

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5091813号  
(P5091813)

(45) 発行日 平成24年12月5日(2012.12.5)

(24) 登録日 平成24年9月21日(2012.9.21)

(51) Int.Cl. F I  
G O 2 F 3/00 (2006.01) G O 2 F 3/00

請求項の数 9 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2008-238381 (P2008-238381)	(73) 特許権者	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日	平成20年9月17日(2008.9.17)	(74) 代理人	100108855 弁理士 蔵田 昌俊
(65) 公開番号	特開2010-72233 (P2010-72233A)	(74) 代理人	100091351 弁理士 河野 哲
(43) 公開日	平成22年4月2日(2010.4.2)	(74) 代理人	100088683 弁理士 中村 誠
審査請求日	平成23年3月23日(2011.3.23)	(74) 代理人	100109830 弁理士 福原 淑弘
		(74) 代理人	100075672 弁理士 峰 隆司
		(74) 代理人	100095441 弁理士 白根 俊郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子ゲート方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

共振器中の複数の物理系を物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  は 2 以上の整数) とし、それぞれの物理系  $i$  の有する 2 つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し (状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた 2 つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  とし、状態  $|2\rangle_i$  と  $|3\rangle_i$  との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、

前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ ,  $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の 2 つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{\text{hom}}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{\text{hom}}$  よりも大きいエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_k) - E(|v\rangle_k)| > E_{\text{hom}}$ ,  $u, v \in \{2, 3, 4, 5\}$ ,  $u \neq v$ ,  $E(|s\rangle)$  は状態  $s$  のエネルギーを表す) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移し、

前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|4\rangle_k$  間の遷移および状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴する光を利用して、物理系間のアダバティック・パッセージを行い、

前記  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行い、

状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  に移すことを特徴とする量子ゲート方法。

【請求項2】

共振器中の複数の物理系を物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$  は2以上の整数) とし、それぞれの物理系  $i$  の有する2つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  として、状態  $|2\rangle_i$  と  $|3\rangle_i$  との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、

前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ 、 $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の2つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{\text{hom}}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{\text{hom}}$  以上のエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  であって、異なる物理系の間で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{\text{hom}}$  よりも大きい状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_q) - E(|v\rangle_r)| > E_{\text{hom}}$ 、 $u, v \in \{4, 5\}$ 、 $q, r \in \{j(1), j(2), \dots, j(m)\}$ 、 $q \neq r$ ) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移し、

前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|4\rangle_k$  間の遷移および状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴する光を利用して物理系間のアディバティック・パッセージを行い、

前記  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行い、

状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  に移すことを特徴とする量子ゲート方法。

【請求項3】

共振器中の複数の物理系を物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$  は2以上の整数) とし、それぞれの物理系  $i$  の有する2つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  として、状態  $|2\rangle_i$  と  $|3\rangle_i$  との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、

前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ 、 $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態  $|2\rangle_k$  と  $|3\rangle_k$  のうちのエネルギーの低い方の状態を  $|2\rangle_k$  とし、かつ状態  $|2\rangle_k$  として、状態  $|0\rangle_k$  あるいは状態  $|1\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{\text{hom}}$  よりも大きい状態を用い、状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  のうち状態  $|2\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{\text{hom}}$  よりも大きい状態を残してもう片方を状態  $|2\rangle_k$  に移し、

前記共振器モードと共鳴する単一光子を外部から入射させ、量子ビット間の量子ビットゲートを行い、

前記  $m$  個の量子ビット間での単一光子と共振器モードとを利用した量子ビットゲートの終了後に、状態  $|2\rangle_k$  を、状態  $|0\rangle_k$  と  $|1\rangle_k$  のうちの単一光子入射前に状態  $|2\rangle_k$  へ移された状態に戻すことを特徴とする量子ゲート方法。

【請求項4】

前記物理系が結晶中の希土類イオンであり、量子ビットを表す2つの状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  が電子基底状態の超微細構造分裂で分離した2つの状態であり、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の一方の状態が  $4f$  電子の状態でもう一方の状態が  $5d$  電子の状態であることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の量子ゲート方法。

【請求項5】

10

20

30

40

50

状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  あるいは状態  $|2\rangle_k$  に移すために、状態  $|0\rangle_k$  と  $|4\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射し、また、状態  $|1\rangle_k$  と  $|5\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射するか、または、状態  $|1\rangle_k$  と  $|2\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射して、2状態間のアディアバティック・パッセージを利用することを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の量子ゲート方法。

【請求項6】

状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  あるいは状態  $|2\rangle_k$  に移すために、状態  $|0\rangle_k$  と  $|4\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射し、また、状態  $|1\rangle_k$  と  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射するか、または、状態  $|1\rangle_k$  と  $|2\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射するかして、パルス光が共鳴する遷移の2状態を入れ替えることを利用することを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の量子ゲート方法。

【請求項7】

共振器と、

前記共振器中に含まれる複数の物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$ は2以上の整数)であって、物理系  $i$  の有する2つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  を有する物理系  $i$  と、

前記共振器の共振器モードが物理系  $i$  の有する、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移に共鳴し、前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ 、 $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の2つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{\text{hom}}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{\text{hom}}$  よりも大きいエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_k) - E(|v\rangle_k)| > E_{\text{hom}}$ 、 $u, v \in \{2, 3, 4, 5\}$ 、 $u \neq v$ 、 $E(|s\rangle)$  は状態  $s$  のエネルギーを表す)に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移し、前記  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートの終了後に、状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  に移すための第1光源と、

前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|4\rangle_k$  間の遷移および状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴する光を利用して物理系間のアディアバティック・パッセージを行うための第2光源と、

前記第1光源および前記第2光源から発生する光の時間波形を制御する制御部を具備することを特徴とする量子ゲート装置。

【請求項8】

共振器と、

前記共振器中の複数の物理系を物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$ は2以上の整数)であって、物理系  $i$  の有する2つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  を有する物理系  $i$  と、

前記共振器の共振器モードが物理系  $i$  の有する、均一幅  $E_{\text{hom}}$  が状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移に共鳴し、前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ 、 $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビ

10

20

30

40

50

ット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の 2 つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{h.o.m.}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{h.o.m.}$  以上のエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  であって、異なる物理系の間で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{h.o.m.}$  よりも大きい状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_q) - E(|v\rangle_r)| > E_{h.o.m.}$ 、 $u, v \in \{4, 5\}$ 、 $q, r \in \{j(1), j(2), \dots, j(m)\}$ 、 $q \neq r$ ) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移し、前記  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートの終了後に、状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  に移すための第 1 光源と、

10

前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|4\rangle_k$  間の遷移および状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴する光を利用して物理系間のアダバティック・パッセージを行うための第 2 光源と、

前記第 1 光源および前記第 2 光源から発生する光の時間波形を制御する制御部を具備することを特徴とする量子ゲート装置。

#### 【請求項 9】

共振器と、

前記共振器中に含まれる複数の物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$  は 2 以上の整数) であって、物理系  $i$  の有する 2 つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  (状態の添え字はその状態を有する物理系を示す) で量子ビットを表す物理系  $i$  と、

20

前記共振器の共振器モードが物理系  $i$  の有する、均一幅  $E_{h.o.m.}$  が状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移に共鳴し、前記物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ 、 $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態  $|2\rangle_k$  と  $|3\rangle_k$  のうちのエネルギーの低い方の状態を  $|2\rangle_k$  とし、かつ状態  $|2\rangle_k$  として、状態  $|0\rangle_k$  あるいは状態  $|1\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{h.o.m.}$  以上である状態を用い、状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  のうち状態  $|2\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{h.o.m.}$  以上である状態を残してもう片方を状態  $|2\rangle_k$  に移し、前記  $m$  個の量子ビット間での単一光子と共振器モードとを利用した量子ビットゲートの終了後に、状態  $|2\rangle_k$  を、状態  $|0\rangle_k$  と  $|1\rangle_k$  のうちの単一光子入射前に状態  $|2\rangle_k$  へ移された状態に戻すための第 3 光源と、

30

前記共振器モードと共鳴させた単一光子を外部から入射させ、量子ビット間の量子ビットゲートを行うための第 4 光源と、

前記第 3 光源と前記第 4 光源から発生する光の時間波形を制御する制御部を具備することを特徴とする量子ゲート装置。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本発明は、共振器モードを利用する量子ゲートにおける量子ゲート方法および装置に関する。

40

#### 【背景技術】

#### 【0002】

結晶中の希土類イオンの核スピンの状態は、固体としては特異的に長いコヒーレンス時間を持ち (4 K で約  $500 \mu s$ 、磁場印加で  $82 ms$ 、 $rf$  パルス列印加で  $30 s$ ) かつ光で制御や読出しができるため、量子情報処理デバイスの固体での実現に極めて適している。この結晶中の核スピンを量子ビットとして利用する際に、相互の結合に共振器モードを利用して、量子ビット数に拡張性のある量子コンピュータを構築する、周波数領域量子コンピュータが提案されている (例えば非特許文献 1 参照)。しかしながら従来の技術では、共振器モードとの結合に振動子強度の非常に小さい  $f - f$  遷移の利用が想定されていたため、結合定数  $g$  を量子ビット間の 2 量子ビットゲート (あるいは多量子ビットゲート

50

)に十分な大きさにすることが困難である。

【0003】

f - f 遷移の利用が想定されていたのは、量子ビットは、コヒーレンス時間の長い電子基底状態の核スピンの状態で表すという前提のもと、以下の2つの条件を満たすためである。(1)単一イオン内の状態(量子ビットの基底状態である $|0\rangle$ と $|1\rangle$ など)を光遷移のエネルギーで区別するために、利用する光遷移の均一幅が核スピンによる分裂幅(10~100MHz)以下でなくてはならない。(2)量子ビット間の区別を光遷移のエネルギーで行うため、利用する光遷移の均一幅が量子ビット間の区別に使うエネルギー差以下(超微細構造の不均一分布を利用して区別する場合、数kHz程度以下。光遷移の不均一幅を利用して区別する場合、数GHz程度以下)でなければならない。

10

【非特許文献1】Opt. Commun. 196, 119(2001).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本来禁制の遷移が結晶場でわずかに許容になったf - f 遷移に対し、本来許容のf - d 遷移が利用できれば、結合定数の点ではるかに有利(約1000倍)である。しかし、f - d 遷移は大きな均一幅(30THz程度以下)を持つため、f - d 遷移を利用しつつ上記(1)、(2)に記述されているエネルギーの区別を実現する方法は知られていない。

【0005】

本発明の目的は、共振器モードと遷移双極子モーメントが大きく均一幅の大きな遷移との強い結合を量子ゲートに利用する量子ゲート方法および装置を提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0006】

上述の課題を解決するため、本発明の量子ゲート方法は、共振器中の複数の物理系を物理系 $i$ ( $1 \leq i \leq n$ ,  $n$ は2以上の整数)とし、それぞれの物理系 $i$ の有する2つの状態 $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$ で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅 $E_{hom}$ が、状態 $|0\rangle_i$ と $|1\rangle_i$ の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態 $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$ として、状態 $|2\rangle$ と $|3\rangle$ との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、前記物理系 $i$ のうちの $m$ 個の物理系 $k$ ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m), 2 \leq m \leq n$ )で表される $m$ 個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系 $k$ の2つの状態であって、同一の物理系 $k$ の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅 $E_{hom}$ よりも大きく、それぞれが状態 $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$ のいずれとも $E_{hom}$ よりも大きいエネルギー差を持つ状態 $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$ ( $|E(|u\rangle_k) - E(|v\rangle_k)| > E_{hom}$ 、 $u, v \in \{2, 3, 4, 5\}$ 、 $u \neq v$ 、 $E(|s\rangle)$ は状態 $s$ のエネルギーを表す)に、それぞれ $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$ で表していた量子ビットの状態を移し、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態 $|3\rangle_k$ と状態 $|4\rangle_k$ 間の遷移および状態 $|3\rangle_k$ と状態 $|5\rangle_k$ の間の遷移に共鳴する光を利用して、物理系間のアダバティック・パッセージを行い、前記 $m$ 個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行い、状態 $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$ で表していた量子ビットの状態を状態 $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$ に移すことを特徴とする。

30

40

【0007】

本発明の量子ゲート方法は、共振器中の複数の物理系を物理系 $i$ ( $1 \leq i \leq n$ ,  $n$ は2以上の整数)とし、それぞれの物理系 $i$ の有する2つの状態 $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$ で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅 $E_{hom}$ が、状態 $|0\rangle_i$ と $|1\rangle_i$ の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態 $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$ として、状態 $|2\rangle$ と $|3\rangle$ との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、前記物理系 $i$ のうちの $m$ 個の物理系 $k$ ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$

50

)、 $2 \times m \times n$ )で表される $m$ 個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系 $k$ の2つの状態であって、同一の物理系 $k$ の中で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{h.o.m.}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{h.o.m.}$  以上のエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  であって、異なる物理系の間で相互のエネルギーの差が前記均一幅  $E_{h.o.m.}$  よりも大きい状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_q) - E(|v\rangle_r)| > E_{h.o.m.}$ 、 $u, v \in \{4, 5\}$ 、 $q, r \in \{j(1), j(2), \dots, j(m)\}$ 、 $q \neq r$ ) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移し、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態の片方の状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|4\rangle_k$  間の遷移および状態  $|3\rangle_k$  と状態  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴する光を利用して物理系間のアディアバティック・パッセージを行い、前記 $m$ 個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行い、状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  に移すことを特徴とする。

10

#### 【0008】

本発明の量子ゲート方法は、共振器中の複数の物理系を物理系 $i$  ( $1 \leq i \leq n$ 、 $n$ は2以上の整数)とし、それぞれの物理系 $i$ の有する2つの状態  $|0\rangle_i$ 、 $|1\rangle_i$  で量子ビットを表し(状態の添え字はその状態を有する物理系を示す)、それぞれの物理系に対し、均一幅  $E_{h.o.m.}$  が、状態  $|0\rangle_i$  と  $|1\rangle_i$  の間のエネルギー差よりも大きい遷移で結ばれた2つの状態であって、相互のエネルギーの差が該均一幅よりも大きい状態を状態  $|2\rangle_i$ 、 $|3\rangle_i$  として、状態  $|2\rangle_i$  と  $|3\rangle_i$  との間の遷移に共通の共振器モードを共鳴させ、前記物理系 $i$ のうちの $m$ 個の物理系 $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ )、 $2 \times m \times n$ )で表される $m$ 個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、前記共振器モードと共鳴させた遷移で結ばれた状態  $|2\rangle_k$  と  $|3\rangle_k$  のうちのエネルギーの低い方の状態を  $|2\rangle_k$  とし、かつ状態  $|2\rangle_k$  として、状態  $|0\rangle_k$  あるいは状態  $|1\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{h.o.m.}$  よりも大きい状態を用い、状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  のうち状態  $|2\rangle_k$  とのエネルギー差が  $E_{h.o.m.}$  よりも大きい状態を残してもう片方を状態  $|2\rangle_k$  に移し、前記共振器モードと共鳴する単一光子を外部から入射させ、量子ビット間の量子ビットゲートを行い、前記 $m$ 個の量子ビット間での単一光子と共振器モードとを利用した量子ビットゲートの終了後に、状態  $|2\rangle_k$  を、状態  $|0\rangle_k$  と  $|1\rangle_k$  のうちの単一光子入射前に状態  $|2\rangle_k$  へ移された状態に戻すことを特徴とする。

20

30

#### 【発明の効果】

#### 【0009】

本発明の量子ゲート方法および装置によれば、共振器モードと遷移双極子モーメントが大きく均一幅の大きな遷移との強い結合を量子ゲートに利用することができる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0010】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態に係る量子ゲート方法および装置について詳細に説明する。なお、以下の実施形態では、同一の番号を付した部分については同様の動作を行うものとして、重ねての説明を省略する。

40

#### 【0011】

本実施形態の量子ゲート装置について図1を参照して説明する。

本実施形態の量子ゲート装置は、光源部101、光制御部102、共振器付き結晶103、クライオスタット104を含む。

#### 【0012】

光源部101は、レーザーを生成しこのレーザーのスペクトル幅を搾取化する。光源部101は例えば9種類のレーザーを生成する。

光制御部102は、光学効果素子を使用してレーザーの周波数および強度を設定する。

共振器付き結晶103は、内部に結晶(例えば希土類イオンを含む酸化物結晶)を有し

50

ていて特定の共鳴周波数を持つ光に共鳴する。

クライオスタット104は、内部の温度を低温（例えば1.5 K）に保つ。クライオスタット104の内部には共振器付き結晶103が設置されている。

それぞれの具体的な動作は後に実施例で説明する。

#### 【0013】

次に、本発明により、通常はエネルギー差が小さくコヒーレンス時間の長い状態で表されている量子ビットに対して、均一幅の大きな遷移と共振器モードとの強い結合を利用しつつ、量子ビットを表す状態を量子ビット内、および量子ビット間において遷移エネルギーで区別できるようにし、量子ゲートが可能になる機構を説明する。また、量子ビットを表す物理系と共振器モードとの結合が強くなることにより、量子ゲートの性能が向上する（失敗確率が減少する）機構も説明する。

10

#### 【0014】

エネルギー差の小さい2状態で量子ビットを表し、量子ビットの操作に光を使う場合の量子ゲートについて図2を参照して説明する。例えば、酸化物結晶中の希土類イオンの超微細構造分裂で分離した核スピンの状態を量子ビットとして利用する場合が相当する。

#### 【0015】

量子ゲートでは、一つの量子ビット内で量子ビットの量子状態を操作する場合がある。その際、量子ビットを表す複数の量子状態（例えば量子ビットの基底）を区別して操作する必要がある。図2(a)に、量子ビットを表す状態 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ を $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移および $|1\rangle - |e\rangle$ 間遷移にそれぞれ共鳴する光1、光2を照射し操作する様子を示す。その際、照射する2つの光の強度の時間変化などを光1、光2のそれぞれに対して制御し、量子ビットを操作するので、光1、光2は、それぞれ $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移、 $|1\rangle - |e\rangle$ 間遷移にのみ共鳴するのが望ましい。そのために $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移、 $|1\rangle - |e\rangle$ 間遷移の均一幅は状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ のエネルギー差よりも小さい必要がある。

20

#### 【0016】

また、量子ゲートには、2量子ビット間の操作が必要である。その際、量子ビットを遷移周波数の違いで区別し操作するためには、量子ゲートを行う2つの量子ビットの間での遷移周波数の違いよりも、操作に利用する遷移の均一幅が狭い必要がある。図2(b)にその様子を示す。図2(b)中の物理系1と物理系2の $|A\rangle - |e\rangle$ 間遷移は共通の共振器モードに共鳴し、これにより2量子ビット間の操作が可能になっている。（その前にいくつかの操作が必要であるが）物理系1の $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移に光3を、物理系2の $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移に光4を共鳴させて2量子ビット間の操作を行うためには、物理系1と物理系2との間での $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移周波数の差よりも、 $|0\rangle - |e\rangle$ 間遷移の均一幅が小さい必要がある。

30

#### 【0017】

さらに、2量子ビット間のゲートに利用する共振器モードとの結合が $|A\rangle - |e\rangle$ 間遷移にのみ共鳴するためには、 $|A\rangle - |e\rangle$ 間遷移の均一幅が（図2(b)で示されている場合では）状態 $|0\rangle$ と $|A\rangle$ との間および $|1\rangle$ と $|A\rangle$ との間のエネルギー差よりも小さい必要がある。

40

#### 【0018】

このように、量子ビット内あるいは量子ビット間で量子ビットを表す状態をエネルギーで区別して操作をするために、操作に利用する遷移の均一幅が、量子ビットを通常あるいは一時的に表す状態間のエネルギー差よりも小さい必要がある。

#### 【0019】

次に、量子ビットの操作に利用する遷移の均一幅が量子ビットを表す状態間のエネルギー差よりも大きい場合について図3を参照して説明する。

この場合、量子ビット内での量子ビットを表す状態の区別（図3(a)の光1と光2に共鳴する状態の区別や、図3(b)の光3、光4に共鳴する状態と共振モードに共鳴する状態との区別）ができなくなり、また量子ビット間での量子ビットを表す状態の区別（図

50

3 ( b ) の光 3 と光 4 に共鳴する状態が属する物理系の区別) もできなくなる。

【 0 0 2 0 】

ところで、上記の量子状態間の区別という点では、量子ビット操作に利用する遷移の均一幅は狭い方が有利である。しかし、後述するように、量子ゲートの成功確率、量子ゲートに必要な時間等の点では、共振器モードと量子ビット操作に利用する遷移との結合が強い方が有利であり、そのためには遷移双極子モーメントが大きな遷移の利用が望ましく、その結果、遷移は少なくとも遷移確率に応じた大きな均一幅を持つことになる。

【 0 0 2 1 】

本発明では、量子ビットを表している状態間のエネルギー差が小さい場合でも、共振器モードとの結合に遷移双極子モーメントの大きな遷移を用いて、性能の高い量子ゲートを実現するために、以下の方法を用いる。

2量子ビット間のゲート操作で遷移双極子モーメントが大きく均一幅の大きな遷移と強く結合した共振器モードを利用する時に、エネルギー差の小さい状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  で表していた量子ビットを、エネルギー差が利用する遷移の均一幅よりも大きなエネルギー差を持つ2状態  $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$  に移す。後ほど本発明を用いた2種類の量子ゲートの方法の例を説明するが、その中の第2の量子ゲートの方法では、 $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  の一方の状態を共振器モードと共鳴する遷移の2状態のうちの一つである状態  $|2\rangle$  に移し、残りの状態と  $|2\rangle$  とのエネルギー差を利用する遷移の均一幅よりも大きくするだけでもよい。

【 0 0 2 2 】

例えば、ある物理系  $k$  の状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  あるいは状態  $|2\rangle_k$  に移すために、状態  $|0\rangle_k$  と  $|4\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射し、また、状態  $|1\rangle_k$  と  $|5\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射するか、または、状態  $|1\rangle_k$  と  $|2\rangle_k$  の間の遷移への共鳴を横切るように周波数を変化させた光を照射して、2状態間のアディアバティック・パッセージを利用する。他に、状態  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  あるいは状態  $|2\rangle_k$  に移すために、状態  $|0\rangle_k$  と  $|4\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射し、また、状態  $|1\rangle_k$  と  $|5\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射するか、または、状態  $|1\rangle_k$  と  $|2\rangle_k$  の間の遷移に共鳴するパルス光を照射するかして、パルス光が共鳴する遷移の2状態を入れ替えることを利用してもよい。

【 0 0 2 3 】

これらの状態で、共振器モードを利用した操作を行い、2量子ビット間の共振器モードを利用した操作が終わった後、 $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$  あるいは  $|2\rangle$  に移していた状態を、それぞれ  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  あるいは移動前に量子ビットを表していた状態の片方に戻す。

【 0 0 2 4 】

一般に、量子ビットを表す2状態は、コヒーレンス時間の長い状態が選択されており、それを  $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$ 、 $|2\rangle$  などの他の状態に移すと、その間デコヒーレンス(コヒーレンスの劣化)が早く進む場合が多いと考えられる。しかし強い共振器モードと物理系との結合による速いゲートが可能になるため、他の状態に移している間のコヒーレンス時間でも、十分長いと見なすことができるようになる。

【 0 0 2 5 】

2量子ビット間の量子ゲートの方法として、例えば以下の2つの方法がある。

第1の方法は、共通の共振器モードに共鳴することで繋がれた量子ビットを古典的な光(コヒーレント光)で操作して、2量子ビット間の量子ゲートを行う方法である。図4を用いてこの方法を説明する。

【 0 0 2 6 】

この方法では、お互いの状態間の遷移双極子モーメントが小さく、遷移の均一幅の狭い複数の状態(A状態と呼ぶ)と、A状態との遷移双極子モーメントが大きく、A状態との遷移の均一幅( $E_{h.o.m.}$ )が広い状態(B状態と呼ぶ)とを有する複数の物理系を用いる。A状態の中の、エネルギー差  $E_{qubit}$  の2つの状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  で、2量

10

20

30

40

50



子ビットゲート操作中ではない物理系の量子ビットが表されている。通常、状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  は  $E_{\text{qubit}}$  が小さく、コヒーレンス時間の長い状態である。すなわち、 $E_{\text{homo}} > E_{\text{qubit}}$  を満たす。このような複数の物理系が光共振器の中に入れられ、それぞれの物理系の A 状態の中の一つの状態  $|2\rangle$  と B 状態 ( $|3\rangle$  とする) とを結び遷移が、共通の共振器モードと共鳴している。なお、状態  $|2\rangle$  と  $|3\rangle$  のエネルギー差は  $E_{\text{homo}}$  よりも大きい。

【0027】

これらの複数の物理系で表されている複数の量子ビットのうち、 $k$  番目と  $l$  番目の量子ビットで 2 量子ビットゲートを行う場合には、 $k$  番目と  $l$  番目の物理系に対して、次の (1) ~ (3) に示す一連の操作を行う。

(1) 量子ビットの状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  を、それぞれ  $|4\rangle$  と  $|5\rangle$  に移す。ただし、状態  $|4\rangle$  と  $|5\rangle$  のエネルギー差は  $E_{\text{homo}}$  よりも大きく、また  $|4\rangle$  と  $|5\rangle$  の両方と、 $|2\rangle$  と  $|3\rangle$  の両方との 4 通りの組み合わせに対するエネルギー差も  $E_{\text{homo}}$  よりも大きい状態である (図 4 (a))。 (2) 状態  $|4\rangle$  -  $|3\rangle$  間、 $|5\rangle$  -  $|3\rangle$  間遷移に共鳴する光パルス照射し、アディアバティック・パッセージによるゲート操作を行う (図 4 (b))。 (3) 状態  $|4\rangle$ 、 $|5\rangle$  を、状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  に戻す。

上記 (1) では、物理系  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  は 2 以上の整数) のうちの  $m$  個の物理系  $k$  ( $k = j(1), j(2), \dots, j(m)$ ,  $2 \leq m \leq n$ ) で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の 2 つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が均一幅  $E_{\text{homo}}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{\text{homo}}$  よりも大きいエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_k) - E(|v\rangle_k)| > E_{\text{homo}}$ 、 $u, v \in \{2, 3, 4, 5\}$ 、 $u \neq v$ 、 $E(|s\rangle)$  は状態  $s$  のエネルギーを表す) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移す。他に、物理系  $i$  のうちの  $m$  個の物理系  $k$  で表される  $m$  個の量子ビット間で共振器モードを利用した量子ビットゲートを行う際に、それぞれの物理系  $k$  の 2 つの状態であって、同一の物理系  $k$  の中で相互のエネルギーの差が均一幅  $E_{\text{homo}}$  よりも大きく、それぞれが状態  $|2\rangle_k$ 、 $|3\rangle_k$  のいずれとも  $E_{\text{homo}}$  よりも大きいエネルギー差を持つ状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  であって、異なる物理系の間で相互のエネルギーの差が均一幅  $E_{\text{homo}}$  よりも大きい状態  $|4\rangle_k$ 、 $|5\rangle_k$  ( $|E(|u\rangle_q) - E(|v\rangle_r)| > E_{\text{homo}}$ 、 $u, v \in \{4, 5\}$ 、 $q, r \in \{j(1), j(2), \dots, j(m)\}$ 、 $q \neq r$ ) に、それぞれ  $|0\rangle_k$ 、 $|1\rangle_k$  で表していた量子ビットの状態を移してもよい。

【0028】

第 2 の方法では、共通の共振器モードに共鳴することで繋がれた量子ビットに対して、共振器モードに単一光子を入射することにより、2 量子ビットゲート操作を施す。

この方法でも、第 1 の方法と同様の物理系を用い、同様の状態  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  で 2 量子ビットゲート操作中ではない物理系の量子ビットが表されている。ただしこの方法では、共振器に入射した光子がほぼいつでも入射した光路を反対向きに戻ってくる片側共振器 (反射率 100% に近いミラーと、それよりも低反射率のミラーからなる光共振器) を利用する。

【0029】

第 2 の方法の場合、 $k$  番目と  $l$  番目の量子ビットで 2 量子ビットゲートを行う場合には、 $k$  番目と  $l$  番目の物理系に対し、次の (1) ~ (3) の一連の操作を行う。 (1) 状態  $|1\rangle$  を、状態  $|2\rangle$  に移す。 (2) 反射率が低いミラーの方から、量子ビットを繋いでいる共振器モードに対して単一光子を入射する (図 5)。この操作で 2 量子ビットゲートである制御位相ゲートを行う。 (3) 状態  $|2\rangle$  を  $|1\rangle$  に戻す。

【0030】

(1) の操作を、 $k$  番目と  $l$  番目の物理系に対し選択的に行うには、それぞれの物理系の状態を、一旦状態  $|2\rangle$  ではない A 状態に移し (その際に、操作する光の周波数で  $k$  番目と  $l$  番目を選択する)、さらにその状態から状態  $|2\rangle$  へ移せばよい (図中の破線で示

10

20

30

40

50

した過程)。

【0031】

この一連の操作において、状態  $|1\rangle$  の代わりに状態  $|0\rangle$  を状態  $|2\rangle$  に移し、単一光子入射後、また状態  $|0\rangle$  に戻してもよい。

【0032】

第1の方法では、共振器モードと遷移との強い結合をアディアバティック・パッセージに利用できるため、速いゲートが可能になり、ゲートの際の失敗確率を減らすことができる。第2の方法では、共振器モードと遷移との強い結合により、大きなノーマルモード・スプリッティングが生じるため、同じパルス幅のパルス光で(同じゲートの速さで)比較した場合、やはり失敗確率を減らすことができる。

10

【0033】

第1の方法の利点をもう少し詳しく述べる。共振器モードで結合した物理系にアディアバティック・パッセージを適用した2量子ビットゲートでは、光共振器の減衰定数が多いほど、また共振器モードと結合する遷移の緩和速度が速いほど、誤り確率が大きくなる。誤り確率  $P$  が、共振器の緩和に起因する  $\gamma \cdot T$  と、遷移の緩和に起因する  $(\gamma \cdot T) / (g^2 \cdot T^2)$  との和で表されるとする。ここで  $\gamma$  は共振器の減衰定数、 $T$  はゲートにかかる時間、 $\gamma$  は遷移の緩和速度、 $g$  は共振器モードとイオンとの結合定数である。 $P$  をまず  $T$  の関数と考え、 $P$  は  $T_{\min} = (1/g) \cdot (\gamma / \gamma_0)^{1/2}$  で最小値  $2 \cdot \{(\gamma \cdot \gamma_0) / g^2\}^{1/2}$  をとる。この値がゲート時間最適化後の誤り確率である。ところで、現実的な物理系として、光共振器中の希土類イオン分散結晶を考え、共振器モードと結合する遷移として、均一幅の狭い  $f - f$  遷移を利用するとすると、 $g \sim 100 \text{ kHz}$ 、 $\gamma \sim 50 \text{ kHz}$ 、 $\gamma_0 \sim 2 \text{ kHz}$  程度なので、 $T_{\min} \sim 2 \times 10^{-6} < 1/g$  となり、結合定数の逆数程度よりも長い時間をかけるというアディアバティックの条件を満たしていない。その結果、緩和の起こる上状態への励起が起こりやすくなり、緩和による失敗確率が増えると考えられる。ところが、均一幅の広い  $f - d$  遷移が利用できるとすると、 $g$  が例えば  $100 \sim 1000$  倍程度となり、アディアバティックの条件を満たすため、最小の  $P$  が実現できると予想される。以上のようにして量子ゲートの失敗確率を減らすことができる。

20

【0034】

以上の実施形態によれば、共振器モードを利用する量子ゲートにおいて、エネルギー差が小さくコヒーレンス時間の長い状態で表されている量子ビットに対して、共振器モードを利用する操作の間、一時的に、個々の量子ビットを表す2状態間のエネルギーの差または異なる量子ビット間での量子ビットを表す状態のエネルギーの差が大きな状態で量子ビットを表すことにより、遷移双極子モーメントが大きく遷移の均一幅が量子ビットを通常表している2状態間のエネルギー差、あるいは量子ビット間での量子ビットを通常表している状態のエネルギー差よりも大きい遷移に共鳴させた共振器モードを利用しても、量子ビット内での量子ビットを表す2状態の区別、あるいは量子ビット間での量子ビットを表す状態の区別を可能にし、共振器モードと遷移双極子モーメントが大きな遷移との強い結合を量子ゲートに利用することを可能にすることができる。

30

【実施例】

40

【0035】

(第1の実施例)

本実施例の量子ゲート方法および装置では、量子ビットとして、 $Y_2SiO_5$  の  $10^{-3}\%$  の  $Y^{3+}$  イオンを  $Pr^{3+}$  イオンに置換した  $Pr^{3+} : Y_2SiO_5$  結晶中の  $Pr^{3+}$  イオンを利用する。結晶は  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  程度の大きさで、表面に超高反射率のミラーが形成され、共振器構造になっている。またその共振器モードは、 $Pr^{3+}$  イオンの  $^3P_0 - 5d$  バンド間遷移に共鳴し、モードウエスト半径が約  $1 \mu\text{m}$  となっている。結晶は、クライオスタット中に設置され  $1.5 \text{ K}$  に保たれる。 $Pr^{3+} : Y_2SiO_5$  結晶中の  $Pr^{3+}$  イオンのエネルギー状態のうち、本実施例にかかわるものを図6に示す。

50

## 【0036】

本実施例の量子ゲート装置について図7を参照して説明する。

本実施例の量子ゲート装置は、アルゴンイオンレーザー励起リングチタンサファイアレーザー701, 703, 708, 709、リング色素レーザー702, 704, 705, 706, 707、周波数狭窄化システム710、2倍波用非線形結晶711、ミラー712、ビームスプリッター713、差周波用非線形結晶714、周波数設定用音響光学効果素子715、強度設定用音響光学効果素子716、制御部717、共振器付き結晶103、クライオスタット104を含む。なお、レーザー701, 703, 708, 709、702, 704, 705, 706, 707、周波数狭窄化システム710、2倍波用非線形結晶711、ミラー712、ビームスプリッター713、および、差周波用非線形結晶714が光源部101に対応し、周波数設定用音響光学効果素子715、強度設定用音響光学効果素子716、制御部717、および、ミラー712が光制御部102に対応する。

10

## 【0037】

2量子ビットゲート操作の際、対象となる量子ビットを表している2つのイオンの片方(イオン1とする)を操作するため、アルゴンイオンレーザー励起のリング色素レーザー2台(レーザー1 702、レーザー2 704とする)とアルゴンイオンレーザー励起リングチタンサファイアレーザー2台(レーザー3 701、レーザー4 703とする)を用意し、レーザー1 702とレーザー3 701は、参照用共振器と音響光学効果素子および電気光学効果素子によるフィードバック系(周波数狭窄化システム710)で、1kHzにスペクトルを狭窄化し、絶対周波数も安定化させて用いる。レーザー3 701、レーザー1 702からの光をそれぞれ光1、光2とする。またレーザー4 703からの光は、さらに2倍波用非線形結晶711を通され、周波数を2倍にして用いる。この光を光3、レーザー2 704からの光を光4とする。

20

## 【0038】

もう片方のイオン(イオン2とする)を操作するために、さらにアルゴンイオンレーザー励起のリング色素レーザー3台(レーザー5 705、レーザー6 706、レーザー7 707とする)、アルゴンレーザー励起リングチタンサファイアレーザー2台(レーザー8 708、レーザー9 709とする)を用意する。レーザー5 705からの光は2つに分けられ、片方はレーザー8 708と非線形結晶714により差周波を取られ、もう片方はレーザー9 709と差周波をとられて、それぞれ参照用共振器と音響光学効果素子および電気光学効果素子によるフィードバック系(周波数狭窄化システム710)で、1kHzにスペクトルが狭窄化される。こうして得た光をそれぞれ光5、光6とする。レーザー6 706、レーザー7 707からの光はそれぞれ非線形結晶711で2倍波とし、それぞれ光7、光8とする。

30

光1~8は、それぞれ、制御部717からの信号で制御された周波数設定用音響光学効果素子715と強度設定用音響光学効果素子716により、周波数と強度を調整されている。

## 【0039】

イオン1に関して、核スピンの起因して分裂した状態にまで分解した ${}^3H_4 - {}^1G_4$ 間遷移の遷移周波数の一つを ${}_{104}$ とする。その遷移の下の状態は、 ${}^3H_4$ のシュタルク分裂した状態のうち最もエネルギーが低い状態が核スピンの状態により3つに分裂した状態の一つである $\pm |5/2\rangle$ となっており、これを $|0\rangle_1$ とする。上の状態は $|4\rangle_1$ とする。また、核スピンの起因して分裂した状態にまで分解した ${}^3H_4 - {}^1D_2$ 間遷移の遷移周波数の一つを ${}_{115}$ とする。その遷移の下の状態は、 ${}^3H_4$ のシュタルク分裂した状態のうち最もエネルギーが低い状態が核スピンの状態により3つに分裂した状態の一つである $\pm |3/2\rangle$ となっており、これを $|1\rangle_1$ とする。上の状態は $|5\rangle_1$ とする。

40

## 【0040】

イオン2に関しては、核スピンの起因して分裂した状態にまで分解した ${}^3H_4 - {}^3H_6$ 間遷移の遷移周波数の一つを ${}_{204}$ とする。その遷移の下の状態は、 ${}^3H_4$ のシュタル

50

ク分裂した状態のうち最もエネルギーが低い状態が核スピンの状態により3つに分裂した状態の一つである  $\pm |5/2\rangle$  となっており、これを  $|0\rangle_2$  とする。上の状態は  $|4\rangle_2$  とする。また、核スピンの起因して分裂した状態にまで分解した  ${}^3H_4 - {}^3F_4$  間遷移の遷移周波数の一つを  ${}_{215}$  とする。その遷移の下の状態は、 ${}^3H_4$  のシュタルク分裂した状態のうち最もエネルギーが低い状態が核スピンの状態により3つに分裂した状態の一つである  $\pm |3/2\rangle$  となっており、これを  $|1\rangle_2$  とする。上の状態は  $|5\rangle_2$  とする。

#### 【0041】

光1は  ${}_{104}$ 、光2は  ${}_{115}$ 、光3は  ${}^1G_4 - 5d$  バンド間遷移、光4は  ${}^1D_2 - 5d$  バンド間遷移、光5は  ${}_{204}$ 、光6は  ${}_{215}$ 、光7は  ${}^3H_6 - 5d$  バンド間遷移、光8は  ${}^3F_4 - 5d$  バンド間遷移にそれぞれ共鳴させることができる。

10

#### 【0042】

イオン1とイオン2の間で、2量子ビットゲートを行う場合、まず、光1、光2、光5、光6を、それぞれ周波数  ${}_{104}$ 、 ${}_{115}$ 、 ${}_{204}$ 、 ${}_{215}$  を横切るように周波数掃引しつつ結晶に照射し、2状態とひとつの光によるアディアパティック・パッセージによって、状態  $|0\rangle_1$ 、 $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  をそれぞれ状態  $|4\rangle_1$ 、 $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  に移す。その際、光1、光2、光5、光6の パルスを利用して、状態を移してもよい。次に、本実施例では、“Phys. Rev. A 70, 012305 (2004).” に記載の方法で、光3、光4、光7、光8の光パルスを照射することにより、イオン1で表される量子ビット(量子ビット1とする)とイオン2で表される量子ビット(量子ビット2とする)の間で、制御位相反転ゲートを行う。その際、イオン1とイオン2の  ${}^3P_0 - 5d$  間遷移と共振器モードとの強い結合を利用している。 ${}^3P_0 - 5d$  間遷移の均一幅、および光3、光4、光7、光8の光パルスを作用させる  ${}^1G_4 - 5d$  バンド間遷移、 ${}^1D_2 - 5d$  バンド間遷移、 ${}^3H_6 - 5d$  バンド間遷移、 ${}^3F_4 - 5d$  バンド間遷移の均一幅は、状態  $|0\rangle_1 - |1\rangle_1$  間、 $|0\rangle_2 - |1\rangle_2$  間のエネルギー差よりも大きい。これらの状態を、それぞれエネルギー差が大きな2状態すなわち、状態  $|4\rangle_1$  と  $|5\rangle_1$  および  $|4\rangle_2$  と  $|5\rangle_2$  に移したため、 ${}^3P_0 - 4f5d$  間遷移と共振器モードとの強い結合を利用した量子ゲートが可能になっている。

20

#### 【0043】

光3、光4、光7、光8の光パルス照射後、状態  $|4\rangle_1$ 、 $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  で表されている情報を、状態  $|0\rangle_1$ 、 $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  に戻す。本実施例の場合、状態  $|4\rangle_1$ 、 $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  が属してしている4つの状態、 ${}^1G_4$ 、 ${}^1D_2$ 、 ${}^3H_6$ 、 ${}^3F_4$  はそれぞれ結晶場でシュタルク分裂した複数の状態からなっており、そのそれぞれが、核スピンの状態によりさらに分裂している。従って、本実施例の場合、実は4つの光パルス照射後、情報は状態  $|4\rangle_1$ 、 $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  だけでなく、それぞれの状態にエネルギー的に近い複数の状態に分散されて蓄えられている。その様子を状態  $|4\rangle_1$  について示すと、下記の(1)のようになる。

30

#### 【数1】

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i |{}^1G_4\rangle_i \quad (1)$$

40

#### 【0044】

情報は上記(1)の  ${}_i$  に蓄えられている。この分散された状態をまとめて状態  $|0\rangle_1$  に移す必要がある。その方法は、状態  $|4\rangle_1$  に関しては以下のようになる。光3、光4、光7、光8の光パルス照射の方法は決められているため(イオン1、イオン2、共振器モード系にユニタリー変換を施すだけであるため)、 ${}_i$  の値(相互比率)は予めわかる。まず適当な状態、例えば  ${}^1D_2$  の状態の一つを選び  $|a\rangle$  とする。状態  $|{}^1G_4\rangle_i$  と  $|a\rangle$  との間を結ぶ遷移に共鳴するN個の光と、 $|0\rangle_1$  と  $|a\rangle$  との間を結ぶ遷移に共鳴する光を用意し(図7では省略されている)、 ${}_i$  に応じた強度の時間変化をもつ光を照射することで、分散していた確率振幅をまとめて、 $|4\rangle_1$  に移すことができると考えられる。同様にして、状態  $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  とそのそれぞれの近傍の状態で

50

表されている情報も、それぞれ状態  $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  に移すことができると考えられる。

【0045】

本実施例では、1量子ビットゲート操作は、光2、光6をそれぞれ3つにわけ、音響光学効果素子で周波数  $\nu_{115}$ 、 $\nu_{115} + 17.3\text{MHz}$ 、 $\nu_{115} - 10.2\text{MHz}$ 、 $\nu_{215}$ 、 $\nu_{215} + 17.3\text{MHz}$ 、 $\nu_{215} - 10.2\text{MHz}$  の光を生成し、それらを結晶に照射することで、2つのパルス光照射と1つのパルス光照射により、あるいは、3つの光照射によるアディアバティック・パッセージにより、実行することができる。また、結果の読み出しは、量子ビット1に関しては、状態  $|0\rangle_1$  または  $|1\rangle_1$  を、量子ビット2に関しては、状態  $|0\rangle_2$  または  $|1\rangle_2$  を、 $^3P_0$  の状態にアディアバティック・パッセージあるいはパルス照射で移し、共振器モードに現れる真空ラビ分裂（単一物理系によるノーマルモード・スプリッティング）を観測することで実行できる。

10

【0046】

以上のようにして、状態  $|0\rangle_1$ 、 $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  で表されている量子ビット1と量子ビット2に対し、遷移双極子モーメントが大きく、共振器モードとの結合定数を大きくできる f - d 遷移を利用した2量子ビットゲート操作を、施すことが可能になる。また、2量子ビットゲートを施すイオンは、光遷移の不均一幅の中から選ぶので、量子ビット数の拡張性にも優れた方法となっている。

【0047】

（第2の実施例）

20

第1の実施例において、2量子ビットゲート操作を施したいイオン1、イオン2に対して、状態  $|0\rangle_1$ 、 $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  をそれぞれ状態  $|4\rangle_1$ 、 $|5\rangle_1$ 、 $|4\rangle_2$ 、 $|5\rangle_2$  に移すかわりに、状態  $|1\rangle_1$ 、 $|1\rangle_2$  のみをそれぞれ状態  $|5\rangle_1$ 、 $|5\rangle_2$  に移す。さらに  $^1D_2 - ^3P_0$  間遷移に共鳴する光をリング色素レーザーとチタンサファイアレーザーの差周波を取ることで用意し、 $|5\rangle_1$  をイオン1の  $^3P_0$  に移す。またリング色素レーザーで用意した光により、 $|5\rangle_2$  をイオン2の  $^3P_0$  に移す。本実施例では、この状態の共振器モードと物理系に対し、“Phys. Rev. A 72, 032333 (2005).” に記載の方法を適用する。すなわち、共振器モードに、単一光子源から発生させた単一光子を入射させる。これにより、量子ビット1と量子ビット2の間で、制御位相ゲートが実行される。最後に第1の実施例と同様の方法で、イオン1とイオン2の  $^3P_0$  の状態に蓄えられている情報を、それぞれ状態  $|1\rangle_1$  と  $|1\rangle_2$  に移す。

30

【0048】

本実施例でも、1量子ビットゲート操作は第1の実施例と同様の方法で行うことができる。また、結果の読み出しも第1の実施例と同様の方法で可能である。

【0049】

以上のようにして、本実施例でも状態  $|0\rangle_1$ 、 $|1\rangle_1$ 、 $|0\rangle_2$ 、 $|1\rangle_2$  で表されている量子ビット1と量子ビット2に対し、遷移双極子モーメントが大きく、共振器モードとの結合定数を大きくできる f - d 遷移を利用した2量子ビットゲート操作を、施すことが可能になる。また、2量子ビットゲートを施すイオンは、光遷移の不均一幅の中から選ぶので、量子ビット数の拡張性に優れた方法となっている。

40

【0050】

なお、本発明は上記実施形態そのままに限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で構成要素を変形して具体化できる。また、上記実施形態に開示されている複数の構成要素の適宜な組み合わせにより、種々の発明を形成できる。例えば、実施形態に示される全構成要素から幾つかの構成要素を削除してもよい。さらに、異なる実施形態にわたる構成要素を適宜組み合わせてもよい。

【図面の簡単な説明】

【0051】

【図1】実施形態の量子ゲート装置のブロック図。

【図2】光を使った量子ゲートにおける、エネルギーを使った状態の区別と量子ビットの

50

区別を説明するための図。

【図3】均一幅の広い遷移を量子ビットの操作に利用する場合を説明するための図。

【図4】実施形態の量子ゲート方法の第1の方法について説明するための図。

【図5】実施形態の量子ゲート方法の第2の方法について説明するための図。

【図6】実施例で利用する  $Y_2SiO_5$  結晶中の  $Pr^{3+}$  イオンのエネルギー状態を模式的に示した図。

【図7】実施例の量子ゲート装置のブロック図。

【符号の説明】

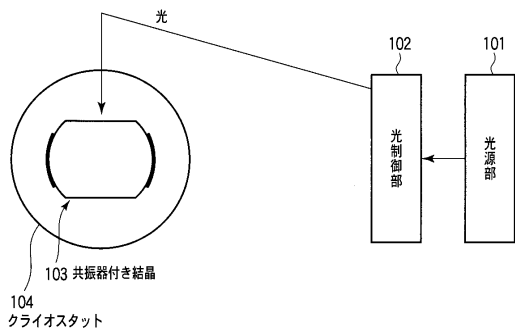
【0052】

101・・・光源部、102・・・光制御部、103・・・共振器付き結晶、104・・・クライオスタット、701, 703, 708, 709・・・アルゴンイオンレーザー励起リングチタンサファイアレーザー、702, 704, 705, 706, 707・・・リング色素レーザー、710・・・周波数狭窄化システム、711・・・2倍波用非線形結晶、712・・・ミラー、713・・・ビームスプリッター、714・・・差周波用非線形結晶、715・・・周波数設定用音響光学効果素子、716・・・強度設定用音響光学効果素子、717・・・制御部。

10

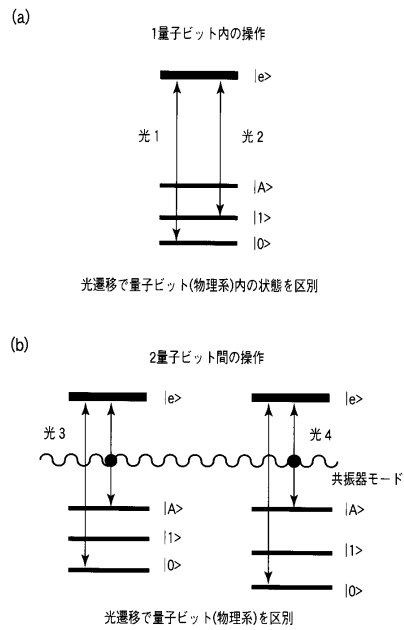
【図1】

図1



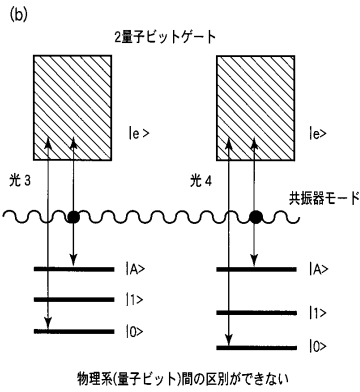
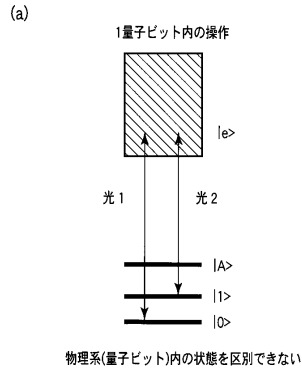
【図2】

図2



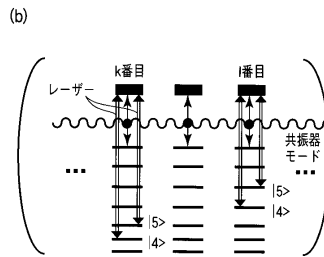
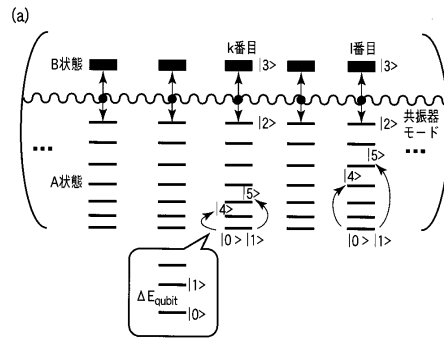
【 図 3 】

図 3



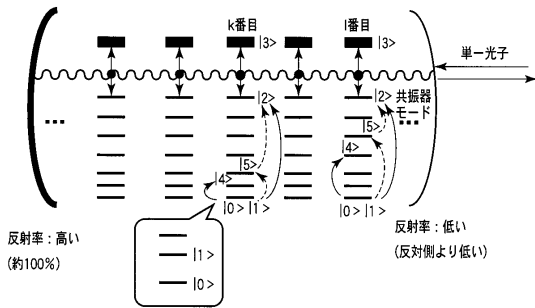
【 図 4 】

図 4



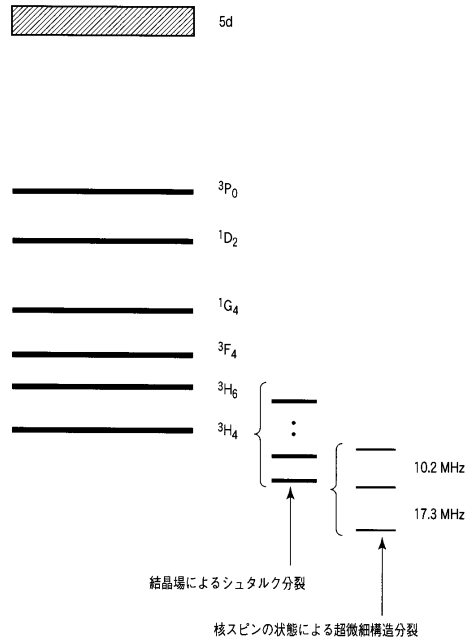
【 図 5 】

図 5



【 図 6 】

図 6







## フロントページの続き

- (74)代理人 100084618  
弁理士 村松 貞男
- (74)代理人 100103034  
弁理士 野河 信久
- (74)代理人 100119976  
弁理士 幸長 保次郎
- (74)代理人 100153051  
弁理士 河野 直樹
- (74)代理人 100140176  
弁理士 砂川 克
- (74)代理人 100100952  
弁理士 風間 鉄也
- (74)代理人 100101812  
弁理士 勝村 紘
- (74)代理人 100070437  
弁理士 河井 将次
- (74)代理人 100124394  
弁理士 佐藤 立志
- (74)代理人 100112807  
弁理士 岡田 貴志
- (74)代理人 100111073  
弁理士 堀内 美保子
- (74)代理人 100134290  
弁理士 竹内 将訓
- (74)代理人 100127144  
弁理士 市原 卓三
- (74)代理人 100141933  
弁理士 山下 元
- (72)発明者 市村 厚一  
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 後藤 隼人  
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 川口 聖司

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 0 2 F 3 / 0 0

J S T P l u s ( J D r e a m I I )