

(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2011-175078
(P2011-175078A)

(43) 公開日 平成23年9月8日(2011.9.8)

(51) Int. Cl.

G02F 3/00 (2006.01)

F 1

G02F 3/00

テーマコード(参考)

2K002

審査請求 有 請求項の数 11 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2010-38766 (P2010-38766)
(22) 出願日 平成22年2月24日(2010.2.24)

(71) 出願人 507317719
青戸 智浩
茨城県土浦市中村南6丁目6-38-8
(74) 代理人 110000752
特許業務法人朝日特許事務所
(72) 発明者 青戸 智浩
茨城県土浦市中村南6丁目6番38-8号
Fターム(参考) 2K002 AA03 AB21 AB23 BA04 EA30

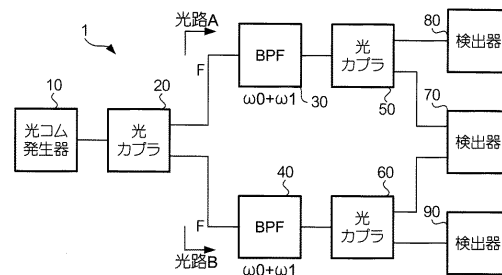
(54) 【発明の名称】 量子コンピュータおよび量子情報処理方法

(57) 【要約】

【課題】 容易に量子状態を生成・制御し、情報を読み出すことができる量子コンピュータを提供すること。

【解決手段】 量子コンピュータ1は、光コム発生器10、光カプラ20、フィルタ30、フィルタ40、光カプラ50、光カプラ60、検出器70、検出器80、検出器90、およびファイバーFを含む。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

周波数 0 および周波数 1 を含み同期周波数の間隔で並ぶ複数の周波数における離散的なスペクトルを有する光を出力する光コム発生器と、

前記光コム発生器から出力された光を、第 1 光路長を有する第 1 光路を伝播する光と、第 2 光路長を有する第 2 光路を伝播する光とに分割する第 1 分割手段と、

前記第 1 光路において周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過する第 1 フィルタと、

前記第 2 光路において周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過する第 2 フィルタと、

前記第 1 光路を伝播した光および前記第 2 光路を伝播した光を重ね合わせた光を観測する第 1 検出器と

を有し、

前記第 1 検出器が検出する光の周波数の違い、または光路の違いを量子情報として用いる

ことを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項 2】

前記第 1 フィルタおよび前記第 2 フィルタは、周波数 0 および周波数 1 の光を透過する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 3】

前記第 1 フィルタは周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過し、

前記第 2 フィルタは周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 4】

前記第 1 光路において前記第 1 フィルタよりも前記第 1 検出器側に設けられ、入力された光を第 1 副光路を伝播する光と、前記第 1 副光路よりも光路長が短い第 2 副光路を伝播する光とに分割する第 2 分割手段と、

前記第 1 副光路に設けられ、周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過する第 3 フィルタと、

前記第 2 副光路に設けられ、周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過する第 4 フィルタと、

前記第 2 光路において前記第 2 フィルタよりも前記第 1 検出器側に設けられ、入力された光を前記第 2 副光路と同じ光路長を有する第 3 副光路を伝播する光と、前記第 1 副光路と同じ光路長を有する第 4 副光路を伝播する光とに分割する第 3 分割手段と、

前記第 3 副光路に設けられ、周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過する第 5 フィルタと、

前記第 4 副光路に設けられ、周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過する第 6 フィルタと、

前記第 1 光路に設けられ、前記第 1 副光路を伝播した光と前記第 2 副光路を伝播した光を合成する第 1 合成手段と、

前記第 2 光路に設けられ、前記第 3 副光路を伝播した光と前記第 4 副光路を伝播した光を合成する第 2 合成手段と、

を有し、

前記第 1 検出器は、前記第 1 光路を伝播した光および前記第 2 光路を伝播した光を観測する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 5】

前記光コム発生器と前記第 1 分割手段との間に設けられ、透過した光の偏光状態を円偏光にする第 1 偏光制御素子と、

10

20

30

40

50

前記第 1 光路に設けられ、透過した光の偏光状態を縦偏光にする第 2 偏光制御素子と、前記第 2 光路に設けられ、透過した光の偏光状態を横偏光にする第 3 偏光制御素子とを有し、

前記第 1 検出器が検出する光の偏光状態を量子情報として用いることを特徴とする請求項 1 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 6】

前記第 1 光路において前記第 1 フィルタよりも前記第 1 検出器側に設けられ、周波数 0 および周波数 1 の光の周波数に変調周波数を加算する変調をする音響光学素子を有し、

前記第 1 フィルタおよび前記第 2 フィルタは、周波数 0 および周波数 1 の光を透過する

10

ことを特徴とする請求項 1 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 7】

前記光コム発生器は、モード同期したフェムト秒レーザーを含む

ことを特徴とする請求項 1 - 6 のいずれかの項に記載の量子コンピュータ。

【請求項 8】

前記第 1 光路および前記第 2 光路の少なくとも一方が、光路長を変更するディレイラインを有する

ことを特徴とする請求項 1 - 7 のいずれかの項に記載の量子コンピュータ。

【請求項 9】

前記第 1 検出器は、周波数を検出する周波数検出器と、前記第 1 光路および前記第 2 光路の光路長が一致したことを検出する差動検出器を含む

20

ことを特徴とする請求項 1 - 8 のいずれかの項に記載の量子コンピュータ。

【請求項 10】

前記第 1 光路を伝播した光を観測する第 2 検出器と、

前記第 2 光路を伝播した光を観測する第 3 検出器と

を有する請求項 2、3、または 6 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 11】

周波数 0 および周波数 1 を含み同期周波数の間隔で並ぶ複数の周波数における離散的なスペクトルを有する光を出力する光コム発生器から出力された光を、第 1 光路長を有する第 1 光路を伝播する光と、第 2 光路長を有する第 2 光路を伝播する光とに分割するステップと、

30

前記第 1 光路に設けられた第 1 フィルタが、周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過するステップと、

前記第 2 光路に設けられた第 2 フィルタが、周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過するステップと、

前記第 1 光路を伝播した光および前記第 2 光路を伝播した光を重ね合わせた光を第 1 検出器において観測するステップと

を有し、

前記第 1 検出器が検出する光の周波数の違い、または光路の違いを量子情報として用いる

40

ことを特徴とする量子情報処理方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子コンピュータおよび量子情報処理方法に関する。

【背景技術】

【0002】

量子力学的に重ね合わされた状態（量子状態）をビット（量子ビット）として計算を行う、いわゆる量子コンピュータが知られている（特許文献 1 - 4 および非特許文献 1 - 3

50

)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2006-65219号公報

【特許文献2】特表2005-524129号公報

【特許文献3】特開2001-209083号公報

【特許文献4】特開2005-159159号公報

【非特許文献】

【0004】

10

【非特許文献1】E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, Nature, vol. 409, p. 49 (2001)

【非特許文献2】M. Koashi, T. Yamamoto, and N. Imoto, Physical Review A, vol. 63, p. 30301 (2001)

【非特許文献3】K. Ichimura, Opt. Commun., vol. 196, p.119 (2001)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

原子やイオンなどの単一量を量子ビットとして利用した量子コンピュータにおいては、量子状態を読み出す信号が微弱であることが問題となっていた。また、電子のスピン、原子または分子の電子状態、分子および固体における核スピン、磁束、単一光子の空間伝播状態および単一光子の偏光を量子ビットとして利用した量子コンピュータにおいては、量子情報を伝送することが困難であるという問題があった。

20

これに対し、本発明は、より容易に量子状態を生成・制御し情報を読み出すことができる量子コンピュータを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明は、周波数 0 および周波数 1 を含み同期周波数の間隔で並ぶ複数の周波数における離散的なスペクトルを有する光を出力する光コム発生器と、前記光コム発生器から出力された光を、第1光路長を有する第1光路を伝播する光と、前記第1光路長と異なる第2光路長を有する第2光路を伝播する光とに分割する第1分割手段と、前記第1光路において周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過する第1フィルタと、前記第2光路において周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過する第2フィルタと、前記第1光路を伝播した光および前記第2光路を伝播した光を重ね合わせた光を観測する第1検出器とを有し、前記第1検出器が検出する光の周波数の違い、または光路の違いを量子情報として用いることを特徴とする量子コンピュータを提供する。

30

この量子コンピュータによれば、光コム発生器を用いない場合と比較して、より容易に量子状態を生成・制御し情報を読み出すことができる。

【0007】

40

好ましい態様において、前記第1フィルタおよび前記第2フィルタは、周波数 0 および周波数 1 の光を透過してもよい。

この量子コンピュータによれば、周波数の違いおよび光路の違いを用いて2量子ビットの量子情報を生成することができる。

【0008】

別の好ましい態様において、前記第1フィルタは周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過し、前記第2フィルタは周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過してもよい。

この量子コンピュータによれば、エンタングルした2量子ビットの量子情報を生成することができる。

50

【0009】

さらに別の好ましい態様において、この量子コンピュータは、前記第1光路において前記第1フィルタよりも前記第1検出器側に設けられ、入力された光を第1副光路を伝播する光と、前記第1副光路よりも光路長が短い第2副光路を伝播する光とに分割する第2分割手段と、前記第1副光路に設けられ、周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過する第3フィルタと、前記第2副光路に設けられ、周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過する第4フィルタと、前記第2光路において前記第2フィルタよりも前記第1検出器側に設けられ、入力された光を前記第2副光路と同じ光路長を有する第3副光路を伝播する光と、前記第1副光路と同じ光路長を有する第4副光路を伝播する光とに分割する第3分割手段と、前記第3副光路に設けられ、周波数 0 の光を透過せず周波数 1 の光を透過する第5フィルタと、前記第4副光路に設けられ、周波数 1 の光を透過せず周波数 0 の光を透過する第6フィルタと、前記第1光路に設けられ、前記第1副光路を伝播した光と前記第2副光路を伝播した光を合成する第1合成手段と、前記第2光路に設けられ、前記第3副光路を伝播した光と前記第4副光路を伝播した光を合成する第2合成手段とを有してもよい。

10

この量子コンピュータによれば、制御 NOT 演算を行うことができる。

【0010】

さらに別の好ましい態様において、この量子コンピュータは、前記光コム発生器と前記第1分割手段との間に設けられ、透過した光の偏光状態を円偏光にする第1偏光制御素子と、前記第1光路に設けられ、透過した光の偏光状態を縦偏光にする第2偏光制御素子と、前記第2光路に設けられ、透過した光の偏光状態を横偏光にする第3偏光制御素子とを有し、前記第1検出器が検出する光の偏光状態を量子情報として用いてもよい。

20

この量子コンピュータによれば、周波数の違い、光路の違いおよび偏光状態の違いを用いて3量子ビットの量子情報を生成することができる。

【0011】

さらに別の好ましい態様において、この量子コンピュータは、前記第1光路において前記第1フィルタよりも前記第1検出器側に設けられ、周波数 0 および周波数 1 の光の周波数に変調周波数を加算し変調をする音響光学素子を有し、前記第1フィルタおよび前記第2フィルタは、周波数 0 および周波数 1 の光を透過してもよい。

この量子コンピュータによれば、量子情報を暗号化することができる。

30

【0012】

さらに別の好ましい態様において、前記光コム発生器は、モード同期したフェムト秒レーザーを含んでもよい。

この量子コンピュータによれば、周波数の異なる状態を安定して生成することができる。

。

【0013】

さらに別の好ましい態様において、前記第1光路および前記第2光路の少なくとも一方が、光路長を変更するディレイラインを有してもよい。

この量子コンピュータによれば、光路長の異なる状態を安定して生成することができる。

。

40

【0014】

さらに別の好ましい態様において、前記第1検出器は、周波数を検出する周波数検出器と、前記第1光路および前記第2光路の光路長が一致したことを検出する差動検出器を含んでもよい。

この量子コンピュータによれば、第1光路および第2光路の光路長が一致しているか確認することができる。

【0015】

さらに別の好ましい態様において、この量子コンピュータは、前記第1光路を伝播した光を観測する第2検出器と、前記第2光路を伝播した光を観測する第3検出器とを有してもよい。

50

この量子コンピュータによれば、第1光路および第2光路のそれぞれで、周波数または光路が異なる状態が重ね合わせられているのを確認することができる。

【0016】

また、本発明は、周波数 0 および周波数 1 を含み同期周波数の間隔で並ぶ複数の周波数における離散的なスペクトルを有する光を出力する光コム発生器から出力された光を、第1光路長を有する第1光路を伝播する光と、前記第1光路長と異なる第2光路長を有する第2光路を伝播する光とに分割するステップと、前記第1光路に設けられた第1フィルタが、周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過するステップと、前記第2光路に設けられた第2フィルタが、周波数 0 および周波数 1 の少なくとも一方を含む周波数帯の光を透過するステップと、前記第1光路を伝播した光および前記第2光路を伝播した光を重ね合わせた光を第1検出器において観測するステップとを有し、前記第1検出器が検出する光の周波数の違い、または光路の違いを量子情報として用いることを特徴とする量子情報処理方法を提供する。

10

この量子情報処理方法によれば、光コム発生器を用いない場合と比較して、より容易に量子状態を生成・制御し情報を読み出すことができる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】第1実施形態に係る量子コンピュータ1の構成を示す図である。

【図2】光コム発生器10から出力される光の特性を示す図である。

【図3】第2実施形態に係る量子コンピュータ2の構成を示す図である。

20

【図4】第3実施形態に係る量子コンピュータ3の構成を示す図である。

【図5】第4実施形態に係る量子コンピュータ4の構成を示す図である。

【図6】第5実施形態に係る量子コンピュータ5の構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

1. 第1実施形態

図1は、第1実施形態に係る量子コンピュータ1の構成を示す図である。量子コンピュータ1は、2量子ビット（キュービット）に相当する状態を生成する。量子コンピュータ1は、光コム発生器10、光カプラ20（第1分割手段の一例）、フィルタ30（第1フィルタの一例）、フィルタ40（第2フィルタの一例）、光カプラ50、光カプラ60、検出器70（第1検出器の一例）、検出器80（第2検出器の一例）、検出器90（第3検出器の一例）、およびファイバーFを含む。光コム発生器10は、スペクトル特性が光コムとなる光を出力する。光コム発生器10は、モード同期したフェムト秒ファイバーレーザーを用いた白色パルス光源や、レーザーキャビティを含む。

30

【0019】

図2は、光コム発生器10から出力される光の特性を示す図である。光コム発生器10から出力される光は、例えば、50MHzの周波数で繰り返される、パルス幅180fsのパルス光である。以下、このパルス光の繰り返し周波数を「同期周波数」という。また、この光は、例えば、波長領域において、中心波長が1550nm、半値幅（バンド幅）が約100nmのスペクトルを有する。図2(a)は時間領域における特性を、図2(b)は周波数領域における特性を示している。図2(a)において、縦軸は光の強度を、横軸は時間を示している。図2(a)に示されるように、光コム発生器10から出力される光は、安定した高繰り返しのモード同期した超短光パルス列を含む。図2(a)の特性をフーリエ変換することにより、図2(b)が得られる。図2(b)において、縦軸はスペクトル強度を、横軸は周波数を示している。図2(b)に示されるように、光コム発生器10から出力される光は、複数の安定な光周波数モードが同期周波数の間隔で規則的に並んだ離散スペクトルを有する。このスペクトル特性を、光コム（comb = 櫛）または光周波数コムという。以下の説明においては、図2に示されるスペクトル特性を有する光を単に「光コム」という。この例で、光コムは、周波数 0 および 1 におけるスペクトルを含んでいる。

40

50

【 0 0 2 0 】

再び図 1 を参照する。光カプラ 2 0 は、入力された光を、ある比率（この比率を「分岐比」という。例えば 1 : 1 ）で 2 つ以上の光路に分割する。光カプラ 2 0 は、分岐比が可変の光カプラである。この例で、光カプラ 2 0 は、光コム発生器 1 0 から出力された光を、光路 A（第 1 光路の一例）と光路 B（第 2 光路の一例）の 2 つの光路を伝播する光に分割する。量子コンピュータ 1 において、光はファイバ F を伝播する。ファイバ F は、光源からの光を低損失で伝播する光学素子である。光路 A は、光カプラ 2 0 から検出器 7 0 までの光路である。光路 B は、光カプラ 2 0 から検出器 7 0 までの光路であって、光路 A とは異なるファイバ F を介したものである。光路 A の途中にはフィルタ 3 0 が挿入されている。光路 B の途中にはフィルタ 4 0 が挿入されている。この例では、光路 A と光路 B とは、その長さが同じであってもよいし異なってもよい。

10

【 0 0 2 1 】

フィルタ 3 0 およびフィルタ 4 0 は、入力された光のうちある周波数帯のものを透過するバンドパスフィルタである。第 1 実施形態において、フィルタ 3 0 およびフィルタ 4 0 は、光コムのうち周波数 0 および 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。すなわち、検出器 7 0、検出器 8 0 および検出器 9 0 が検出する光は、周波数 0 および 1 の光だけである。

【 0 0 2 2 】

光カプラ 5 0 および光カプラ 6 0 は、光カプラ 2 0 と同様に、入力された光を、分岐比に従って 2 つ以上の光路に分割する。この例で、光カプラ 5 0 は、入力された光を、検出器 7 0 に接続された光路（光路 A）を伝播する光と、検出器 8 0 に接続される光路を伝播する光とに分割する。光カプラ 6 0 は、入力された光を、検出器 7 0 に接続された光路（光路 B）を伝播する光と、検出器 9 0 に接続される光路を伝播する光とに分割する。

20

【 0 0 2 3 】

検出器 7 0 は、光路 A を伝播してきた光と光路 B を伝播してきた光の合成波を検出する。具体的に、検出器 7 0 は、差動検出器と、周波数検出器とを含む。差動検出器は、光路 A と光路 B との光路長差 l がゼロになったこと、または光路長差 l が光速 c と同期周波数 f_1 との商に一致したこと、すなわち、

$$l = k \times c / f_1 \quad (1)$$

が満たされたことを検出する（ k は整数）。差動検出器により、光路 A と光路 B との光路長が一致しているか一致していないかを検出することができる。なお、「光路長が一致」または「光路長が同じ」とは、光路長が完全に一致している状態に限定されず、誤差を含んでいてもよい。許容される誤差は、例えば、光源の波長領域のスペクトルの半値幅、またはその 2 倍程度である。

30

【 0 0 2 4 】

また、式（1）に示されるように、差動検出器は光路長差 l が光速 c と同期周波数 f_1 との商に一致したことを検出できる。したがって、例えば第三者が式（1）を満たす状態を経由して光路長を変更するような操作を行った場合に、差動検出器を観測していれば光路長が変更されたことを検出することができる。

【 0 0 2 5 】

検出器 7 0 の周波数検出器は、光路 A を伝播してきた光と光路 B を伝播してきた光とを重ね合わせた光（合成波）を観測する。一般に、周波数 ω の光の状態を表す波動関数は

$$= \exp(-i \omega t - i k x) \quad (2)$$

と表される（ t は時間、 k は波数、 x は位置を示す）。

変分原理により式（2）を変形すると、

$$= \exp(-i \omega t) \times \exp(-i k x) \quad (3)$$

となり、状態 ψ は周波数の項と位置の項の積で表される。いま、周波数および位置をそれぞれ量子状態を表すパラメータと考える。周波数 ω_0 および周波数 ω_1 はそれぞれ異なる量子状態に相当すると考えられるので、ディラック（Dirac）のブラ・ケット記号 $|\omega\rangle$ を

40

50

用いて、 $|0\rangle$ および $|1\rangle$ と表す。同様に、光路（位置）に関して、光路 A を伝播した光の状態を $|A\rangle$ 、光路 B を伝播した光の状態を $|B\rangle$ と表す。光路 A を伝播した光は周波数 0 の光および周波数 1 の光を含んでいるので、光路 A を伝播した光の状態は、 $|0\rangle|A\rangle + |1\rangle|A\rangle$ と表される。ここで、加算記号「+」は量子力学的な重ね合わせを意味する。すなわち、検出器 80 が検出する光の状態は、 $|0\rangle|A\rangle + |1\rangle|A\rangle$ と表される。なお検出器 80 が検出する光の光路と、検出器 70 が検出する光のうち光路 A を伝播した光の光路とは完全に一致しない場合もあるが、ここでは便宜上どちらの光の状態も $|A\rangle$ と記述する。光路 B についても同様である。光路 A と同様に、光路 B を伝播した光の状態、すなわち、検出器 90 が検出する光の状態は、 $|0\rangle|B\rangle + |1\rangle|B\rangle$ と表される。

10

【0026】

検出器 80 が検出する光は周波数 0 の光と周波数 1 の光とを含んでいるので、検出器 80 において、これらの周波数差に起因するビート（うなり）が観測される。検出器 80 においてビートが観測されるということは、周波数 0 の光と周波数 1 とに相当する 2 つの状態が重ね合わされていることが確認できるということである。検出器 90 についても同様である。

【0027】

検出器 70 は光路 A を伝播した光と光路 B を伝播した光を重ね合わせた光を検出する。したがって、検出器 70 の周波数検出器が検出する光の状態は、

$$|0\rangle|A\rangle + |1\rangle|A\rangle + |0\rangle|B\rangle + |1\rangle|B\rangle \quad (4)$$

20

で表される。いま、周波数の状態 $|0\rangle$ および $|1\rangle$ をそれぞれ $|0\rangle$ および $|1\rangle$ のビットと定義し、光路の状態 $|A\rangle$ および $|B\rangle$ をそれぞれ $|0\rangle$ および $|1\rangle$ のビットと定義すると、検出器 70 の周波数検出器が検出する光の状態は、

$$|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle + |1\rangle|1\rangle \quad (5)$$

と表される。この状態は 4 状態の重ね合わせであり、2 量子ビットの均等な重ね合わせの一つの表現である。

【0028】

以上で説明したように、量子コンピュータ 1 によれば、周波数および光路の違いをそれぞれ量子情報として用いて、2 量子ビットに相当する状態を生成することができる。

【0029】

30

2. 第 2 実施形態

図 3 は、第 2 実施形態に係る量子コンピュータ 2 の構成を示す図である。量子コンピュータ 2 は、エンタングルした（もつれ合った、絡まった）状態を生成する。以下、第 1 実施形態と共通する要素については共通の参照符号を用いて説明する。量子コンピュータ 2 は、光コム発生器 10、光カプラ 20、フィルタ 30、フィルタ 40、光カプラ 50、光カプラ 60、検出器 70、検出器 80、検出器 90、およびファイバー F を含む。

【0030】

第 2 実施形態において、フィルタ 30 は、光コムのうち周波数 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。フィルタ 40 は、光コムのうち周波数 0 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。

40

【0031】

量子コンピュータ 2 において、検出器 80 が検出する光の状態は、 $|1\rangle|A\rangle = |1\rangle|0\rangle$ である（ビットの定義は第 1 実施形態と同様）。検出器 90 が検出する光の状態は、 $|0\rangle|B\rangle = |0\rangle|1\rangle$ である。検出器 70 が検出する光の状態は、

$$|1\rangle|A\rangle + |0\rangle|B\rangle = |1\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle \quad (6)$$

と表される。すなわち、周波数の状態を第 1 ビット、位置（光路）の状態を第 2 ビットとすると、第 2 ビットの値は第 1 ビットの値に依存している。この状態は、いわゆる量子力学的なエンタングル状態に相当する。

【0032】

以上で説明したように、量子コンピュータ 2 によれば、量子力学的にエンタングルした

50

2量子ビットに相当する状態を生成することができる。

【0033】

3. 第3実施形態

図4は、第3実施形態に係る量子コンピュータ3の構成を示す図である。量子コンピュータ3は、制御NOT回路として機能する。量子コンピュータ3は、光コム発生器10、光カプラ20、フィルタ30、フィルタ31（第3フィルタの一例）、フィルタ32（第4フィルタの一例）、フィルタ40、フィルタ42（第5フィルタの一例）およびフィルタ41（第6フィルタの一例）、光カプラ51（第2分割手段の一例）、光カプラ61（第3分割手段の一例）、光カプラ52（第1合成手段の一例）および光カプラ62（第2合成手段の一例）、検出器70、並びにファイバーFを含む。フィルタ31およびフィルタ32、並びにフィルタ41およびフィルタ42はそれぞれ、フィルタ30およびフィルタ40と同じ機能を有する。光カプラ51および光カプラ52は、光カプラ50および光カプラ60と同じ機能を有する。光カプラ61および光カプラ62も基本的に光カプラ50および光カプラ60と同じ機能を有するが、光カプラ50および光カプラ60とは入出力を逆向きにして用いられている。

【0034】

量子コンピュータ3においては、光路の構成が第1および第2実施形態と異なっている。光カプラ20により分岐された後、図4の上側に位置する光路（フィルタ30を経由する光路）を光路U、図4の下側に位置する光路（フィルタ40を経由する光路）を光路Lという。光路U上には光カプラ51および光カプラ52が設けられている。光カプラ51は、入力された光を光路UL（第1副光路の一例）および光路US（第2副光路の一例）の2つの光路を伝播する光に分割する。光路ULは光路長変更機構、この例ではディレイライン201を含んでおり、光路ULと光路USとは光路長が異なっている。ディレイライン201の長さは、例えば、 $6\text{ m} (= \text{光速} / \text{同期周波数})$ である。光路ULおよび光路USの光路長をLULおよびLUSと表すと、 $LUL > LUS$ である。光路ULにはフィルタ31が設けられている。光路USにはフィルタ32が設けられている。第3実施形態において、フィルタ30は周波数0および1の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。フィルタ31は周波数1の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。フィルタ32は周波数0の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。光カプラ52は、光路ULおよび光路USを伝搬してきた光を単一の光路を伝播する光に合成する。

【0035】

光路L上には光カプラ61および光カプラ62が設けられている。光カプラ61は、入力された光を光路LL（第4副光路の一例）および光路LS（第3副光路の一例）の2つの光路を伝播する光に分割する。光路LLは光路長変更機構、この例ではディレイライン202を含んでおり、光路LLと光路LSとは光路長が異なっている。ディレイライン202の長さは、例えば、光路ULと同様に6mである。光路LLおよび光路LSの光路長をLLLおよびLLSと表すと、 $LLL > LLS$ である。光路LLにはフィルタ41が設けられている。光路LSにはフィルタ42が設けられている。第3実施形態において、フィルタ40は周波数0および1の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。フィルタ41は周波数0の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。フィルタ42は周波数1の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。光カプラ62は、光路LLおよび光路LSを伝搬してきた光を単一の光路を伝播する光に合成する。

【0036】

この例で、光コム発生器10から検出器70までの光路のうち、光路ULを経由する光路と光路LLを経由する光路とは同一の光路長（長い光路）を有している。同様に、光コム発生器10から検出器70までの光路のうち、光路USを経由する光路と光路LSを経由する光路とは同一の光路長（短い光路）を有している。第3実施形態においては、この「短い光路」を光路Aと表し、「長い光路」を光路Bと表す。

【0037】

いま、周波数0の光が光路Uを伝播した場合を考える。光路Uを伝播する光は、光カ

プラ51において光路ULと光路USを伝播する光に分割される。光路ULにおいては、フィルタ31により周波数 0 の光は透過されない。光路USにおいては、フィルタ32により周波数 0 の光が透過される。結局、検出器70は、光路US（短い光路 = 光路A）を經由した周波数 0 の光を観測する。ここで、光路Uのうち光コム発生器10から光カプラ51までの部分を伝播した光の状態を | 上 > と表す。光カプラ51に到達する前の光を入力、検出器70が観測する光を出力と考えると、入力された光の状態は | 0 > | 上 > であり、出力される光の状態は | 0 > | A > である。他の周波数の光、他の光路を伝播した光についても同様に考えることができ、入力光の状態と出力光の状態を入力 出力と表すと、

$$\begin{array}{ll}
 | 0 > | 上 > & | 0 > | A > \\
 | 0 > | 下 > & | 0 > | B > \\
 | 1 > | 上 > & | 1 > | B > \\
 | 1 > | 下 > & | 1 > | A > \quad (7)
 \end{array}$$

10

である。なお、| 下 > は光路Lのうち光コム発生器10から光カプラ61までの部分を伝播した光の状態を示している。光路の状態に関し、| 上 > および | 下 > をそれぞれ | 0 > および | 1 > としてビットを定義すると（| 上 > および | 下 > 以外のビットの定義は第1実施形態と同様）、式（7）は以下のように表される。

$$\begin{array}{ll}
 | 0 > | 0 > & | 0 > | 0 > \\
 | 0 > | 1 > & | 0 > | 1 > \\
 | 1 > | 0 > & | 1 > | 1 > \\
 | 1 > | 1 > & | 1 > | 0 > \quad (8)
 \end{array}$$

20

第1ビットを制御ビット、第2ビットを操作ビット（標的ビット）として見ると、式（8）は、制御ビットが | 0 > のときは操作ビットの値を維持し、制御ビットが | 1 > のときは操作ビットの値を反転する演算を示している。すなわち、式（8）は、いわゆる制御NOT回路（制御NOTゲートまたはCNOTともいう）の真理値表を示しており、量子コンピュータ3が制御NOT回路として機能していることがわかる。

【0038】

以上のように、量子コンピュータ3によれば、制御NOT回路が提供される。制御NOT回路は量子計算におけるユニバーサルゲートの一つであり、ユニタリーゲートと組み合わせることによりどのような量子計算も可能であることが知られている。

30

【0039】

ユニタリーゲートの構成は種々のものが可能である。例えば、図3の構成において、BPF40と光カプラ60との間に位相変調器（フェーズシフタ）を設けたものがユニタリーゲートとして用いられる。光路Bを通る光に対して、この位相変調器により 0 の位相変調を与えると、光の状態（波動関数）は、exp(-i 0 t) から以下のように変化する。

$$\begin{aligned}
 \exp(-i 0 t) &= \exp(-i 0 t - i \pi) \\
 &= \exp(-i 0 t) \times \exp(-i \pi) \\
 &= -\exp(-i 0 t) \quad (9) \\
 (\exp(-i \pi) &= -1)
 \end{aligned}$$

40

つまり、この位相変調器により光路Bを通る光の状態は、

$$| 0 > | B > \rightarrow - | 0 > | B > \quad (10)$$

と変換される。このとき、検出器70が検出する状態は式（6）で示されたものとは符号が反転しており、

$$| 1 > | A > - | 0 > | B > = | 1 > | 0 > - | 0 > | 1 > \quad (11)$$

となっている。これは、ユニタリー変換を表している。

【0040】

4. 第4実施形態

図5は、第4実施形態に係る量子コンピュータ4の構成を示す図である。量子コンピュータ4は、3量子ビットに相当する状態を生成する。量子コンピュータ4は、光コム発生

50

器 10、光カプラ 20、フィルタ 30、フィルタ 40、検出器 70、ファイバー F、偏光制御素子 101（第 1 偏光制御素子の一例）、偏光制御素子 102（第 2 偏光制御素子の一例）、および偏光制御素子 103（第 3 偏光制御素子の一例）を含む。

【0041】

量子コンピュータ 4 において、光コム発生器 10 と光カプラ 20 との間には、偏光制御素子 101 が設けられている。偏光制御素子 101 は、透過した光の偏光状態を円偏光にする素子である。光カプラ 20 は、偏光制御素子 101 を透過した光を、光路 A と光路 B の 2 つの光路を伝播する光に分割する。光路 A は、光カプラ 20 から検出器 70 までの光路である。光路 B は、光カプラ 20 から検出器 70 までの光路であって、光路 A とは異なるファイバー F を介したものである。光路 B には光路長変更機構としてディレイライン 203 が設けられている。ディレイライン 203 の長さは、例えば、6 m（= 光速 / 同期周波数）である。ディレイライン 203 により光路 A と光路 B とは、その長さが異なっており、光路長 $L_A < L_B$ である。光路 A には、光コム発生器 10 に近い方から順に、偏光制御素子 102 およびフィルタ 30 が設けられている。偏光制御素子 102 は、透過した光の偏光状態を縦偏光にする素子である。この例で、フィルタ 30 は周波数 0 および 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。光路 B には、光コム発生器 10 に近い方から順に、偏光制御素子 103 およびフィルタ 40 が設けられている。偏光制御素子 103 は、透過した光の偏光状態を横偏光にする素子である。この例で、フィルタ 40 は周波数 0 および 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。

【0042】

縦偏光の状態を $|縦\rangle$ 、横偏光の状態を $|横\rangle$ と表すと、光路 A を伝播する光の状態は、

$$|0\rangle |A\rangle |縦\rangle + |1\rangle |A\rangle |縦\rangle \quad (12)$$

で表される。同様に、光路 B を伝播する光の状態は、

$$|0\rangle |B\rangle |横\rangle + |1\rangle |B\rangle |横\rangle \quad (13)$$

で表される。偏光の状態に関し、 $|縦\rangle$ および $|横\rangle$ をそれぞれ $|0\rangle$ および $|1\rangle$ としてビットを定義すると（他のビットの定義は第 1 実施形態と同様）、検出器 70 が観測する光の状態は、

$$|0\rangle |0\rangle |0\rangle + |1\rangle |0\rangle |0\rangle + |0\rangle |1\rangle |1\rangle + |1\rangle |1\rangle |1\rangle \quad (14)$$

と表される。ここで、第 1 ビットは周波数を、第 2 ビットは光路を、第 3 ビットは偏光状態を示している。この状態は 4 状態の重ね合わせであり、3 量子ビットの一つの表現である。

【0043】

以上で説明したように、量子コンピュータ 4 によれば、量子コンピュータ 2 と同様に 3 量子ビットのエンタングルに相当する状態を生成することができる。

【0044】

5. 第 5 実施形態

図 6 は、第 5 実施形態に係る量子コンピュータ 5 の構成を示す図である。量子コンピュータ 5 は、量子情報を暗号化する機能を有する。量子コンピュータ 5 は、光コム発生器 10、光カプラ 20、フィルタ 30、フィルタ 40、光カプラ 50、光カプラ 60、検出器 70、検出器 80、検出器 90、ファイバー F、および音響光学素子 111 を含む。

【0045】

光カプラ 20 は、光コム発生器 10 から出力された光を、光路 A と光路 B の 2 つの光路を伝播する光に分割する。光路 A は、光カプラ 20 から検出器 70 までの光路である。光路 B は、光カプラ 20 から検出器 70 までの光路であって、光路 A とは異なるファイバー F を介したものである。光路 B には光路長変更機構としてディレイラインが設けられている。ディレイライン 206 の長さは、例えば、6 m（= 光速 / 同期周波数）である。ディレイライン 206 により光路 A と光路 B とは、その長さが異なっており、光路長 $L_A < L_B$ である。光路 A には、光コム発生器 10 に近い方から順に、フィルタ 30 および

音響光学素子 1 1 1 が設けられている。音響光学素子 1 1 1 は、周波数 0 の光および周波数 1 の光の周波数を、+ 変調する素子である。この例で、フィルタ 3 0 は周波数 0 および 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。光路 B には、フィルタ 4 0 が設けられている。この例で、フィルタ 4 0 は周波数 0 および 1 の光を透過し、他の周波数の光を透過しない。

【 0 0 4 6 】

量子コンピュータ 5 において、情報の送信者は、変調周波数 を送信したい情報として用いる。この例で、検出器 7 0 および検出器 8 0 は正当な受信者の装置であり、検出器 9 0 は通信を傍受しようとする盗聴者が用いる装置である。

【 0 0 4 7 】

光路 A において、周波数 0 の光および周波数 1 の光の周波数は、それぞれ + 変調され、周波数 0 ' (= 0 +) および周波数 1 ' (= 1 +) になる。検出器 8 0 はこれらの光の合成波を観測する。この合成波のビート周波数 B は、これら 2 つの光の周波数の差、すなわち、

$$B = 1' - 0' \\ = 1 - 0 \quad (15)$$

である。これに対し、検出器 7 0 は、周波数 0、1、0' および 1' の 4 つの光の合成波を観測する。この合成波のビート周波数は、次式のように B 1、B 2 および B 3 の 3 つである。

$$B 1 = 1 - 0 \quad (16)$$

$$B 2 = 1 - (0 +) \quad (17)$$

$$B 3 = (1 +) - 0 \quad (18)$$

式 (16) ~ (18) を用いると、受信したい情報は次式により得られる。

$$= B 1 - B 2 = B 3 - B 1 \quad (19)$$

すなわち、検出器 8 0 で観測されるビート周波数を鍵として用いると、検出器 7 0 で観測されるビート周波数から情報を取り出すことができる。

【 0 0 4 8 】

一方、検出器 9 0 が観測する光のビート周波数も $B = 1 - 0$ であるが、これだけでは送信者が送信した情報を取り出すことができない。このように、量子コンピュータ 5 によれば、送信者が送信した情報は暗号化されている。

【 0 0 4 9 】

ここでは検出器 9 0 が盗聴者の装置であると仮定した場合について説明したが、検出器 8 0 が盗聴者の装置であり検出器 9 0 が正当な受信者の装置であると仮定した場合にも同様に送信者が送信した情報は暗号化されている。

【 0 0 5 0 】

6 . 他の実施形態

本発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、種々の変形実施が可能である。以下、変形例をいくつか説明する。以下の変形例のうち 2 つ以上のものが組み合わせて用いられてもよい。

【 0 0 5 1 】

量子コンピュータ 1 および 2 において、検出器 8 0 および 9 0 は省略されてもよい。

図 2 で説明した光コムの特性は例示であり、光コムの特性はこれに限定されない。光コムのうちどのピーク周波数を周波数 0 および 1 として用いるかは自由である。2 つ以上の周波数を用いて多数の重ね合わせ状態を生成することもできる。

実施形態で説明した量子ビットの定義は例示であり、これに限定されない。どの状態を $| 0 \rangle$ および $| 1 \rangle$ のどちらに割り当てるかは自由である。

光を伝播する媒体はファイバー F に限定されない。空気等、ファイバー F 以外の媒体を介して光が伝播されてもよい。この場合において、光を分割する分割手段として光カブラの代わりに、ビームプリズムスプリッターが用いられてもよい。

量子コンピュータ 4 において、偏光制御素子 1 0 2 とフィルタ 3 0 の位置は入れ替えら

10

20

30

40

50

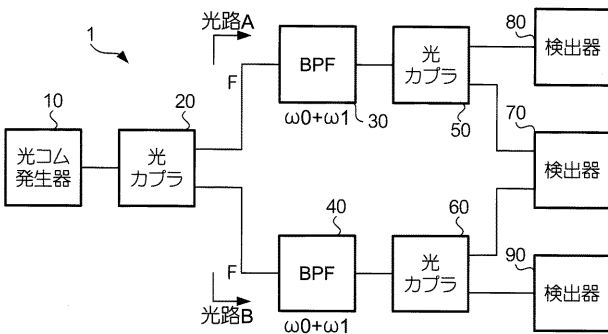
れてもよい。偏光制御素子 103 とフィルタ 40 についても同様である。

【符号の説明】

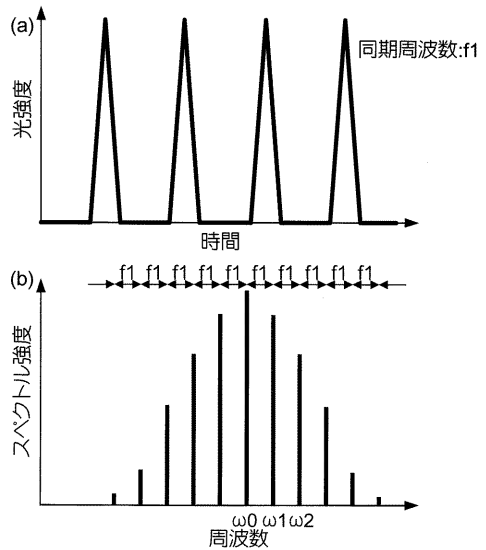
【0052】

1 量子コンピュータ、2 量子コンピュータ、3 量子コンピュータ、4 量子コンピュータ、5 量子コンピュータ、10 光コム発生器、20 光カプラ、30 フィルタ、31 フィルタ、32 フィルタ、40 フィルタ、41 フィルタ、42 フィルタ、50 光カプラ、51 光カプラ、52 光カプラ、60 光カプラ、61 光カプラ、62 光カプラ、70 検出器、80 検出器、90 検出器、101 偏光制御素子、102 偏光制御素子、103 偏光制御素子、111 音響光学素子、201 ディレイライン、202 ディレイライン、203 ディレイライン、206 ディレイライン

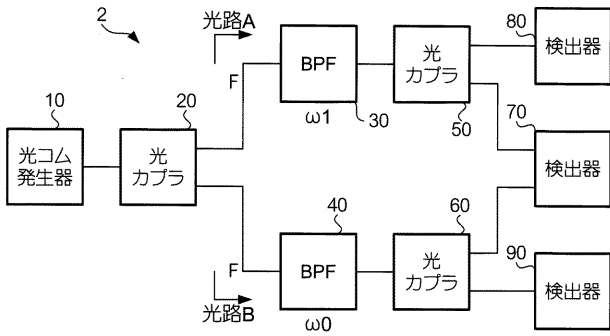
【図1】



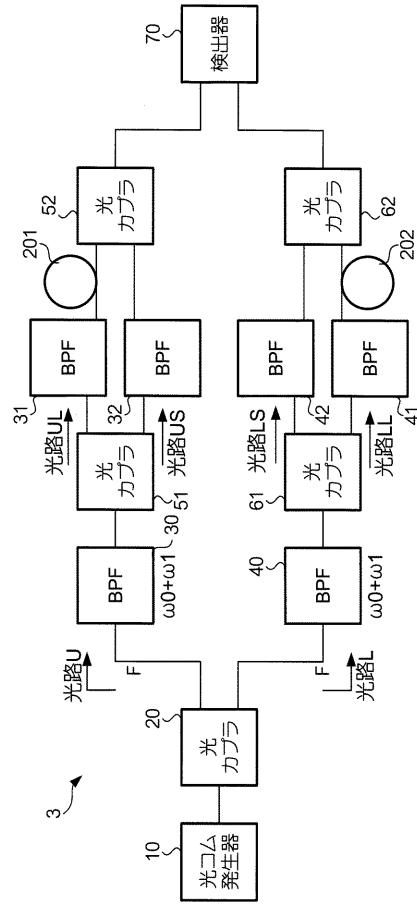
【図2】



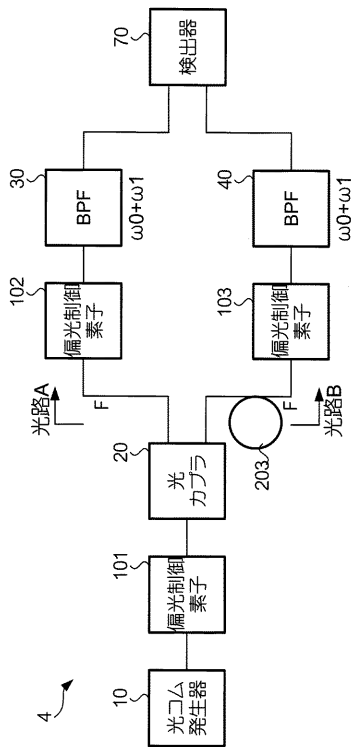
【図3】



【図4】



【図5】



【図6】

