向から照射する構成を実現している。また、2つの光ビームを、入射光整形レンズ21の光軸に平行かつ対称に入射させるとともに、入射光整形レンズ21の光軸と、光共振器5の入射面の法線方向とを一致させている。これによって、2つの光ビームを光共振器5に対して、光共振器5の入射面の法線方向を軸として線対称に入射させている。

- [0091] なお、互いに平行に進行する2つの励起光は、例えば次のような光整形部7の部分構成によって生成することができる。まず、1つの光源から出射された光ビームを、ビームスプリッタによって2つの光ビームに分離する。その後、ミラーを適宜配置して反射させることによって、2つの光ビームの光路長を揃えつつ、互いに平行に進行する2つの光ビームとする。
- [0092] 以上のように、互いに波長が等しい2つの光ビームを光共振器5に対してそれぞれ別の方向から照射する構成は非常に簡素な構成によって実現することが可能である。
- [0093] また、光分離部6は、2光子をそれぞれの波長で分別する二色性ビームスプリッタ、もしくは50%ビームスプリッタと波長選択フィルタとの組み合わせによって構成されている。光共振器5から出射される2つの相関光子は、ビームスプリッタによって分離されてフィルタがかけられることによって、第1および第2光子検出器3A・3Bで的確にそれぞれ検出される。ここで、光共振器5から出射される2つの相関光子は同じ方向に進行するので、第1および第2光子検出器3A・3B配置位置を容易に設定することが可能となっている。
- [0094] 図8に示す構成では、入射光整形レンズ21に対して、所定の光領域を有する励起光（レーザ光）を照射するとともに、光整形部7の部分構成としてのマスク31を該励起光の光領域中に配置することによって2つの光ビームに分断し、光共振器5に入射させている。同図に示す例では、マスク31は入射光整形レンズ21の光射出面側に設けられている。なお、マスク31の配置位置はこの位置に限定されるものではなく、入射光整形レンズ21の光入射面側に設けられていてもよいし、入射光整形レンズ21と光共振器5との間の領域、あるいは、入射光整形レンズ21の光入射側の空間などに設けられていてもよい。
- [0095] このような構成によれば、マスク31という極めて簡素な構成によって、光源4から出射される1つの光ビームを2つの光ビームに変換することができる。また、入射光整形レンズ21とマスク31とを組み合わせることによ

って、2つの光ビームを光共振器5に対してそれぞれ別の方向から照射する構成を実現している。

[0096] また、図8に示す構成では、光共振器5から出射された出射光を整形する出射光整形レンズ22が設けられている。この出射光整形レンズ22によって、光共振器5から出射された拡散光が平行光に変換されて光分離部6としてのビームスプリッタ6Aに照射される。

[0097] また、光共振器5から出射された出射光のうち、相関光子の光ビームとしてのRHP S光が進行する領域に開口が設けられており、それ以外の領域を遮光する出射側マスク32が設けられている。図8に示す例では、出射側マスク32は出射光整形レンズ22の光入射面側に設けられている。なお、出射側マスク32の配置位置はこの位置に限定されるものではなく、出射光整形レンズ22の光出射面側に設けられていてもよいし、出射光整形レンズ22と光共振器5との間の領域、あるいは、出射光整形レンズ22の光出射側の空間などに設けられていてもよい。

[0098] 前記したように、本実施形態の光子対生成装置2によれば、励起光の進行方向と相関光子の進行方向との角度差を従来よりも広くすることができるので、上記の出射側マスク32のような簡素な構成によって、励起光と相関光子とを容易に分離することが可能となる。

[0099] また、図8に示す例では、光分離部6は、ビームスプリッタ6Aおよび波長選択フィルタ6B・6Cによって構成されている。光共振器5から出射される2つの相関光子は、ビームスプリッタによって2方向に分離される。そして、第1光子検出器3Aの光入射側に波長選択フィルタ6Bが設けられ、第2光子検出器3Bの光入射側に波長選択フィルタ6Cが設けられており、これによって、2つの相関光子は第1および第2光子検出器3A・3Bでの確にそれぞれ検出される。

[0100] 図9に示す構成では、入射光整形レンズ21として、ソリッドイマージョン(SI)レンズを用いている。SIレンズとは、同図に示すように、半球形またはワイエルストラス形をしたレンズであり、光出射側の面を光共振器

5の光入射側面に密着させて使用する。このような構成によれば、通常のレンズよりも遥かに高いN.A.（開口数）を実現できる。また、マスク31を入射光整形レンズ21の光入射側面に設けており、これにより光源4から出射される1つの光ビームを2つの光ビームに変換している。

[0101] すなわち、このS Iレンズとしての入射光整形レンズ21とマスク31とを用いることによって、より広角度で2つの励起光を光共振器5に対して入射させることが可能となる。また、この構成によれば、励起光の単位体積あたりの強度（励起密度）を大きくすることもでき、同じ励起光強度でより効率よくRHP Sを起こすことが出来る。さらに、励起光の入射角度を広角にすることにより、垂直方向に出射するRHP S光（相関光子対）と励起光との分離をより容易に実現することが可能となる。

[0102] また、励起光の入射角度にある程度広がりを持たせることができるので、入射光の位相整合条件をある程度の範囲で同時に満たすことが可能となる。その結果、作製した光共振器5の構造が設計と少し違っていても、条件の角度がこの範囲に含まれていれば外部での励起光の入射角度の調整が必要なくなる。これは、光共振器5の作製精度の条件が軽減されることになるので、実際の装置製作時の設計誤差の許容量を増大させることができ、製造コストの低減が期待される。

[0103] 本発明は上述した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る。すなわち、請求項に示した範囲で適宜変更した技術的手段を組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

産業上の利用可能性

[0104] 本発明に係る光子対生成システムは、生成される相関光子対を用いることにより、量子テレポーテーションを利用した量子暗号などの量子情報通信技術に適用することができる。

符号の説明

[0105] 1 光子対生成システム

- 2 光子対生成装置
- 3 A・3 B 第1および第2光子検出器
- 4 光源
- 5 光共振器
- 6 光分離部
- 6 A ビームスプリッタ
- 6 B・6 C 波長選択フィルタ
- 7 光整形部
- 1 1・1 2 第1および第2反射鏡
- 1 3 スペーサ層
- 1 4 励起子活性媒質（相関光子対生成部材）
- 2 1 入射光整形レンズ
- 2 2 出射光整形レンズ
- 3 1 マスク
- 3 2 出射側マスク

請求の範囲

[請求項1]

光を出射する光源と、
上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、
上記光整形部から出射された光ビームによって2個の光子を取り入れ、該2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材とを備え、
上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、
上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されていることを特徴とする光子対生成装置。

[請求項2]

上記光源から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振器をさらに備え、
上記相関光子対生成部材が、上記光共振器の内部に含まれていることを特徴とする請求項1記載の光子対生成装置。

[請求項3]

光を出射する光源と、
上記光源から出射された光ビームを整形する光整形部と、
上記光整形部から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振器とを備え、
上記光共振器が、取り入れた2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材を含んでいるとともに、励起子の共鳴エネルギーと共振器に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーとの差を示す離調度と、励起子分子の束縛エネルギーとが同じになるように設定されており、
上記光整形部が、上記光共振器に入射する2個の光子と、上記光共振器から出射する2個の相関光子との間で位相整合条件が満たされる

ように、光を上記光共振器に照射することを特徴とする光子対生成装置。

[請求項4] 上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、

上記光共振器が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されていることを特徴とする請求項3記載の光子対生成装置。

[請求項5] 上記光共振器が、当該光共振器におけるRabi分裂量が励起分子の束縛エネルギーより大きくなるように構成されていることを特徴とする請求項2または3記載の光子対生成装置。

[請求項6] 上記相関光子対生成部材が、量子井戸、量子細線、または量子ドットであることを特徴とする請求項1または3記載の光子対生成装置。

[請求項7] 上記光整形部が、入射光整形レンズとマスクとを含んでおり、上記光源から出射された所定の光領域を有する光ビームを上記入射光整形レンズに照射するとともに、上記マスクを該光ビームの光領域中に配置することによって2つの光ビームに分断し、これにより上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から光ビームを照射することを特徴とする請求項1または3記載の光子対生成装置。

[請求項8] 上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材の光入射面の法線方向に対して線対称となる互いに異なる2つの方向から照射するとともに、

上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子を、上記相関光子対生成部材の光出射面の法線方向に出射するように構成されていることを特徴とする請求項1または4記載の光子対生成装置。

[請求項9] 光を出射する光源から出射された光ビームを光整形部によって整形する光整形処理と、

相関光子対生成部材が、上記光整形部から出射された光ビームによ

って2個の光子を取り入れ、該2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成処理とを有し、

上記光整形部が、同じ波長の光ビームを、上記相関光子対生成部材に対して互いに異なる2つの方向から照射するとともに、

上記相関光子対生成部材が、上記相関光子対として、互いに波長の異なる2個の相関光子をそれぞれ同一の方向に出射するように構成されていることを特徴とする光子対生成方法。

[請求項10]

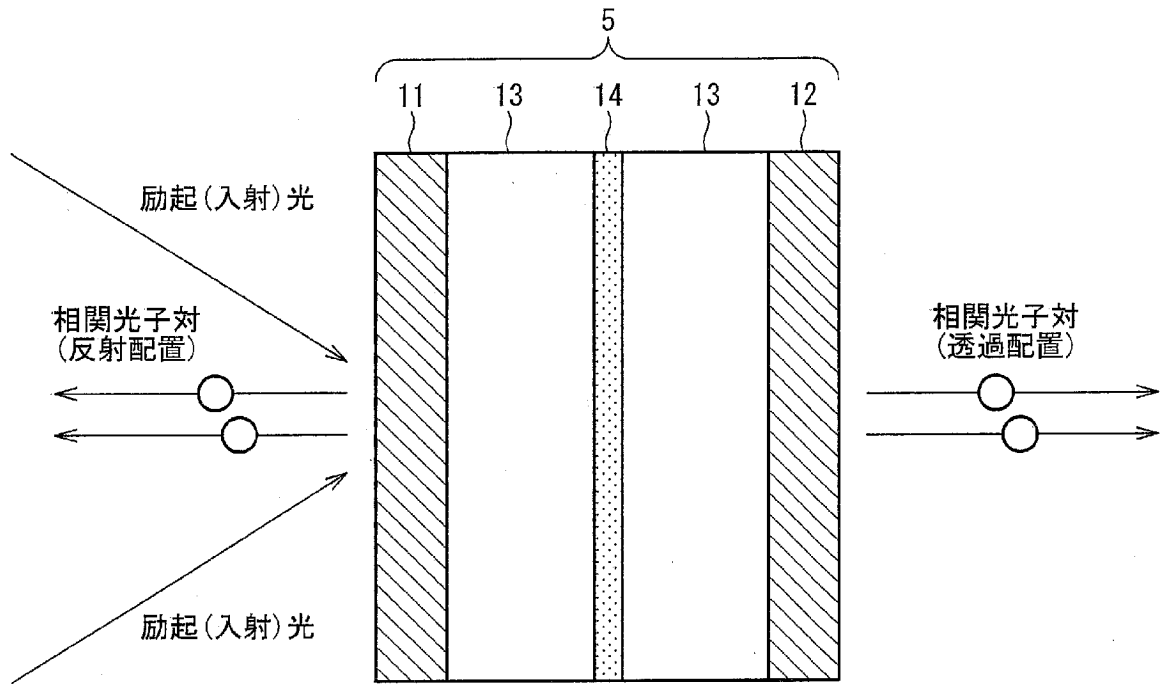
光を出射する光源から出射された光ビームを光整形部によって整形する光整形処理と、

光共振器が、上記光整形部から出射された光を取り入れ、内部で共振させることによって光の強度を強める光共振処理とを有し、

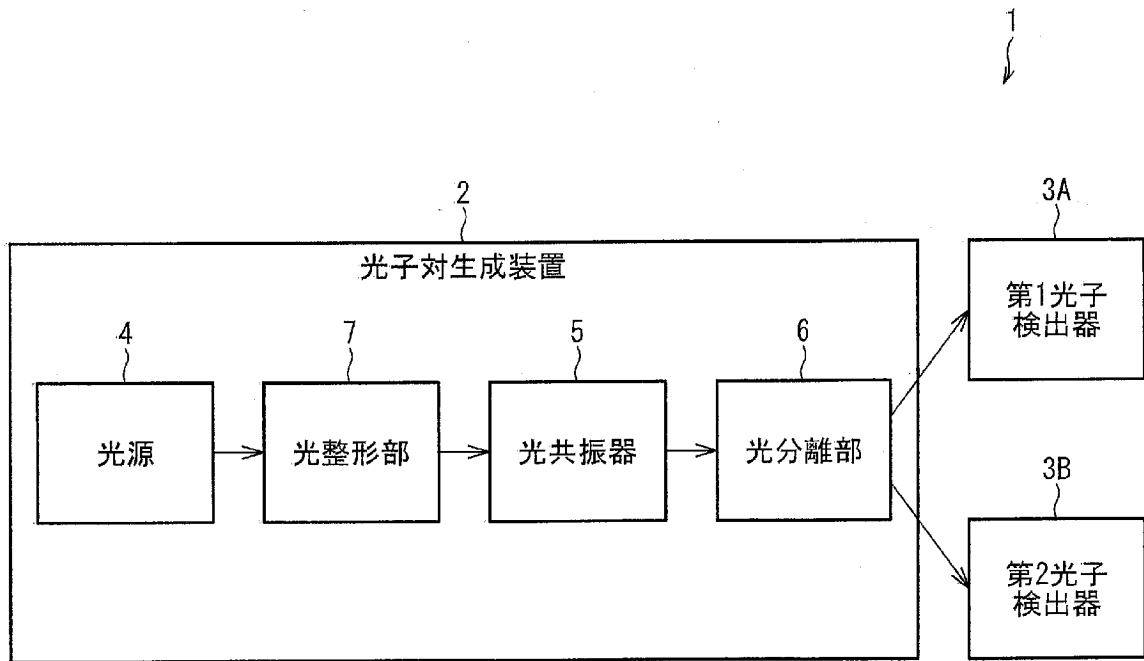
上記光共振器が、取り入れた2個の光子を共鳴的に励起させて励起子分子を生成し、さらに該励起子分子が崩壊することによって、互いに量子相関した2個の相関光子を相関光子対として放出する相関光子対生成部材を含んでいるとともに、励起子の共鳴エネルギーと共振器に閉じ込められた光子の共鳴エネルギーとの差を示す離調度と、励起子分子の束縛エネルギーとが同じになるように設定されており、

上記光整形部が、上記光共振器に入射する2個の光子と、上記光共振器から出射する2個の相関光子との間で位相整合条件が満たされるように、光を上記光共振器に照射することを特徴とする光子対生成方法。

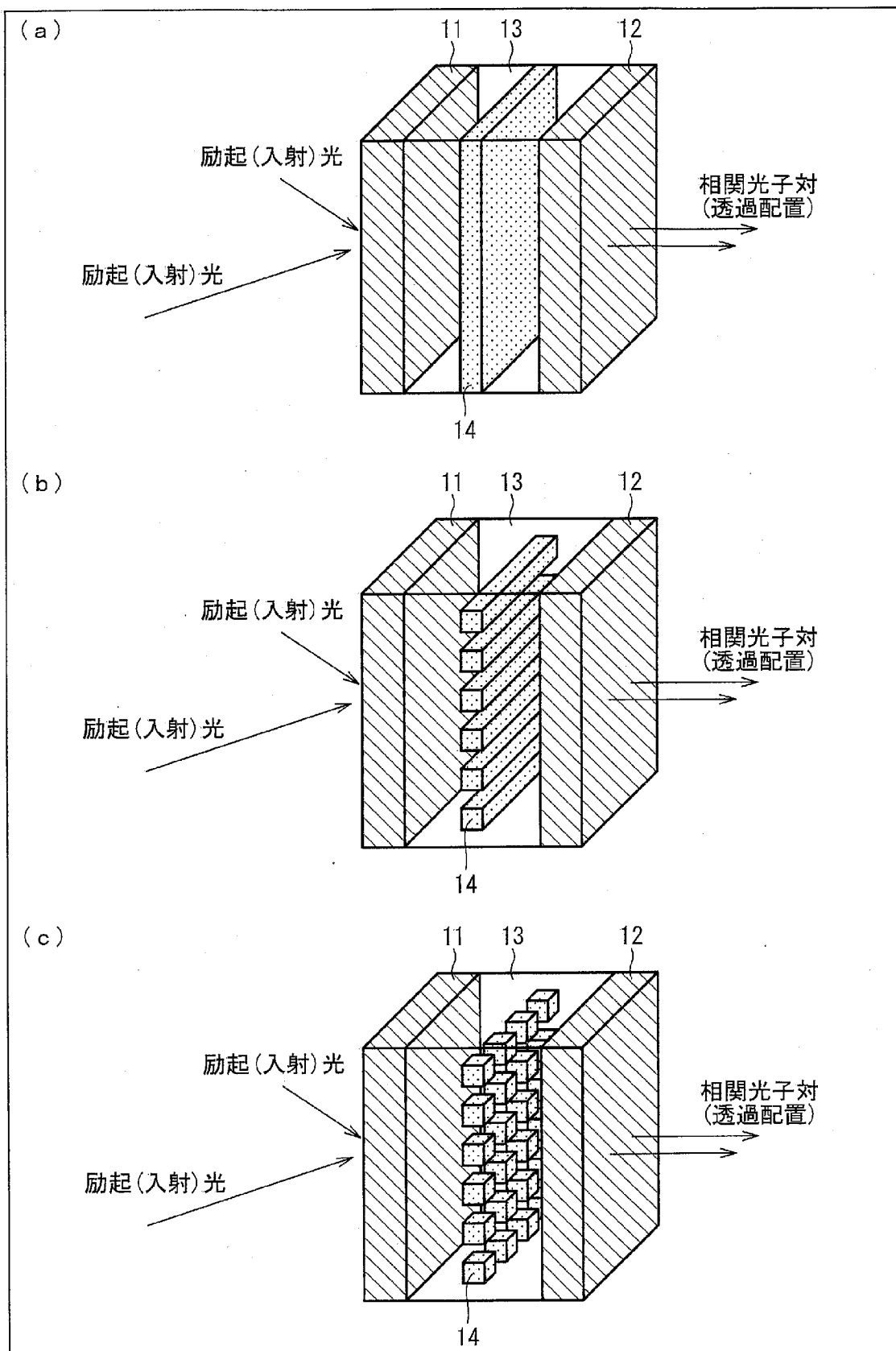
[图1]



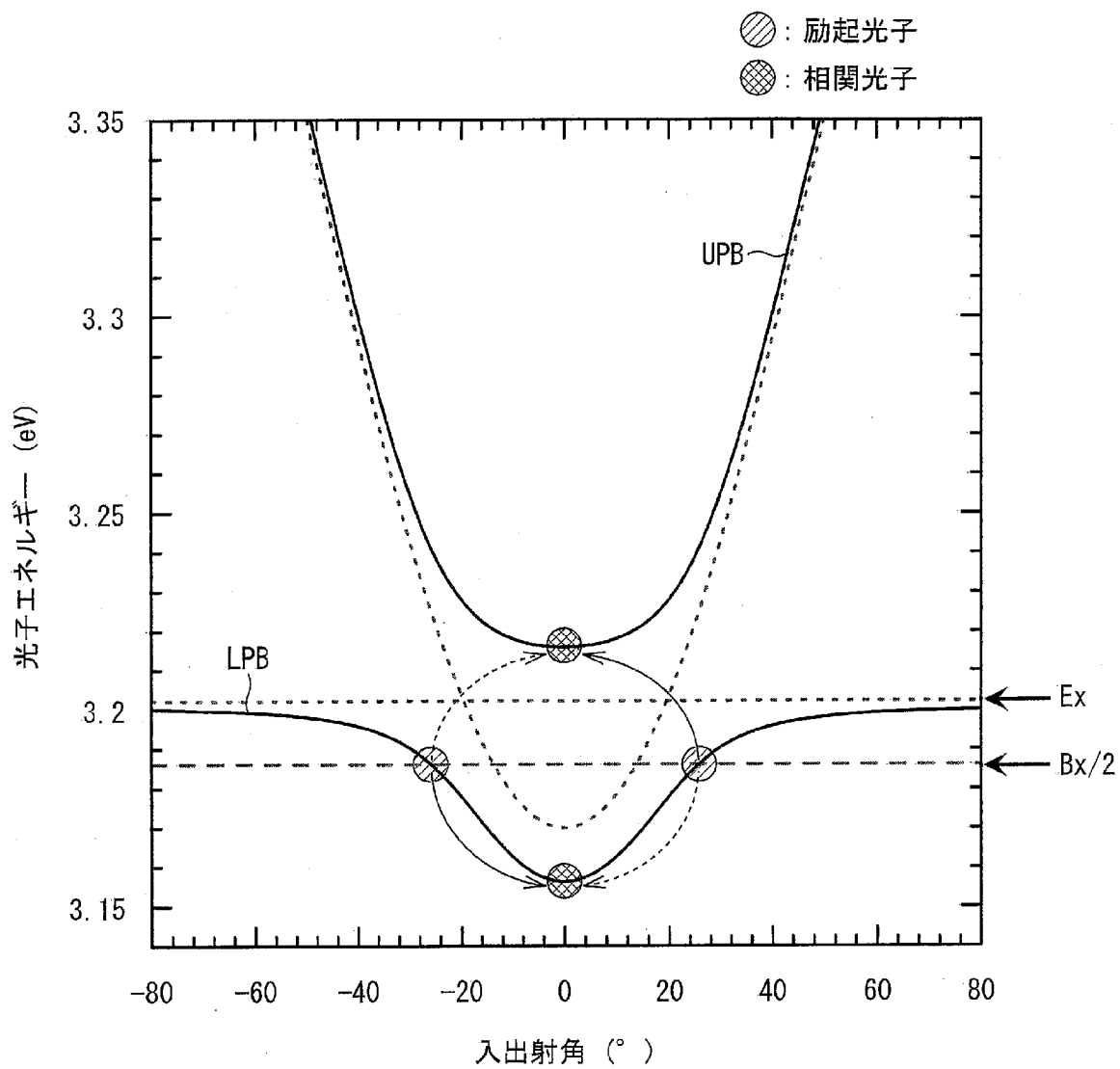
[图2]



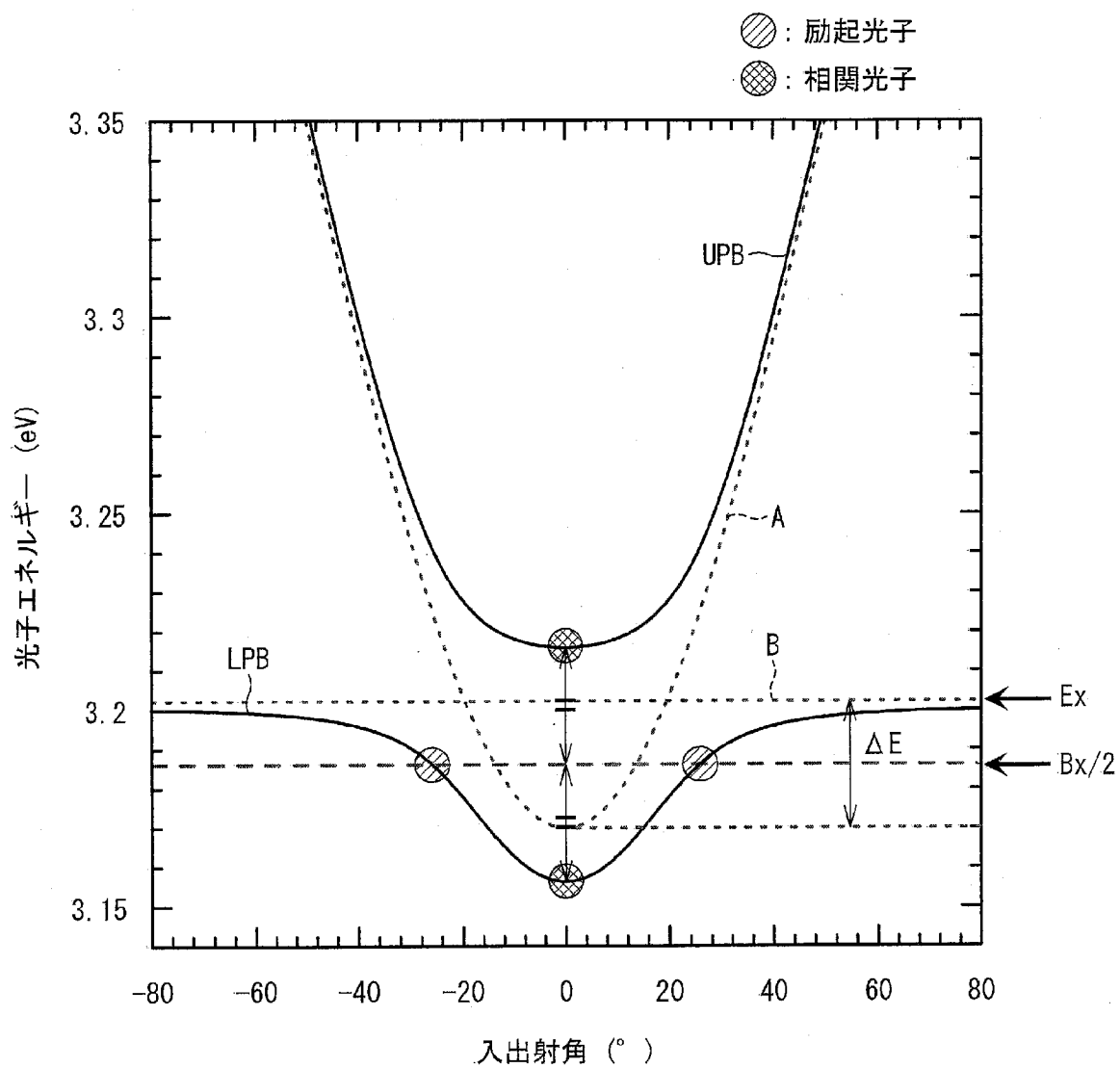
[圖3]



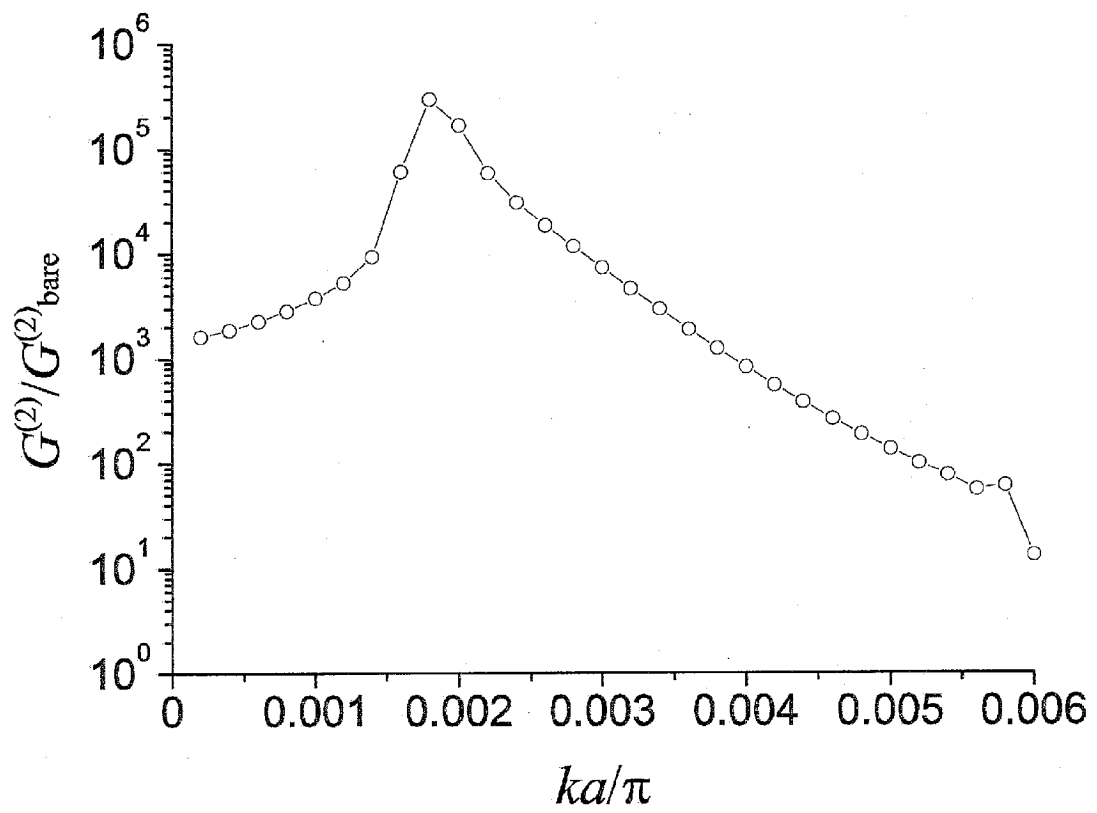
[図4]



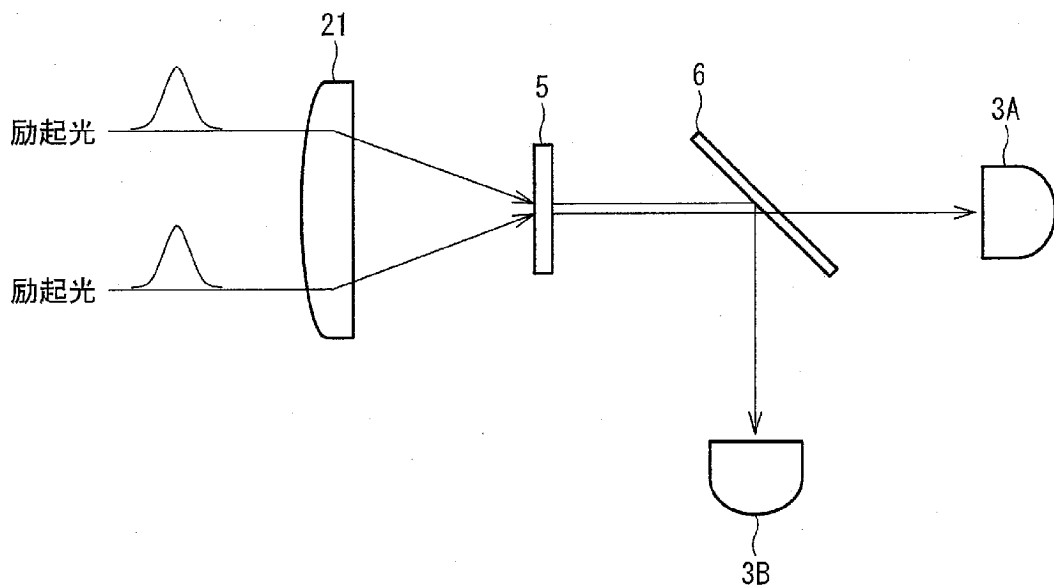
[図5]



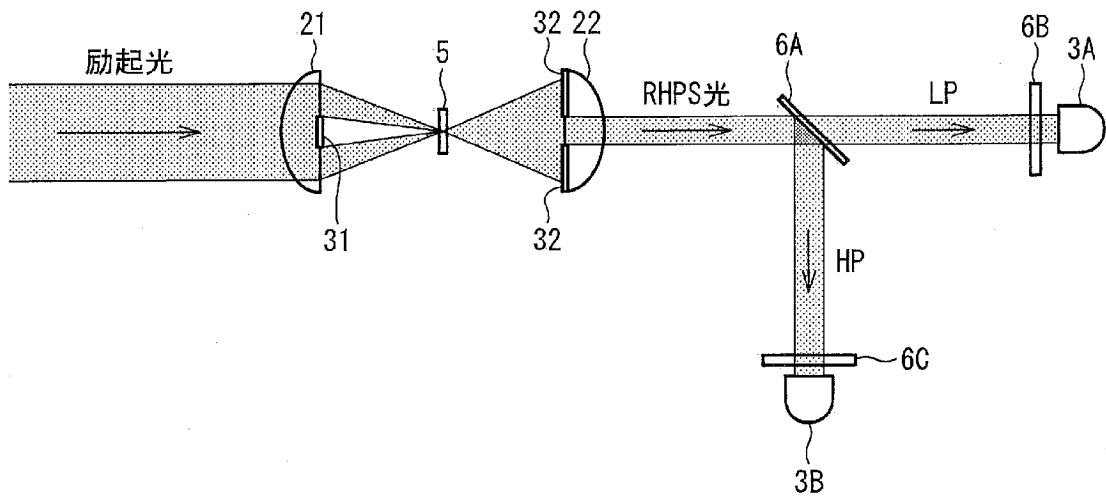
[图6]



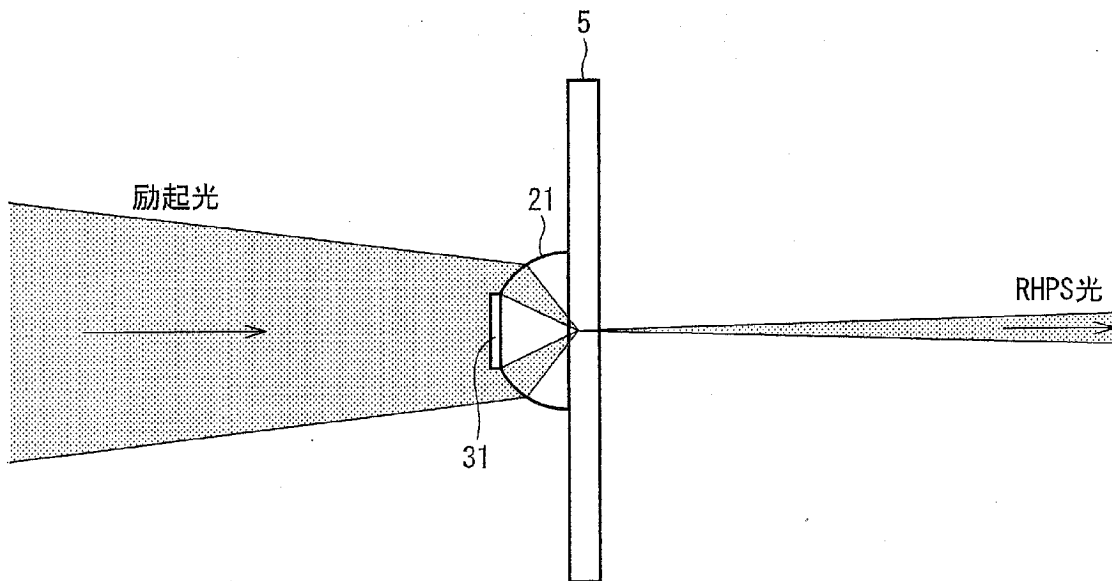
[图7]



[图8]



[图9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/058333

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F1/35 (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, G02F3/00

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 1996-2009

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2009 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2009

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

JSTPlus (JDreamII), JST7580 (JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2007/094094 A1 (Osaka Prefecture University), 23 August, 2007 (23.08.07), Par. Nos. [0013] to [0075]; Figs. 1, 5, 6 (Family: none)	1-10
A	JP 2002-040505 A (NEC Corp.), 06 February, 2002 (06.02.02), Par. Nos. [0015] to [0029]; Figs. 1 to 6 & US 2002/0030186 A1	1-10
A	Goro OHATA et al., "DBR-gata CuCl Micro Cavity ni Okeru Rabi-bunretsu no Seigyō", Abstracts of the Meeting of the Physical Society of Japan, 29 February, 2008 (29.02.08), Vol.63, No.1, separate Vol.4, page 704, 23pYJ-2	1-10

 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
22 May, 2009 (22.05.09)Date of mailing of the international search report
02 June, 2009 (02.06.09)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/058333

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	R.J. Young et al., Entangled photons from the biexciton cascade of quantum dots, Journal of Applied Physics, 2007.04.15, Vol.101, pp.081711-1 - 081711-4	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

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
G02F3/00

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	1971-2009年
日本国実用新案登録公報	1996-2009年
日本国登録実用新案公報	1994-2009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)
JST7580(JDreamII)

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	WO 2007/094094 A1 (公立大学法人大阪府立大学) 2007.08.23, 段落【0013】 - 【0075】, 第1, 5, 6 図 (ファミリーなし)	1 - 10
A	JP 2002-040505 A (日本電気株式会社) 2002.02.06, 段落【0015】 - 【0029】, 第1 - 6 図 & US 2002/0030186 A1	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

22.05.2009

国際調査報告の発送日

02.06.2009

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)

山本 貴一

2 X

4 0 8 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 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	大畠悟郎 他, DBR 型 CuCl マイクロキャビティにおけるラビ分裂の制御, 日本物理学会講演概要集, 2008.02.29, 第63巻, 第1号, 第4分冊, p.704 23pYJ-2	1 - 10
A	R. J. Young et al., Entangled photons from the biexciton cascade of quantum dots, Journal of Applied Physics, 2007.04.15, Vol.101, pp.081711-1 - 081711-4	1 - 10