

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-91685

(P2010-91685A)

(43) 公開日 平成22年4月22日(2010.4.22)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02F 2/00 (2006.01)	G02F 2/00	2K002
G02F 1/37 (2006.01)	G02F 1/37	5K102
H04B 10/04 (2006.01)	H04B 9/00 L	
H04B 10/06 (2006.01)		
H04B 10/142 (2006.01)		

審査請求 有 請求項の数 10 O L (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2008-260012 (P2008-260012)
 (22) 出願日 平成20年10月6日 (2008.10.6)

(出願人による申告) 平成20年度、独立行政法人 科学技術振興機構、「通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム」の中の「時間位置もつれ光子対を用いた量子通信実験」委託事業、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 000004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
 (74) 代理人 100077481
 弁理士 谷 義一
 (74) 代理人 100088915
 弁理士 阿部 和夫
 (72) 発明者 武居 弘樹
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
 Fターム(参考) 2K002 AA02 AB12 AB40 BA01 BA04
 DA01 EA30 GA10 HA14 HA22
 5K102 AA61 AB11

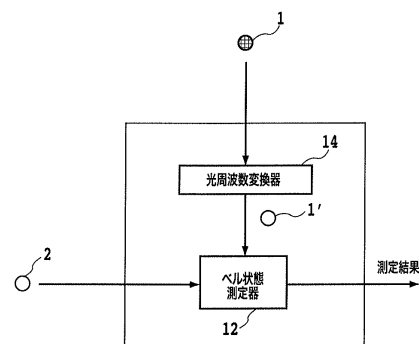
(54) 【発明の名称】 量子干渉装置および量子通信システム

(57) 【要約】

【課題】光周波数の異なる2光子間の量子干渉測定を可能にする。

【解決手段】本発明の一実施形態による量子干渉装置は、光周波数の異なる2光子(1, 2)のベル状態測定を行う。この量子干渉装置では、光周波数の異なる2光子の一方の光周波数を他方の光周波数に変換し、光周波数が一致した2光子(1', 2)のベル状態測定を行う。これにより、光周波数の異なる2光子間の量子干渉測定が可能になる。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光周波数の異なる 2 光子のベル状態測定を行うための量子干渉装置であって、
前記 2 光子の一方の光周波数を他方の光周波数に変換する光周波数変換手段と、
前記光周波数変換手段により光周波数が一致した 2 光子のベル状態測定を行うベル状態
測定手段と
を備えたこと特徴とする量子干渉装置。

【請求項 2】

光周波数の異なる 2 光子のベル状態測定を行うための量子干渉装置であって、
前記 2 光子の一方の光周波数をある特定の光周波数に変換する第 1 の光周波数変換手段
と、
前記 2 光子の他方の光周波数を前記特定の光周波数に変換する第 2 の光周波数変換手段
と、
前記第 1 および第 2 の光周波数変換手段により光周波数が一致した 2 光子のベル状態測
定を行うベル状態測定手段と
を備えたこと特徴とする量子干渉装置。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の量子干渉装置であって、前記ベル状態測定手段は、
ベル状態測定を行う 2 光子を入力して干渉させる 2 入力 2 出力のビームスプリッタと、
前記ビームスプリッタの各々の出力に接続された光子検出手段と
を備えたことを特徴とする量子干渉装置。

【請求項 4】

請求項 1 または 2 に記載の量子干渉装置であって、前記ベル状態測定手段は、
ベル状態測定を行う 2 光子を入力して干渉させる 2 入力 2 出力のビームスプリッタと、
前記ビームスプリッタの各出力に接続された偏波ビームスプリッタと、
前記偏波ビームスプリッタの各出力に接続された光子検出手段と
を備えたことを特徴とする量子干渉装置。

【請求項 5】

請求項 1 から 4 のいずれかに記載の量子干渉装置であって、前記周波数変換手段は、2
次の非線形光学媒質を備え、光周波数 f_s の光子および光周波数 f_p のポンプ光を入力し
て、 $f_c = f_s + f_p$ を満たす光周波数 f_c の光子を出力することを特徴とする量子干渉
装置。

【請求項 6】

請求項 1 から 4 のいずれかに記載の量子干渉装置であって、前記周波数変換手段は、3
次の非線形光学媒質を備え、光周波数 f_s の光子、光周波数 f_{p1} の第 1 のポンプ光およ
び光周波数 f_{p2} の第 2 のポンプ光を入力して、 $f_s + f_{p1} = f_c + f_{p2}$ を満たす光
周波数 f_c の光子を出力することを特徴とする量子干渉装置。

【請求項 7】

第 1 のノードから第 2 のノードへ中継ノードを介して光子の量子状態を転送するための
量子通信システムであって、
単一光子を発生する第 1 のノードと、
請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードで
あって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノ
ードと、
量子もつれ状態にある光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと
単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 2 のノードと
を備え、

前記第 1 のノードは、前記第 1 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードに前記単一光
子を送信するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 1 のノードおよ
び前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つのノードからそれぞれ単一の光子を受信し、

該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記第 2 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする量子通信システム。

【請求項 8】

第 1 のノードと第 2 のノード間に中継ノードを介して量子もつれ状態を共有するための量子通信システムであって、

単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 1 のノードと、

請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、

10

量子もつれ状態にある光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 2 のノードと

を備え、

前記第 1 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つの中継ノードからそれぞれ単一の光子を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記第 2 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする量子通信システム。

20

【請求項 9】

第 1 のノードから複数の第 2 のノードへ中継ノードを介して光子の量子状態を転送するための量子通信システムであって、

単一光子を発生する第 1 のノードと、

請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、

30

量子もつれ状態にある多チャネルの光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと、

単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第 2 のノードとを備え、

前記第 1 のノードは、前記第 1 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードに前記単一光子を送信するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 1 のノードおよび前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つのノードからそれぞれ単一の光子を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記複数の第 2 のノードの各々は、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第 1 のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする量子通信システム。

40

【請求項 10】

複数の第 1 のノードと複数の第 2 のノード間に中継ノードを介して量子もつれ状態を共有するための量子通信システムであって、

単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第 1 のノードと、

請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、

50

量子もつれ状態にある多チャネルの光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと、

単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第 2 のノードとを備え、

前記複数の第 1 のノードの各々は、前記第 2 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第 1 のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つの中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記複数の第 2 のノードの各々は、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第 1 のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする量子通信システム。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光周波数の異なる 2 光子を、2 光子の基底状態であるベル状態に対して射影測定するための量子干渉装置に関する。また、このような量子干渉装置を用いて量子状態の転送を行うためのシステム、および量子もつれ状態を遠隔の 2 者で共有するためのシステムに関する。

20

【背景技術】

【0002】

光子の量子状態を遠方に転送する技術として、量子テレポーテーションという手法が知られている（非特許文献 1）。図 1 に、量子テレポーテーションを説明するための系を示す。この系において、ユーザ A のノード 100 にある単一光子光源 102 からの光子 1 の偏波に関する量子状態 $\alpha |1, 0\rangle_1 + \beta |0, 1\rangle_1$ をユーザ B のノード 200 に転送したいとする。ここで、 $|a, b\rangle_1$ は水平偏波モードに光子が a 個、垂直偏波モードに光子が b 個存在する状態を表す量子状態ベクトルであり、 α, β は $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数である。添え字 1 は光子 1 であることを示している。図に示すように、中継ノード 10, 20 を配置して量子状態をユーザ B に転送する。

30

【0003】

中継ノード 20 には偏波に関する量子もつれ光子対を発生する量子もつれ光源 22 を配置する。この光源 22 により、例えば 2 光子の量子状態が次式で表される光子 2, 3 を発生する。

【0004】

【数 1】

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1,0\rangle_2 |1,0\rangle_3 + |0,1\rangle_2 |0,1\rangle_3) \quad (1)$$

40

【0005】

これは、偏波に関する量子もつれ状態の一つである。この光子 2 を中継ノード 10 に、光子 3 をユーザ B にそれぞれ送付する。一方、ユーザ A が用意した光子 1 もまた中継ノード 10 に送付する。

【0006】

光子 1, 2, 3 をまとめた全系の量子状態は次式で表される。

【0007】

【数 2】

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|1,0\rangle_1 + \beta|0,1\rangle_1) \otimes (|1,0\rangle_2|1,0\rangle_3 + |0,1\rangle_2|0,1\rangle_3) \quad (2)$$

【0008】

ここで、式(2)は次のように変形することができる。

【0009】

【数 3】

$$|\phi\rangle = \frac{1}{2}\{|\Phi^+\rangle_{12}(\alpha|1,0\rangle_3 + \beta|0,1\rangle_3) + |\Phi^-\rangle_{12}(\alpha|1,0\rangle_3 - \beta|0,1\rangle_3) \\ + |\Psi^+\rangle_{12}(\alpha|0,1\rangle_3 + \beta|1,0\rangle_3) + |\Psi^-\rangle_{12}(\alpha|0,1\rangle_3 - \beta|1,0\rangle_3)\} \quad (3)$$

10

【0010】

ここで、 $|\Phi^+\rangle_{12}$ 、 $|\Phi^-\rangle_{12}$ 、 $|\Psi^+\rangle_{12}$ 、 $|\Psi^-\rangle_{12}$ は光子1、2の偏波状態に対する固有状態(ベル状態)であり、次式で表される。

【0011】

【数 4】

$$|\Phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1,0\rangle_1|1,0\rangle_2 \pm |0,1\rangle_1|0,1\rangle_2) \quad (4)$$

20

【0012】

【数 5】

$$|\Psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1,0\rangle_1|0,1\rangle_2 \pm |0,1\rangle_1|1,0\rangle_2) \quad (5)$$

【0013】

式(3)は、光子1、2が4つのベル状態のいずれかに射影測定されれば、光子3の状態が光子1の初期状態をユニタリ変換したものに定まることを示唆している。そこで、光子1、2を中継ノード10においてベル状態測定器(BSM)12でベル状態への射影測定を行い、その結果をユーザBに通常の通信回線30を通じて送付する。ユーザBにおいては、ユニタリ変換器(UT)202でベル状態測定の結果に応じて、光子3の状態を適切にユニタリ変換する。これにより、光子1の初期状態を光子3の転送することができる。

30

【0014】

ベル状態測定の手法として最もよく用いられるのは、図2に示すように2入力2出力のビームスプリッタ(BS)120と光子検出器122、124を用いる手法である。この手法は、非特許文献2において報告された、Hong-On-Mandel(HOM)効果に基づく。HOM効果とは、識別不可能な光子がBSの2入力ポートに一個ずつ入力されると、2光子はBSの同じ出力ポートから出力されるというものである。ここで2光子が識別不可能であるとは、光子の偏波モード、時間モード、周波数モードなど、すべての物理パラメータが2光子で同一になっている状況を表す。

40

【0015】

BSに入力される2光子は、偏波状態以外の物理パラメータは識別不可能となっているとする。BS120の2入力ポートに相当するモードをm、n、2出力ポートをx、yとラベル付けすると、BSに光子を入力することにより次のようなユニタリ変換を行うことができる。

【0016】

【数 6】

$$|k_h, k_v\rangle_m = \frac{1}{\sqrt{2}}(|k_h, k_v\rangle_x + |k_h, k_v\rangle_y) \quad (6)$$

【0 0 1 7】

【数 7】

$$|k_h, k_v\rangle_n = \frac{1}{\sqrt{2}}(|k_h, k_v\rangle_x - |k_h, k_v\rangle_y) \quad (7)$$

【0 0 1 8】

10

ここで k_h , k_v はそれぞれ H 偏波モードおよび V 偏波モードに存在する光子数である。

【0 0 1 9】

BS の 2 入力ポートより、量子状態が $|\Phi^\pm\rangle_{12}$ で表される 2 光子が、光子 1 が上記入力ポート m から、光子 2 が入力ポート n から入力されたとする。このとき、式 (6), (7) で表されるユニタリ変換により、BS 出力における 2 光子の量子状態は次のように変換される。

【0 0 2 0】

【数 8】

$$|\Phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{2\sqrt{2}}\{|2,0\rangle_x|0,0\rangle_y - |0,0\rangle_x|2,0\rangle_y \pm (|0,2\rangle_x|0,0\rangle_y - |0,0\rangle_x|0,2\rangle_y)\} \quad (8)$$

20

【0 0 2 1】

このように、BS の出力ポートにおいては、2 光子は常に同一のポートかつ同一の偏波モードに観測される。これは、状態 $|\Psi^\pm\rangle_{12}$ が入力しているとき、BS に入力されている 2 光子は同一の偏波状態を持つため、すべての物理パラメータに関して識別不可能の状態になり、前述の HOM 効果による同一の出力ポートから 2 光子が出力されると考えることができる。

【0 0 2 2】

次に、量子状態が $|\Psi^\pm\rangle_{12}$ で表される 2 光子が上記と同様に入力された場合は、BS 出力における量子状態は以下ようになる。

30

【0 0 2 3】

【数 9】

$$|\Psi^+\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1,1\rangle_x|0,0\rangle_y - |0,0\rangle_x|1,1\rangle_y) \quad (9)$$

【0 0 2 4】

最後に、量子状態が $|\Psi^-\rangle_{12}$ で表される 2 光子が入力された場合は、BS 出力における量子状態は以下ようになる。

【0 0 2 5】

【数 10】

40

$$|\Psi^-\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0,1\rangle_x|1,0\rangle_y - |1,0\rangle_x|0,1\rangle_y) \quad (10)$$

【0 0 2 6】

式 (8), (9), (10) から、BS の 2 出力ポートから光子が一個ずつ出力されるのは、入力された 2 光子の量子状態が $|\Psi^\pm\rangle_{12}$ であるときのみであることがわかる。よって、BS の出力に配置された 2 つの光子検出器 1 2 2, 1 2 4 が同時に光子を検出したとき、入力された 2 光子の量子状態は $|\Psi^\pm\rangle_{12}$ に射影されたことになる。

【0 0 2 7】

また、式 (9) の状態は、同一ポートから異なる偏波モードの光子が出力される状況に

50

相当する。よって、図 3 に示すように、B S 出力ポートにさらに偏波ビームスプリッタ (P B S) 1 2 6 , 1 2 8 を配置し、その出力ポートにそれぞれ光子検出器 1 2 2 - 1 , 1 2 2 - 2 , 1 2 4 - 1 , 1 2 4 - 2 を配置する。出力ポート x における H 偏波モードの光子検出器 1 2 2 - 1 と V 偏波モードの光子検出器 1 2 2 - 2、または出力ポート y における H 偏波モードの光子検出器 1 2 4 - 1 と V 偏波モードの光子検出器 1 2 4 - 2 の同時計数を観測すれば、入力された 2 光子は $|\Psi^+>_{12}$ に射影される。また、P B S の出力にかかわらず、出力ポート x 側の光子検出器 1 2 2 - 1 , 1 2 2 - 2 と出力ポート y 側の光子検出器 1 2 4 - 1 , 1 2 4 - 2 の同時計数を観測すれば、入力 2 光子は $|\Psi^->_{12}$ に射影されたことになる。

【 0 0 2 8 】

一方、式 (8) の状態は、現在の技術では $|\Phi^+>_{12}$ と $|\Phi^->_{12}$ のいずれかであることを区別することは困難である。

【 0 0 2 9 】

以上より、図 2 に示す系より、4 つのレベル基底状態から $|\Psi^->_{12}$ を選択して射影するベル状態測定が、図 3 に示す系により $|\Psi^+>_{12}$ と $|\Psi^->_{12}$ を区別して射影することのできるベル状態測定がそれぞれ実現可能である。非特許文献 1 においては、前者のベル状態測定を用いて量子テレポーテーション実験に成功している。

【 0 0 3 0 】

上に述べた量子もつれ光子対は、主に 2 次または 3 次の非線形光学効果を用いて発生されている。最近では、例えば非特許文献 3 など、光ファイバでの伝送に適した 1 . 5 μ m 帯の量子もつれ光子対の発生が盛んに行われている。1 . 5 μ m 帯の量子もつれ光子対を用いると、数 1 0 k m を超える距離にわたり量子もつれ状態を分配することが可能である (非特許文献 4)。このようにして長距離伝送した量子もつれ光子対を用いて、光ファイバ網上で長距離の量子テレポーテーションを行うことが可能である。

【 0 0 3 1 】

また、転送するための単一光子状態を発生する技術として、単一の量子系からの発光を用いる手法がある。量子系としては、半導体量子ドットや原子などを用いる。例えば、非特許文献 5 に報告されている半導体量子ドットを用いた手法においては、既に同一のドットから出力された 2 光子を用いて前述の H O M 効果を観測している。これはすなわち、同一のドットから出力される光子は、その光周波数および時間波形が同一であり、識別不可能になっていることを表している。この単一光子光源は、量子テレポーテーションを含む、量子情報処理のための単一光子を供給するものとして期待されている。

【 0 0 3 2 】

量子テレポーテーションは、量子状態を観測することなく遠方に転送できることから、例えば量子暗号の中継器として応用することが可能である。

【 0 0 3 3 】

【非特許文献 1】D.Bouwmeester et al., Nature 390, 575 (1997).

【非特許文献 2】C.K.Hong et al., Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987).

【非特許文献 3】H.Takesue and K.Inoue, Phys. Rev. A 70, 031802 (2004).

【非特許文献 4】H.Takesue, Opt. Express 14, 3453 (2006).

【非特許文献 5】C.Santori et al., Nature 419, 594 (2002).

【非特許文献 6】K.Inoue and K.Shimizu, Jpn. J.Appl. Phys. Part 1, 43, 8048 (2004).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 3 4 】

先に述べたように、1 . 5 μ m 帯の量子もつれ光子対を用いることにより、長距離の光ファイバ上で量子もつれを分配することが可能となっている。また、単一の量子系を用いて単一光子状態を生成することが可能となっている。しかし、現在の技術では、このような単一光子状態の発生はほとんどの場合 5 0 0 n m から 8 0 0 n m 近辺の波長帯において

行われている。このため、従来の技術を用いて発生した単一光子は、光周波数の違いによる識別可能性のため、長距離ファイバ伝送に適した $1.5 \mu\text{m}$ 量子もつれ光子対を用いて量子テレポーテーションすることができなかった。よって、従来技術を用いて発生した単一光子源のほとんどは、長距離の光ファイバ網上を量子テレポーテーションすることは困難であった。

【0035】

また、第2の課題として以下が挙げられる。現在、非特許文献6の例に見られるように、複数の光周波数の量子もつれ光子対を一括発生する技術が開発されている。しかし、前述のように、ベル状態測定における2光子は識別不可能であることが要請されるため、転送したい光子の光周波数が定まっている場合、量子もつれ光子対源から複数の光周波数の量子もつれ光子対が発生している場合にも、テレポーテーションに使用できる光子対は一組に限られていた。これにより、複数の光周波数の量子もつれ光子対を一括発生する光源の量子テレポーテーションへの応用が制限されていた。

10

【課題を解決するための手段】

【0036】

本発明は、このような課題を解決するために、請求項1に記載の発明は、光周波数の異なる2光子のベル状態測定を行うための量子干渉装置であって、前記2光子の一方の光周波数を他方の光周波数に変換する光周波数変換手段と、前記光周波数変換手段により光周波数が一致した2光子のベル状態測定を行うベル状態測定手段とを備えたこと特徴とする。

20

【0037】

また、請求項2に記載の発明は、光周波数の異なる2光子のベル状態測定を行うための量子干渉装置であって、前記2光子の一方の光周波数をある特定の光周波数に変換する第1の光周波数変換手段と、前記2光子の他方の光周波数を前記特定の光周波数に変換する第2の光周波数変換手段と、前記第1および第2の光周波数変換手段により光周波数が一致した2光子のベル状態測定を行うベル状態測定手段とを備えたこと特徴とする。

【0038】

また、請求項3に記載の発明は、請求項1または2に記載の量子干渉装置であって、前記ベル状態測定手段は、ベル状態測定を行う2光子を入力して干渉させる2入力2出力のビームスプリッタと、前記ビームスプリッタの各々の出力に接続された光子検出手段とを備えたことを特徴とする。

30

【0039】

また、請求項4に記載の発明は、請求項1または2に記載の量子干渉装置であって、前記ベル状態測定手段は、ベル状態測定を行う2光子を入力して干渉させる2入力2出力のビームスプリッタと、前記ビームスプリッタの各出力に接続された偏波ビームスプリッタと、前記偏波ビームスプリッタの各出力に接続された光子検出手段とを備えたことを特徴とする。

【0040】

また、請求項5に記載の発明は、請求項1から4のいずれかに記載の量子干渉装置であって、前記周波数変換手段は、2次の非線形光学媒質を備え、光周波数 f_s の光子および光周波数 f_p のポンプ光を入力して、 $f_c = f_s + f_p$ を満たす光周波数 f_c の光子を出力することを特徴とする。

40

【0041】

また、請求項6に記載の発明は、請求項1から4のいずれかに記載の量子干渉装置であって、前記周波数変換手段は、3次の非線形光学媒質を備え、光周波数 f_s の光子、光周波数 f_{p1} の第1のポンプ光および光周波数 f_{p2} の第2のポンプ光を入力して、 $f_s + f_{p1} = f_c + f_{p2}$ を満たす光周波数 f_c の光子を出力することを特徴とする。

【0042】

また、請求項7に記載の発明は、第1のノードから第2のノードへ中継ノードを介して光子の量子状態を転送するための量子通信システムであって、単一光子を発生する第1の

50

ノードと、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、量子もつれ状態にある光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 2 のノードとを備え、前記第 1 のノードは、前記第 1 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードに前記単一光子を送信するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 1 のノードおよび前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つのノードからそれぞれ単一の光子を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記第 2 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする。

10

【0043】

また、請求項 8 に記載の発明は、第 1 のノードと第 2 のノードの間に中継ノードを介して量子もつれ状態を共有するための量子通信システムであって、単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 1 のノードと、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、量子もつれ状態にある光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する第 2 のノードとを備え、前記第 1 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つの中継ノードからそれぞれ単一の光子を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記第 2 のノードは、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記光子対の一方を受信し、各第 1 のタイプの中継ノードからベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする。

20

【0044】

また、請求項 9 に記載の発明は、第 1 のノードから複数の第 2 のノードへ中継ノードを介して光子の量子状態を転送するための量子通信システムであって、単一光子を発生する第 1 のノードと、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を受信して、ベル状態測定を行う 1 つまたは複数の第 1 のタイプの中継ノードと、量子もつれ状態にある多チャネルの光子対を発生する 1 つまたは複数の第 2 のタイプの中継ノードと、単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第 2 のノードとを備え、前記第 1 のノードは、前記第 1 のタイプの中継ノードの最初の中継ノードに前記単一光子を送信するように構成され、前記第 1 のタイプの中継ノードは、前記第 1 のノードおよび前記第 2 のタイプの中継ノードのうち 2 つのノードからそれぞれ単一の光子を受信し、該受信した 2 光子のベル状態測定を行うように構成され、前記複数の第 2 のノードの各々は、前記第 2 のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第 1 のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする。

30

40

【0045】

また、請求項 10 に記載の発明は、複数の第 1 のノードと複数の第 2 のノード間に中継ノードを介して量子もつれ状態を共有するための量子通信システムであって、単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第 1 のノードと、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子干渉装置を備えた第 1 のタイプの中継ノードであって、2 光子を

50

受信して、ベル状態測定を行う1つまたは複数の第1のタイプの中継ノードと、量子もつれ状態にある多チャネルの光子対を発生する1つまたは複数の第2のタイプの中継ノードと、単一光子を受信し、ユニタリ変換して光子の状態を測定する複数の第2のノードとを備え、前記複数の第1のノードの各々は、前記第2のタイプの中継ノードの最初の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第1のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成され、前記第1のタイプの中継ノードは、前記第2のタイプの中継ノードのうち2つの中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、該受信した2光子のベル状態測定を行うように構成され、前記複数の第2のノードの各々は、前記第2のタイプの中継ノードの最終の中継ノードから前記多チャネルのそれぞれの光子対の一方を受信し、前記第1のタイプの中継ノードから前記光子対の他方に対応するベル状態測定の結果を受信して、その結果に基づいて、前記光子対の一方の状態を操作し、該光子の状態を測定するように構成されたことを特徴とする。

10

20

30

40

50

【発明の効果】

【0046】

本発明により、光周波数の異なる2光子を、2光子の基底状態であるベル状態に対して射影測定するための量子干渉装置を構築することが可能となる。また、このような量子干渉装置を用いて、量子状態の転送を行う量子通信システム、および量子もつれ状態を遠隔の2者で共有する量子通信システムの構築が可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0047】

図4に、本発明の第1の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す。この量子干渉装置は、2光子のベル状態を測定するベル状態測定器12と、光子の光周波数を変換する光周波数変換器14とを備えている。量子干渉装置には、光周波数 f_1 を有する光子1と、光周波数 f_2 を有する光子2がそれぞれのポートから入力される。ただし、 $f_1 \neq f_2$ とする。光子1は、光周波数変換器14に入力され、光周波数 f_2 の光子1'に変換される。ここで、光周波数変換器14は、光子1の光周波数だけを変換し、他の物理パラメータは変換しない。光子1'と光子2はベル状態測定器12に入力され、4つのベル状態のいずれかに射影測定され、測定結果が出力される。光周波数変換器の構成例については後述する。

【0048】

図5に、本発明の第2の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す。この量子干渉装置は、2光子のベル状態を測定するベル状態測定器12と、光子の光周波数を変換する2つの光周波数変換器14-1、14-2とを備えている。量子干渉装置には、光周波数 f_1 を有する光子1と、光周波数 f_2 を有する光子2がそれぞれのポートから入力される。ただし、 $f_1 \neq f_2$ とする。光子1は、光周波数変換器14-1に入力され、光周波数 f_c の光子1'に変換される。また、光子2は、光周波数変換器14-2に入力され、光周波数 f_c の光子2'に変換される。ここで、光周波数変換器14-1、14-2は、光子の光周波数だけを変換し、他の物理パラメータは変換しない。光子1'と光子2'はベル状態測定器12に入力され、4つのベル状態のいずれかに射影測定され、測定結果が出力される。光周波数変換器の構成例については後述する。

【0049】

図6に、本発明の第3の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す。この量子干渉装置は、2入力2出力のビームスプリッタ(BS)120と、BSからの光子を検出する2つの光子検出器122、124と、2つの光子検出器の検出信号を解析する解析装置16とを備えている。量子干渉装置には、光周波数 f_1 を有する光子1と、光周波数 f_2 を有する光子2がそれぞれのポートから入力される。ただし、 $f_1 \neq f_2$ とする。光子1は、光周波数変換器14に入力され、光周波数 f_2 の光子1'に変換される。ここで、光周波数変換器14は、光子1の光周波数だけを変換し、他の物理パラメータは変換しない。光

子 1' と光子 2 はそれぞれ B S 1 2 0 の入力ポート m および n から入力される。B S 1 2 0 の出力ポート x および y から出力された光子はそれぞれ光子検出器 1 2 2 , 1 2 4 により検出される。光子検出器 1 2 2 , 1 2 4 からの検出信号は、解析装置 1 6 に入力される。従来の技術で述べたように、2 つの光子検出器において同時検出が得られた場合、2 光子は $|\Psi^+\rangle_{12}$ に射影されている。よって、解析装置 1 6 は、2 光子の同時計数が検出されると、出力信号を発生するよう動作する。

【0050】

図 7 に、本発明の第 4 の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す。この量子干渉装置は、光子の光周波数を変換する 2 つの光周波数変換器 1 4 - 1 , 1 4 - 2 と、2 入力 2 出力のビームスプリッタ (B S) 1 2 0 と、B S からの光子を検出する 2 つの光子検出器 1 2 2 , 1 2 4 と、2 つの光子検出器の検出信号を解析する解析装置 1 6 とを備えている。量子干渉装置は、光周波数 f_1 を有する光子 1 と、光周波数 f_2 を有する光子 2 がそれぞれのポートから入力される。ただし、 $f_1 \neq f_2$ とする。光子 1 は、光周波数変換器 1 4 - 1 に入力され、光周波数 f_c の光子 1' に変換される。また、光子 2 は、光周波数変換器 1 4 - 2 に入力され、光周波数 f_c の光子 2' に変換される。ここで、光周波数変換器 1 4 - 1 , 1 4 - 2 は、光子の光周波数だけを変換し、他の物理パラメータは変換しない。光子 1' と光子 2' は、第 3 の実施形態と同様、ビームスプリッタ 1 2 0、光子検出器 1 2 2 , 1 2 4、解析装置 1 6 からなるベル状態測定器に入力され、2 光子が $|\Psi^+\rangle_{12}$ に射影された場合、出力信号を発生する。

10

20

【0051】

なお、第 1 および第 2 の実施形態ともに、図 3 に述べた B S の出力ポートにそれぞれ P B S と 2 つの光子検出器を配置した系をとることも可能である。この場合、同時計数される光子検出器の組み合わせにより、 $|\Psi^+\rangle_{12}$ および $|\Psi^-\rangle_{12}$ の 2 状態に射影することが可能となる。

【0052】

図 8 に、本発明に使用することができる光周波数変換器の一例を示す。この光周波数変換器は、入力光子とポンプ光を合波する合波手段 1 4 0 と、合波手段からの入力光子とポンプ光から周波数を変換した光子を生成する 2 次の非線形光学媒質 1 4 2 と、2 次の非線形光学媒質からの不要成分を取り除くフィルタ 1 4 4 とを備えている。入力光子とポンプ光が合波手段により合波され、2 次の非線形媒質に入力される。ポンプ光が十分強く、古典的な電磁場と近似できる場合、系の相互作用ハミルトニアンは次式で表される。

30

【0053】

【数 1 1】

$$\hat{H}_I = i\hbar\chi(\hat{a}_s\hat{a}_c^\dagger - h.c.) \quad (11)$$

【0054】

ここで、

【0055】

【数 1 2】

40

$$\hat{a}_s, \hat{a}_c$$

【0056】

は、入力光子と、周波数変換後の光子の消滅演算子である。また、 χ は 2 次の非線形感受率とポンプ光の電場に比例する定数である。入力光子、ポンプ光、周波数変換後の光子の光周波数を f_s , f_p , f_c とすると、これらの間には次式の関係が成立する。

【0057】

【数 1 3】

$$f_s + f_p = f_c \quad (12)$$

【0 0 5 8】

式 (1 1) より、ハイゼンベルグの運動方程式は次式のように得られる。

【0 0 5 9】

【数 1 4】

$$\frac{d\hat{a}_s}{dt} = -\chi\hat{a}_c \quad (13)$$

10

【0 0 6 0】

【数 1 5】

$$\frac{d\hat{a}_c}{dt} = \chi\hat{a}_s \quad (14)$$

【0 0 6 1】

上式の解は次のように得られる。

【0 0 6 2】

【数 1 6】

$$\hat{a}_s(t) = \hat{a}_{s0} \cos \chi t - \hat{a}_{c0} \sin \chi t \quad (15)$$

20

【0 0 6 3】

【数 1 7】

$$\hat{a}_c(t) = \hat{a}_{c0} \cos \chi t + \hat{a}_{s0} \sin \chi t \quad (16)$$

【0 0 6 4】

ここで、

【0 0 6 5】

【数 1 8】

$$\hat{a}_{x0} (x=s, c)$$

30

【0 0 6 6】

は時刻 $t = 0$ におけるモード x の消滅演算子である。周波数変換後の光子の平均光子数

【0 0 6 7】

【数 1 9】

$$\langle \hat{a}_c^\dagger \hat{a}_c \rangle = \langle \hat{n}_c \rangle$$

【0 0 6 8】

は次式で与えられる。

【0 0 6 9】

【数 2 0】

$$\langle \hat{n}_c \rangle = \langle \hat{n}_{c0} \rangle \cos^2 \chi t + \langle \hat{n}_{s0} \rangle \sin^2 \chi t \quad (17)$$

40

【0 0 7 0】

特に、光周波数変換の場合、 $t = 0$ における光周波数 f_c の光子数は

【0 0 7 1】

【数 2 1】

$$0(\langle \hat{n}_{s0} \rangle = 0)$$

50

【 0 0 7 2 】

だから、

【 0 0 7 3 】

【 数 2 2 】

$$\langle \hat{n}_c \rangle = \langle \hat{n}_{s0} \rangle \sin^2 \chi t \quad (18)$$

【 0 0 7 4 】

となる。上式より、1個の入力光子が入力された場合、 $\sin^2 \chi t$ の確率で光周波数変換されることがわかる。特に、 $\chi t = \pi / 2$ のとき、入力光子は100%の確率で周波数変換される。

10

【 0 0 7 5 】

2次の非線形媒質から出力された光子は、光周波数 f_c を透過するフィルタを通過させることにより残留ポンプ光や他の雑音光子などを除去させる。その結果、出力ポートからは周波数変換後の光子を取り出すことができる。

【 0 0 7 6 】

本実施形態の光周波数変換器によると、式(12)より、入力光子の光周波数 f_s は、周波数変換後の光周波数 f_c に比べて小さくなることがわかる。すなわち、本光周波数変換器は、必ず周波数を増大する方向に光周波数変換する。言い換えれば、波長を短くする方向に波長変換する。

【 0 0 7 7 】

20

図9に、本発明に使用することができる光周波数変換器の別の一例を示す。この光周波数変換器は、入力光子と2つのポンプ光を合波する合波手段140と、合波手段からの入力光子と2つのポンプ光から周波数を変換した光子を生成する3次の非線形光学媒質146と、3次の非線形光学媒質からの不要成分を取り除くフィルタ144とを備えている。入力光子と光周波数 f_{p1} および f_{p2} を持つ2つのポンプ光が合波手段により合波され、3次の非線形媒質に入力される。2つのポンプ光が十分強く、古典的な電磁場と近似できる場合、その周波数変換の特性は式(11)、(13)、(14)、(15)、(16)、(17)、(18)とまったく同一の式で表される。ただし、式(11)の χ はここでは3次の非線形感受率と2つのポンプ光の電場に比例する定数となり、2ポンプ光と入力光子、周波数変換後の光子の光周波数の間には次の関係が成立する。

30

【 0 0 7 8 】

【 数 2 3 】

$$f_s + f_{p1} = f_{p2} + f_c \quad (19)$$

【 0 0 7 9 】

この式より、図8の光周波数変換器と異なり、 f_s と f_c の大小関係は、2ポンプ光の周波数を適当に配置することにより、 $f_s < f_c$ 、 $f_s > f_c$ のどちらにでも設定できることがわかる。よって、この光周波数変換器により、入力光子の周波数を、増大および減少の両方向に変換することが可能となる。

【 0 0 8 0 】

40

図8の場合と同様に、3次の非線形媒質から出力された光子は、光周波数 f_c を透過するフィルタを通過させることにより残留ポンプ光や他の雑音光子などを除去させる。その結果、出力ポートからは周波数変換後の光子を取り出すことができる。

【 0 0 8 1 】

図10に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第1の実施例を示す。この量子通信システムは、ユーザAのノード100と、2つの中継ノード10、20と、ユーザBのノード200とから構成されている。この通信システムにおいて、ユーザAのノード100にある単一光子光源102からの光子1の偏波に関する量子状態を、中継ノード10、20を介してユーザBのノード200に転送する。

【 0 0 8 2 】

50

ユーザ A のノード 100 は単一光子光源 102 を備え、光周波数が f_1 であり、送付したい量子状態をもつ単一光子 1 を発生する。この光源から発生した光子 1 は、光伝送路を介して中継ノード 10 に送付される。中継ノード 20 は、量子もつれ発生装置 22 を備え、量子もつれ状態にある光周波数 f_2 の光子 2 および光周波数 f_3 の光子 3 を発生する。光子 2 は光伝送路を介して中継ノード 10 に送付され、光子 3 は光伝送路を介してユーザ B に送付される。中継ノード 10 は、図 4 から図 7 で述べた量子干渉装置 15 を有し、光子 1 および光子 2 についてベル状態測定を行う。ベル状態測定の結果は、通信手段 30 を介してユーザ B に送付される。

【0083】

ユーザ B のノード 200 は、制御装置 212 と光子測定装置 214 とを備えている。ユーザ B のノード 200 は、送付されたベル状態測定の結果に基づき、制御装置 212 により光子 3 の状態を操作し（ユニタリ変換）、光子測定装置 214 により光子 3 の状態を測定する。本実施例においては、光子 3 の偏波に関する量子状態を測定する。また、測定可能な量子状態のときだけ、ゲートを開け、他は捨てるといった制御を行ってもよい。これは、例えば、光子検出器をゲート動作させたり、あるいは取得したデータからソフトウェア上で削除するなどして実現することができる。これにより、ユーザ B はユーザ A が光子 1 により用意した量子状態を光子 3 として受信し、測定することができる。なお、図 2 に示す系より、4 つのレベル基底状態のうち $|\Psi\rangle_{12}$ のみを選択して射影するベル状態測定においては、測定した 2 光子の量子状態を送付する必要はなく、ベル状態測定が成功した時刻を送付するだけでよい。

【0084】

図 11 に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 2 の実施例を示す。この量子通信システムは、ユーザ A のノード 100 と、3 つの中継ノード 10, 20-1, 20-2 と、ユーザ B のノード 200 とから構成されている。中継ノード 20-1 は量子もつれ発生装置 22-1 を備え、量子もつれ状態にある光子 1（光周波数 f_1 ）と光子 4（光周波数 f_4 ）を発生する。同様に、中継ノード 20-2 は量子もつれ発生装置 22-2 を備え、量子もつれ状態にある光子 2（光周波数 f_2 ）と光子 3（光周波数 f_3 ）を発生する。光子 1 と光子 2 は光伝送路を介して中継ノード 10 に送付される。光子 4 と光子 3 は、光伝送路を介してそれぞれユーザ A およびユーザ B に送付される。

【0085】

中継ノード 10 は、図 4 から図 7 で述べた量子干渉装置 15 を有し、光子 1 および光子 2 についてベル状態測定を行う。ベル状態測定の結果は、通信手段 30a, 30b を介してそれぞれユーザ A およびユーザ B に送付される。ユーザ A およびユーザ B のノード 100, 200 はそれぞれ、制御装置 112, 212 と光子測定装置 114, 214 とを備えている。ユーザ A およびユーザ B の各ノードは、送付されたベル状態測定の結果に基づき、制御装置 112, 212 により光子 4, 3 の状態を操作し（ユニタリ変換）、光子測定装置 114, 214 により光子 4, 3 の状態を測定する。本実施例においては、光子 4, 3 それぞれの偏波に関する量子状態を測定する。この方法によると、光子 4 と量子もつれの関係にある光子 1 の量子状態は、量子テレポーテーションにより光子 3 の量子状態へと転送される。その結果、光子 4 と光子 3 の間に量子もつれ状態を形成することが可能となる。

【0086】

図 12 に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 3 の実施例を示す。この量子通信システムは、ユーザ A のノード 100 と、2 つの中継ノード 10, 20 と、ユーザ B 1 から B n で表される n 個のノード 200-1 ~ 200-n（n は 2 以上の自然数）とから構成されている。なお、図 12 は $n = 2$ の場合を示している。

【0087】

中継ノード 20 は広帯域量子もつれ発生装置 24 を備え、量子もつれ状態にある光周波数 f_{2-k} （ $k = 1, 2, \dots, n$ ）の光子 2-k と光周波数 f_{3-k} の光子 3-k（ $k = 1, 2, \dots, n$ ）の計 n 組の光子対を発生する。ユーザ A のノード 100 は、広

10

20

30

40

50

帯域量子もつれ発生装置 104 を備え、光子 1 を発生する。光子 1 は光伝送路を介して中継ノード 10 に送付される。合計 n 個の光子 $2-1 \sim 2-n$ は光伝送路を介してすべて中継ノード 10 に送付される。一方、光子 $3-1 \sim 3-n$ は光伝送路を介してそれぞれ異なるユーザのノード $200-1 \sim 200-n$ に送付される。

【0088】

中継ノード 10 は、図 4 から図 7 で述べた量子干渉装置 15 を有する。送付された光子 1 および光子 $2-1 \sim 2-n$ は、この量子干渉装置 15 に入力される。量子干渉装置中の光周波数変換器は、入力された光子 $2-1 \sim 2-n$ のうち一つの光子 $2-k$ ($k=1, 2, \dots, n$) だけが光子 1 と干渉するように、光子 1 または光子 $2-k$ またはその両方を光周波数変換する。その結果、光子 1 とある一つの光子 $2-k$ についてベル状態測定がなされる。ベル状態測定の結果は、通信手段 30 を用いてユーザ B_k に送付される。ユーザ B_k のノード $200-k$ は、制御装置 212- k と光子測定装置 214- k とを備えている。ユーザ B_k のノード $200-k$ は、送付されたベル状態測定の結果に基づき、制御装置 212- k により光子 $3-k$ の状態を操作し (ユニタリ変換)、光子測定装置 214- k により光子 $3-k$ の状態を測定する。本実施例においては、光子 $3-k$ の偏波に関する量子状態を測定する。これにより、ユーザ B_k はユーザ A が光子 1 により用意した量子状態を光子 $3-k$ として受信し、測定することができる。

10

【0089】

本構成によると、量子干渉装置 15 において光子 1 と量子干渉させる光子 $2-k$ を任意に変更することが可能である。よって、ユーザ A が送付したい量子状態を、任意のユーザ B_k に転送することが可能となる。

20

【0090】

図 13 に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 4 の実施例を示す。この量子通信システムは、ユーザ A 1 から A_n で表される n 個のノード $100-1 \sim 100-n$ (n は 2 以上の自然数) と、3 つの中継ノード 10, 20-1, 20-2 と、ユーザ B 1 から B_m で表される m 個のノード $200-1 \sim 200-m$ (m は 2 以上の自然数) とから構成されている。なお、図 13 は $n=m=2$ の場合を示している。

【0091】

中継ノード 20-1 は広帯域量子もつれ発生装置 24-1 を備え、量子もつれ状態にある光周波数 f_{1-k} の光子 $1-k$ ($k=1, 2, \dots, n$) と光周波数 f_{4-k} の光子 $4-k$ ($k=1, 2, \dots, n$) の n 組の光子対を発生する。同様に、中継ノード 20-2 は広帯域量子もつれ発生装置 24-2 を備え、量子もつれ状態にある光周波数 f_{2-j} の光子 $2-j$ ($j=1, 2, \dots, m$) と光周波数 f_{3-j} の光子 $3-j$ ($j=1, 2, \dots, m$) の m 組の光子対を発生する。合計 n 個の光子 $1-1 \sim 1-n$ および合計 m 個の光子 $2-1 \sim 2-m$ はそれぞれ光伝送路を介してすべて中継ノード 10 に送付される。一方、 n 個の光子 $4-1 \sim 4-n$ は光伝送路を介してそれぞれことなるユーザのノード $100-1 \sim 100-n$ に送付され、 m 個の光子 $3-1 \sim 3-m$ は光伝送路を介してそれぞれ異なるユーザのノード $200-1 \sim 200-m$ に送付される。

30

【0092】

中継ノード 10 は、図 4 から図 7 で述べた量子干渉装置 15 を有する。送付された光子 $1-1 \sim 1-n$ および光子 $2-1 \sim 2-m$ は、この量子干渉装置 15 に入力される。量子干渉装置中の光周波数変換器は、入力された光子 $1-1 \sim 1-n$ のうち一つの光子 $1-k$ ($k=1, 2, \dots, n$) と光子 $2-1 \sim 2-m$ のうち一つの光子 $2-j$ ($j=1, 2, \dots, m$) のうちの一組だけが干渉するように、光子 $1-k$ または光子 $2-j$ またはその両方を光周波数変換する。その結果、ある一つの光子 $1-k$ とある一つの光子 $2-j$ についてベル状態測定がなされる。ベル状態測定の結果は、通信手段 30 を用いてユーザ A_k およびユーザ B_j に送付される。ユーザ A_k のノード $100-k$ は、制御装置 112- k と光子測定装置 114- k とを備えている。ユーザ B_j のノード $200-j$ は、制御装置 212- j と光子測定装置 214- j とを備えている。ユーザ A_k は、送付されたベル状態測定の結果に基づき、制御装置 112- k により光子 $4-k$ の状態を操作し (ユニ

40

50

タリ変換)、光子測定装置 114 - k により光子 4 - k の状態を測定する。また、ユーザ B_j は、送付されたベル状態測定の結果に基づき、制御装置 212 - j により光子 3 - j の状態を操作し(ユニタリ変換)、光子測定装置 214 - j により光子 3 - j の状態を測定する。本実施例においては、光子 4 - k, 3 - j それぞれの偏波に関する量子状態を測定する。これにより、光子 4 - k と光子 3 - j の間に量子もつれ状態を形成することが可能となる。本実施例により、n 個のユーザ A_k と m 個のユーザ B_j の任意の組み合わせの間に量子もつれ状態を分配することが可能となる。

【0093】

図 14 に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 5 の実施例を示す。この実施例は、第 4 の実施例と比べて、中継ノード 10 の構成が異なっている。本実施例における中継ノード 10 は、 $m > n$ として、n 個の量子干渉装置 15 - 1 ~ 15 - n と、2 つの波長分離器 18 a, 18 b と、 $n \times n$ の光スイッチ 19 とを備えている。

【0094】

中継ノード 20 - 1, 20 - 2 の構成および動作は、第 4 の実施例と同様である。中継ノード 20 - 1 から光伝送路により中継ノード 10 へ送付された n 個の光子 1 - 1 ~ 1 - n は、波長分離器 18 a により n 個の異なる光路に分離され、それぞれ光スイッチ 19 に入力される。光スイッチ 19 は、n 個の入力ポートと n 個の入力ポートを有し、任意の入力および出力ポート間を接続することが可能である。光スイッチの出力ポートはそれぞれ量子干渉装置 15 - 1 ~ 15 - n に接続されている。一方、中継ノード 20 - 2 から光伝送路により中継ノード 10 へ送付された m 個の光子 2 - 1 ~ 2 - m は、波長分離器 18 b により m 個の異なる光路に分離され、それぞれ量子干渉装置 15 - 1 ~ 15 - n に入力される。光スイッチ 19 において、入力ポートと出力ポートの接続の組み合わせを変更することにより、n 組の任意の組み合わせの光子 1 - k と光子 2 - j についてベル状態測定を同時に行うことができる。このようにして得られたベル状態測定結果を通信手段を介してユーザ A_k およびユーザ B_j に送付することにより、任意の n 個の組み合わせのユーザ A_k およびユーザ B_j の間で同時に量子もつれ状態を分配することが可能となる。

【0095】

図 15 に、本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 6 の実施例を示す。この量子通信システムは、ユーザ A のノード 100 と、n 個の中継ノード 10 - 1 ~ 10 - n と、 $n + 1$ 個の中継ノード 20 - 1 ~ 20 - ($n + 1$) とから構成されている。これら各ノードは、図 11 の各ノードと同じ構成を有している。各中継ノード 10 - k は、中継ノード 20 - k および 20 - ($k + 1$) からの光子を受信し、量子干渉装置によりベル状態測定をして、その結果を通信手段 30 によりユーザ A のノード 100 およびユーザ B のノード 200 に送付する。ただし、最初の中継ノード 20 - 1 および最終の中継 20 - ($n + 1$) からの光子対の一方をそれぞれユーザ A のノード 100 およびユーザ B のノード 200 に送付する。図 11 の場合と同様に、ユーザ A および B は、通信手段 30 により送付された中継ノード 10 - 1 ~ 10 - n のベル状態測定結果を元に、制御装置により受信した光子の状態を操作し、光子測定装置により光子の状態を測定する。このような構成により、図 11 の場合に比べて、より長い距離を隔てた 2 者間に量子もつれ状態を分配することが可能となる。

【0096】

なお、この実施例と同様に、複数個の中継ノードを用いて量子状態を転送する距離を延長する方法は、他の実施例にも適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0097】

【図 1】量子テレポーテーションの原理を説明するための図である。

【図 2】2 光子のベル状態を測定するベル状態測定器の構成例を示す図である。

【図 3】2 光子のベル状態を測定するベル状態測定器の別の構成例を示す図である。

【図 4】本発明の第 1 の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す図である。

【図 5】本発明の第 2 の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す図である。

【図 6】本発明の第 3 の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す図である。

【図 7】本発明の第 4 の実施形態による量子干渉装置の構成例を示す図である。

【図 8】本発明に使用することができる光周波数変換器の一例を示す図である。

【図 9】本発明に使用することができる光周波数変換器の別の一例を示す図である。

【図 10】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 1 の実施例を示す図である。

【図 11】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 2 の実施例を示す図である。

【図 12】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 3 の実施例を示す図である。

10

【図 13】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 4 の実施例を示す図である。

【図 14】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 5 の実施例を示す図である。

【図 15】本発明による量子干渉装置を用いた量子通信システムの第 6 の実施例を示す図である。

【符号の説明】

【0098】

1, 1', 2, 2', 2-1, 2-2, 3, 3-1, 3-2, 4, 4-1, 4-2 光子

20

10, 20, 20-1, 20-2 中継ノード

18a, 18b 波長分離器

19 光スイッチ

30 通信回線

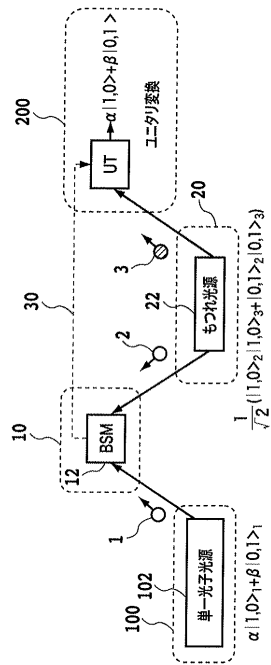
100, 100-1, 100-2, 200, 200-1, 200-2 ユーザノード

120 ビームスプリッタ

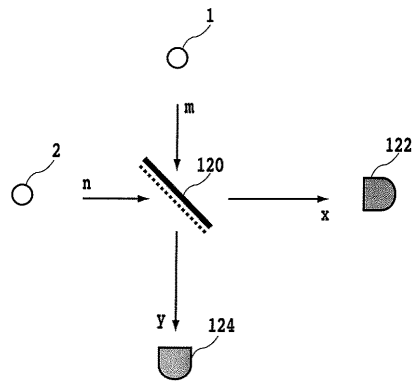
122, 122-1, 122-2, 124, 124-1, 124-2 光子検出器

126, 128 偏波ビームスプリッタ

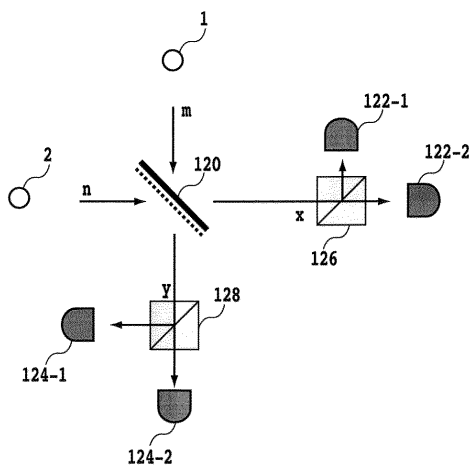
【図 1】



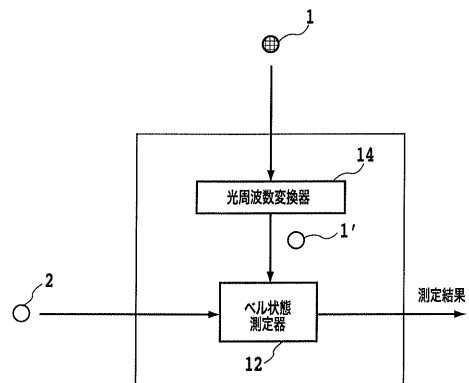
【図 2】



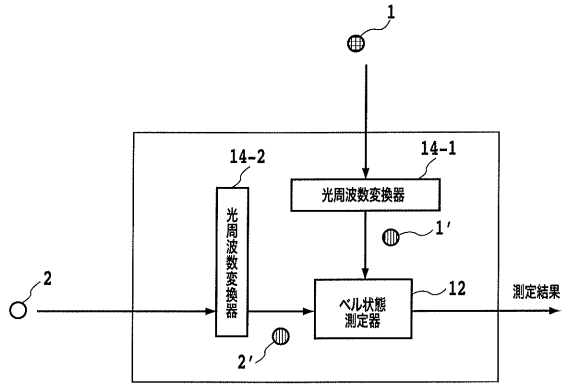
【図 3】



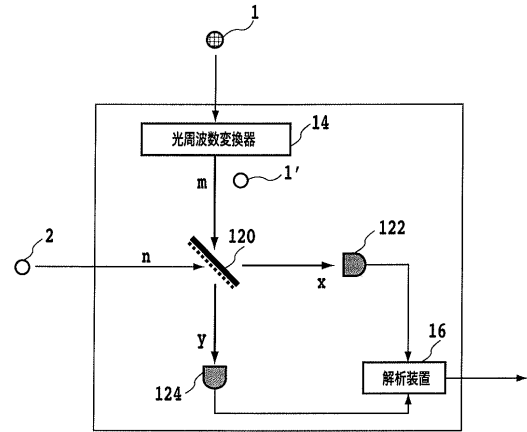
【図 4】



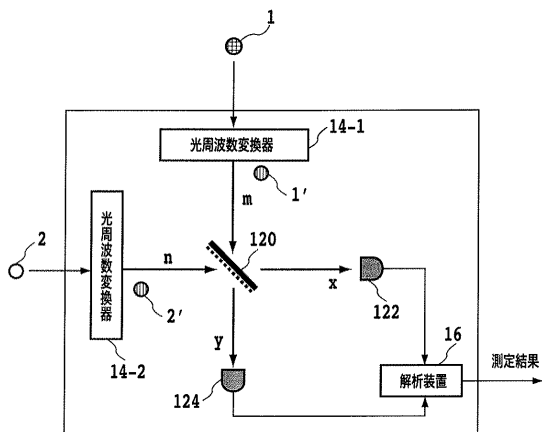
【図 5】



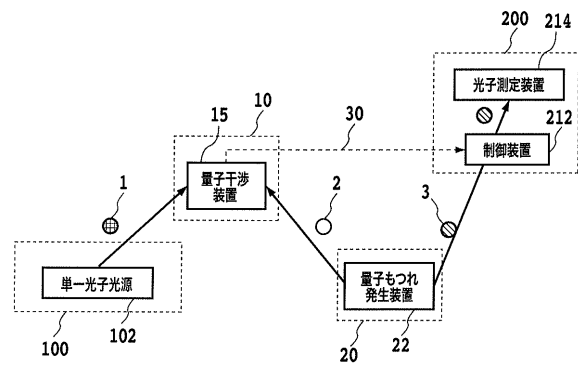
【図 6】



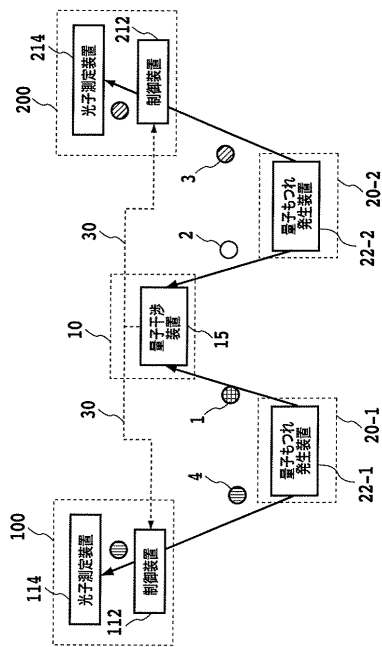
【図 7】



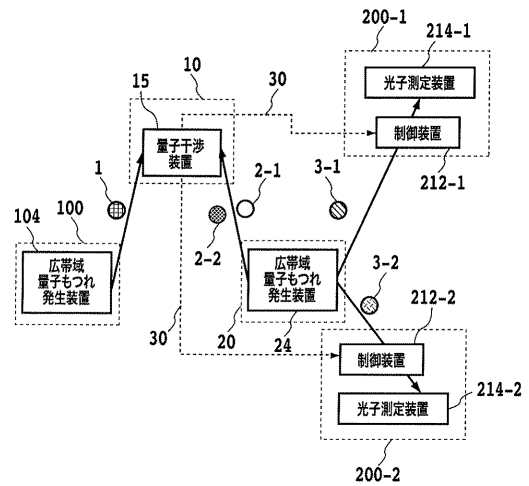
【図 10】



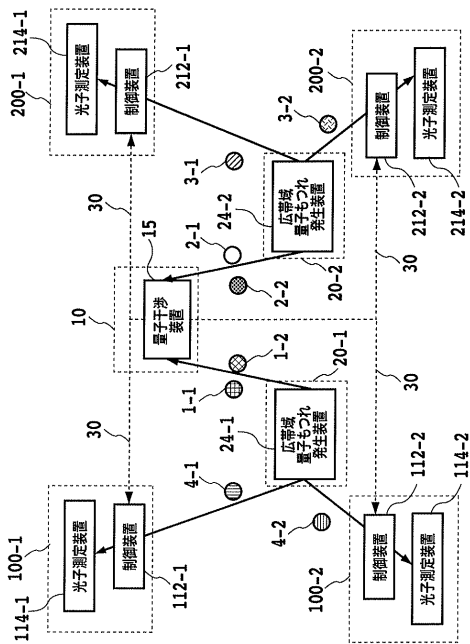
【 図 1 1 】



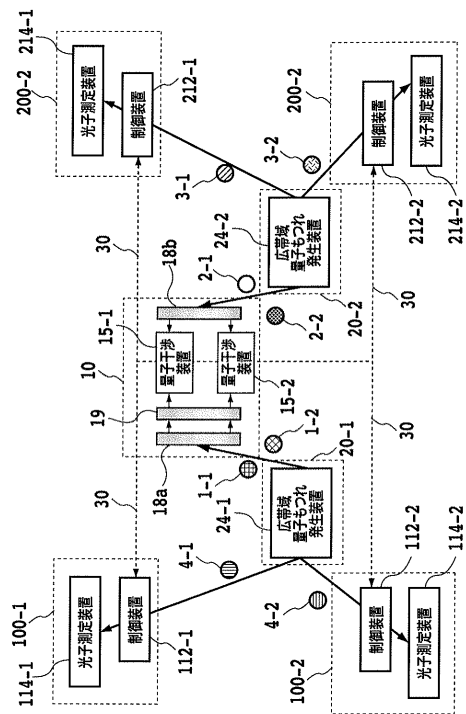
【 図 1 2 】



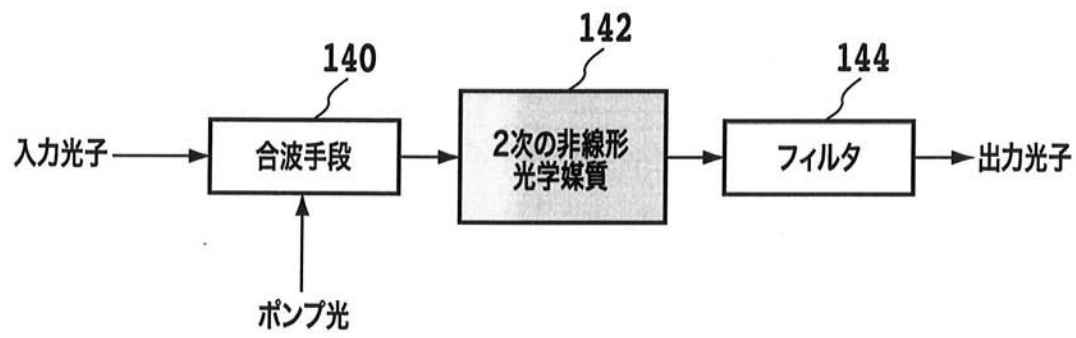
【 図 1 3 】



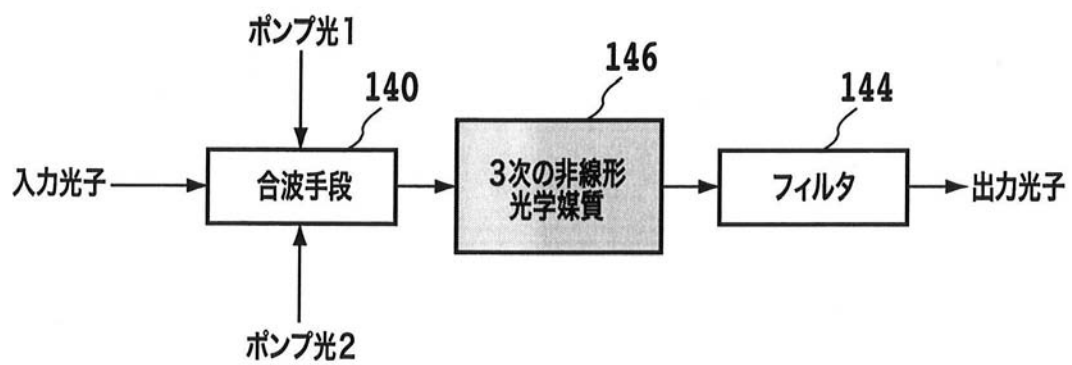
【 図 1 4 】



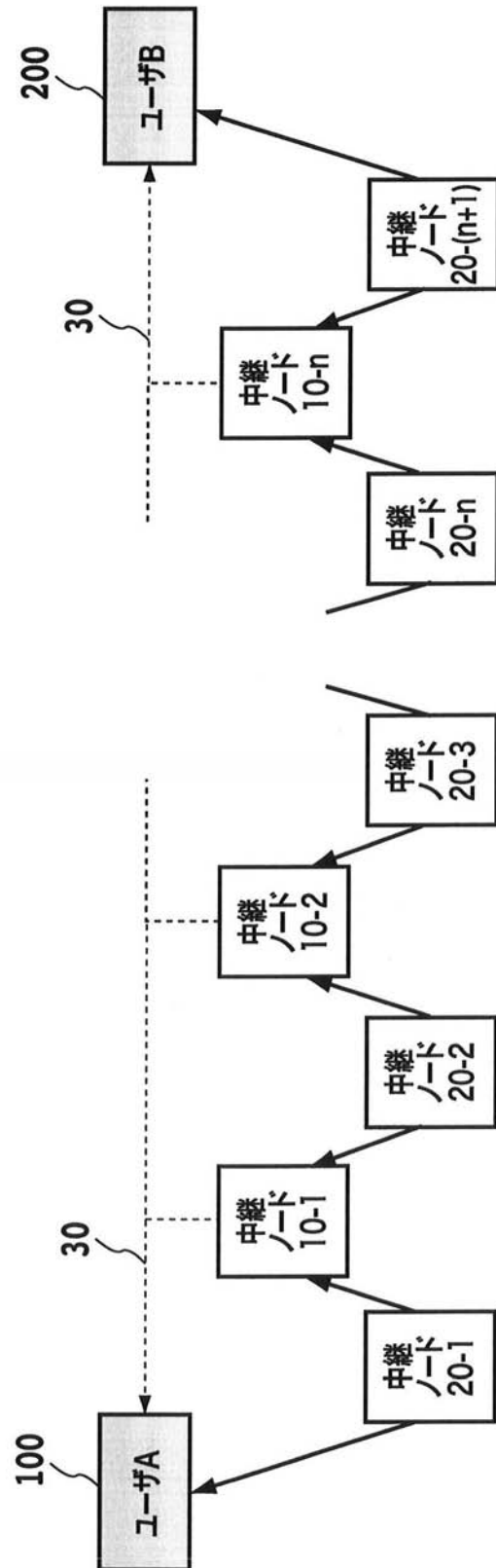
【 図 8 】



【 図 9 】



【図 15】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.

F I

テーマコード (参考)

H 0 4 B 10/152 (2006.01)