

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5041256号
(P5041256)

(45) 発行日 平成24年10月3日(2012.10.3)

(24) 登録日 平成24年7月20日(2012.7.20)

(51) Int. Cl. F I
G02F 1/39 (2006.01) G O 2 F 1/39
G02F 1/377 (2006.01) G O 2 F 1/377
G02F 2/00 (2006.01) G O 2 F 2/00

請求項の数 23 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2009-529007 (P2009-529007)	(73) 特許権者	501086714 学校法人 学習院 東京都豊島区目白1-5-1
(86) (22) 出願日	平成20年8月11日 (2008.8.11)	(73) 特許権者	503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(86) 国際出願番号	PCT/JP2008/064436	(74) 代理人	100082876 弁理士 平山 一幸
(87) 国際公開番号	W02009/025195	(72) 発明者	平野 琢也 東京都豊島区目白3丁目16番11号
(87) 国際公開日	平成21年2月26日 (2009.2.26)	(72) 発明者	衛藤 雄二郎 東京都文京区根津2-10-2 ボンヴォ ワール301
審査請求日	平成23年8月2日 (2011.8.2)	審査官	林 祥恵
(31) 優先権主張番号	特願2007-213205 (P2007-213205)		
(32) 優先日	平成19年8月18日 (2007.8.18)		
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		
早期審査対象出願			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子エンタングルメント生成装置及び方法並びに量子エンタングルメント生成検出装置及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光周波数 $2f_0$ の光を発生するレーザー光源と、
 一つのビームスプリッタと複数の鏡でリング状の光路を形成するリング型干渉計と、
 上記リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光が入射すると光周波数 f_0 の光を発生する光パラメトリック増幅器と、
 上記リング型干渉計の光路中に挿入された分散媒質と、
 を備え、

光周波数 $2f_0$ の光が上記レーザー光源から上記ビームスプリッタに入射し、
 上記ビームスプリッタが $2f_0$ の光周波数を有する光を分岐して上記リング型干渉計内
 を互いに反対方向へ進ませ、分岐した各光が上記光パラメトリック増幅器に入射すること
 で、上記リング型干渉計内を互いに反対方向へ進む第1及び第2のスクイーズ光が発生し

10

、
 上記分散媒質が上記第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を所定の値に調整し、
 上記ビームスプリッタが上記第1及び第2のスクイーズ光を合波して、量子エンタング
 ルビームが生成される、量子エンタングルメント生成装置。

【請求項2】

前記リング型干渉計は、三角形以上の多角形の各辺で光路が構成され、
 前記ビームスプリッタは、上記多角形の一頂点に配置され、
 前記複数の鏡は、上記多角形の残りの頂点に配置されている、請求項1に記載の量子エ

20

ンタングルメント生成装置。

【請求項 3】

前記リング型干渉計は、前記ビームスプリッタと前記複数の鏡のうち第 1 及び第 2 の鏡とが反時計方向に順に配設されて形成された三角形の光路を有しており、

前記分散媒質は、前記ビームスプリッタと上記第 1 の鏡との間の光路に配置され、

前記光パラメトリック増幅器は、上記第 1 の鏡と上記第 2 の鏡との間の光路に配置される、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 4】

前記リング型干渉計は、前記ビームスプリッタと前記複数の鏡のうち第 1 ~ 第 3 の鏡とが反時計方向に順に配設されて形成された矩形形状の光路を有しており、

前記光パラメトリック増幅器は上記第 1 の鏡と上記第 2 の鏡との間の光路に配置され、

前記分散媒質は前記ビームスプリッタと上記第 3 の鏡との間の光路に配置される、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 5】

前記光パラメトリック増幅器と前記第 1 の鏡との光軸上及び前記光パラメトリック増幅器と前記第 2 の鏡との光軸上には、それぞれ集光手段が配設される、請求項 3 又は 4 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 6】

前記光パラメトリック増幅器は、電気光学結晶からなる光導波路構造を有している、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 7】

前記分散媒質は 2 枚のガラス板からなる、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 8】

前記レーザー光源が、光周波数 f_0 の光を発生する光源と、該光源から入射される光周波数 f_0 の光を光周波数 $2f_0$ に変換する第 2 高調波発生器と、からなる、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 9】

前記第 2 高調波発生器が、電気光学結晶からなる光導波路構造を有している、請求項 8 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 10】

前記ビームスプリッタは、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ の両方の光に対して透過率及び反射率が共に約 50% である、請求項 1 に記載の量子エンタングルメントの生成装置。

【請求項 11】

前記リング型干渉計が面上に形成されている、請求項 1 に記載の量子エンタングルメント生成装置。

【請求項 12】

レーザー光源から光周波数 $2f_0$ の光を発生し、

一つのビームスプリッタと複数の鏡とでリング状の光路を形成するリング型干渉計に、上記レーザー光源からの光を入射し、

入射する光を上記ビームスプリッタで分岐して上記リング型干渉計内で互いに反対方向へ進む 2 つの光とし、

上記ビームスプリッタで分岐された一方の光を、上記リング型干渉計内の光路に配置された光パラメトリック増幅器から、該リング型干渉計内の光路に配置された分散媒質へ進ませて、光周波数 f_0 の第 1 のスクイーズ光を発生させ、

上記ビームスプリッタで分岐された他方の光を、上記分散媒質から上記光パラメトリック増幅器へ進ませて、光周波数 f_0 の第 2 のスクイーズ光を発生させ、

上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光の相対的な位相を、上記分散媒質によって所定の値に調整し、かつ、上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光を、上記ビームスプリッタで合波するこ

10

20

30

40

50

とにより量子エンタングルビームを生成する、量子エンタングルメント生成方法。

【請求項 1 3】

前記第 1 及び第 2 のスクイーズ光の相対的な位相を $\pi/2$ とする、請求項 1 2 に記載の量子エンタングルメント生成方法。

【請求項 1 4】

前記量子エンタングルビームを、前記ビームスプリッタを透過する第 1 の量子エンタングルビームとし、前記ビームスプリッタを反射する第 2 の量子エンタングルビームとする、請求項 1 2 に記載の量子エンタングルメント生成方法。

【請求項 1 5】

光周波数 f_0 のパルスレーザー光源と光周波数 f_0 の光が入射すると光周波数 $2f_0$ の光を発生する第 2 高調波発生器とからなり、光周波数 f_0 のパルスレーザー光と光周波数 $2f_0$ のパルスレーザー光を同じ光軸上に出射する光源部と、

一つのビームスプリッタ及び複数の鏡でリング状の光路を形成するリング型干渉計と、上記リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光が入射すると光周波数 f_0 の光を発生する光パラメトリック増幅器と、

上記リング型干渉計の光路中に挿入された分散媒質と、

ホモダイン検出器と、

を備え、

光周波数 $2f_0$ の光が上記レーザー光源から上記ビームスプリッタに入射し、

上記ビームスプリッタが $2f_0$ の光周波数を有する光を分岐して上記リング型干渉計内を互いに反対方向へ進ませ、分岐した各光が上記光パラメトリック増幅器に入射することで、上記リング型干渉計内を互いに反対方向へ進む光周波数 f_0 の直線偏光した第 1 及び第 2 のスクイーズ光を発生し、

上記分散媒質が上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光の相対的な位相を所定の値に調整し、

上記ビームスプリッタが上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光を合波して、光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビームが生成され、

上記ホモダイン検出器に対して、光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビーム光が信号光として、上記光源部から出射される光周波数 f_0 で該信号光とは直交する偏光を有しているパルスレーザー光が局部発振光として、それぞれ入射し、直交位相振幅が検出される、量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 1 6】

前記量子エンタングルビームは第 1 及び第 2 の量子エンタングルビームからなり、上記ホモダイン検出器は第 1 及び第 2 のホモダイン検出器からなり、上記第 1 及び第 2 の量子エンタングルビーム光が、それぞれ、上記第 1 及び第 2 のホモダイン検出器への信号光となる、請求項 1 5 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 1 7】

前記ビームスプリッタは、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ の水平直線偏光の光に対して透過率及び反射率が共に約 50% であり、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光に対して反射率が約 100% である、請求項 1 5 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 1 8】

前記ホモダイン検出器は、前記信号光及び前記局部発振光が入射される電気光学結晶と、該電気光学結晶から入射する光を偏光させる $1/2$ 波長板と、該 $1/2$ 波長板で偏光した光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、該ビームスプリッタで分岐される 2 つの光をそれぞれ検出する検出器と、該検出器の差分を出力する手段と、からなる、請求項 1 5 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 1 9】

前記ホモダイン検出器は、前記信号光及び前記局部発振光が入射され、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ を透過させるフィルタと、該フィルタからの光の位相を変化させる $1/4$ 波長板と、該 $1/4$ 波長板からの光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、該ビームスプリッタで分岐される 2 つの光をそれぞれ検出する検出

10

20

30

40

50

器と、該検出器の差分を出力する手段と、からなる、請求項 15 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 20】

さらに、前記局部発振光及び前記信号光と前記ホモダイン検出器との間に配設される分散媒質を備え、該ホモダイン検出器は、上記分散媒質を通過した光から光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ を透過させるフィルタと、該フィルタからの光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、該ビームスプリッタで分岐される 2 つの光をそれぞれ検出する検出器と、該検出器の差分を出力する手段と、からなる、請求項 15 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 21】

前記リング型干渉計が、面上に形成されている、請求項 15 に記載の量子エンタングルメントの生成検出装置。

【請求項 22】

光周波数 f_0 のレーザー光源からの光と該レーザー光源から第 2 高調波発生器を介して発生させた光周波数 $2f_0$ の光とを、同じ光軸上に発生し、

一つのビームスプリッタ及び複数の鏡でリング状の光路を形成するリング型干渉計に、上記レーザー光源からの光周波数 $2f_0$ の光を入射し、

入射する光を、上記ビームスプリッタで分岐して上記リング型干渉計内で互いに反対方向へ進む 2 つの光とし、

上記ビームスプリッタで分岐された一方の光を、上記リング型干渉計内の光路に配置された光パラメトリック増幅器から、該リング型干渉計内の光路に配置された分散媒質へ進む光とし、光周波数 f_0 の直線偏光した第 1 のスクイーズ光を発生し、

上記ビームスプリッタで分岐された他方の光を、上記分散媒質から上記光パラメトリック増幅器へ進む光とし、光周波数 f_0 の直線偏光した第 2 のスクイーズ光を発生し、

上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光の相対的な位相を、上記分散媒質によって所定の値に調整し、かつ、上記第 1 及び第 2 のスクイーズ光を、上記ビームスプリッタで合波することにより、光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビームを生成し、

光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビームをホモダイン検出器の信号光とし、上記ビームスプリッタで分岐された一方の光と同じ光路を介して上記レーザー光源からの光周波数 f_0 の光を上記リング型干渉計内を通過させると共に、上記信号光とは直交する偏光とし、上記ホモダイン検出器の局部発振光とし、上記ホモダイン検出器が、上記信号光の直交位相振幅を検出する、量子エンタングルメントの生成及び検出方法。

【請求項 23】

前記光パラメトリック増幅器の前後の光軸上に光周波数 $2f_0$ を阻止するフィルタを挿入し、前記量子エンタングルビームの発生を停止する、請求項 22 に記載の量子エンタングルメントの生成及び検出方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子エンタングルメント生成装置と量子エンタングルメント生成検出装置、並びに量子エンタングルメントの生成方法と量子エンタングルメント生成検出方法に関する。さらに詳細には、2 次の高調波型光学効果を用いる連続変数の量子エンタングルメント生成装置及び生成方法と、この量子エンタングルメント生成装置で生成した量子エンタングルビームの検出も同時に行うことができる装置とその検出方法に関する。

【背景技術】

【0002】

量子情報技術は、量子力学的効果を直接的に利用することにより、従来よりも優れた情報処理を実現する技術あるいは技術分野である。量子エンタングルメントは、量子情報技術の最も重要な資源である。量子エンタングルメントを利用することにより、絶対に安全な通信や、従来よりも桁違いに高速な計算処理を実現することができる。

10

20

30

40

50

【0003】

量子的にエンタングルした状態は、複数の離れた場所にある物理系が互いに相関を持った状態であり、それら複数の物理系を分離して扱うことができない状態である。2つの離れた場所にある物理系が量子的にエンタングルした状態を共有しているとき、2つの場所で行う測定の結果には、古典論では説明することができない相関が生じる。

【0004】

量子エンタングルメントという言葉は、一般に、量子的にエンタングルした状態そのもの、あるいは、エンタングルした状態が示す量子論特有の物理現象、または、量子論が非分離の特性を内包しているという概念を表すのに用いられる。しかし、本明細書では、量子エンタングルメントを、量子的にエンタングルした状態を示す言葉として用いる。

10

【0005】

量子情報処理には、主に2つのアプローチがあり、ひとつは離散的な物理量を用いるもの、もう一つは連続的な物理量を用いるものである(例えば、非特許文献1参照)。光の場合には、通常、電場の直交振幅を連続的な値をとる物理量として用いる。連続的な物理量に対する量子エンタングルメントのことを、連続変数量子エンタングルメントと呼ぶ。

【0006】

従来の連続変数エンタングルメントの生成方法を説明する。最も初期に用いられた方法は、非縮退のパラメトリック増幅器を用いる方法である(例えば、特許文献1参照)。特許文献1で紹介されている実験では、非線型媒質としてチタン酸リン酸カリウム(KTP)を用い、タイプII(type II)の位相整合を行うことで、互いに直交した偏光状態のシグナル光とアイドラ光を発生した。非縮退とは、偏光状態が異なるということである。パラメトリック増幅をタイプIIの位相整合で行ったときのシグナル光とアイドラ光は、量子的な相関を有しており、連続変数量子エンタングルメントを生成することができる。

20

【0007】

しかしながら、従来のタイプIIの位相整合を用いる方法では、シグナル光とアイドラ光に対する非線型媒質の屈折率が異なるため、これらの2つの光に対して光共振器を同時に共鳴させることが技術的に困難であった。また、一般に、タイプIIの位相整合ではビームのウォークオフが起り、量子エンタングルメントの質が低下していた。

【0008】

次に実施された方法は、2つのスクイーズ光を発生し、それらを透過率と反射率がともに50%のビームスプリッタで重ね合わせることで、量子エンタングルメントを生成するというものである。このとき、2つのスクイーズ光の相対的な位相差が $\pi/2$ となるように精密に制御する必要がある。

30

【0009】

例えば、非特許文献2では、リング共振器内に置かれたタイプIの位相整合を行うパラメトリック増幅により、リングを右回りと左回りに進行するスクイーズ光を発生し、それらをリングの外に置いたビームスプリッタで重ね合わせることで、量子エンタングルメントを発生した。この方法の問題点は、リング共振器を出た後にビームスプリッタで重なり合うまでに、2つのスクイーズ光は別の経路をたどるので、2つの経路間の相対的な光路長が不安定になることである。

40

【0010】

【特許文献1】H. J. Kimble et al., U.S. Patent 5,339,182, Aug. 16, 1994

【非特許文献1】S. L. Braunstein and P. van Loock, Rev. Mod. Phys. Vol.77, p.513, 2005

【非特許文献2】T. C. Zhang, et al., Phys. Rev. A, Vol.67, p.033802, 2003

【非特許文献3】Yujiro Eto, et al., Optics Letters, Vol. 32, pp. 1698-1700, 2007

【非特許文献4】L. M. Duan, et al., Physical Review Letters, Vol. 84, p.2722, 2000

00

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

50

【 0 0 1 1 】

従来の2つのスクイーズ光を用いる方法では、光路長の差を常に監視し、帰還制御（フィードバック制御）による安定化を行う必要があるが、相対的な光路長の安定化は有限の精度でしか実現できない上に、装置が複雑になるという課題があった。

【 0 0 1 2 】

上記課題に鑑み、本発明の第1の目的は、2つのスクイーズ光を重ね合わせるエンタングルメント生成において、2つのスクイーズ光の相対的な位相差を安定的に制御できる、量子エンタングルメント生成装置を提供することである。本発明の第2の目的は、量子エンタングルメントを生成する方法を提供することである。

本発明の第3の目的は、この量子エンタングルメント生成装置で生成した量子エンタングルビームの検出も同時に行うことができる装置を提供することにある。さらに、本発明の第4の目的は量子エンタングルメントを生成し、さらに生成した量子エンタングルビームの検出も同時に行うことができる方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 3 】

上記第1の目的を達成するため、本発明の量子エンタングルメント生成装置は、光周波数 $2f_0$ の光を発生するレーザー光源と、光周波数 $2f_0$ の光が入射されるビームスプリッタ及び複数の鏡でリング状光路が構成されるリング型干渉計と、リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光が入射すると光周波数 f_0 の光を発生する光パラメトリック増幅器と、リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光と光周波数 f_0 との相対的な光路長を変化させる分散媒質と、を備え、ビームスプリッタで分岐されリング型干渉計内を互いに反対方向へ進む2つの光周波数 $2f_0$ の光を、光パラメトリック増幅器に入射させることで、リング型干渉計内を互いに反対方向へ進む第1及び第2のスクイーズ光を発生させ、第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を分散媒質により所定の値に調整し、第1及び第2のスクイーズ光を、ビームスプリッタで合波することにより量子エンタングルビームを生成する。

上記構成において、リング型干渉計は、好ましくは、三角形以上の多角形の各辺で光路が構成され、ビームスプリッタは多角形の一頂点に配置され、複数の鏡は多角形の残りの頂点に配置されている。

リング型干渉計は、好ましくは、ビームスプリッタと複数の鏡のうち第1及び第2の鏡とが反時計方向に順に配設される三角形の光路を有しており、分散媒質はビームスプリッタと第1の鏡との間の光路に配置され、光パラメトリック増幅器は第1の鏡と第2の鏡との間の光路に配置される。

リング型干渉計は、好ましくは、ビームスプリッタと複数の鏡のうち第1～第3の鏡とが反時計方向に順に配設される矩形形状の光路を有しており、光パラメトリック増幅器は第1の鏡と第2の鏡との間の光路に配置され、分散媒質はビームスプリッタと第3の鏡との間の光路に配置される。

光パラメトリック増幅器と第1の鏡との光軸上及び光パラメトリック増幅器と第2の鏡との光軸上には、好ましくは、それぞれ集光手段が配設される。前記光パラメトリック増幅器は、好ましくは、電気光学結晶からなる光導波路構造を有している。

分散媒質は、好ましくは、2枚のガラス板からなる。

レーザー光源は、好ましくは、光周波数 f_0 の光を発生する光源と、光源から入射される光周波数 f_0 の光を光周波数 $2f_0$ に変換する第2高調波発生器と、からなる。

第2高調波発生器は、好ましくは、電気光学結晶からなる光導波路構造を有している。

ビームスプリッタは、好ましくは、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ の両方の光に対して透過率及び反射率が共に約50%である。

前記リング型干渉計は、好ましくは面上に形成されている。

【 0 0 1 4 】

上記第2の目的を達成するため、本発明の量子エンタングルメント生成方法は、レーザー光源から光周波数 $2f_0$ の光を発生し、レーザー光源からの光を、ビームスプリッタ及

10

20

30

40

50

び鏡からなる光路と光路内に配置される光パラメトリック増幅器及び分散媒質とからなるリング型干渉計へ入射し、入射する光をビームスプリッタで分岐してリング型干渉計内で互いに反対方向へ進む2つの光とし、分岐された一方の光を光パラメトリック増幅器から分散媒質へ進む光とし、光周波数 f_0 の第1のスクイーズ光を発生し、分岐された他方の光を分散媒質から光パラメトリック増幅器へ進む光とし、光周波数 f_0 の第2のスクイーズ光を発生し、第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を分散媒質によって所定の値に調整し、第1及び第2のスクイーズ光をビームスプリッタで合波することにより量子エンタングルビームを生成する。

上記構成において、好ましくは、第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を $\pi/2$ とする。量子エンタングルビームを、好ましくは、ビームスプリッタを透過する第1の量子エンタングルビームとし、ビームスプリッタを反射する第2の量子エンタングルビームとする。

【0015】

上記構成によれば、リング型干渉計で生成する2つのスクイーズ光の相対的な位相を安定に保つことにより、安定に量子エンタングルメントを生成することができる。

【0016】

上記第3の目的を達成するため、本発明の量子エンタングルメントの生成検出装置は、光周波数 f_0 のパルスレーザー光源と光周波数 f_0 の光が入射すると光周波数 $2f_0$ の光を発生する第2高調波発生器とからなり、光周波数 f_0 のパルスレーザー光と光周波数 $2f_0$ のパルスレーザー光を同じ光軸上に出射する光源部と、光周波数 $2f_0$ の光が入射されるビームスプリッタ及び複数の鏡でリング状光路が構成されるリング型干渉計と、リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光が入射すると光周波数 f_0 の光を発生する光パラメトリック増幅器と、リング型干渉計の光路中に挿入され、光周波数 $2f_0$ の光と光周波数 f_0 との相対的な光路長を変化させる分散媒質と、ホモダイン検出器と、を備え、ビームスプリッタで分岐されてリング型干渉計内を互いに反対方向へ進む2つの光周波数 $2f_0$ の光を光パラメトリック増幅器に入射させることで、リング型干渉計内を互いに反対方向へ進む光周波数 f_0 の第1及び第2の直線偏光したスクイーズ光を発生させ、第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を分散媒質により所定の値に調整し、第1及び第2のスクイーズ光を、ビームスプリッタで合波することにより量子エンタングルビームを生成させ、ホモダイン検出器に対して、光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビーム光が信号光として、光源部から出射される光周波数 f_0 で信号光とは直交する偏光を有しているパルスレーザー光が局部発振光として、それぞれ入射され、直交位相振幅が検出される。

【0017】

上記構成において、好ましくは、量子エンタングルビームは第1及び第2の量子エンタングルビームからなり、ホモダイン検出器は第1及び第2のホモダイン検出器からなり、第1及び第2の量子エンタングルビーム光が、それぞれ、第1及び第2のホモダイン検出器への信号光となる。

ビームスプリッタは、好ましくは、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ の水平直線偏光の光に対して透過率及び反射率が共に約50%であり、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光に対して反射率が約100%である。

ホモダイン検出器は、好ましくは、信号光及び局部発振光が入射される電気光学結晶と、電気光学結晶から入射する光を偏光させる $1/2$ 波長板と、 $1/2$ 波長板で偏光した光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、分岐される2つの光をそれぞれ検出する検出器と、検出器の差分を出力する手段と、からなる。

ホモダイン検出器は、好ましくは、信号光及び局部発振光が入射される光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ を透過させるフィルタと、フィルタからの光の位相を変化させる $1/4$ 波長板と、 $1/4$ 波長板からの光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、分岐される2つの光をそれぞれ検出する検出器と、検出器の差分を出力する手段と、からなる。

10

20

30

40

50

さらに、好ましくは、局部発振光及び信号光とホモダイン検出器との間に配設される分散媒質を備え、ホモダイン検出器は、分散媒質を通過した光から光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ を透過させるフィルタと、フィルタからの光を重ね合わせると共に透過光と反射光とに分岐するビームスプリッタと、分岐される2つの光をそれぞれ検出する検出器と、検出器の差分を出力する手段と、からなる。

前記リング型干渉計は、好ましくは面上に形成されている。

【0018】

上記第4の目的を達成するため、本発明の量子エンタングルメントの生成及び検出方法は、光周波数 f_0 のレーザー光源からの光とレーザー光源から第2高調波発生器を介して発生させた光周波数 $2f_0$ の光とを同じ光軸上に発生し、レーザー光源からの光周波数 $2f_0$ の光を、ビームスプリッタ及び複数の鏡からなるリング状光路と光路内に配置される光パラメトリック増幅器及び分散媒質とからなるリング型干渉計へ入射し、入射する光をビームスプリッタで分岐してリング型干渉計内で互いに反対方向へ進む2つの光とし、分岐された一方の光を光パラメトリック増幅器から分散媒質へ進む光とし、光周波数 f_0 の第1の直線偏光したスクイーズ光を発生し、分岐された他方の光を分散媒質から光パラメトリック増幅器へ進む光とし、光周波数 f_0 の第2の直線偏光したスクイーズ光を発生し、第1及び第2のスクイーズ光の相対的な位相を分散媒質によって所定の値に調整し、第1及び第2のスクイーズ光をビームスプリッタで合波することにより量子エンタングルビームを生成し、光周波数 f_0 の直線偏光した量子エンタングルビームをホモダイン検出器の信号光とし、光周波数 f_0 のレーザー光源からの光を分岐された一方の光と同じ光路を介してリング型干渉計内を通過させると共に、信号光とは直交する偏光とし、ホモダイン検出器の局部発振光とし、ホモダイン検出器により信号光の直交位相振幅を検出する。

【0019】

上記構成において、好ましくは、光パラメトリック増幅器の前後の光軸上に光周波数 $2f_0$ の光を阻止するフィルタを挿入し、量子エンタングルビームの発生を停止する。

【0020】

上記構成によれば、リング型干渉計で生成する2つのスクイーズ光の相対的な位相を安定に保つことにより、安定に量子エンタングルビームを生成することができる。さらに、ホモダイン検出器の局部発振光が、リング型干渉計に入射する光と同じ光軸から供給されるので、量子エンタングルビームのホモダイン検出も安定して行うことができる。

【発明の効果】

【0021】

本発明の量子エンタングルメント生成装置及び量子エンタングルメント生成方法によれば、リング型干渉計内で互いに反対方向へ進む2つのスクイーズ光の相対的な位相を安定に保つことにより、安定に量子エンタングルメントを生成することができる。

本発明の量子エンタングルメント生成検出装置及び量子エンタングルメント生成及び検出方法によれば、リング型干渉計内で互いに反対方向へ進む2つのスクイーズ光の相対的な位相を安定に保つことにより、安定に量子エンタングルメントを生成することができると共に、生成した量子エンタングルメントビームのホモダイン検出も安定して行うことができる。さらに、エンタングルメントビームとホモダイン検出のための局部発振光とを同軸上に出力することにより、ホモダイン検出の安定性を向上することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明の第1実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置の構成を示すブロック図である。

【図2】本発明の第2実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置の構成を示す図である。

【図3】本発明の第3実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置の構成を示すブロック図である。

【図4】本発明の第1実施形態による量子エンタングルメントの生成検出装置を示すプロ

10

20

30

40

50

ック図である。

【図5】本発明の第2実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置を示すブロック図である。

【図6】 $\sqrt{2} (X_a(\theta_{a1}) + X_b(\theta_b))$ の値が最小になった位相(その位相を $\theta_b = \theta_{b1}$ とする。)における $X_a(\theta_{a1})$ と $X_b(\theta_{b1})$ の散布図である。

【図7】 $\theta_b = \theta_{b2} = \theta_{b1} + \pi/2$ を満たす位相(その位相を $\theta_b = \theta_{b1}$ とする。)における $X_a(\theta_{a2})$ と $X_b(\theta_{b2})$ の散布図である。

【図8】測定した $X_a(\theta_a)$, $X_b(\theta_b)$ から計算した第1の量子エンタングルビームと第2の量子エンタングルビームの和と差の分散の θ_b への依存性を示す図である。

【符号の説明】

【0023】

- 1 : レーザー光源
- 2 , 105 : 第2高調波発生器
- 3 : 第1の鏡
- 4 : ビームスプリッタ
- 5 : 第2の鏡
- 6 , 122 : 光パラメトリック増幅器
- 7 : 第3の鏡
- 8 : 第4の鏡
- 9 , 124 , 128 : 分散媒質
- 10 , 130 : 第1の量子エンタングルビーム
- 11 , 131 : 第2の量子エンタングルビーム
- 15 : 光周波数 f_0 のレーザー光源
- 20 , 25 , 70 , 170 : リング型干渉計
- 30 , 35 , 40 : 量子エンタングルメント生成装置
- 50 , 150 : 量子エンタングルメントの生成検出装置
- 60 , 160 : 光源部
- 80 , 180 : 第1のホモダイン検出器
- 90 , 190 : 第2のホモダイン検出器
- 100 : パルスレーザー光源
- 101 : 光パルス(光周波数 f_0 で水平偏光の光)
- 102 , 132 , 138 , 139 : 光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの $1/2$ 波長板
- 103 , 107 , 110 , 113 : 光周波数 f_0 の光の水平偏光成分
- 104 , 108 , 111 : 光周波数 f_0 の光の垂直偏光成分
- 106 : 光周波数 $2f_0$ で水平偏光の光
- 109 , 117 , 219 : 光周波数 f_0 に対する偏光ビームスプリッタ
- 112 , 118 : 2波長用波長板(光周波数 f_0 では $1/2$ 波長板、光周波数 $2f_0$ では 1 波長板となる)
- 114 : 鏡
- 115 : 光周波数 f_0 の光
- 116 : 光周波数 $2f_0$ の光
- 120 , 134 , 213 : 特殊ビームスプリッタ
- 121 , 123 , 203 , 204 , 210 : 鏡(2波長鏡)
- 125 , 216 : 第1のガラス板
- 126 , 217 : 第2のガラス板
- 133 , 135 , 214 , 215 , 220 : 光周波数 f_0 に対する鏡
- 136 : 第1の電気光学結晶
- 137 : 第2の電気光学結晶
- 140 , 141 : 光周波数 f_0 に対する偏光ビームスプリッタ
- 142 : 第1のフォトダイオード

10

20

30

40

50

- 1 4 3 : 第 2 のフォトダイオード
- 1 4 4 : 第 3 のフォトダイオード
- 1 4 5 : 第 4 のフォトダイオード
- 1 4 6 : 第 1 の R F コンバイナー
- 1 4 7 : 第 2 の R F コンバイナー
- 1 4 8 : 第 1 の増幅器
- 1 4 9 : 第 2 の増幅器
- 2 0 0 , 2 0 2 , 2 0 6 , 2 0 8 , 2 2 6 , 2 2 7 , 2 2 8 , 2 2 9 : レンズ
- 2 0 5 , 2 0 7 , 2 2 3 , 2 2 4 : 赤色フィルタ
- 2 1 1 , 2 1 2 : 平行平面ガラス板
- 2 2 1 , 2 2 2 : バンドパスフィルタ
- 2 2 5 : 1 / 4 波長板

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0024】

以下、図面を参照して本発明の好適な実施形態を詳細に説明する。

(量子エンタングルメント生成装置の第1実施形態)

図1は、本発明の第1実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置30の構成を示す平面視のブロック図である。光路は直線で示している。図示したXY座標によって、平面図における横方向をX方向とし、縦方向をY方向として説明する。図1に示すように、本発明の量子エンタングルメント生成装置30は、レーザー光源1とリング型干渉計20

20

とから構成されている。光周波数が $2f_0$ のレーザー光源1から出射した光は、第1の鏡3を介してリング型干渉計20に入射される。

【0025】

(量子エンタングルメント生成装置の第2実施形態)

図2は、本発明の第2実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置35の構成を示す平面視のブロック図である。光路は直線で示している。図2に示す量子エンタングルメント生成装置35が図1に示す量子エンタングルメント生成装置30と異なるのは、レーザー光源1の構成である。レーザー光源1は、光周波数 f_0 のレーザー光源15と第2高調波発生器2とから構成されており、光周波数 $2f_0$ の光を発生する。レーザー光源1から発生したレーザー光は、図2において、-X方向(左向き)に直進して第1の鏡3に入

30

力され、その反射光が-Y方向(下向き)に反射されてリング型干渉計20へ入射する。

【0026】

リング型干渉計20は、ビームスプリッタ4と第2の鏡5と光パラメトリック増幅器6と第3の鏡7と第4の鏡8と分散媒質9とから構成されている。ビームスプリッタ4の-Y方向(下側)に第2の鏡5が配置されている。第2の鏡5のX方向(右側)に第3の鏡7が配置されている。また、ビームスプリッタ4のX方向(右側)に第4の鏡8が配置されている。

【0027】

リング型干渉計20は、ビームスプリッタ4と第2~4の鏡5,7,8とが四角形、具体的には矩形の各頂点に配置され、光路を形成している。つまり、リング型干渉計20は、ビームスプリッタ4と、リング型干渉計20用の第1~第3の鏡5,7,8が反時計方向に順に配設されている。光パラメトリック増幅器6は第2の鏡5と第3の鏡7とから形成される光路軸に沿って配置されている。分散媒質9は、ビームスプリッタ4と第4の鏡8とから形成される光路軸に沿って配置されている。

40

【0028】

ビームスプリッタ4は、光周波数 $2f_0$ と光周波数 f_0 の両方の光に対して、透過率及び反射率が50%であることが望ましい。

【0029】

第1~4の鏡3,5,7,8は、何れも光周波数 $2f_0$ と光周波数 f_0 の両方の光を反射する鏡であり、例えば、誘電体からなる。

50

【 0 0 3 0 】

光パラメトリック増幅器 6 は光周波数 $2f_0$ の光を f_0 に変換する。光パラメトリック増幅器 6 は、2 次の非線型光学効果を有する結晶を用いることができ、例えば、周期分極反転構造を有する LiNbO_3 からなる光導波路を用いることができる。

【 0 0 3 1 】

分散媒質 9 は光学ガラスを用いることができる。光学ガラスの材料としては、BK7 のようなホウケイ酸ガラスを使用してもよい。分散媒質 9 が光学ガラスからなる場合には、光学ガラスの光軸内の寸法が変化するように微動することにより、レーザー光がガラス内を透過する距離を変化させることで、レーザー光の相対的な位相を制御することができる。光学ガラスとしては、楔形状のウェッジガラス板を用いてもよく、後述するように、2 枚用いた分散媒質 9 としてもよい。別の分散媒質 9 としては、空気などの気体を容器に充填し、光の入り口及び出口となる窓部を有する、所謂ガスセルを用いることができる。分散媒質 9 がガスセルからなる場合には、気体の圧力を変化させることで、気体を通過するレーザー光の相対的な位相を制御することができる。

10

【 0 0 3 2 】

リング型干渉計 20 は、平面の上に形成されていることが好ましい。リング型干渉計 20 は、ブレッドボード上に形成することができる。ブレッドボードは、光学定盤とも呼ばれている。ブレッドボードは、剛性がある材料からなる板または基板であってもよい。リング型干渉計 20 を単一のブレッドボード上に形成することにより、温度変動や振動に対して光路長の安定化を図ることができると共に、装置の構成が簡単になる。第 1 の鏡 3 も単一のブレッドボード上に形成してもよい。レーザー光源 1 からの光も、光ファイバで単一のブレッドボードへ導光すれば、さらに、温度変動や振動に対して光路長の安定化を図ることができる。

20

【 0 0 3 3 】

次に、本発明の量子エンタングルメント生成装置 30, 35 の動作を説明する。

レーザー光源 1 から出射して第 1 の鏡 3 とビームスプリッタ 4 と第 2 の鏡 5 とを通過した光周波数 $2f_0$ の光は、光パラメトリック増幅器 6 の励起光入力となり、光周波数 f_0 の第 1 のスクイーズ光を発生する。この第 1 のスクイーズ光は、リング型干渉計 20 の中を反時計回りに進み、第 3 の鏡 7 及び第 4 の鏡 8 で反射されたのち、分散媒質 9 を通過し、ビームスプリッタ 4 に至る。

30

【 0 0 3 4 】

次に、ビームスプリッタ 4 で X 方向（右側）に反射されたレーザー光は、分散媒質 9 を通過し、第 4 の鏡 8 で - Y 方向（下側）に反射され、第 3 の鏡 7 で - X 方向（左側）に反射されたのち、光パラメトリック増幅器 6 に入射し、光周波数 f_0 の第 2 のスクイーズ光を発生する。したがって、この第 2 のスクイーズ光は、リング共振器の中を時計回りに進み、第 2 の鏡 5 で反射された後、ビームスプリッタ 4 に至る。

【 0 0 3 5 】

このようにして、リング型干渉計 20 で発生し、互いに反対方向へ進む第 1 及び第 2 のスクイーズ光は、ビームスプリッタ 4 で空間的に重ね合わせが生起される。このとき、第 1 のスクイーズ光と第 2 のスクイーズ光との相対的な位相が $\pi/2$ となるように分散媒質 9 を操作することにより、量子的な相関をもつ第 1 の量子エンタングルビーム 10 と第 2 の量子エンタングルビーム 11 を発生することができる。第 1 の量子エンタングルビーム 10 は、ビームスプリッタ 4 を通過した後、図 1 に示すように - X 方向（左方向）に出射する。第 2 の量子エンタングルビーム 11 は、ビームスプリッタ 4 により Y 方向（上方向）へ反射し、第 1 の鏡 3 を通過して出射する。

40

【 0 0 3 6 】

第 1 のスクイーズ光と第 2 のスクイーズ光とを、ビームスプリッタ 4 で重ね合わせた際の相対的な位相を、分散媒質 9 を用いて制御できるのは、次の理由による。リング型干渉計 20 を反時計回りに進む経路では、光周波数 f_0 の光が分散媒質 9 を通過するのに対し、時計回りに進む経路では光周波数 $2f_0$ の光が分散媒質 9 を通過するからである。すなわ

50

ち、時計回りと反時計回りの互いに反対方向に進む場合には、分散媒質 9 を通るときの光周波数が異なるので、分散の大きさを変えることで、第 1 のスクイーズ光と第 2 のスクイーズ光の相対的な位相を変えることができる。

【 0 0 3 7 】

さらに、第 1 のスクイーズ光と第 2 のスクイーズ光との相対的な位相を、分散媒質 9 により所望の値、例えば、 $\pi/2$ となるように設定することにより、第 1 及び第 2 の量子エンタングルメント生成装置 10、11 を生成することができる。

【 0 0 3 8 】

本発明の第 1、第 2 の実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置 30、35 によれば、第 1 及び第 2 の 2 つのスクイーズ光は、互いに異なる経路をたどるのではなく、同一のリング型干渉計 20 内を互いに逆向きに回るだけであるので、それらの間の相対的な位相は機械的に安定である。さらに、リング型干渉計 20 内で光の波長が変換される。すなわち、光周波数 $2f_0$ のレーザー光源 1 による励起光によって、光パラメトリック増幅器 6 において光周波数 f_0 のスクイーズ光を発生し、分散媒質 9 を制御することにより、第 1 及び第 2 のスクイーズ光間の相対的な位相を変化させることができる。したがって、本発明の量子エンタングルメント生成装置 30、35 によれば、第 1 及び第 2 のスクイーズ光を重ね合わせるエンタングルメント生成において、第 1 及び第 2 のスクイーズ光の相対的な位相差を安定に制御することができる。

【 0 0 3 9 】

(量子エンタングルメント生成装置の第 3 実施形態)

次に、本発明の第 3 実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置 40 の構成について説明する。

図 3 は、本発明の第 3 実施形態に係る量子エンタングルメント生成装置 40 の構成を示す平面視したブロック図である。光路は直線で示している。図 3 に示す量子エンタングルメント生成装置 40 が、図 1 に示す量子エンタングルメント生成装置 30 と異なるのは、リング型干渉計 25 である。他の構成は、量子エンタングルメント生成装置 30 と同じであるので説明は省略する。

リング型干渉計 25 は、ビームスプリッタ 4 と分散媒質 9 と第 2 の鏡 5 と光パラメトリック増幅器 6 と第 3 の鏡 7 とから構成されている。ビームスプリッタ 4 の垂直下方 ($-Y$ 方向) に第 2 の鏡 5 が配置されている。ビームスプリッタ 4 の X 方向 (右方向) に第 3 の鏡 7 が配置されている。

【 0 0 4 0 】

リング型干渉計 25 は、ビームスプリッタ 4 と第 2 の鏡 5 と第 3 の鏡 7 とが三角形の各頂点に配置されて光路を形成している。つまり、リング型干渉計 25 は、ビームスプリッタ 4 と、リング型干渉計 25 用の第 1 及び第 2 の鏡 5、7 が反時計方向に順に配設されている。光パラメトリック増幅器 6 は第 2 の鏡 5 と第 3 の鏡 7 とから形成される光路軸に沿って配置されている。分散媒質 9 は、ビームスプリッタ 4 と第 2 の鏡 5 とから形成される光路軸に沿って配置されている。

【 0 0 4 1 】

リング型干渉計 25 は、リング型干渉計 20 と同様に基板上に形成されていることが好ましい。リング型干渉計 25 を基板上に形成することにより、温度変動や振動に対して光路長の安定化を図ることができると共に、装置の構成が簡単になる。第 1 の鏡 3 も同一の基板上に形成してもよい。レーザー光源 1 からの光を光ファイバで基板へ導光すれば、さらに、温度変動や振動に対して光路長の安定化を図ることができる。

【 0 0 4 2 】

次に、第 3 実施形態の量子エンタングルメント生成装置 40 による量子エンタングルメント生成について説明する。

レーザー光源 1 から出射した光周波数 $2f_0$ の光は、第 1 の鏡 3 で反射され、ビームスプリッタ 4 を透過した後、分散媒質 9 を通過して第 2 の鏡 5 で反射され、光パラメトリック増幅器 6 の励起光入力となる。光パラメトリック増幅器 6 は、光周波数 f_0 の第 1 のス

10

20

30

40

50

クイズ光を発生する。光周波数 f_0 の第 1 のスクイズ光は、水平偏光した光であってもよい。

この第 1 のスクイズ光は、リング型干渉計 25 の中を反時計回りに進み、第 3 の鏡 7 で反射されたのち、ビームスプリッタ 4 に至る。

【0043】

レーザー光源 1 から出射し、第 1 の鏡 3 で反射された光はビームスプリッタ 4 へ入射し、ビームスプリッタ 4 に入射した光周波数 $2f_0$ の光は X 方向へ反射され、第 3 の鏡 7 で紙面左斜め下方に反射されて光パラメトリック増幅器 6 に入射し、光周波数 f_0 の第 2 のスクイズ光を発生する。

次に、光周波数 f_0 の第 2 のスクイズ光は第 2 の鏡 5 で Y 方向に反射されたのち、分散媒質 9 を通過し、ビームスプリッタ 4 に至る。したがって、この第 2 のスクイズ光は、リング型干渉計 25 の中を時計回りに進み、分散媒質 9 を通過してビームスプリッタ 4 に至る。

【0044】

このようにして、リング型干渉計 25 で発生した第 1 及び第 2 のスクイズ光は、ビームスプリッタ 4 で空間的に重ね合わせが生起される。このとき、第 1 のスクイズ光と第 2 のスクイズ光との相対的な位相が $\pi/2$ となるように分散媒質 9 を操作することにより、量子的な相関をもつ第 1 の量子エンタングルビーム 10 及び第 2 の量子エンタングルビーム 11 を発生することができる。第 1 の量子エンタングルビーム 10 は、ビームスプリッタ 4 を通過した後、図 3 に示すように - X 方向（左方向）に出射する。第 2 の量子エンタングルビーム 11 は、ビームスプリッタ 4 により Y 方向（上側）へ反射し、第 1 の鏡 3 を通過して出射する。

【0045】

第 1 のスクイズ光及び第 2 のスクイズ光の相対的な位相を $\pi/2$ となるように分散媒質 9 を設定することにより、第 1 及び第 2 の量子エンタングルビーム 10, 11 を生成することができる。

【0046】

（量子エンタングルメント生成検出装置の第 1 実施形態）

次に、本発明の第 1 の実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 50 について説明する。

図 4 は、第 1 実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 50 を示す平面視におけるブロック図である。光路は直線で示している。量子エンタングルメントの生成検出装置 50 は、量子エンタングルビームを生成する手段と、生成された量子エンタングルビームを検出する手段と、を備えた装置である。図 4 に示すように、量子エンタングルメントの生成検出装置 50 は、光源部 60 とリング型干渉計 70 と第 1 のホモダイン検出器 80 と第 2 のホモダイン検出器 90 とから構成されている。

【0047】

ここで、量子エンタングルビームの生成は、光源部 60 とリング型干渉計 70 とにより行われる。生成された量子エンタングルビーム信号は、第 1 及び第 2 のホモダイン検出器 80, 90 により検出される。この場合、光源部 60 からの光が局部発振光となる。ホモダイン検出とは、同じ光周波数を有する信号光及び局部発振光の混合による検波であり、信号光の直交位相振幅を測定するものである。

【0048】

光源部 60 は、パルスレーザー光源 100 と、パルスレーザー光源 100 から出射されるパルスレーザー光の光路に沿って順に配置されている $1/2$ 波長板 102 と第 2 高調波発生器 105 と偏光ビームスプリッタ 109 と 2 波長用波長板 112 と鏡 114 と偏光ビームスプリッタ 117 と 2 波長用波長板 118 とから構成されている。2 波長用波長板 118 を通過したレーザー光がリング型干渉計 70 へ入射される。

【0049】

パルスレーザー光源 100 は、光周波数が f_0 で水平偏光の光パルス 101 を発生する

10

20

30

40

50

。水平偏光の光パルス光 101 は、光周波数 f_0 に対してゼロオーダーの $1/2$ 波長板 102 に入射する。 $1/2$ 波長板 102 は、水平偏光の光パルス光 101 の偏光面を回転し、斜め直線偏光の光に変換する。つまり、光パルス光 101 の偏光面が、水平偏光成分 103 と垂直偏光成分 104 に変換され、水平偏光成分 103 及び垂直偏光成分 104 が第 2 高調波発生器 105 へ入射する。この場合、偏光面の回転角により局部発振光の強度を調節することができる。

【0050】

第 2 高調波発生器 105 により、光周波数 f_0 のパルス光の水平偏光成分 103 の一部は、光周波数が $2f_0$ で水平偏光のパルスレーザー光 106 に変換される。この水平偏光のパルスレーザー光 106 は、偏光ビームスプリッタ 109 及び 2 波長用波長板 112 で

10

【0051】

光周波数 $2f_0$ に変換されなかった水平偏光成分の光周波数 f_0 の光 107 は、垂直偏光を透過するように配置された光周波数 f_0 に対する偏光ビームスプリッタ 109 により反射され、光周波数 f_0 の光の水平偏光成分 110 となり外部へ出射し、エンタングルビーム生成には使用しない。これは、第 2 高調波への変換効率が高い場合には、変換されずに残った基本波の時間波形が乱れるためである（非特許文献 3 参照）。しかしながら、第 2 高調波発生器 105 の変換効率が高くない場合には、水平偏光成分 110 を必ずしも捨

20

【0052】

一方、光周波数 f_0 のパルス光の垂直偏光成分 104 は、第 2 高調波発生器 105 の非線形相互作用を受けることなく通過するので、出力される垂直偏光成分 108 は、元のパルスレーザー光源 100 から出力されるパルスと同じパルス幅とスペクトルを有している。この光周波数 f_0 のパルス光の垂直偏光成分 108 は、偏光ビームスプリッタ 109 を透過し、透過した垂直偏光の光 111 は、光周波数 f_0 では $1/2$ 波長、光周波数 $2f_0$ では 1 波長となる 2 波長用波長板 112 によって水平偏光の光 113 となる。

【0053】

鏡 114 は、光周波数 $2f_0$ に対する反射率が高いものを用いる。鏡 114 としては、誘電体からなる鏡を使用することができる。鏡 114 の光周波数 f_0 に対する反射率は、後述するホモダイン検出に必要な局部発振光の強度に応じて選ぶことができる。鏡 114 の光周波数 f_0 に対する反射率が小さいときは、鏡 114 を光周波数 f_0 のみを選択的に減衰するフィルタとして用いることができる。

30

【0054】

したがって、パルスレーザー光源 100 から出射した光は、同じ光軸上において、どちらも水平偏光である光周波数 f_0 のパルス光 115 と光周波数 $2f_0$ のパルス光 116 となる。ここで、光周波数 f_0 のパルス光 115 及び光周波数 $2f_0$ のパルス光 116 は同じ光軸にあるので、同軸上のパルス光 115 及び光周波数 $2f_0$ のパルス光 116 と呼ぶ。

40

【0055】

偏光ビームスプリッタ 117 が、光周波数 f_0 の水平偏光成分を透過するように配置されている。したがって、光周波数 f_0 のパルス光はそのまま透過する。つぎに、2 波長用波長板 118 により、光周波数 f_0 のパルス光が垂直偏光へと変換される。

【0056】

リング型干渉計 70 は、後述する特殊な機能を有するビームスプリッタ 120（以下、本発明では特殊ビームスプリッタと呼ぶ。）と鏡 121 と光パラメトリック増幅器 122 と鏡 123 と分散媒質 124 とから構成されている。鏡 121 は特殊ビームスプリッタ 120 の平面視 - X 方向（左側）に配置されており、鏡 123 は特殊ビームスプリッタ 120 の - Y 方向（下側）に配置されている。

50

【 0 0 5 7 】

リング型干渉計 7 0 は、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 と鏡 1 2 1 , 1 2 3 とが三角形の各頂点に配置されている。光パラメトリック増幅器 1 2 2 は、鏡 1 2 1 と鏡 1 2 3 とから形成される光路軸に沿って配置されている。分散媒質 1 2 4 は、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 と鏡 1 2 3 とから形成される光路軸に沿って配置されている。上述したリング型干渉計 2 0 と同様に、リング型干渉計 7 0 は、ブレッドボードや基板上に形成されていることが好ましい。リング型干渉計 7 0 をブレッドボードや基板上に形成することで、温度変動や振動に対して光路長の安定化を図ることができると共に、装置の構成が簡単になる。

【 0 0 5 8 】

特殊ビームスプリッタ 1 2 0 は、光周波数 f_0 及び光周波数 $2 f_0$ の水平直線偏光の光に対しては透過率及び反射率が共にほぼ 5 0 % であり、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光に対してはほぼ 1 0 0 % の反射率を有している。したがって、光周波数 $2 f_0$ のパルス光 1 1 6 は水平偏光であるので、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 により、ほぼ 1 対 1 の割合で分岐され、リング型干渉計 7 0 に入射した後、後述するように第 1 及び第 2 の量子エンタングルビーム 1 3 1 , 1 3 2 を発生する。

【 0 0 5 9 】

鏡 1 2 1 , 1 2 3 は、光周波数 f_0 及び $2 f_0$ に対して反射率がほぼ 1 0 0 % の鏡であり、例えば誘電体からなる。

【 0 0 6 0 】

光パラメトリック増幅器 1 2 2 は、2 次の非線型光学効果を有する結晶を用いることができ、例えば、周期分極反転した LiNbO_3 からなる光導波路を用いることができる。

【 0 0 6 1 】

分散媒質 1 2 4 は、第 1 のガラス板 1 2 5 と第 2 のガラス板 1 2 6 とから構成されている。第 1 及び第 2 のガラス板 1 2 5 , 1 2 6 は、波長に対して微小な光路長差を与えることができる光学部品のウェッジガラス板を使用することができる。ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 の一例は、片面が光軸に対して直角な面であり、他面が光軸に対して傾斜面として形成されている。ウェッジガラスの材料としては、BK7 のようなホウケイ酸ガラスを使用することができる。第 1 または第 2 のウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 は、光軸に対して垂直方向へ移動することができる。第 1 または第 2 のウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 を光の進行方向に垂直方向に移動しても、2 つのウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 を通過後の光ビーム位置の変動を抑えることができる。

上記の構成において、ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 のウェッジの向きを互い逆にするすることで、すなわち、2 つのウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 の厚さが薄い側が光軸に対して左右逆になるように配置することで、光ビーム位置の変動をさらに抑えることができる。

【 0 0 6 2 】

さらに、ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 の両面に、光周波数 f_0 及び光周波数 $2 f_0$ に対する無反射コーティングを施すことで、ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 に高い透過率をもたせることができる。ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 を光軸に対して垂直方向へ移動すると、ガラス板中を透過する光路長が変化するので、分散の効果を得ることができる。すなわち、第 1 のウェッジガラス板 1 2 5 と第 2 のウェッジガラス板 1 2 6 とを用い、光の周波数による屈折率の違いの効果により、光周波数が f_0 と $2 f_0$ との光の間の相対的な光路長を変化させることができる。例えば、ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 の材料として BK7 を使用し、ウェッジガラスの傾斜角を 1 度とする。光周波数 f_0 の光の波長が 1 5 3 5 nm で、光周波数 $2 f_0$ の光の波長が 7 6 7 nm とした場合、ウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 を光軸に対して垂直方向に 0 . 8 6 mm 移動すると、光周波数 f_0 の光と光周波数 $2 f_0$ の光の相対的な位相が $\pi/2$ 変化する。この時の光周波数 f_0 と光周波数 $2 f_0$ との光ビームの相対的な位置変動は 3 nm よりも小さい。また、好ましくは、光ビームを 1 枚目のウェッジガラス板 1 2 5 に対して垂直に入射させ、2 枚目のウェッジガラス板 1 2 6 から光ビームを垂直に出射するように第 1 及び第 2 のウェッジガラス板 1

10

20

30

40

50

25, 126を配置し、さらに、2枚のウェッジガラス板125, 126の間隔を可能な限り接近させることで、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ の光ビームの位置のずれを小さくすることができる。

【0063】

次に、第1実施形態に係る量子エンタングルメント生成検出装置50の動作について説明する。

特殊ビームスプリッタ120によりほぼ1対1の割合で分岐された光周波数 $2f_0$ の2つの光において、その一方の光は、リング型干渉計70内を反時計方向、つまり、鏡121と光パラメトリック増幅器122と鏡123と分散媒質124との順に通過する。他方の光は、リング型干渉計70内を時計方向、つまり、分散媒質124と鏡123と光パラメトリック増幅器122と鏡121との順に通過する。

10

【0064】

反時計方向に進む光周波数 $2f_0$ の水平偏光の光は、光パラメトリック増幅器122に入射し、光周波数 $2f_0$ のパルス光はパラメトリック増幅の励起光としてはたらし、光周波数 f_0 の水平偏光したスクイーズ光を発生する。この反時計回りに進むスクイーズ光は、鏡123で反射され、分散媒質124を通過し、再び特殊ビームスプリッタ120に入射する。

【0065】

時計方向に進む光周波数 $2f_0$ の水平偏光の光は、分散媒質124を通過して光パラメトリック増幅器122に入射し、光周波数 $2f_0$ のパルス光はパラメトリック増幅の励起光としてはたらし、光周波数 f_0 の水平偏光したスクイーズ光を発生する。この時計回りに進むスクイーズ光は、鏡121で反射され、再び特殊ビームスプリッタ120に入射する。

20

【0066】

特殊ビームスプリッタ120に入射され互いに反対方向に進むスクイーズ光、つまり、時計回りに進むスクイーズ光と反時計回りに進むスクイーズ光とは、どちらも水平偏光であり、ほぼ1対1で重ね合わせることができる。2つのスクイーズ光間の相対的な位相は、分散媒質124内の第1及び第2のウェッジガラス板124, 125の相対位置により任意の値に設定することができる。相対的な位相差を $\pi/2$ となるように設定すると、量子的な相関をもつ第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131を発生することができる。

30

【0067】

特殊ビームスプリッタ120は、光周波数 f_0 で水平直線偏光の光に対しては透過率及び反射率が共にほぼ50%である。したがって、発生した量子エンタングルビームは、特殊ビームスプリッタ120により反射された成分が第1の量子エンタングルビーム130となり、特殊ビームスプリッタ120を透過した成分が第2の量子エンタングルビーム131となる。

【0068】

図示するように、第1の量子エンタングルビーム130は、 $1/2$ 波長板132と鏡133と特殊ビームスプリッタ134とを介して、第1のホモダイン検出器80に入射する。 $1/2$ 波長板132は、光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの波長板であって、光周波数 f_0 で水平直線偏光の光を垂直偏光に変換する。鏡133は光周波数 f_0 の光を反射し、例えば、誘電体からなる。特殊ビームスプリッタ134は垂直偏光の光を反射する。これにより、第1の量子エンタングルビーム130は、垂直偏光に変換された後に、第1のホモダイン検出器80に入射する。

40

【0069】

第2の量子エンタングルビーム131は、 2 波長用波長板118により垂直偏光の光に変換され、偏光ビームスプリッタ117と特殊ビームスプリッタ134と鏡135とで反射されて、第2のホモダイン検出器90に入射する。鏡135は光周波数 f_0 の光を反射し、例えば誘電体からなる。

50

【 0 0 7 0 】

第 1 及び第 2 のホモダイン検出器 8 0 , 9 0 の局部発振光となる光について説明する。光源部 6 0 からの光は、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光と光周波数 $2 f_0$ とが同軸上に形成されて、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 に入射される。光周波数 $2 f_0$ のパルス光は上記したように、リング型干渉計 7 0 内で量子エンタングルビームを発生させるのに使用されている。一方、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光は、第 1 及び第 2 のホモダイン検出器 8 0 , 9 0 の局部発振光となるパルス光となる。以下、詳細に説明する。

【 0 0 7 1 】

光周波数 f_0 の垂直直線偏光は、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 で反射され、図 4 の左水平方向に配置されている鏡 1 2 1 で反射されて、光パラメトリック増幅器 1 2 2 を通過して鏡 1 2 3 で反射され、分散媒質 1 2 4 を通過して、再び特殊ビームスプリッタ 1 2 0 に入射する。ここで、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 は光周波数 f_0 の垂直直線偏光は反射する。したがって、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 に入射した光周波数 f_0 の垂直直線偏光した光は、反射されて光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの $1 / 2$ 波長板 1 3 2 に向かう。 $1 / 2$ 波長板 1 3 2 に入射した光周波数 f_0 の垂直直線偏光した光は、 $1 / 2$ 波長板 1 3 2 により光周波数 f_0 の光の偏光面を 90 度回転し、光周波数 f_0 の垂直直線偏光の光は水平偏光となり、光周波数 f_0 に対して反射率の高い鏡 1 3 3 で反射され、特殊ビームスプリッタ 1 3 4 へ到達する。

【 0 0 7 2 】

特殊ビームスプリッタ 1 3 4 は、光周波数 f_0 の水平直線偏光の光に対しては透過率及び反射率が共にほぼ 50% である。したがって、特殊ビームスプリッタ 1 3 4 に入射した光周波数 f_0 の水平に偏光した光は、反射光及び透過光となる。反射光が第 1 のホモダイン検出器 8 0 に入射し、透過光が第 2 のホモダイン検出器 9 0 に入射し、それぞれ、ホモダイン検出器 8 0 , 9 0 の局部発振光となる。

【 0 0 7 3 】

次に、第 1 及び第 2 のホモダイン検出器 8 0 , 9 0 について説明する。

第 1 のホモダイン検出器 8 0 は、電気光学結晶 1 3 6 と $1 / 2$ 波長板 1 3 8 と偏光ビームスプリッタ 1 4 0 と 2 つのフォトダイオード 1 4 2 , 1 4 3 と RF コンバイナー 1 4 6 と増幅器 1 4 8 とからなる。第 2 のホモダイン検出器 9 0 も、第 1 のホモダイン検出器 8 0 と同様に、電気光学結晶 1 3 7 と $1 / 2$ 波長板 1 3 9 と偏光ビームスプリッタ 1 4 1 と、2 つのフォトダイオード 1 4 4 , 1 4 5 と RF コンバイナー 1 4 7 と増幅器 1 4 9 からなる。

【 0 0 7 4 】

第 1 のホモダイン検出器 8 0 へは、第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 が上述したように、光周波数 f_0 の垂直偏光したパルス光が信号光照射として入射し、光周波数 f_0 の水平直線偏光したパルス光が局部発振光として入射する。同様に、第 2 のホモダイン検出器 9 0 へは、第 2 の量子エンタングルビーム 1 3 1 が上述したように、光周波数 f_0 の垂直偏光したパルス光が信号光照射として入射し、光周波数 f_0 の水平直線偏光したパルス光が局部発振光として入射する。

【 0 0 7 5 】

第 1 のホモダイン検出器 8 0 に入射する第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 は水平偏光であり、一方、局部発振光となる垂直偏光したコヒーレントな光パルスも同じ光軸上を進む。つまり、信号光となる第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 と局部発振光となる垂直偏光したコヒーレントな光パルスは同軸上を進む。したがって、第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 と局部発振光は常に同じ経路をたどるので、これらの間の相対的な位相は非常に安定に保つことが可能である。

【 0 0 7 6 】

第 2 のホモダイン検出器 9 0 に入射する第 2 の量子エンタングルビーム 1 3 1 の場合には、量子エンタングルビーム 1 3 1 と局部発振光は、特殊ビームスプリッタ 1 2 0 で分かれた後、特殊ビームスプリッタ 1 3 4 で再合流するため、一部異なる経路をたどることに

なる。このことにより生じる相対的な位相の不安定さは、特殊ビームスプリッタ 120、偏光ビームスプリッタ 117、誘電体ミラー 133、特殊ビームスプリッタ 134 の 4 つの光学部品を共通のブレッドボードや基板上に設置し、ビームの高さを低く保つことで改善することができる。

【0077】

第 1 のホモダイン検出器 80 において、電気光学結晶 136 は、結晶に印加される電圧を変化させることで、水平偏光成分と垂直偏光成分との間の相対的な位相を変化させることができる。光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの $1/2$ 波長板 138 は、直線偏光の偏光面を 45 度回転するように配置されている。このため、第 1 の量子エンタングルビーム 130 と局部発振光は互いに偏光面は直交しつつ、45 度偏光面が回転した偏光状態となる。

10

【0078】

これにより、光周波数 f_0 に対する偏光ビームスプリッタ 140 で、第 1 の量子エンタングルビーム 130 と局部発振光を、ほぼ 1 対 1 の割合で重ね合わせることができる。偏光ビームスプリッタ 140 を反射した光及び透過した光が、それぞれフォトダイオード 142, 143 へ入射する。

【0079】

RF コンバイナー 146 は、2 つのフォトダイオード 142 と 143 の光電流の差を出力し、増幅器 148 で増幅した後、その出力電圧を計測することで、第 1 の量子エンタングルビーム 130 における直交位相振幅の測定が可能となる。RF コンバイナー 146 は 2 つのフォトダイオード 142 と 143 とからなる検出器の差分を出力する手段である。RF コンバイナー 146 の代わりに、2 つのフォトダイオード 142, 143 のアノードとカソードを接続することで、差電流を取り出すこともできる。

20

【0080】

第 2 のホモダイン検出器 90 も第 1 のホモダイン検出器 80 と同様に、電気光学結晶 137 に印加される電圧を変化させることで、水平偏光成分と垂直偏光成分との間の相対的な位相を変化させることができる。光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの $1/2$ 波長板 139 は、直線偏光の偏光面を 45 度回転するように設置する。その結果、第 2 の量子エンタングルビーム 131 と局部発振光は互いに偏光面は直交しつつ、45 度偏光面が回転した偏光状態となる。

30

【0081】

これにより、光周波数 f_0 に対する偏光ビームスプリッタ 141 で、第 2 の量子エンタングルビーム 131 と局部発振光を、ほぼ 1 対 1 の割合で重ね合わせることができる。偏光ビームスプリッタ 141 を反射した光及び透過した光が、それぞれフォトダイオード 144, 145 へ入射する。

【0082】

RF コンバイナー 147 は、2 つのフォトダイオード 144 及び 145 の光電流の差を出力し、増幅器 149 で増幅した後、その出力電圧を計測することで、第 2 の量子エンタングルビーム 131 における直交位相振幅の測定が可能となる。RF コンバイナー 146 は 2 つのフォトダイオード 144 と 145 とからなる検出器の差分を出力する手段である。RF コンバイナー 147 の代わりに、2 つのフォトダイオード 144, 145 のアノードとカソードを接続することで、差電流を取り出すこともできる。

40

【0083】

このような構成によれば、2 つのスクイーズ光の相対的な位相を安定に保つことにより、安定に量子エンタングルメントを生成できる。さらに、量子エンタングルメントと同軸の局部発振光を出力することができ、ホモダイン検出の安定性を向上することができる。

本実施例では、偏光の自由度を利用することにより、量子エンタングルビームとホモダイン検出のための局部発信光を同軸に出力し、エンタングルビームと局部発信光の相対的な位相を安定に保つことができる。

【0084】

50

(量子エンタングルメント生成検出装置の第2実施形態)

次に、本発明の第2の実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置150について説明する。

図5は、本発明の第2実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置150を示す平面視におけるブロック図である。光路は直線で示している。図5に示すように、量子エンタングルメントの生成検出装置150は、量子エンタングルビームを生成する生成手段と、生成された量子エンタングルビームを検出する検出手段と、を備え、生成手段は光源部160とリング型干渉計170とから構成され、検出手段は第1のホモダイン検出器180と第2のホモダイン検出器190とから構成されている。

【0085】

光源部160が、第1実施形態の量子エンタングルメントの生成検出装置50における光源部60と異なるのは、第2高調波発生器105である。第2高調波発生器105は、第2高調波発生器となる光導波路201と、この光導波路201のパルスレーザー光源100側及び第2高調波の出射側に配置される集光手段となるレンズ200、202と、を備えている。つまり、光導波路201が、光軸上で2枚のレンズ200、202に挟まれている点が異なっている。光導波路201は、例えば周期分極反転型でMgOを添加したLiNbO₃からなる光導波路を用いることができる。レンズ200、202としては、凸レンズを用いることができる。光導波路201へのパルスレーザー光源100の集光を凸レンズ200により効率良く行うことができる。同様に、光導波路201から発生させる第2高調波をレンズ202によって効率良く出射させることができる。他の構成は、量子エンタングルメントの生成検出装置50における光源部60と同じであるので、説明は省略する。

【0086】

第2実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置150におけるリング型干渉計170の構成は、第1実施形態に係る生成検出装置50におけるリング型干渉計70に対して、特殊ビームスプリッタ120を備える点は同じ構成であるが、光路形状(第1の相違点)、光パラメトリック増幅器122の構造(第2の相違点)、分散媒質124の構造(第3の相違点)、赤色フィルタ205、209を挿入可能にした構造(第4の相違点)が異なっている。以下、これらの相違点について図5を参照して詳細に説明する。

【0087】

第1の相違点である光路形状について説明する。

図5において、リング型干渉計170は、特殊ビームスプリッタ120と、鏡203、204、121と、光パラメトリック増幅器122と、鏡123、210と分散媒質124とから構成されている。鏡203は特殊ビームスプリッタ120の平面視-X方向に配置され、鏡204は鏡203のY方向に配置され、鏡121は鏡204の-X方向に配置され、鏡123は光パラメトリック増幅器122の-Y方向に配置され、鏡210は鏡123のX方向に配置されると共に特殊ビームスプリッタ120の-Y方向に配置されている。

ここで、鏡203、204、210は、鏡121、123と同様に、光周波数 f_0 及び $2f_0$ に対して反射率がほぼ100%の鏡であり、例えば誘電体からなる。

【0088】

リング型干渉計170は、特殊ビームスプリッタ120と鏡203、204、121、123、210とが六角形の各頂点に配置されている。第1実施形態におけるリング型干渉計70が三角形の光路を有しているのに対して、本第2実施形態におけるリング型干渉計170は六角形の光路を有している点(第1の相違点)が異なっているが、リング型干渉計170としての動作は基本的に同じである。

【0089】

第2の相違点である光パラメトリック増幅器122について説明する。

光導波路207の光軸方向の前後にレンズ206、208を配置した点が、第1実施形態によるリング型干渉計70とは異なっている。リング型干渉計170内の光パラメトリ

10

20

30

40

50

ック増幅器 1 2 2 は、鏡 1 2 1 と鏡 1 2 3 とから形成される光路軸に沿って配置されており、2 枚のレンズ 2 0 6 , 2 0 8 で挟まれた周期分極反転型の MgO が添加された LiNbO₃ からなる光導波路 2 0 7 とから構成されている。レンズ 2 0 6 , 2 0 8 としては、凸レンズを用いることができる。リング型干渉計 1 7 0 内を周回し、光導波路 2 0 7 を通過する光周波数 f_0 と光周波数 $2f_0$ の光は、2 枚のレンズ 2 0 6 , 2 0 8 によって効率良く入射と出射が行われる。

【0090】

第 1 実施形態によるリング型干渉計 7 0 と比べて、本実施形態のリング型干渉計 1 7 0 では鏡 2 0 3 , 2 0 4 , 2 1 0 が追加されている。光導波路 2 0 7 の両脇それぞれに 2 枚以上の鏡を配置することにより、光導波路 2 0 7 への両側からの光パルスの入射効率を最適化することができる。また、リング型干渉計 1 7 0 中で、右回りと左回りで光導波路 2 0 7 から特殊ビームスプリッタ 1 2 0 までの距離を等しくすることにより、右回りと左回りで生成されたスクイーズド光間の空間的なモードの一致を高めることができる。

10

【0091】

第 3 の相違点である分散媒質 1 2 4 について説明する。

リング型干渉計 1 7 0 に配置する分散媒質 1 2 4 として、2 枚の平行に配置された平面ガラス板（以下、平行平面ガラス板と呼ぶ）2 1 1 , 2 1 2 を分散媒質 1 2 4 として使用している点が、2 枚のウェッジガラス板 1 2 5 , 1 2 6 を使用した第 1 実施形態によるリング型干渉計 7 0 と相違している。

【0092】

平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 は、光軸に垂直な面に対して対称に等しい傾き角を持つように配置されている。この光軸に対する傾き角を、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の両者で等しく保ちながら変化させることが好ましい。この場合、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の傾き角が変化しても、これらのガラス板 2 1 1 , 2 1 2 を通過後の光ビームの光軸は変化しない。光軸に垂直な面に対してこれらのガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の傾き角を変化させると、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の間を透過する光路が変化するので、2 枚のウェッジガラス板 1 2 4 , 1 2 5 と同様に分散の効果を得ることができる。すなわち、第 1 及び第 2 の平行に配置された平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 を用い、光周波数による屈折率の違いの効果により、光周波数 f_0 と $2f_0$ との光の間の相対的な光路長を変化させることができる。

20

30

【0093】

ここで、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の材料としては、BK7 のようなホウケイ酸ガラスを使用することができる。さらに、これらのガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の両面には、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ に対する無反射コーティングを施し、光周波数 f_0 及び光周波数 $2f_0$ において高い透過率を持たせることが好ましい。

【0094】

例えば、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 の材料として BK7 を用い、それらの厚さを 5 mm とする。光周波数 f_0 の波長が 1 5 3 5 nm で光周波数 $2f_0$ の波長が 7 6 7 nm の場合、平行平面ガラス板 2 1 1 , 2 1 2 を対称に 0 ° から 4 . 8 ° 回転させることで、光周波数 f_0 の光と光周波数 $2f_0$ の光の相対的な位相差を $\pi/2$ だけ変化させることができる。

40

【0095】

第 4 の相違点である赤色フィルタ 2 0 5 , 2 0 9 について説明する。

リング型干渉計 1 7 0 内の光軸上に抜き差しできるように 2 枚の赤色フィルタ 2 0 5 , 2 0 9 を配設しており、図示の場合には、赤色フィルタ 2 0 5 は鏡 1 2 1 とレンズ 2 0 6 との間の光軸上に配置され、赤色フィルタ 2 0 9 はレンズ 2 0 8 と鏡 1 2 3 との間の光軸上に配置されている。赤色フィルタ 2 0 5 , 2 0 9 は、光周波数 f_0 をほぼ 1 0 0 % 透過し、光周波数 $2f_0$ をほぼ 1 0 0 % 吸収する特性を有している。赤色フィルタ 2 0 5 , 2 0 9 を上記した配置、つまり、2 つのレンズに挟まれた光導波路 2 0 7 の前後に配置することで、光導波路 2 0 7 には光周波数 $2f_0$ の光が入射しなくなる。従って、光パラメ

50

リック増幅器 122 を構成する光導波路 207 には、励起光となる光周波数 $2f_0$ のパルス光は赤色フィルタ 205, 209 で除去されるので、光導波路 207 から光周波数 f_0 の水平偏光したスクイーズ光が発生しなくなる。このため、リング型干渉計 170 から第 1 及び第 2 の量子エンタングルビーム 130, 131 が発生しなくなる。

【0096】

赤色フィルタ 205, 209 を光軸に挿入した場合、ホモダイン検出器 180, 190 には、スクイーズ光 131, 132 が信号光として入射せず、光周波数 f_0 の局部発振光だけが入射する。これにより、ホモダイン検出器 180, 190 は、信号光が入射しない状態、つまりショット雑音レベルの検出器として動作する。

10

【0097】

第 2 実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 150 において、光源部 160 及びリング型干渉計 170 は、赤色フィルタ 205, 209 を光軸に挿入できる以外は、第 1 実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 50 と同様に、第 1 の量子エンタングルビーム 130 及び第 2 の量子エンタングルビーム 131 を発生する。

【0098】

第 1 の量子エンタングルビーム 130 から第 1 のホモダイン検出器 180 への伝播光路について説明する。

図示するように、水平直線偏光の第 1 の量子エンタングルビーム 130 は、 $1/2$ 波長板 132 と特殊ビームスプリッタ 213 と鏡 214 との順に通過し、第 1 のホモダイン検出器 180 に入射する。 $1/2$ 波長板 132 は、光周波数 f_0 に対するゼロオーダーの波長板であって、光周波数 f_0 で水平直線偏光の光を垂直偏光に変換する。特殊ビームスプリッタ 213 は垂直偏光の光を反射させ、この光周波数 f_0 の光が鏡 214 によって反射される。鏡 214 は、例えば誘電体からなる。

20

これにより、第 1 の量子エンタングルビーム 130 は、垂直偏光に変換された後に、第 1 のホモダイン検出器 180 に入射する。これは、第 1 実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 50 と同じである。

【0099】

第 2 の量子エンタングルビーム 131 から第 2 のホモダイン検出器 190 への伝播光路について説明する。

30

第 2 の量子エンタングルビーム 131 は、 2 波長用波長板 118 により垂直偏光の光に変換され、偏光ビームスプリッタ 117, 219 を通過し、鏡 220 で反射されて、第 2 のホモダイン検出器 190 に入射する。鏡 220 は、例えば誘電体からなり、光周波数 f_0 の光を反射する。

これにより、第 2 の量子エンタングルビーム 131 は、垂直偏光に変換された後に、第 2 のホモダイン検出器 190 に入射する。これは、第 1 実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置 50 と同じである。

【0100】

次に、局部発振光の伝播光路を説明する。

光源 160 からの光周波数 f_0 の垂直偏光は、特殊ビームスプリッタ 120 で反射され、リング型干渉計 170 を 1 周した後、再び特殊ビームスプリッタ 120 で反射される。反射された光周波数 f_0 の垂直偏光の光パルスは、 $1/2$ 波長板 132 で水平偏光に変換され、特殊ビームスプリッタ 213 により強度比がほぼ 50 対 50 の水平偏光の反射光及び水平偏光の透過光となる。特殊ビームスプリッタ 213 によって反射された光周波数 f_0 の水平偏光の光パルスは、鏡 214 により反射され、第 1 のホモダイン検出器 180 に入射し、局部発振光となる。

40

【0101】

一方、特殊ビームスプリッタ 213 を透過した水平偏光の光パルスは、分散媒質 218 と偏光ビームスプリッタ 219 を透過し、鏡 220 によって反射された後、第 2 のホモダイン検出器 190 に入射し、局部発振光として使用される。

50

【 0 1 0 2 】

第1実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置50のホモダイン検出器80及び90では、水平偏光した第1の量子エンタングルビーム130と垂直偏光した局部発振光間の位相差を第1の電気光学結晶136によって調整し、同様に、水平偏光した第2の量子エンタングルビーム131と垂直偏光した局部発振光間の位相差を第2の電気光学結晶137によって調整している。

【 0 1 0 3 】

第2実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置150のホモダイン検出器180及び190においては、第1実施形態に係る量子エンタングルメントの生成検出装置50のホモダイン検出器80及び90とは異なる構成を採用している。

第1のホモダイン検出器180は、バンドパスフィルタ221と赤色フィルタ223と、光軸上に抜き差しできる1/4波長板225と、1/2波長板138と、偏光ビームスプリッタ140と、偏光ビームスプリッタ140で反射された光を集光するレンズ226と集光された反射光を検出するフォトダイオード142と、偏光ビームスプリッタ140を透過した光を集光するレンズ227と集光された透過光を検出するフォトダイオード143と、2つのフォトダイオード142, 143で検出された光電流の差を出力するRFコンバイナー146とから構成されている。RFコンバイナー146からの出力は、ホモダイン検出器80と同様にさらに図示しない増幅器148で増幅されても良い。

【 0 1 0 4 】

第1のホモダイン検出器180においては、鏡214と1/2波長板138との光軸上にバンドパスフィルタ221と赤色フィルタ223と、光軸上に抜き差しできる1/4波長板225と、レンズ226, 227が配置されている以外の構成は、第1のホモダイン検出器80の構成と同じである。

【 0 1 0 5 】

バンドパスフィルタ221は、光周波数 f_0 での透過率が最も高い光透過特性を有している。このため、光周波数 f_0 の局部発振光と干渉しない光振動数の成分は、可能な限り除去される。

【 0 1 0 6 】

赤色フィルタ223は、リング型干渉計170で用いた赤色フィルタ205, 209と同様に光周波数 f_0 での透過率がほぼ100%で、光周波数 $2f_0$ での透過率がほぼ0%の光学特性を有している。このため、赤色フィルタ223によって、周波数 $2f_0$ の光パルスが、フォトダイオード142, 143へ入射しなくなる。

【 0 1 0 7 】

1/4波長板225は、光路に挿入した場合、光周波数 f_0 の光パルスの水平偏光成分と垂直偏光成分の位相差を $\pi/2$ ずらすことができる。1/4波長板225を配置して測定を行うことで、1/4波長板225がない場合と比べて、垂直偏光の第1の量子エンタングルビーム130と水平偏光の局部発振光との位相差を $\pi/2$ ずらすことができる。これにより、第1のホモダイン検出器80における電気光学結晶137と同様に、垂直偏光した第1の量子エンタングルビーム130と水平偏光した局部発振光間の位相差を調整することができる。

【 0 1 0 8 】

偏光ビームスプリッタ140とフォトダイオード142, 143との間に配置されるレンズ226, 227は集光のために設けているが、例えば凸レンズを用い得る。

【 0 1 0 9 】

第1のホモダイン検出器180においては、1/2波長板138よりも右側に配置される偏光ビームスプリッタ140とフォトダイオード142, 143とRFコンバイナー146の機能は、第1のホモダイン検出器80と同じであるので説明は省略する。

【 0 1 1 0 】

第1のホモダイン検出器180によれば、バンドパスフィルタ221、赤色フィルタ223、集光用のレンズ226, 227を備えているので、第1のホモダイン検出器80よ

10

20

30

40

50

りも感度を増大させることができる。

【0111】

次に、第2のホモダイン検出器190について説明する。

第2のホモダイン検出器190は、バンドパスフィルタ222と、赤色フィルタ224と、1/2波長板139と、偏光ビームスプリッタ141と、偏光ビームスプリッタ141で反射された光を集光するレンズ228と集光された反射光を検出するフォトダイオード144と、偏光ビームスプリッタ141を透過した光を集光するレンズ229と集光された透過光を検出するフォトダイオード145と、2つのフォトダイオード144, 145で検出された光電流の差を出力するRFコンパイナ147とから構成されている。RFコンパイナ147からの出力は、ホモダイン検出器90と同様にさらに図示しない増幅器149で増幅されても良い。

10

【0112】

第2のホモダイン検出器190が第1のホモダイン検出器180と異なるのは、光軸上に抜き差しできる1/4波長板225を備えていない点にある。つまり、第1のホモダイン検出器180の1/4波長板225の代わりに分散媒質218を用いている。分散媒質218は、上記したように、特殊ビームスプリッタ213を透過した水平偏光の光パルスを反射させる鏡215と偏光ビームスプリッタ219との間の光軸上に配置されている。

【0113】

分散媒質218は、2枚のガラス板216, 217から構成されている。2枚のガラス板216, 217は、波長に対して微小な光路長差を与えることができる光学部品のウェッジガラス板を使用することができる。上記したように、ウェッジガラス板216, 217は、ガラス板216又はガラス板217を光軸に対して垂直方向に移動することができる。ガラス板216又はガラス板217を光軸に対して垂直方向に移動することにより、第2のホモダイン検出器190において、第2の量子エンタングルビーム131と局部発振光との位相差を変化させることができる。

20

【0114】

第2のホモダイン検出器190によれば、第1のホモダイン検出器180と同様にバンドパスフィルタ222、赤色フィルタ224、集光用のレンズ228, 229を備えているので、第2のホモダイン検出器90よりも感度を増大させることができる。

【0115】

(エンタングルメントの判定基準)

次に、第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131のエンタングルメントの判定基準について説明する。

第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131の直交位相振幅を、それぞれ $X_a(\phi_a)$, $X_b(\phi_b)$ とする。

ここで ϕ_a , ϕ_b は、それぞれ、第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131と対応する局部発振光の位相差を表す。

また、2つの真空状態の直交位相振幅をそれぞれ $X_{a,vac}$, $X_{b,vac}$ とする。

【0116】

生成された状態がエンタングルしているための十分条件は、下記(1)式の不等式で表される(非特許文献4参照)。

40

【数1】

$$\begin{aligned} & \langle \Delta^2(X_a(\phi_{a1}) + X_b(\phi_{b1})) \rangle + \langle \Delta^2(X_a(\phi_{a2}) - X_b(\phi_{b2})) \rangle \\ & < \langle \Delta^2(X_{a,vac} + X_{b,vac}) \rangle + \langle \Delta^2(X_{a,vac} - X_{b,vac}) \rangle = 2\langle \Delta^2 X_{a,vac} \rangle + 2\langle \Delta^2 X_{b,vac} \rangle = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_{a1} , ϕ_{a2} , ϕ_{b1} , ϕ_{b2} は、 $\phi_{a2} - \phi_{a1} = \pi/2$, $\phi_{b2} - \phi_{b1} = \pi/2$ の関係を満たす必要がある。

生成された第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131の状態が上記(1)式の不等式を満足していれば、実際にエンタングルしていることになる。

50

【0117】

ホモダイン検出器180において、第1の量子エンタングルビーム130と局部発信光は、同軸であることから、 θ_a はある特定の値に固定されている。ここで、1/4波長板225がない場合の位相差を $\theta_a = \theta_{a1}$ と定義すると、1/4波長板225を挿入したときの位相差は $\theta_a = \theta_{a2} = \theta_{a1} + \pi/2$ となる。分散媒質218により、 θ_b は任意の値に変えることができる。

【0118】

測定手順としては、1/4波長板225が光路上にない状態で、 θ_b を不連続的に走査させながら、ホモダイン検出器180で $X_a(\theta_{a1})$ とホモダイン検出器190で $X_b(\theta_b)$ を同時に測定する。

次に、1/4波長板225を配置し、 θ_b を不連続的に走査させながら、 $X_a(\theta_{a2})$ 及び $X_b(\theta_b)$ を同時に測定する。次に、赤色フィルタ205, 209をリング型干渉計170中に配置し、ホモダイン検出器180, 190に局部発信光のみを入射し $X_{a,vac}, X_{b,vac}$ を測定する。

上記の得た $X_a(\theta_{a1}), X_b(\theta_b), X_a(\theta_{a2}), X_b(\theta_b), X_{a,vac}$ 及び $X_{b,vac}$ から、上記(1)式中の下記(2)式の値を得ることができる。

【数2】

$$\langle \Delta^2(X_{a,vac} + X_{b,vac}) \rangle + \langle \Delta^2(X_{a,vac} - X_{b,vac}) \rangle = 2\langle \Delta^2 X_{a,vac} \rangle + 2\langle \Delta^2 X_{b,vac} \rangle \quad (2)$$

【0119】

(量子エンタングルメント生成検出装置の第2実施形態の測定例)

量子エンタングルメント生成検出装置150の構成の主要部を説明する。

パルスレーザー光源100として、波長1535nm, パルス幅3.7ns, 繰り返し周波数2.7kHzの受動Qスイッチエルビウム(Er)添加ガラスレーザー(cobolt社製、tangoレーザー)を使用した。第2高調波発生器105として、周期分極反転型のMgOが添加されたLiNbO₃からなる光導波路201を用いた。同様に、リング型干渉計170内の光パラメトリック増幅器122として、周期分極反転型のMgOが添加されたLiNbO₃からなる光導波路207を用いた。従って、光周波数 f_0 は、波長1535nmであり、光周波数 $2f_0$ は波長が約767nmである。

【0120】

量子エンタングルメント生成検出装置150によって、第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131を発生させ、第1及び第2のホモダイン検出器180, 190によって第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131の直交位相振幅を測定した。上記のエンタングルメントの判定基準で説明した手順によって第1及び第2の量子エンタングルビーム130, 131の直交位相振幅である $X_a(\theta_a), X_b(\theta_b), X_{a,vac}, X_{b,vac}$ 、2つの真空状態の直交位相振幅である $X_{a,vac}, X_{b,vac}$ 等の測定を行った。

【0121】

次に、上記測定で得た結果について説明する。

図6は、 $\langle \Delta^2(X_a(\theta_{a1}) + X_b(\theta_b)) \rangle$ の値が最小になった位相(その位相を $\theta_b = \theta_{b1}$ とする。)における $X_a(\theta_{a1})$ と $X_b(\theta_{b1})$ の散布図である。

図6から明らかのように、 $X_a(\theta_{a1})$ と $X_b(\theta_{b1})$ とは、和の相関を有していることが分かり、 $\langle \Delta^2(X_a(\theta_{a1}) + X_b(\theta_b)) \rangle = 0.31$ という値を得た。この値は、対応する真空雑音に対して-2.0dBである。

【0122】

図7は、 $\theta_b = \theta_{b2} = \theta_{b1} + \pi/2$ を満たす位相(その位相を $\theta_b = \theta_{b1}$ とする。)における $X_a(\theta_{a2})$ と $X_b(\theta_{b2})$ の散布図である。

図7から明らかのように、 $X_a(\theta_{a2})$ と $X_b(\theta_{b2})$ とは、差の相関を有していることが分かり、 $\langle \Delta^2(X_a(\theta_{a2}) - X_b(\theta_{b2})) \rangle = 0.33$ という値を得

10

20

30

40

50

た。この値は、対応する真空雑音に対して - 1 . 9 d B である。

【 0 1 2 3 】

図 8 は、測定した $X_a(\phi_{a1})$, $X_b(\phi_b)$ から計算した第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 と第 2 の量子エンタングルビーム 1 3 1 の和と差の分散の ϕ_b への依存性を示す図である。図 8 の横軸は ϕ_b (ラジアン) であり、縦軸は対応する真空雑音と比較した場合の分散の大きさ (d B) である。図において、丸印 (●) 及びバツ印 (×) は、それぞれ、 $\Delta^2(X_a(\phi_{a1}) + X_b(\phi_b))$ 、 $\Delta^2(X_a(\phi_{a2}) - X_b(\phi_b))$ に対応している。すなわち、丸印のデータは、1 / 4 波長板 2 2 5 が光路上にない状態で、 ϕ_b を不連続的に走査させながら、ホモダイン検出器 1 8 0 で $X_a(\phi_{a1})$ を、ホモダイン検出器 1 9 0 で $X_b(\phi_b)$ を同時に測定し、測定された $X_a(\phi_{a1})$, $X_b(\phi_b)$ から計算された和の分散である。また、バツ印のデータは、1 / 4 波長板 2 2 5 を配置し、 ϕ_b を不連続的に走査させながら、 $X_a(\phi_{a2})$ 及び $X_b(\phi_b)$ を同時に測定し、測定した $X_a(\phi_{a2})$, $X_b(\phi_b)$ から計算した差の分散である。

10

図 8 から明らかなように、 $\Delta^2(X_a(\phi_{a1}) + X_b(\phi_b))$ は、 ϕ_b が ラジアン及び 3 ラジアン のときに最小となり、 ϕ_b が 2 ラジアン のときに最大となることが分かる。また、 $\Delta^2(X_a(\phi_{a2}) - X_b(\phi_b))$ は、 ϕ_b が おおよそ 1 . 6 ラジアン のときに最小となり、 ϕ_b が おおよそ 2 . 7 ラジアン のときに最大となることが分かる。

20

【 0 1 2 4 】

得られた $\Delta^2(X_a(\phi_{a1}) + X_b(\phi_b))$ 及び $\Delta^2(X_a(\phi_{a2}) - X_b(\phi_b))$ の値から、上記 (1) 式を計算すると、下記 (3) 式に示す不等式が得られる。

【 数 3 】

$$\langle \Delta^2(X_a(\phi_{a1}) + X_b(\phi_{b1})) \rangle + \langle \Delta^2(X_a(\phi_{a2}) - X_b(\phi_{b2})) \rangle = 0.64 < 1 \quad (3)$$

つまり、上記 (3) 式の左辺の値が 0 . 6 4 であり、1 よりも小さいので、明白にエンタングルメントに対する十分条件を満たす。つまり、第 1 の量子エンタングルビーム 1 3 0 と第 2 の量子エンタングルビーム 1 3 1 は、エンタングルしていることが判明した。

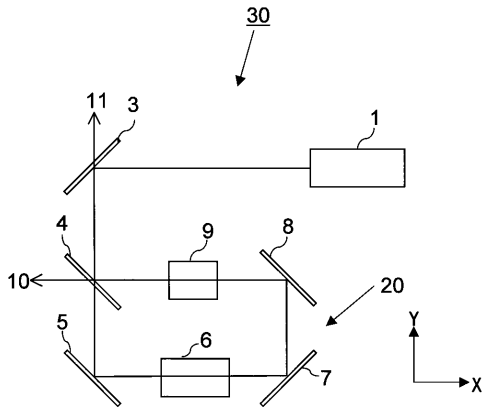
30

【 産業上の利用可能性 】

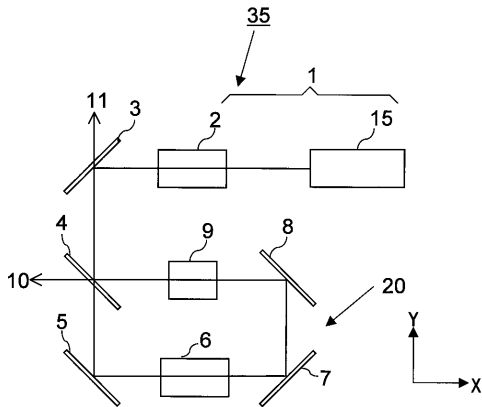
【 0 1 2 5 】

本発明の量子エンタングルメント生成装置と量子エンタングルメントの生成検出装置により発生した量子エンタングルメントを利用することにより、絶対に安全な通信や、従来よりも桁違いに高速な計算処理を実現することができる。

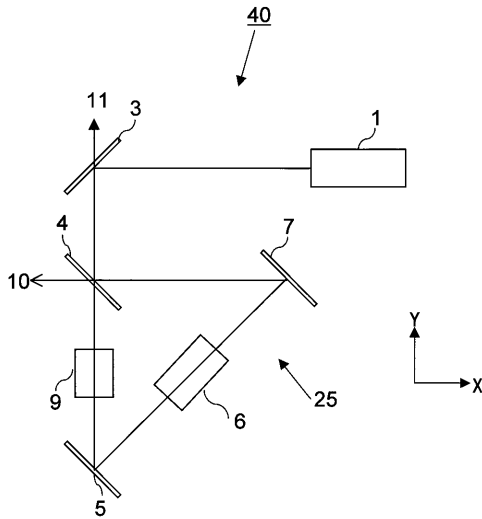
【図1】



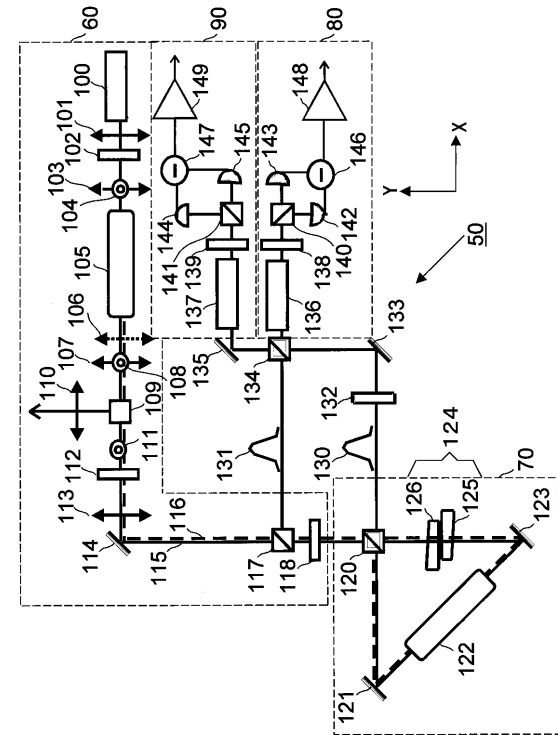
【図2】



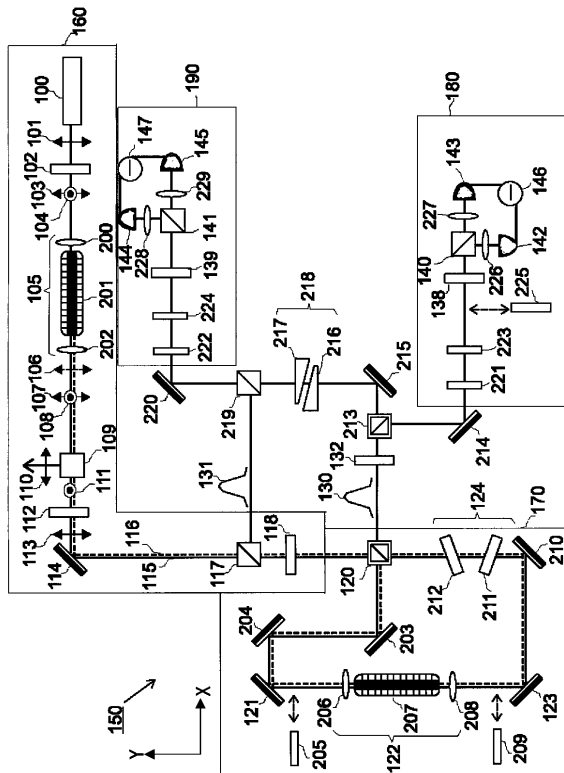
【図3】



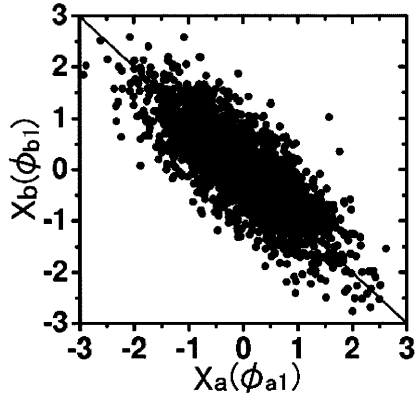
【図4】



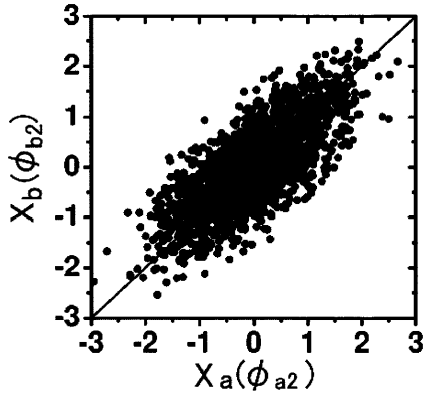
【図5】



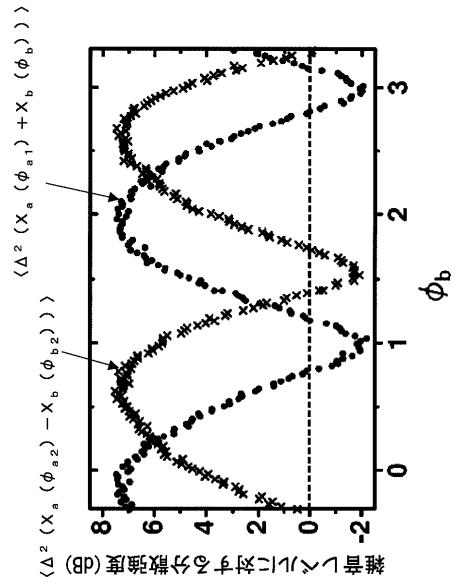
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平4 - 172329 (JP, A)

T.C.Zhang, et al., "Quantum teleportation of light beams", Physical Review A, 2003年 3月, Vol. 67, No. 3, p.033802-1 - 033802-16

Y. Eto, et al., "Observation of squeezed light at 1.535 um using a pulsed homodyne detector", Optics Letters, 2007年 6月15日, Vol. 32, No. 12, p.1698-1700

Y.Zhang, et al., "Experimental generation of broadband quadrature entanglement using laser pulses", Physical Review A, 2007年 7月, Vol. 76, No. 1-A, p.012314-1 - 012314-9

松岡正浩, "裳華房テキストシリーズ - 物理学 量子光学", 株式会社裳華房, 2006年 6月20日, 第6版, p.166-169

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00-7/00

G06E 1/00

H04L 9/12

JSTPlus/JST7580(JDreamII)

IEEE Xplore