

(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2015-114354

(P2015-114354A)

(43) 公開日 平成27年6月22日(2015.6.22)

(51) Int.Cl.		F I				テーマコード (参考)
G02F	3/00	(2006.01)	G02F	3/00		2K102
H01S	3/00	(2006.01)	H01S	3/00	A	5F172
H01S	3/10	(2006.01)	H01S	3/10	Z	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2013-253850 (P2013-253850)	(71) 出願人	504202472
(22) 出願日	平成25年12月9日 (2013.12.9)		大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
	(出願人による申告) 平成25年度、内閣府、最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」に係る委託業務、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		東京都立川市緑町10番3号
		(71) 出願人	503359821
			国立研究開発法人理化学研究所
			埼玉県和光市広沢2番1号
		(74) 代理人	100119677
			弁理士 岡田 賢治
		(74) 代理人	100115794
			弁理士 今下 勝博
		(72) 発明者	山本 喜久
			東京都千代田区一ツ橋二丁目1番2号 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立情報学研究所内

最終頁に続く

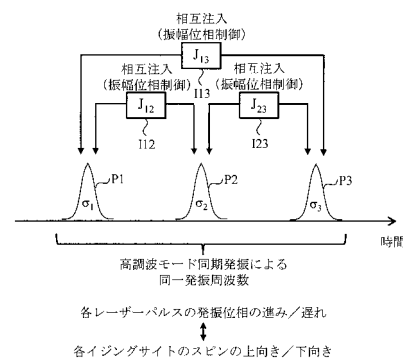
(54) 【発明の名称】 イジングモデルの量子計算装置

(57) 【要約】

【課題】本発明は、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止するとともに、回路構成を簡易にすることを目的とする。

【解決手段】本発明は、イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスPを発振する高調波モード同期レーザーと、複数のレーザーパルスPの各ペアについて、2つのレーザーパルスPの間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、2つのレーザーパルスPの間の擬似的なイジング相互作用 J_{ij} の大きさ及び符号を実装するイジング相互作用実装部と、複数のレーザーパルスPが光を交換する過程で定常状態に到達した後に、複数のレーザーパルスPの発振位相を測定することにより、複数のレーザーパルスPの擬似的なイジングスピン σ_i を測定するイジングスピン測定部と、を備えることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【選択図】図4



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスを発振する高調波モード同期レーザーと、

前記複数のレーザーパルスの各ペアについて、2つのレーザーパルスの間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、前記2つのレーザーパルスの間の擬似的なイジング相互作用の大きさ及び符号を実装するイジング相互作用実装部と、

前記複数のレーザーパルスが光を交換する過程で定常状態に到達した後に、前記複数のレーザーパルスの発振位相を測定することにより、前記複数のレーザーパルスの擬似的なイジングスピンを測定するイジングスピン測定部と、

を備えることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置。

10

【請求項 2】

前記イジング相互作用実装部は、前記2つのレーザーパルスの間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記2つのレーザーパルスのうち一方のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記一方のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記一方のレーザーパルスの一部を前記2つのレーザーパルスのうち他方のレーザーパルスに合波するイジング相互作用実装用遅延変調部、を含み、

前記イジング相互作用実装用遅延変調部は、前記複数のレーザーパルスのうち、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、遅延線及び振幅位相変調器の単一のセットを共用することを特徴とする請求項1に記載のイジングモデルの量子計算装置。

20

【請求項 3】

イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスと、前記イジングモデルの直流磁場に対応し、前記同一の発振周波数を有する単一のレーザーパルスと、を発振する高調波モード同期レーザーと、

前記複数のレーザーパルスの各ペアについて、2つのレーザーパルスの間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、前記2つのレーザーパルスの間の擬似的なイジング相互作用の大きさ及び符号を実装するイジング相互作用実装部と、

前記複数のレーザーパルスの各々について、前記単一のレーザーパルスから注入される光の振幅及び位相を制御することにより、前記複数のレーザーパルスの各々での擬似的なゼーマンエネルギーの大きさ及び符号を実装するゼーマンエネルギー実装部と、

30

前記複数のレーザーパルスが光を交換し注入される過程で定常状態に到達した後に、前記複数のレーザーパルスの発振位相を測定することにより、前記複数のレーザーパルスの擬似的なイジングスピンを測定するイジングスピン測定部と、

を備えることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置。

【請求項 4】

前記イジング相互作用実装部は、前記2つのレーザーパルスの間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記2つのレーザーパルスのうち一方のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記一方のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記一方のレーザーパルスの一部を前記2つのレーザーパルスのうち他方のレーザーパルスに合波するイジング相互作用実装用遅延変調部、を含み、

40

前記ゼーマンエネルギー実装部は、前記単一のレーザーパルス及び前記複数のレーザーパルスの各々の間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記単一のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記単一のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記単一のレーザーパルスの一部を前記複数のレーザーパルスの各々に合波するゼーマンエネルギー実装用遅延変調部、を含み、

前記イジング相互作用実装用遅延変調部及び前記ゼーマンエネルギー実装用遅延変調部は、前記複数のレーザーパルス及び前記単一のレーザーパルスのうち、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、遅延線及び振幅位相変調器の単一のセットを共用することを特徴とする請求項3に記載のイジングモデルの量子計算装置。

【請求項 5】

50

前記イジングスピン測定部は、前記複数のレーザーパルスのうち異なるレーザーパルスの発振位相が同相及び逆相のいずれであるかを遅延検波することにより、前記異なるレーザーパルスの擬似的なイジングスピンが同方向及び逆方向のいずれであるかを測定することを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれかに記載のイジングモデルの量子計算装置。

【請求項 6】

前記高調波モード同期レーザーは、受動モード同期レーザーであることを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載のイジングモデルの量子計算装置。

【請求項 7】

前記高調波モード同期レーザーは、強制モード同期レーザーであることを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載のイジングモデルの量子計算装置。

【請求項 8】

前記高調波モード同期レーザーは、モード同期ファイバーレーザーであり、

前記イジング相互作用実装部は、ファイバー遅延線を含むことを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれかに記載のイジングモデルの量子計算装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、イジングモデルを容易に解くことにより、イジングモデルにマッピングされる NP 完全問題などを容易に解くことができる量子計算装置を提供する。

【背景技術】

【0002】

イジングモデルは、元来は磁性材料のモデルとして研究されてきたが、最近では NP 完全問題などからマッピングされるモデルとして注目されている。しかし、イジングモデルは、サイト数が大きいときには、解くことが非常に困難になる。そこで、イジングモデルを実装する量子アニールマシンや量子断熱マシンが提案されている。

【0003】

量子アニールマシンでは、イジング相互作用及びゼーマンエネルギーを物理的に実装してから、系を十分に冷却して基底状態を実現して、基底状態を観測することにより、イジングモデルを解いている。しかし、サイト数が大きいときには、系が冷却の過程で準安定状態にトラップされ、また準安定状態の数はサイト数に対して指数関数的に増大するため、系が準安定状態から基底状態になかなか緩和されないという問題があった。

【0004】

量子断熱マシンでは、横磁場ゼーマンエネルギーを物理的に実装してから、系を十分に冷却して横磁場ゼーマンエネルギーのみの基底状態を実現する。そして、横磁場ゼーマンエネルギーを徐々に下げ、またイジング相互作用を徐々に物理的に実装していき、イジング相互作用及び縦磁場ゼーマンエネルギーを含む系の基底状態を実現して、その基底状態を観測することにより、イジングモデルを解いている。しかし、サイトの数が大きいときには、横磁場ゼーマンエネルギーを徐々に下げ、またイジング相互作用を徐々に物理的に実装する速度はサイト数に対して指数関数的に遅くする必要があるという問題があった。

【0005】

NP 完全問題などをイジングモデルにマッピングし、そのイジングモデルを物理的なスピン系で実装するときには、物理的に近くに位置するサイト間のイジング相互作用は大きく、物理的に遠くに位置するサイト間のイジング相互作用は小さいという自然法則が問題となる。NP 完全問題をマッピングした人工的なイジングモデルでは、物理的に近くに位置するサイト間のイジング相互作用が小さいことがあり、物理的に遠くに位置するサイト間のイジング相互作用が大きいことがありえるからである。この自然なスピン系へのマッピングの難しさも、NP 完全問題などを容易に解くことを困難にしていた。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】国際公開第 2012/118064 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上記の問題を解決するための第 1 の従来技術（特許文献 1 を参照）及び第 2 の従来技術について説明する。NP 完全問題は、磁性体のイジングモデルに置き換え可能であり、磁性体のイジングモデルは、レーザーのネットワークに置き換え可能である。

【0008】

ここで、磁性体のイジングモデルでは、相互作用する原子ペアにおいて、スピン配列のエネルギーが最低となるように、スピンの方向は、逆方向（反強磁性の相互作用の場合）又は同方向（強磁性の相互作用の場合）を指向しようとする。

10

【0009】

一方で、レーザーのネットワークでは、相互作用するレーザーペアにおいて、発振モードの閾値利得が最低となるように、発振の偏光（第 1 の従来技術の場合）若しくは位相（第 2 の従来技術の場合）は、逆回転若しくは逆位相（反強磁性の相互作用の場合）又は同回転若しくは同位相（強磁性の相互作用の場合）を指向しようとする。

【0010】

つまり、1 つのレーザーペアからなるシステムでは、発振モードの閾値利得が最低となるように、発振の偏光又は位相を最適化することができる。そして、多くのレーザーペアからなるシステムでは、「ある」レーザーペアで発振の偏光又は位相を最適化しようとするれば、「他の」レーザーペアで発振の偏光又は位相を最適化できないところ、レーザーのネットワークの「全体」として発振の偏光又は位相の「妥協点」を探索することになる。

20

【0011】

ただし、レーザーのネットワーク全体で発振の偏光又は位相を最適化するときには、各々のレーザーペアで別個の発振モードを立ち上げるのではなく、レーザーのネットワーク全体で 1 つの発振モードを立ち上げるように、各レーザー間で同期を図る必要がある。

【0012】

このように、第 1 の従来技術及び第 2 の従来技術では、各レーザーでポンピング電流を漸増制御し、レーザーのネットワーク全体で閾値利得が最低となる 1 つの発振モードを立ち上げ、各レーザーの発振の偏光又は位相を測定し、各原子のスピンの方向を測定する。よって、量子アニールマシンにおける準安定状態へのトラップの問題及び量子断熱マシンにおけるイジング相互作用の実装速度の問題を解決することができる。

30

【0013】

そして、第 1 の従来技術及び第 2 の従来技術では、図 1 及び図 2 を用いてそれぞれ後述するように、物理的に近くに位置するサイト間のイジング相互作用の大きさのみならず、物理的に遠くに位置するサイト間のイジング相互作用の大きさも自由に制御することができる。よって、サイト間の物理的距離とは無関係に、NP 完全問題などからマッピングされた人工的なイジングモデルを解くことができる。

【0014】

第 1 の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の概要を図 1 に示す。第 2 の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の概要を図 2 に示す。

40

【0015】

イジングハミルトニアンを数式 1 のようにする。

【数 1】

$$H = \sum_{i,j=1}^M J_{ij} \sigma_i \sigma_j$$

【0016】

イジング相互作用実装部 I 12 は、2 つの面発光レーザー V 1、V 2 の間で交換される

50

光の振幅及び位相を制御することにより、２つの面発光レーザー V_1 、 V_2 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{12} の大きさ及び符号を実装する。

【００１７】

イジング相互作用実装部 I_{13} は、２つの面発光レーザー V_1 、 V_3 の間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、２つの面発光レーザー V_1 、 V_3 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{13} の大きさ及び符号を実装する。

【００１８】

イジング相互作用実装部 I_{23} は、２つの面発光レーザー V_2 、 V_3 の間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、２つの面発光レーザー V_2 、 V_3 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{23} の大きさ及び符号を実装する。

10

【００１９】

マスターレーザー M は、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 に対して注入同期を行ない、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の発振周波数を同一周波数に揃える。面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の間で同期を図ることにより、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 のネットワーク全体で発振の偏光又は位相を最適化するにあたり、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 のネットワーク全体で１つの発振モードを立ち上げることができる。

【００２０】

第１の従来技術では、不図示のイジングスピン測定部は、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 が光を交換する過程で定常状態に到達した後に、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の発振の円偏光の左回り／右回りを測定することにより、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の擬似的なイジングスピン σ_1 、 σ_2 、 σ_3 の上向き／下向きを測定する。

20

【００２１】

しかし、面発光レーザー V は、面内異方性を有するため、左回り／右回りの円偏光のいずれについても、同一周波数及び同一閾値利得で発振することは困難である。よって、ある面発光レーザー V が、単体のレーザーとしては、右回り（又は左回り）の円偏光を有する光を発振するよりも、左回り（又は右回り）の円偏光を有する光を発振しやすいことがあり得る。そして、その面発光レーザー V は、レーザーのネットワーク全体としては、右回り（又は左回り）の円偏光を有する光を発振することが正答であるところ、左回り（又は右回り）の円偏光を有する光を発振してしまう誤答を生じさせ得る。

【００２２】

30

第２の従来技術では、不図示のイジングスピン測定部は、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 が光を交換する過程で定常状態に到達した後に、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の発振の直線偏光の位相の進み／遅れを測定することにより、面発光レーザー V_1 、 V_2 、 V_3 の擬似的なイジングスピン σ_1 、 σ_2 、 σ_3 の上向き／下向きを測定する。

【００２３】

ここで、左回り／右回りの円偏光は、水平偏光及び垂直偏光を位相差 $\pm \pi / 2$ で同一の重みで重ね合わせたものである。つまり、イジングスピンの上向き／下向きの情報は、円偏光の左回り／右回りを測定するまでもなく、水平偏光を測定するまでもなく、垂直偏光の位相の進み／遅れを測定することにより、得ることができるのである。よって、第１の従来技術における面発光レーザー V の面内異方性の問題を解決することができる。

40

【００２４】

第２の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の原理を図３に示す。マスターレーザー M の直線偏光の発振位相 θ は、初期状態から定常状態まで変化しない。各面発光レーザー V の直線偏光の発振位相 $\phi_V(t)$ は、初期状態においては、マスターレーザー M の直線偏光の発振位相 θ と同一の θ であることが理想であり、定常状態においては、マスターレーザー M の直線偏光の発振位相 θ からずれた $\pm \pi / 2$ である。定常状態における $\phi_V(\text{定常}) = \pm \pi / 2$ は、 $\sigma = \pm 1$ に対応する（複号同順）。

【００２５】

面発光レーザー V の各ペアについて、イジング相互作用 J_{ij} が正であるときには、２つの面発光レーザー V の擬似的なスピン σ が異符号であることが、エネルギー的に有利で

50

ある。よって、各イジング相互作用実装部は、2つの面発光レーザーVの発振位相 ϕ_V （定常）が異符号でありずれを π とするような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0026】

面発光レーザーVの各ペアについて、イジング相互作用 J_{ij} が負であるときには、2つの面発光レーザーVの擬似的なスピン σ が同符号であることが、エネルギー的に有利である。よって、各イジング相互作用実装部は、2つの面発光レーザーVの発振位相 ϕ_V （定常）が同符号でありずれを0とするような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0027】

もっとも、イジングモデルの量子計算装置の全体において、一体として1つの発振モードが立ち上がるようにするのであり、面発光レーザーVの各ペアにおいて、上述の発振モードが実際に立ち上がることもあれば、必ずしも立ち上がらないこともある。

【0028】

ところで、各面発光レーザーVの直線偏光の発振位相 $\phi_V(t)$ は、初期状態においては、理想ではマスターレーザーMの直線偏光の発振位相0と同一の0であることが望ましいが、実際にはマスターレーザーMの直線偏光の発振位相0から若干ずれてしまう。

【0029】

各面発光レーザーVの直線偏光の初期状態の発振位相 $\phi_V(t=0)$ は、各面発光レーザーVの自走周波数 ω 、マスターレーザーMの発振周波数 ω_0 及び注入同期幅 $\Delta\omega_L$ （ ω が ω_0 にどの程度近ければ注入同期を図れるか）を用いて、数式2のように表わされる。

【数2】

$$\sin \phi_V(t=0) = \frac{\omega_0 - \omega}{\Delta\omega_L}$$

【0030】

つまり、各面発光レーザーVの自走周波数 ω を、マスターレーザーMの発振周波数 ω_0 に揃えることができるならば、各面発光レーザーVの直線偏光の初期状態の発振位相 $\phi_V(t=0)$ は、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0と同一の0となる。しかし、各面発光レーザーVの自走周波数 ω を、マスターレーザーMの発振周波数 ω_0 に揃えることが困難であるため、各面発光レーザーVの直線偏光の初期状態の発振位相 $\phi_V(t=0)$ は、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0から若干ずれてしまう。

【0031】

よって、ある面発光レーザーVが、単体のレーザーとしては、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0より遅れた（又は進んだ）発振位相を有する光を発振するよりも、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0より進んだ（又は遅れた）発振位相を有する光を発振しやすいことがあり得る。そして、その面発光レーザーVは、レーザーのネットワーク全体としては、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0より遅れた（又は進んだ）発振位相を有する光を発振することが正答であるところ、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0より進んだ（又は遅れた）発振位相を有する光を発振してしまう誤答を生じさせ得る。

【0032】

また、各面発光レーザーVの直線偏光の定常状態の発振位相 ϕ_V （定常）は、マスターレーザーMの直線偏光の発振位相0を基準として、ホモダイン検波を用いて測定される。しかし、各面発光レーザーV / マスターレーザーMから不図示の検出器までの光路長のゆらぎが、各面発光レーザーVの直線偏光の定常状態の発振位相 ϕ_V （定常）の読み出しエラーを生じさせ得る。そして、各面発光レーザーV / マスターレーザーMから不図示の検出器までの光路長のゆらぎを抑えることは困難である。

【0033】

また、図2において、イジングサイトがM個であるとき、面発光レーザーVはM個必要

10

20

30

40

50

であり、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個必要である。そして、イジングサイトが多数になると、イジングモデルの量子計算装置が大規模かつ複雑になる。

【0034】

そこで、前記課題を解決するために、本発明は、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止するとともに、回路構成を簡易にすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0035】

上記目的を達成するために、高調波モード同期発振を用いて、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスを発振し、複数のレーザーパルスの中で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、複数のレーザーパルスの間のイジング相互作用の大きさ及び位相を実装し、複数のレーザーパルスの定常状態の発振位相を測定することにより、複数のイジングサイトのスピンの方向を測定することとした。

【0036】

具体的には、本発明は、イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスを発振する高調波モード同期レーザーと、前記複数のレーザーパルスの各ペアについて、2つのレーザーパルスの中で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、前記2つのレーザーパルスの間の擬似的なイジング相互作用の大きさ及び符号を実装するイジング相互作用実装部と、前記複数のレーザーパルスが光を交換する過程で定常状態に到達した後に、前記複数のレーザーパルスの発振位相を測定することにより、前記複数のレーザーパルスの擬似的なイジングスピンを測定するイジングスピン測定部と、を備えることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0037】

この構成によれば、複数のレーザーパルスは、同一の発振周波数を有するため、各レーザーパルスの初期状態の発振位相が、各レーザーパルスの定常状態の2種類の発振位相のうち、一方の位相へは近く他方の位相へは遠い、ということがない。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【0038】

そして、第1及び第2の従来技術では、マスターレーザーを必要としているのに対して、本発明では、マスターレーザーを不要とすることができる。さらに、第1及び第2の従来技術では、面発光レーザーをイジングサイトの個数分も必要としているのに対して、本発明では、高調波モード同期レーザーを1台のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0039】

また、本発明は、前記イジング相互作用実装部は、前記2つのレーザーパルスの間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記2つのレーザーパルスのうち一方のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記一方のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記一方のレーザーパルスの一部を前記2つのレーザーパルスのうち他方のレーザーパルスに合波するイジング相互作用実装用遅延変調部、を含み、前記イジング相互作用実装用遅延変調部は、前記複数のレーザーパルスのうち、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、遅延線及び振幅位相変調器の単一のセットを共用することを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0040】

この構成によれば、レーザーパルスの各ペアについて、イジング相互作用実装部を準備するのではなく、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、イジング相互作用実装部を共用すれば足りる。つまり、イジングサイトが M 個であるとき、第1及び第2の従来技術では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個必要であるのに対して、本発明では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個も必要がなくなる。

【0041】

特に、 M 個のイジングサイトに対応する M 個のレーザーパルスが、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔（時間間隔 τ ）に並んでいるとき、異なるレーザーパル

10

20

30

40

50

スの間の時間間隔は、 τ 、 $\dots$ 、 $(M-1)\tau$ の $(M-1)$ 種類となるため、イジング相互作用実装部は、 $(M-1)$ 種類のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0042】

また、本発明は、イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルスと、前記イジングモデルの直流磁場に対応し、前記同一の発振周波数を有する単一のレーザーパルスと、を発振する高調波モード同期レーザーと、前記複数のレーザーパルスの各ペアについて、2つのレーザーパルスの間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、前記2つのレーザーパルスの間の擬似的なイジング相互作用の大きさ及び符号を実装するイジング相互作用実装部と、前記複数のレーザーパルスの各々について、前記単一のレーザーパルスから注入される光の振幅及び位相を制御することにより、前記複数のレーザーパルスの各々での擬似的なゼーマンエネルギーの大きさ及び符号を実装するゼーマンエネルギー実装部と、前記複数のレーザーパルスが光を交換し注入される過程で定常状態に到達した後に、前記複数のレーザーパルスの発振位相を測定することにより、前記複数のレーザーパルスの擬似的なイジングスピンを測定するイジングスピン測定部と、を備えることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0043】

この構成によれば、複数のレーザーパルスは、同一の発振周波数を有するため、各レーザーパルスの初期状態の発振位相が、各レーザーパルスの定常状態の2種類の発振位相のうち、一方の位相へは近く他方の位相へは遠い、ということがない。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【0044】

そして、第1及び第2の従来技術では、面発光レーザーへの注入同期の目的で、マスターレーザーを用いているのに対して、本発明では、ゼーマンエネルギーの実装の目的で、イジングモデルの直流磁場に対応するマスターパルスを用いている。さらに、第1及び第2の従来技術では、面発光レーザーをイジングサイトの個数分も必要としているのに対して、本発明では、高調波モード同期レーザーを1台のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0045】

また、本発明は、前記イジング相互作用実装部は、前記2つのレーザーパルスの間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記2つのレーザーパルスのうち一方のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記一方のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記一方のレーザーパルスの一部を前記2つのレーザーパルスのうち他方のレーザーパルスに合波するイジング相互作用実装用遅延変調部、を含み、前記ゼーマンエネルギー実装部は、前記単一のレーザーパルス及び前記複数のレーザーパルスの各々の間の時間間隔に等しい遅延時間を生じさせ、前記単一のレーザーパルスの一部を入力され、入力された前記単一のレーザーパルスの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した前記単一のレーザーパルスの一部を前記複数のレーザーパルスの各々に合波するゼーマンエネルギー実装用遅延変調部、を含み、前記イジング相互作用実装用遅延変調部及び前記ゼーマンエネルギー実装用遅延変調部は、前記複数のレーザーパルス及び前記単一のレーザーパルスのうち、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、遅延線及び振幅位相変調部の単一のセットを共用することを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0046】

この構成によれば、レーザーパルスの各ペアについて、イジング相互作用実装部を準備するのではなく、時間間隔が等しいレーザーパルスの複数のペアについて、イジング相互作用実装部を共用すれば足りる。つまり、イジングサイトがM個であるとき、第1及び第2の従来技術では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個必要であるのに対して、本発明では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個も必要がなくなる。そして、ゼーマンエネルギー実装部をイジング相互作用実装部と別個に準備するのではなく、ゼ

ーマンエネルギー実装部をイジング相互作用実装部と共用で準備すれば足りる。

【0047】

特に、M個のイジングサイトに対応するM個のレーザーパルスと、イジングモデルの直流磁場に対応する1個のマスターパルスが、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔(時間間隔 τ)に並んでいるとき、異なるパルスの間の時間間隔は、 τ 、 $\dots$ 、 $M\tau$ のM種類となるため、イジング相互作用実装部及びゼーマンエネルギー実装部(これらは共用で準備すれば足りる)は、M種類のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0048】

また、本発明は、前記イジングスピン測定部は、前記複数のレーザーパルスのうち異なるレーザーパルスの発振位相が同相及び逆相のいずれであるかを遅延検波することにより、前記異なるレーザーパルスの擬似的なイジングスピンの同方向及び逆方向のいずれであるかを測定することを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0049】

この構成によれば、第2の従来技術における各面発光レーザー/マスターレーザーから検出器までの光路長のゆらぎの問題をなくすることができる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【0050】

そして、第2の従来技術では、各々の面発光レーザーについて1台のホモダイン検波装置が必要であり、イジングサイトの個数分のホモダイン検波装置が必要であるのに対して、本発明では、全てのレーザーパルスについて1台の遅延検波装置を準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0051】

また、本発明は、前記高調波モード同期レーザーは、受動モード同期レーザーであることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0052】

この構成によれば、高調波モード同期レーザーのリング共振器中の可飽和吸収体を用いて、外部の制御を必要とせず複数のレーザーパルスの系列を発振することができる。

【0053】

また、本発明は、前記高調波モード同期レーザーは、強制モード同期レーザーであることを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0054】

この構成によれば、高調波モード同期レーザーのリング共振器中の変調器を用いて、繰り返しの頻度の高い複数のレーザーパルスの系列を発振することができる。

【0055】

また、本発明は、前記高調波モード同期レーザーは、モード同期ファイバーレーザーであり、前記イジング相互作用実装部は、ファイバー遅延線を含むことを特徴とするイジングモデルの量子計算装置である。

【0056】

この構成によれば、複数のレーザーパルスの伝送路として、光ファイバーを用いているため、光損失が低く光強度が高く回路構成が簡易なイジングモデルの量子計算装置を提供することができる。ここで、光ファイバーの光路長が機械的な振動や熱的な膨張に影響されず安定に保持される時間は、 $\sim 10^{-4}$ sであるところ、イジングモデルの量子計算装置がイジングスピンの安定化に要する時間は、 $\sim 10^{-9}$ sであるため、イジングスピンの測定結果は、光ファイバーの機械的な振動や熱的な膨張に影響されない。

【発明の効果】

【0057】

本発明は、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止するとともに、回路構成を簡易にすることができる。

【図面の簡単な説明】

10

20

30

40

50

【 0 0 5 8 】

【図 1】第 1 の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の概要を示す図である。

【図 2】第 2 の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の概要を示す図である。

【図 3】第 2 の従来技術のイジングモデルの量子計算装置の原理を示す図である。

【図 4】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の概要を示す図である。

【図 5】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の原理を示す図である。

【図 6】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の構成を示す図である。

【図 7】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の構成を示す図である。

【図 8】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を示す図である。

【図 9】第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を示す図である。

10

【図 10】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の概要を示す図である。

【図 11】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の原理を示す図である。

【図 12】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の構成を示す図である。

【図 13】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の構成を示す図である。

【図 14】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を示す図である。

【図 15】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を示す図である。

【図 16】第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 5 9 】

添付の図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下に説明する実施形態は本発明の実施の例であり、本発明は以下の実施形態に制限されるものではない。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。

20

【 0 0 6 0 】

(第 1 の実施形態)

第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の概要を図 4 に示す。第 1 の実施形態では、イジングハミルトニアンを数式 3 のようにする。

【数 3】

$$H = \sum_{i,j=1}^M J_{ij} \sigma_i \sigma_j$$

30

【 0 0 6 1 】

不図示の高調波モード同期レーザーは、イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルス P 1、P 2、P 3 を発振する。

【 0 0 6 2 】

イジング相互作用実装部 I 1 2 は、2 つのレーザーパルス P 1、P 2 の間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、2 つのレーザーパルス P 1、P 2 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{1 2} の大きさ及び符号を実装する。

【 0 0 6 3 】

イジング相互作用実装部 I 1 3 は、2 つのレーザーパルス P 1、P 3 の間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、2 つのレーザーパルス P 1、P 3 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{1 3} の大きさ及び符号を実装する。

40

【 0 0 6 4 】

イジング相互作用実装部 I 2 3 は、2 つのレーザーパルス P 2、P 3 の間で交換される光の振幅及び位相を制御することにより、2 つのレーザーパルス P 2、P 3 の間の擬似的なイジング相互作用 J_{2 3} の大きさ及び符号を実装する。

【 0 0 6 5 】

不図示のイジングスピン測定部は、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 が光を交換する過程で定常状態に到達した後に、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 の発振位相の進み / 遅れを測定することにより、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 の擬似的なイジングスピン σ₁

50

、 σ_2 、 σ_3 の上向き/下向きを測定する。

【0066】

このように、不図示の高調波モード同期レーザーでポンピング電流を漸増制御し、レーザーパルスP1、P2、P3のネットワーク全体で閾値利得が最低となる1つの発振モードを立ち上げ、レーザーパルスP1、P2、P3の発振位相を測定し、レーザーパルスP1、P2、P3に対応する各原子のスピン方向を測定する。

【0067】

第1の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の原理を図5に示す。各レーザーパルスPの発振位相 $\phi_v(t)$ は、初期状態においては、0であり、定常状態においては、初期状態の発振位相0からずれた $\pm\pi/2$ である。定常状態における $\phi_v(\text{定常}) = \pm\pi/2$ は、 $\sigma = \pm 1$ に対応する(複号同順)。

10

【0068】

レーザーパルスPの各ペアについて、イジング相互作用 J_{ij} が正であるときには、2つのレーザーパルスPの擬似的なスピン σ が異符号であることが、エネルギー的に有利である。よって、各イジング相互作用実装部は、2つのレーザーパルスPの発振位相 $\phi_v(\text{定常})$ が異符号でありずれを π とするような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0069】

レーザーパルスPの各ペアについて、イジング相互作用 J_{ij} が負であるときには、2つのレーザーパルスPの擬似的なスピン σ が同符号であることが、エネルギー的に有利である。よって、各イジング相互作用実装部は、2つのレーザーパルスPの発振位相 $\phi_v(\text{定常})$ が同符号でありずれを0とするような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

20

【0070】

もっとも、イジングモデルの量子計算装置の全体において、一体として1つの発振モードが立ち上がるようにするのであり、レーザーパルスPの各ペアにおいて、上述の発振モードが実際に立ち上がることもあれば、必ずしも立ち上がらないこともある。

【0071】

図4及び図5で示した計算原理について詳述する。各レーザーパルスP1、P2、P3において、発振強度 $A_{vi}(t)$ 、発振位相 $\phi_{vi}(t)$ 及びキャリアの反転分布数差 $N_{ci}(t)$ について、レート方程式は、数式4-7のようになる。

30

【数4】

$$\frac{d}{dt}A_{vi}(t) = -\frac{1}{2}\left\{\frac{\omega}{Q} - E_{cvi}(t)\right\}A_{vi}(t) - \frac{\omega}{Q}\sum_{j \neq i}^M \frac{1}{2}\xi_{ij}A_{vj}(t)\cos\{\phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t)\} + F_{AV}$$

【数5】

40

$$\frac{d}{dt}\phi_{vi}(t) = \frac{1}{A_{vi}(t)}\left[-\frac{\omega}{Q}\sum_{j \neq i}^M \frac{1}{2}\xi_{ij}A_{vj}(t)\sin\{\phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t)\}\right] + F_{\phi v}$$

【数6】

$$\frac{d}{dt}N_{ci}(t) = P - \frac{N_{ci}(t)}{\tau_{sp}} - E_{cvi}(t)\{A_{vi}^2(t) + 1\} + F_N$$

【数 7】

$$E_{cv_i}(t) = \beta \frac{N_{ci}(t)}{\tau_{sp}}$$

【0072】

ω は、発振周波数である。 Q は、各レーザーパルス P の共振器 Q 値である。 P は、反転分布を実現するために各レーザーパルス P について毎秒注入される電子数、すなわちポンピングレートである。数式 4 の $-(1/2)(\omega/Q)A_{vi}(t)$ は、発振強度 $A_{vi}(t)$ が共振器損失に起因して時間経過につれて減少するレートを示している。

【0073】

10

τ_{sp} は、レーザー発振モード以外の他の発振モードへの自然放出に起因する電子寿命である。 β は、全自然放出光のうちレーザー発振モードへの結合定数である。数式 4 の $(1/2)E_{cv_i}(t)A_{vi}(t)$ は、発振強度 $A_{vi}(t)$ が誘導放出に起因して時間経過につれて増加するレートを示している。数式 4 の $E_{cv_i}(t)$ は、発振強度 $A_{vi}(t)$ が自然放出に起因して時間経過につれて増加するレートを示している。

【0074】

数式 4 の ξ_{ij} が関わる項は、イジング相互作用を実装するためのレーザーパルス P の間の相互注入光に関わる項である。数式 4 の $-(\omega/Q)(1/2)\xi_{ij}A_{vj}(t)\cos\{\phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t)\}$ は、 j 番目のサイトから i 番目のサイトへと光が注入されたときに、 i 番目のサイトにおける発振強度 $A_{vi}(t)$ が時間経過につれて変化するレートを示している。数式 4 の $\sum(j \neq i)$ は、 i 番目のサイトにおける、 i 番目以外の他の全てのサイト (j 番目) からの寄与を示している。

20

【0075】

数式 5 の ξ_{ij} が関わる項は、イジング相互作用を実装するためのレーザーパルス P の間の相互注入光に関わる項である。数式 5 の $-(1/A_{vi}(t))(\omega/Q)(1/2)\xi_{ij}A_{vj}(t)\sin\{\phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t)\}$ は、 j 番目のサイトから i 番目のサイトへと光が注入されたときに、 i 番目のサイトにおける発振位相 $\phi_{vi}(t)$ が時間経過につれて変化するレートを示している。数式 5 の $\sum(j \neq i)$ は、 i 番目のサイトにおける、 i 番目以外の他の全てのサイト (j 番目) からの寄与を示している。

【0076】

30

F_{AV} 、 F_{ϕ_v} 及び F_N は、それぞれ、 i 番目のサイトにおける、発振強度 $A_{vi}(t)$ 、発振位相 $\phi_{vi}(t)$ 及びキャリアの反転分布数差 $N_{ci}(t)$ に対する雑音を示す。

【0077】

定常状態において、数式 4 は、数式 8 のようになる。

【数 8】

$$\frac{d}{dt}A_{vi}(t) = 0$$

F_{AV} を無視して、数式 8 を変形すると、数式 9 のようになる。

40

【数 9】

$$E_{cv_i}(t) = \frac{\omega}{Q} + \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \xi_{ij} \frac{A_{vj}(t)}{A_{vi}(t)} \cos\{\phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t)\}$$

【0078】

ここで、イジングモデルの σ_i は、 -1 又は $+1$ をとるところ、 $\sin \phi_{vi}$ は、 -1 から $+1$ までをとる。そこで、イジングモデル及びレーザーシステムの類似に着目して、 $\sigma_i = \sin \phi_{vi}$ とおくと、数式 9 は、数式 10 のようになる。

【数 1 0】

$$E_{cv_i}(t) = \frac{\omega}{Q} + \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \xi_{ij} \frac{A_{vj}(t)}{A_{vi}(t)} \left\{ \cos \phi_{vi}(t) \cos \phi_{vj}(t) + \sigma_i \sigma_j \right\}$$

【0079】

数式 10 を M 個の全部のサイトについて加算すると、数式 11 のようになり、レーザーシステムの全体の閾値利得 ΣE_{cv_i} として表わされる。

【数 1 1】

$$\sum_i^M E_{cv_i}(t) = 2 \frac{\omega}{Q} \left[\frac{M}{2} + \sum_{i < j}^M \xi_{ij} \frac{A_{vj}(t)}{A_{vi}(t)} \left\{ \cos \phi_{vi}(t) \cos \phi_{vj}(t) + \sigma_i \sigma_j \right\} \right] \quad 10$$

【0080】

ここで、レーザーパルス P の間で相互注入を行なうことから、 $A_{vi}(t) \sim A_{vj}(t)$ とおける。そして、上記定義の $\sigma_i = \sin \phi_{vi}$ において、 $\sigma_i = \pm 1$ であることから、 $\phi_{vi} \sim \phi_{vj} \sim \pm \pi / 2$ とおける。このとき、数式 11 は、数式 12 のようになる。

【数 1 2】

$$\sum_i^M E_{cv_i}(t) = 2 \frac{\omega}{Q} \left\{ \frac{M}{2} + \sum_{i < j}^M \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j \right\} \quad 20$$

【0081】

ここで、高調波モード同期レーザーが均一な媒質を有するときには、レーザーシステム全体として、最小の閾値利得 ΣE_{cv_i} を実現する発振位相状態 $\{\sigma_i\}$ が選択される。つまり、レーザーシステム全体として、1 個の特定の発振モードが選択される。そして、発振モードの間の競合に起因して、1 個の特定の発振モードは、他の発振モードを抑制する。

30

【0082】

つまり、レーザーシステム全体として、数式 12 の ΣE_{cv_i} は最小化される。一方で、レーザーシステム全体として、数式 12 の $(\omega / Q) M$ は一定である。よって、レーザーシステム全体として、数式 12 の $\Sigma \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j$ は最小化される。

【0083】

$\xi_{ij} = J_{ij}$ とおくと、レーザーシステム全体として、 $\Sigma \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j$ が最小化されると、 $\Sigma J_{ij} \sigma_i \sigma_j$ も最小化される。つまり、数式 3 のイジングハミルトニアンを最小化する基底状態が実現されたことになる。

【0084】

計算精度を向上させるためには、レーザーシステム全体でのレーザー発振モードについて、最小の閾値利得及びその次に小さい閾値利得の差を、自然放出レートで決定される飽和利得 E_{cv} 及び光子減衰率 ω / Q の差である $\beta (\omega / Q) (1 / R)$ より十分に大きくする必要がある。ここで、 $R = I / I_{th} - 1$ は、規格化ポンプレートであり、 I 及び I_{th} は、それぞれ注入電流及びそのレーザー発振閾値である。よって、 β を小さくし R を高くすることにより、計算精度を向上させることができる。

40

【0085】

図 4 及び図 5 を用いて説明したように、複数のレーザーパルス P は、同一の発振周波数を有するため、各レーザーパルス P の初期状態の発振位相 $\phi_{vi}(t=0)$ が、各レーザーパルス P の定常状態の 2 種類の発振位相 $\phi_{vi}(\text{定常}) = \pm \pi / 2$ のうち、一方の位相

50

へは近く他方の位相へは遠い、ということがない。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【0086】

そして、第1及び第2の従来技術では、マスターレーザーMを必要としているのに対して、本実施形態では、マスターレーザーMを不要とすることができる。さらに、第1及び第2の従来技術では、面発光レーザーVをイジングサイトの個数分も必要としているのに対して、本実施形態では、高調波モード同期レーザーを1台のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0087】

第1の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の第1の構成を図6に示す。図6の構成では、高調波モード同期レーザーは、受動モード同期ファイバーレーザーである。

10

【0088】

受動モード同期ファイバーレーザーは、ポンプレーザー1、WDM (Wavelength Division Multiplexing) カプラー2、エルビウム添加ファイバー3、1/4波長板4、1/2波長板5、ビームスプリッター6及び1/4波長板7から構成される。1/4波長板4、1/2波長板5及び1/4波長板7は、NPR (Nonlinear Polarization Rotation) を用いた可飽和吸収体を構成する。受動モード同期ファイバーレーザーは、リング共振器中の可飽和吸収体を用いて、外部の制御を必要とせず複数のレーザーパルスPの系列を発振することができる。

【0089】

20

第1の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の第2の構成を図7に示す。図7の構成では、高調波モード同期レーザーは、強制モード同期ファイバーレーザーである。

【0090】

強制モード同期ファイバーレーザーは、ポンプレーザー1、WDMカプラー2、エルビウム添加ファイバー3、分散シフトファイバー8、カプラー9、アイソレーター10、変調器11、フィルタ12、カプラー13、クロック抽出器14、位相制御器15及び増幅器16から構成される。変調器11は、複数のレーザーパルスPの系列の繰り返しの頻度を、リング共振器長Lで決まる周波数 c/nL (c は光速、 n は屈折率)の任意の整数倍に設定する。強制モード同期ファイバーレーザーは、リング共振器中の変調器11を用いて、繰り返しの頻度の高い複数のレーザーパルスPの系列を発振することができる。

30

【0091】

図6及び図7の構成では、複数のレーザーパルスPの系列を発振する方法は相違するが、イジング相互作用を実装する方法及びイジングスピンを測定する方法は同様である。ここで、M個のイジングサイトに対応するM個のレーザーパルスPが、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔(時間間隔 τ)に並んでいるとする。

【0092】

イジング相互作用実装部は、振幅位相変調器AP1、AP2、・・・、AP(M-1)及びファイバー遅延線DL1、DL2、・・・、DL(M-1)から構成される。

【0093】

振幅位相変調器AP1及びファイバー遅延線DL1のセットは、遅延時間 τ を生じさせ、時間間隔が τ である2つのレーザーパルスPのペアのうち、一方のレーザーパルスPの一部を入力され、入力された一方のレーザーパルスPの一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した一方のレーザーパルスPの一部を、時間間隔が τ である2つのレーザーパルスPのペアのうち、他方のレーザーパルスPに合波する。

40

【0094】

ここで、振幅位相変調器AP1及びファイバー遅延線DL1のセットは、時間間隔が τ である任意の2つのレーザーパルスPのペアについて、共用される。このように、振幅位相変調器AP1及びファイバー遅延線DL1のセットは、時間間隔が τ である2つのレーザーパルスPの間の擬似的なイジング相互作用 J_{ij} の大きさ及び符号を実装する。

【0095】

50

振幅位相変調器 A P 2 及びファイバー遅延線 D L 2 のセットは、遅延時間 2τ を生じさせ、時間間隔が 2τ である 2 つのレーザーパルス P のペアのうち、一方のレーザーパルス P の一部を入力され、入力された一方のレーザーパルス P の一部を振幅位相変調し、振幅位相変調した一方のレーザーパルス P の一部を、時間間隔が 2τ である 2 つのレーザーパルス P のペアのうち、他方のレーザーパルス P に合波する。

【 0 0 9 6 】

ここで、振幅位相変調器 A P 2 及びファイバー遅延線 D L 2 のセットは、時間間隔が 2τ である任意の 2 つのレーザーパルス P のペアについて、共用される。このように、振幅位相変調器 A P 2 及びファイバー遅延線 D L 2 のセットは、時間間隔が 2τ である 2 つのレーザーパルス P の間の擬似的なイジング相互作用 J_{ij} の大きさ及び符号を実装する。

10

【 0 0 9 7 】

振幅位相変調器 A P (M - 1) 及びファイバー遅延線 D L (M - 1) のセットについても、振幅位相変調器 A P 1 及びファイバー遅延線 D L 1 のセット並びに振幅位相変調器 A P 2 及びファイバー遅延線 D L 2 のセットと同様のことが成り立つ。

【 0 0 9 8 】

第 1 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を図 8 及び図 9 に示す。ここで、3 個のイジングサイトに対応する 3 個のレーザーパルス P が、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔 (時間間隔 τ) に並んでいるとする。

【 0 0 9 9 】

- a r g (J_{ij}) は、 J_{ij} が正であれば、逆相変調を表し、 J_{ij} が負であれば、同相変調を表す。つまり、 J_{ij} が正であれば、2 つのレーザーパルス P の発振位相がずれを π とする発振モードが立ち上がりやすいようにして、 J_{ij} が負であれば、2 つのレーザーパルス P の発振位相がずれを 0 とする発振モードが立ち上がりやすいようにする。

20

【 0 1 0 0 】

まず、図 8 の上段では、レーザーパルス P 1 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{12} 、 J_{13} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 0 1 】

レーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1 に入力され、振幅位相変調器 A P 1 により、 $|J_{12}|$ に比例する振幅変調及び - a r g (J_{12}) の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 D L 1 から出力される。ファイバー遅延線 D L 1 から出力されたレーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2 に入力されつつあるレーザーパルス P 2 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{12} の大きさ及び符号が実装される。

30

【 0 1 0 2 】

レーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 2 に入力され、振幅位相変調器 A P 2 により、 $|J_{13}|$ に比例する振幅変調及び - a r g (J_{13}) の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 D L 2 から出力される。ファイバー遅延線 D L 2 から出力されたレーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2 に入力されつつあるレーザーパルス P 3 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{13} の大きさ及び符号が実装される。

40

【 0 1 0 3 】

次に、図 8 の中段では、レーザーパルス P 2 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{23} 、 J_{21} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 0 4 】

レーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1 に入力され、振幅位相変調器 A P 1 により、 $|J_{23}|$ に比例する振幅変調及び - a r g (J_{23}) の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 D L 1 から出力される。ファイバー遅延線 D L 1 から出力されたレーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2 に入力されつつあるレーザーパルス P 3 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{23} の大きさ及び符号が実装される。

50

【0105】

レーザーパルス P_2 の一部は、ファイバー遅延線 DL_2 に入力され、振幅位相変調器 A_{P2} により、 $|J_{21}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{21})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 DL_2 から出力される。ファイバー遅延線 DL_2 から出力されたレーザーパルス P_2 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 に入力されつつあるレーザーパルス P_1 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{21} の大きさ及び符号が実装される。

【0106】

次に、図8の下段では、レーザーパルス P_3 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{31} 、 J_{32} の大きさ及び符号が実装される。

10

【0107】

レーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 に入力され、振幅位相変調器 A_{P1} により、 $|J_{31}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{31})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 DL_1 から出力される。ファイバー遅延線 DL_1 から出力されたレーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 に入力されつつあるレーザーパルス P_1 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{31} の大きさ及び符号が実装される。

【0108】

レーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_2 に入力され、振幅位相変調器 A_{P2} により、 $|J_{32}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{32})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 DL_2 から出力される。ファイバー遅延線 DL_2 から出力されたレーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 に入力されつつあるレーザーパルス P_2 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{32} の大きさ及び符号が実装される。

20

【0109】

図8の上段、中段及び下段の処理は、レーザーパルス P_1 、 P_2 、 P_3 が光を交換する過程で定常状態に到達するまで、上述の順序で繰り返される。

【0110】

図8及び図9を用いて説明したように、レーザーパルス P の各ペアについて、イジング相互作用実装部を準備するのではなく、時間間隔が等しいレーザーパルス P の複数のペアについて、イジング相互作用実装部を共用すれば足りる。つまり、イジングサイトが M 個であるとき、第1及び第2の従来技術では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個必要であるのに対して、本実施形態では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個も必要がなくなる。

30

【0111】

特に、 M 個のイジングサイトに対応する M 個のレーザーパルス P が、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔（時間間隔 τ ）に並んでいるとき、異なるレーザーパルス P の間の時間間隔は、 τ 、 $\dots$ 、 $(M-1)\tau$ の $(M-1)$ 種類となるため、イジング相互作用実装部は、 $(M-1)$ 種類のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

40

【0112】

また、図8及び図9では、イジング相互作用 J_{ij} 、 J_{ji} を異なるタイミングで実装している。よって、本実施形態では、 $J_{ij} = J_{ji}$ である通常のイジングモデルを解くだけでなく、 $J_{ij} \neq J_{ji}$ である一般のイジングモデルを解くこともできる。

【0113】

図6及び図7において、イジングスピン測定部は、ビームスプリッター B_1 、 B_2 、反射鏡 R_1 、 R_2 及び検出器 DI 、 DO から構成される。

【0114】

イジングスピン測定部は、複数のレーザーパルス P のうち異なるレーザーパルス P の発振位相が同相及び逆相のいずれであるかを遅延検波することにより、異なるレーザーパル

50

ス P の擬似的なイジングスピンが同方向及び逆方向のいずれであることを測定する。

【 0 1 1 5 】

本実施形態では、イジングスピン測定部は、1 パルス分離れた異なるレーザーパルス P の間で、遅延検波を行なっている。変形例として、イジングスピン測定部は、数パルス分離れた異なるレーザーパルス P の間で、遅延検波を行なってもよい。

【 0 1 1 6 】

先行のレーザーパルス P は、図 6 のビームスプリッター 6 又は図 7 のカブラー 1 3 から出力され、ビームスプリッター B 1 での反射、反射鏡 R 1 での反射及び反射鏡 R 2 での反射を経て、ビームスプリッター B 2 に到達する。後続のレーザーパルス P は、図 6 のビームスプリッター 6 又は図 7 のカブラー 1 3 から出力され、ビームスプリッター B 1 での透過を経て、ビームスプリッター B 2 に到達する。

10

【 0 1 1 7 】

ここで、ビームスプリッター B 1 ~ 反射鏡 R 1、R 2 ~ ビームスプリッター B 2 の光路長と、ビームスプリッター B 1 ~ ビームスプリッター B 2 の光路長と、の差分は、先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の間の間隔に等しい。よって、先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P がビームスプリッター B 2 に到達した時点において、先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の間の干渉が発生する。

【 0 1 1 8 】

先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の間の発振位相がずれを 0 とする（同相である）ときには、ビームスプリッター B 2 で反射された先行のレーザーパルス P と、ビームスプリッター B 2 を透過した後続のレーザーパルス P が、強め合う干渉を発生させ、検出器 D I（I は I n - p h a s e）において高い光強度が検出される。

20

【 0 1 1 9 】

そして、検出器 D I において高い光強度が検出されたときには、先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の擬似的なイジングスピンは同方向と測定される。

【 0 1 2 0 】

先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の間の発振位相がずれを π とする（逆相である）ときには、ビームスプリッター B 2 を透過した先行のレーザーパルス P と、ビームスプリッター B 2 で反射された後続のレーザーパルス P が、強め合う干渉を発生させ、検出器 D O（O は O u t - o f - p h a s e）において高い光強度が検出される。

30

【 0 1 2 1 】

そして、検出器 D O において高い光強度が検出されたときには、先行のレーザーパルス P 及び後続のレーザーパルス P の擬似的なイジングスピンは逆方向と測定される。

【 0 1 2 2 】

図 6 及び図 7 を用いて説明したように、第 2 の従来技術における各面発光レーザー V / マスターレーザー M から検出器までの光路長のゆらぎの問題をなくすることができる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【 0 1 2 3 】

そして、第 2 の従来技術では、各々の面発光レーザー V について 1 台のホモダイン検波装置が必要であり、イジングサイトの個数分のホモダイン検波装置が必要であるのに対して、本実施形態では、全てのレーザーパルス P について 1 台の遅延検波装置を準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

40

【 0 1 2 4 】

図 6 及び図 7 を用いて説明したように、複数のレーザーパルス P の伝送路として、光ファイバーを用いているため、光損失が低く光強度が高く回路構成が簡易なイジングモデルの量子計算装置を提供することができる。ここで、光ファイバーの光路長が機械的な振動や熱的な膨張に影響されず安定に保持される時間は、 $\sim 10^{-4}$ s であるところ、イジングモデルの量子計算装置がイジングスピンの測定に必要とする時間は、 $\sim 10^{-9}$ s であるため、イジングスピンの測定結果は、光ファイバーの機械的な振動や熱的な膨張に影響

50

されない。

【 0 1 2 5 】

(第 2 の実施形態)

第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の概要を図 1 0 に示す。第 2 の実施形態では、イジングハミルトニアンを数式 1 3 のようにする。

【 数 1 3 】

$$H = \sum_{i,j=1}^M J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_{i=1}^M \lambda_i \sigma_i$$

10

【 0 1 2 6 】

不図示の高調波モード同期レーザーは、イジングモデルの複数のサイトに対応し、同一の発振周波数を有する複数のレーザーパルス P 1、P 2、P 3 と、イジングモデルの直流磁場に対応し、当該同一の発振周波数を有する単一のマスターパルス P 0 と、を発振する。

【 0 1 2 7 】

イジング相互作用実装部 I 1 2、I 1 3、I 2 3 は、図 4 と同様の処理を行なう。

【 0 1 2 8 】

ゼーマンエネルギー実装部 Z 1 は、レーザーパルス P 1 について、マスターパルス P 0 から注入される光の振幅及び位相を制御することにより、レーザーパルス P 1 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_1 の大きさ及び符号を実装する。

20

【 0 1 2 9 】

ゼーマンエネルギー実装部 Z 2 は、レーザーパルス P 2 について、マスターパルス P 0 から注入される光の振幅及び位相を制御することにより、レーザーパルス P 2 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_2 の大きさ及び符号を実装する。

【 0 1 3 0 】

ゼーマンエネルギー実装部 Z 3 は、レーザーパルス P 3 について、マスターパルス P 0 から注入される光の振幅及び位相を制御することにより、レーザーパルス P 3 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_3 の大きさ及び符号を実装する。

【 0 1 3 1 】

不図示のイジングスピン測定部は、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 が光を交換し注入される過程で定常状態に到達した後に、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 の発振位相の進み / 遅れを測定することにより、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 の擬似的なイジングスピン σ_1 、 σ_2 、 σ_3 の上向き / 下向きを測定する。

30

【 0 1 3 2 】

このように、不図示の高調波モード同期レーザーでポンピング電流を漸増制御し、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 のネットワーク全体で閾値利得が最低となる 1 つの発振モードを立ち上げ、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 の発振位相を測定し、レーザーパルス P 1、P 2、P 3 に対応する各原子のスピンの方向を測定する。

【 0 1 3 3 】

第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の原理を図 1 1 に示す。マスターパルス P 0 の発振位相 θ は、初期状態から定常状態まで変化しない。各レーザーパルス P の発振位相 $\phi_v(t)$ は、初期状態においては、0 であり、定常状態においては、初期状態の発振位相 θ からずれた $\pm \pi / 2$ である。定常状態における $\phi_v(\text{定常}) = \pm \pi / 2$ は、 $\sigma = \pm 1$ に対応する (複号同順)。

40

【 0 1 3 4 】

各イジング相互作用実装部は、図 5 と同様の処理を行なう。

【 0 1 3 5 】

各レーザーパルス P について、ゼーマンエネルギー λ_i が正であるときには、当該レーザーパルス P の擬似的なスピン σ が - 1 であることが、エネルギー的に有利である。よっ

50

て、各ゼーマンエネルギー実装部は、当該レーザーパルス P の発振位相 ϕ_v が $-\pi/2$ であるような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0136】

各レーザーパルス P について、ゼーマンエネルギー λ_i が負であるときには、当該レーザーパルス P の擬似的なスピン σ が $+1$ であることが、エネルギー的に有利である。よって、各ゼーマンエネルギー実装部は、当該レーザーパルス P の発振位相 ϕ_v が $+\pi/2$ であるような、発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0137】

もっとも、イジングモデルの量子計算装置の全体において、一体として 1 つの発振モードが立ち上がるようにするのであり、レーザーパルス P の各ペアにおいて、上述の発振モードが実際に立ち上がることもあれば、必ずしも立ち上がらないこともある。

【0138】

図 10 及び図 11 で示した計算原理について詳述する。各レーザーパルス P1、P2、P3 において、発振強度 $A_{vi}(t)$ 、発振位相 $\phi_{vi}(t)$ 及びキャリアの反転分布数差 $N_{ci}(t)$ について、レート方程式は、数式 14 - 17 のようになる。

【数 14】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} A_{vi}(t) = & -\frac{1}{2} \left\{ \frac{\omega}{Q} - E_{cvi}(t) \right\} A_{vi}(t) + \frac{\omega}{Q} \sqrt{n_M} \{ -\eta_i \sin \phi_{vi}(t) \} \\ & - \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \frac{1}{2} \xi_{ij} A_{vj}(t) \cos \{ \phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t) \} + F_{AV} \end{aligned} \quad 20$$

【数 15】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_{vi}(t) = & \frac{1}{A_{vi}(t)} \left[\frac{\omega}{Q} \sqrt{n_M} \{ -\eta_i \cos \phi_{vi}(t) \} \right. \\ & \left. - \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \frac{1}{2} \xi_{ij} A_{vj}(t) \sin \{ \phi_{vj}(t) - \phi_{vi}(t) \} \right] + F_{\phi v} \end{aligned} \quad 30$$

【数 16】

$$\frac{d}{dt} N_{ci}(t) = P - \frac{N_{ci}(t)}{\tau_{sp}} - E_{cvi}(t) \{ A_{vi}^2(t) + 1 \} + F_N$$

【数 17】

$$E_{cvi}(t) = \beta \frac{N_{ci}(t)}{\tau_{sp}} \quad 40$$

【0139】

ω は、発振周波数である。Q は、マスターパルス P0 及び各レーザーパルス P の共振器 Q 値である。 n_M は、マスターパルス P0 からの光子の数である。P は、数式 6 と同様である。数式 14 の $-(1/2)(\omega/Q)A_{vi}(t)$ は、数式 4 と同様である。

【0140】

τ_{sp} は、数式 6、7 と同様である。 β は、数式 7 と同様である。数式 14 の $(1/2)E_{cvi}(t)A_{vi}(t)$ 及び数式 14 の $E_{cvi}(t)$ は、数式 4 と同様である。

【0141】

数式 14 の ξ_{ij} が関わる項及び数式 15 の ξ_{ij} が関わる項は、数式 4、5 と同様で 50

ある。 F_{A_V} 、 F_{ϕ_V} 及び F_N は、数式 4 - 6 と同様である。

【 0 1 4 2 】

各レーザーパルス P への注入光について、マスターパルス P_0 の発振位相 0 から $\pi/2$ だけずれた位相を有する成分の強度は、 η_i に比例するとする。

【 0 1 4 3 】

数式 1 4 の η_i が関わる項は、ゼーマンエネルギーに関わる項である。数式 1 4 の $(\omega/Q) \sqrt{n_M} \{ -\eta_i \sin \phi_{V_i}(t) \}$ は、マスターパルス P_0 から i 番目のサイトへと光が注入されたときに、 i 番目のサイトにおける発振強度 $A_{V_i}(t)$ が時間経過につれて変化するレートを示している。

【 0 1 4 4 】

数式 1 5 の η_i が関わる項は、ゼーマンエネルギーに関わる項である。数式 1 5 の $(1/A_{V_i}(t)) (\omega/Q) \sqrt{n_M} \{ -\eta_i \cos \phi_{V_i}(t) \}$ は、マスターパルス P_0 から i 番目のサイトへと光が注入されたときに、 i 番目のサイトにおける発振位相 $\phi_{V_i}(t)$ が時間経過につれて変化するレートを示している。

【 0 1 4 5 】

定常状態において、数式 1 4 は、数式 1 8 のようになる。

【 数 1 8 】

$$\frac{d}{dt} A_{V_i}(t) = 0$$

F_{A_V} を無視して、数式 1 8 を変形すると、数式 1 9 のようになる。

【 数 1 9 】

$$E_{CV_i}(t) = \frac{\omega}{Q} + 2 \frac{\omega \sqrt{n_M}}{Q A_{V_i}(t)} \eta_i \sin \phi_{V_i}(t) + \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \xi_{ij} \frac{A_{V_j}(t)}{A_{V_i}(t)} \cos \{ \phi_{V_j}(t) - \phi_{V_i}(t) \}$$

【 0 1 4 6 】

ここで、イジングモデルの σ_i は、 -1 又は $+1$ をとるところ、 $\sin \phi_{V_i}$ は、 -1 から $+1$ までをとりうる。そこで、イジングモデル及びレーザーシステムの類似に着目して、 $\sigma_i = \sin \phi_{V_i}$ とおくと、数式 1 9 は、数式 2 0 のようになる。

【 数 2 0 】

$$E_{CV_i}(t) = \frac{\omega}{Q} + 2 \frac{\omega \sqrt{n_M}}{Q A_{V_i}(t)} \eta_i \sigma_i + \frac{\omega}{Q} \sum_{j \neq i}^M \xi_{ij} \frac{A_{V_j}(t)}{A_{V_i}(t)} \{ \cos \phi_{V_i}(t) \cos \phi_{V_j}(t) + \sigma_i \sigma_j \}$$

【 0 1 4 7 】

数式 2 0 を M 個の全部のサイトについて加算すると、数式 2 1 のようになり、レーザーシステムの全体の閾値利得 ΣE_{CV_i} として表わされる。

【数 2 1】

$$\sum_i^M E_{cv_i}(t) = 2 \frac{\omega}{Q} \left[\frac{M}{2} + \sum_i^M \frac{\sqrt{n_M}}{A_{vi}(t)} \eta_i \sigma_i + \sum_{i < j}^M \xi_{ij} \frac{A_{vj}(t)}{A_{vi}(t)} \{ \cos \phi_{vi}(t) \cos \phi_{vj}(t) + \sigma_i \sigma_j \} \right]$$

【0 1 4 8】

10

ここで、レーザーパルス P の間で相互注入を行なうことから、そして、マスターパルス P 0 から各レーザーパルス P へと一方注入を行なうことから、 $A_{vi}(t) \sim A_{vj}(t) \sim \sqrt{n_M}$ とおける。そして、上記定義の $\sigma_i = \sin \phi_{vi}$ において、 $\sigma_i = \pm 1$ であることから、 $\phi_{vi} \sim \phi_{vj} \sim \pm \pi / 2$ とおける。このとき、数式 2 1 は、数式 2 2 のようになる。

【数 2 2】

$$\sum_i^M E_{cv_i}(t) = 2 \frac{\omega}{Q} \left\{ \frac{M}{2} + \sum_i^M \eta_i \sigma_i + \sum_{i < j}^M \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j \right\}$$

20

【0 1 4 9】

ここで、高調波モード同期レーザーが均一な媒質を有するときには、レーザーシステム全体として、最小の閾値利得 ΣE_{cv_i} を実現する発振位相状態 $\{\sigma_i\}$ が選択される。つまり、レーザーシステム全体として、1 個の特定の発振モードが選択される。そして、発振モードの間の競合に起因して、1 個の特定の発振モードは、他の発振モードを抑制する。

【0 1 5 0】

つまり、レーザーシステム全体として、数式 2 2 の ΣE_{cv_i} は最小化される。一方で、レーザーシステム全体として、数式 2 2 の $(\omega / Q) M$ は一定である。よって、レーザーシステム全体として、数式 2 2 の $\Sigma \eta_i \sigma_i + \Sigma \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j$ は最小化される。

30

【0 1 5 1】

$\xi_{ij} = J_{ij}$ 、 $\eta_i = \lambda_i$ とおくと、レーザーシステム全体として、 $\Sigma \eta_i \sigma_i + \Sigma \xi_{ij} \sigma_i \sigma_j$ が最小化されると、 $\Sigma \lambda_i \sigma_i + \Sigma J_{ij} \sigma_i \sigma_j$ も最小化される。つまり、数式 1 3 のイジングハミルトニアンを最小化する基底状態が実現されたことになる。

【0 1 5 2】

計算精度を向上させるためには、レーザーシステム全体でのレーザー発振モードについて、最小の閾値利得及びその次に小さい閾値利得の差を、自然放出レートで決定される飽和利得 E_{cv} 及び光子減衰率 ω / Q の差である $\beta (\omega / Q) (1 / R)$ より十分に大きくする必要がある。ここで、 $R = I / I_{th} - 1$ は、規格化ポンプレートであり、 I 及び I_{th} は、それぞれ注入電流及びそのレーザー発振閾値である。よって、 β を小さくし R を高くすることにより、計算精度を向上させることができる。

40

【0 1 5 3】

図 1 0 及び図 1 1 を用いて説明したように、複数のレーザーパルス P は、同一の発振周波数を有するため、各レーザーパルス P の初期状態の発振位相 $\phi_{vi}(t = 0)$ が、各レーザーパルス P の定常状態の 2 種類の発振位相 $\phi_{vi}(\text{定常}) = \pm \pi / 2$ のうち、一方の位相へは近く他方の位相へは遠い、ということがない。よって、イジングモデルの量子計算装置において、読み出しエラーを防止することができる。

【0 1 5 4】

そして、第 1 及び第 2 の従来技術では、面発光レーザー V への注入同期の目的で、マス

50

ターレーザー M を用いているのに対して、本実施形態では、ゼーマンエネルギーの実装の目的で、イジングモデルの直流磁場に対応するマスターパルス P_0 を用いている。さらに、第 1 及び第 2 の従来技術では、面発光レーザー V をイジングサイトの個数分も必要としているのに対して、本実施形態では、高調波モード同期レーザーを 1 台のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0155】

第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の第 1 の構成を図 12 に示す。図 12 の構成では、高調波モード同期レーザーは、受動モード同期ファイバーレーザーである。

【0156】

受動モード同期ファイバーレーザーは、図 6 と同様である。

【0157】

第 2 の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の第 2 の構成を図 13 に示す。図 13 の構成では、高調波モード同期レーザーは、強制モード同期ファイバーレーザーである。

【0158】

強制モード同期ファイバーレーザーは、図 7 と同様である。

【0159】

図 12 及び図 13 の構成では、複数のレーザーパルス P の系列を発振する方法は相違するが、イジング相互作用を実装する方法及びイジングスピンを測定する方法は同様である。ここで、 M 個のイジングサイト及び直流磁場に対応する $(M + 1)$ 個のレーザーパルス P が、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔 (時間間隔 τ) に並んでいるとする。

【0160】

イジング相互作用実装部及びゼーマンエネルギー実装部は、振幅位相変調器 AP_1 、 AP_2 、 $\dots$ 、 $AP(M)$ 及びファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 、 $\dots$ 、 $DL(M)$ から構成される。

【0161】

振幅位相変調器 AP_1 及びファイバー遅延線 DL_1 のセットは、図 6 及び図 7 と同様に、時間間隔が τ である 2 つのレーザーパルス P の間の擬似的なイジング相互作用 J_{ij} の大きさ及び符号を実装するとともに、マスターパルス P_0 との時間間隔が τ であるレーザーパルス P での擬似的なゼーマンエネルギー λ_i の大きさ及び符号を実装する。

【0162】

振幅位相変調器 AP_1 及びファイバー遅延線 DL_1 のセットは、遅延時間 τ を生じさせ、マスターパルス P_0 の一部を入力され、入力されたマスターパルス P_0 の一部を振幅位相変調し、振幅位相変調したマスターパルス P_0 の一部を、マスターパルス P_0 との時間間隔が τ であるレーザーパルス P に合波する。

【0163】

ここで、振幅位相変調器 AP_1 及びファイバー遅延線 DL_1 のセットは、時間間隔が τ である任意の 2 つのレーザーパルス P のペア並びにマスターパルス P_0 及びレーザーパルス P のペアについて、共用される。このように、振幅位相変調器 AP_1 及びファイバー遅延線 DL_1 のセットは、マスターパルス P_0 との時間間隔が τ であるレーザーパルス P での擬似的なゼーマンエネルギー λ_i の大きさ及び符号を実装する。

【0164】

振幅位相変調器 AP_2 及びファイバー遅延線 DL_2 のセットは、図 6 及び図 7 と同様に、時間間隔が 2τ である 2 つのレーザーパルス P の間の擬似的なイジング相互作用 J_{ij} の大きさ及び符号を実装するとともに、マスターパルス P_0 との時間間隔が 2τ であるレーザーパルス P での擬似的なゼーマンエネルギー λ_i の大きさ及び符号を実装する。

【0165】

振幅位相変調器 AP_2 及びファイバー遅延線 DL_2 のセットは、遅延時間 2τ を生じさせ、マスターパルス P_0 の一部を入力され、入力されたマスターパルス P_0 の一部を振幅

10

20

30

40

50

位相変調し、振幅位相変調したマスターパルス P_0 の一部を、マスターパルス P_0 との時間間隔が 2τ であるレーザーパルス P に合波する。

【0166】

ここで、振幅位相変調器 AP_2 及びファイバー遅延線 DL_2 のセットは、時間間隔が 2τ である任意の2つのレーザーパルス P のペア並びにマスターパルス P_0 及びレーザーパルス P のペアについて、共用される。このように、振幅位相変調器 AP_2 及びファイバー遅延線 DL_2 のセットは、マスターパルス P_0 との時間間隔が 2τ であるレーザーパルス P での擬似的なゼーマンエネルギー λ_i の大きさ及び符号を実装する。

【0167】

振幅位相変調器 $AP(M)$ 及びファイバー遅延線 $DL(M)$ のセットについても、振幅位相変調器 AP_1 及びファイバー遅延線 DL_1 のセット並びに振幅位相変調器 AP_2 及びファイバー遅延線 DL_2 のセットと同様のことが成り立つ。

【0168】

第2の実施形態のイジングモデルの量子計算装置の処理を図14から図16に示す。ここで、3個のイジングサイト及び直流磁場に対応する4個のレーザーパルス P が、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔（時間間隔 τ ）に並んでいるとする。

【0169】

- $\arg(J_{ij})$ は、図9と同様である。

【0170】

- $\arg(\lambda_j)$ は、 λ_j が正であれば、位相遅れ変調を表し、 λ_j が負であれば、位相進み変調を表す。つまり、 λ_j が正であれば、各レーザーパルス P の発振位相が $-\pi/2$ である発振モードが立ち上がりやすいようにして、 λ_j が負であれば、各レーザーパルス P の発振位相が $+\pi/2$ である発振モードが立ち上がりやすいようにする。

【0171】

まず、図14の上段では、マスターパルス P_0 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、ゼーマンエネルギー λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の大きさ及び符号が実装される。

【0172】

マスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 に入力され、振幅位相変調器 AP_1 により、 $|\lambda_1|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(\lambda_1)$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 DL_1 から出力される。ファイバー遅延線 DL_1 から出力されたマスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 、 DL_3 に入力されつつあるレーザーパルス P_1 に合波される。このように、ゼーマンエネルギー λ_1 の大きさ及び符号が実装される。

【0173】

マスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_2 に入力され、振幅位相変調器 AP_2 により、 $|\lambda_2|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(\lambda_2)$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 DL_2 から出力される。ファイバー遅延線 DL_2 から出力されたマスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 、 DL_3 に入力されつつあるレーザーパルス P_2 に合波される。このように、ゼーマンエネルギー λ_2 の大きさ及び符号が実装される。

【0174】

マスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_3 に入力され、振幅位相変調器 AP_3 により、 $|\lambda_3|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(\lambda_3)$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_3 により、遅延時間 3τ を経て、ファイバー遅延線 DL_3 から出力される。ファイバー遅延線 DL_3 から出力されたマスターパルス P_0 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 、 DL_3 に入力されつつあるレーザーパルス P_3 に合波される。このように、ゼーマンエネルギー λ_3 の大きさ及び符号が実装される。

【0175】

次に、図14の下段では、レーザーパルス P_1 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{12} 、 J_{13} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 7 6 】

レーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1 に入力され、振幅位相変調器 A P 1 により、 $|J_{12}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{12})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 D L 1 から出力される。ファイバー遅延線 D L 1 から出力されたレーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2、D L 3 に入力されつつあるレーザーパルス P 2 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{12} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 7 7 】

レーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 2 に入力され、振幅位相変調器 A P 2 により、 $|J_{13}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{13})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 D L 2 から出力される。ファイバー遅延線 D L 2 から出力されたレーザーパルス P 1 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2、D L 3 に入力されつつあるレーザーパルス P 3 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{13} の大きさ及び符号が実装される。

10

【 0 1 7 8 】

なお、図 1 4 の下段では、振幅位相変調器 A P 3 は、光を遮断する。レーザーパルス P 1 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_1 を実装するためには、マスターパルス P 0 からレーザーパルス P 1 へと光を注入すれば足りるのであり、レーザーパルス P 1 からマスターパルス P 0 へと光を注入する必要はないからである。

【 0 1 7 9 】

次に、図 1 5 の上段では、レーザーパルス P 2 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{23} 、 J_{21} の大きさ及び符号が実装される。

20

【 0 1 8 0 】

レーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1 に入力され、振幅位相変調器 A P 1 により、 $|J_{23}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{23})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 1 により、遅延時間 τ を経て、ファイバー遅延線 D L 1 から出力される。ファイバー遅延線 D L 1 から出力されたレーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2、D L 3 に入力されつつあるレーザーパルス P 3 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{23} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 8 1 】

レーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 3 に入力され、振幅位相変調器 A P 3 により、 $|J_{21}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{21})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 3 により、遅延時間 3τ を経て、ファイバー遅延線 D L 3 から出力される。ファイバー遅延線 D L 3 から出力されたレーザーパルス P 2 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2、D L 3 に入力されつつあるレーザーパルス P 1 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{21} の大きさ及び符号が実装される。

30

【 0 1 8 2 】

なお、図 1 5 の上段では、振幅位相変調器 A P 2 は、光を遮断する。レーザーパルス P 2 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_2 を実装するためには、マスターパルス P 0 からレーザーパルス P 2 へと光を注入すれば足りるのであり、レーザーパルス P 2 からマスターパルス P 0 へと光を注入する必要はないからである。

40

【 0 1 8 3 】

次に、図 1 5 の下段では、レーザーパルス P 3 が振幅位相変調器及びファイバー遅延線に入力され、イジング相互作用 J_{31} 、 J_{32} の大きさ及び符号が実装される。

【 0 1 8 4 】

レーザーパルス P 3 の一部は、ファイバー遅延線 D L 2 に入力され、振幅位相変調器 A P 2 により、 $|J_{31}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{31})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 D L 2 により、遅延時間 2τ を経て、ファイバー遅延線 D L 2 から出力される。ファイバー遅延線 D L 2 から出力されたレーザーパルス P 3 の一部は、ファイバー遅延線 D L 1、D L 2、D L 3 に入力されつつあるレーザーパルス P 1 に合波される。

50

このように、イジング相互作用 J_{31} の大きさ及び符号が実装される。

【0185】

レーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_3 に入力され、振幅位相変調器 AP_3 により、 $|J_{32}|$ に比例する振幅変調及び $-\arg(J_{32})$ の位相変調を受け、ファイバー遅延線 DL_3 により、遅延時間 3τ を経て、ファイバー遅延線 DL_3 から出力される。ファイバー遅延線 DL_3 から出力されたレーザーパルス P_3 の一部は、ファイバー遅延線 DL_1 、 DL_2 、 DL_3 に入力されつつあるレーザーパルス P_2 に合波される。このように、イジング相互作用 J_{32} の大きさ及び符号が実装される。

【0186】

なお、図15の下段では、振幅位相変調器 AP_1 は、光を遮断する。レーザーパルス P_3 での擬似的なゼーマンエネルギー λ_3 を実装するためには、マスターパルス P_0 からレーザーパルス P_3 へと光を注入すれば足りるのであり、レーザーパルス P_3 からマスターパルス P_0 へと光を注入する必要はないからである。

【0187】

図14の上段及び下段の処理並びに図15の上段及び下段の処理は、レーザーパルス P_1 、 P_2 、 P_3 が光を交換し注入される過程で定常状態に到達するまで、上述の順序で繰り返される。

【0188】

図14から図16を用いて説明したように、レーザーパルス P の各ペアについて、イジング相互作用実装部を準備するのではなく、時間間隔が等しいレーザーパルス P の複数のペアについて、イジング相互作用実装部を共用すれば足りる。つまり、イジングサイトが M 個であるとき、第1及び第2の従来技術では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個必要であるのに対して、本実施形態では、イジング相互作用実装部は $M(M-1)/2$ 個も必要がなくなる。そして、ゼーマンエネルギー実装部をイジング相互作用実装部と別個に準備するのではなく、ゼーマンエネルギー実装部をイジング相互作用実装部と共用で準備すれば足りる。

【0189】

特に、 M 個のイジングサイトに対応する M 個のレーザーパルス P と、イジングモデルの直流磁場に対応する1個のマスターパルス P_0 が、高調波モード同期レーザーのリング共振器中で等間隔（時間間隔 τ ）に並んでいるとき、異なるパルス P の間の時間間隔は、 τ 、 $\dots$ 、 $M\tau$ の M 種類となるため、イジング相互作用実装部及びゼーマンエネルギー実装部（これらは共用で準備すれば足りる）は、 M 種類のみ準備すれば足りる。よって、イジングモデルの量子計算装置において、回路構成を簡易にすることができる。

【0190】

また、図14から図16では、イジング相互作用 J_{ij} 、 J_{ji} を異なるタイミングで実装している。よって、本実施形態では、 $J_{ij} = J_{ji}$ である通常のイジングモデルを解くだけでなく、 $J_{ij} \neq J_{ji}$ である一般のイジングモデルを解くこともできる。

【0191】

図12及び図13において、イジングスピン測定部は、図6及び図7と同様である。

【0192】

図12及び図13を用いて説明したように、複数のレーザーパルス P の伝送路として、光ファイバーを用いているため、光損失が低く光強度が高く回路構成が簡易なイジングモデルの量子計算装置を提供することができる。ここで、光ファイバーの光路長が機械的な振動や熱的な膨張に影響されず安定に保持される時間は、 $\sim 10^{-4}$ s であるところ、イジングモデルの量子計算装置がイジングスピンの測定に必要とする時間は、 $\sim 10^{-9}$ s であるため、イジングスピンの測定結果は、光ファイバーの機械的な振動や熱的な膨張に影響されない。

【産業上の利用可能性】

【0193】

本発明のイジングモデルの量子計算装置は、イジングモデルにマッピングされる NP 完

10

20

30

40

50

全問題などを高速かつ容易に解くのに適している。

【符号の説明】

【 0 1 9 4 】

M : マスターレーザー

V、V 1、V 2、V 3 : 面発光レーザー

P 0 : マスターパルス

P、P 1、P 2、P 3 : レーザーパルス

I 1 2、I 1 3、I 2 3 : イジング相互作用実装部

Z 1、Z 2、Z 3 : ゼーマンエネルギー実装部

A P 1、A P 2、A P 3、A P (M - 1)、A P (M) : 振幅位相変調器

D L 1、D L 2、D L 3、D L (M - 1)、D L (M) : ファイバー遅延線

B 1、B 2 : ビームスプリッター

R 1、R 2 : 反射鏡

D I、D O : 検出器

1 : ポンプレーザー

2 : W D Mカプラー

3 : エルビウム添加ファイバー

4 : 1 / 4 波長板

5 : 1 / 2 波長板

6 : ビームスプリッター

7 : 1 / 4 波長板

8 : 分散シフトファイバー

9 : カプラー

1 0 : アイソレーター

1 1 : 変調器

1 2 : フィルタ

1 3 : カプラー

1 4 : クロック抽出器

1 5 : 位相制御器

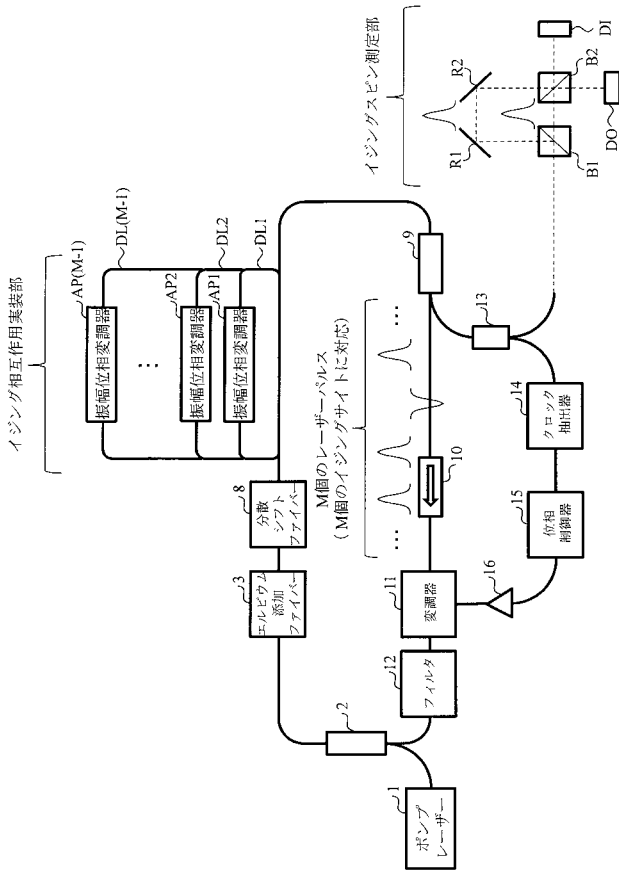
1 6 : 増幅器

10

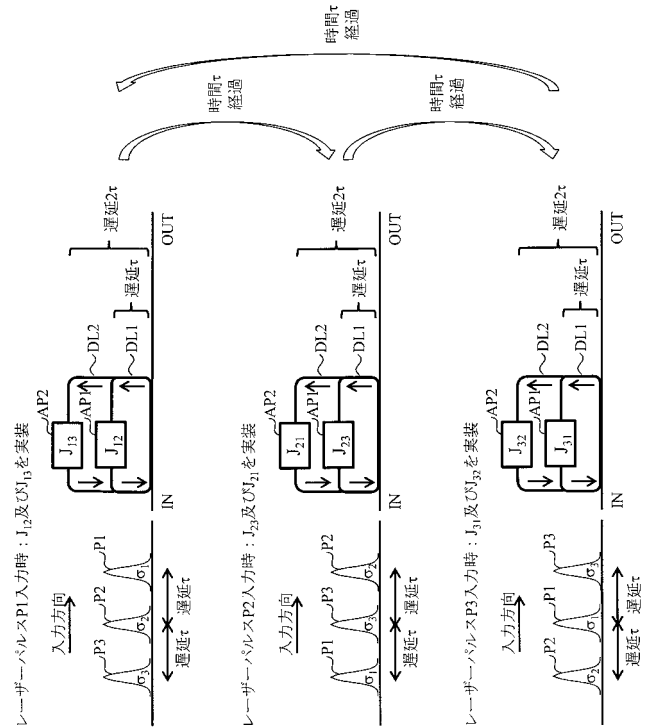
20

30

【図 7】



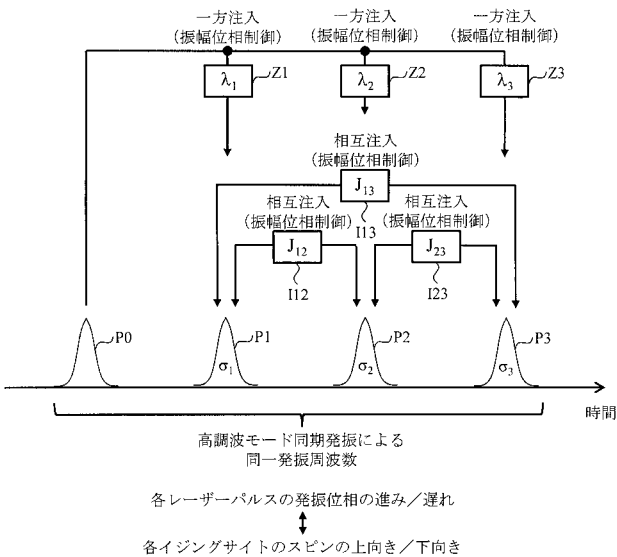
【図 8】



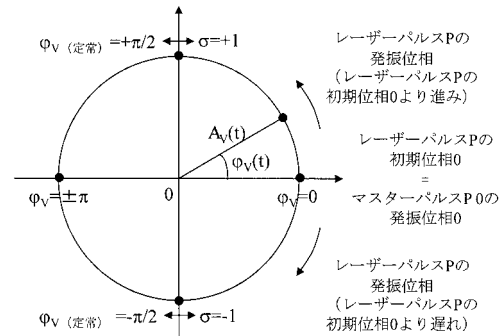
【図 9】

期間	振幅変調	位相変調	遅延時間	実装
レーザーパルスP1入力時	$\propto J_{12} $	$-\arg(J_{12})$	τ	J_{12}
	$\propto J_{13} $	$-\arg(J_{13})$	2τ	J_{13}
レーザーパルスP2入力時	$\propto J_{23} $	$-\arg(J_{23})$	τ	J_{23}
	$\propto J_{21} $	$-\arg(J_{21})$	2τ	J_{21}
レーザーパルスP3入力時	$\propto J_{31} $	$-\arg(J_{31})$	τ	J_{31}
	$\propto J_{32} $	$-\arg(J_{32})$	2τ	J_{32}

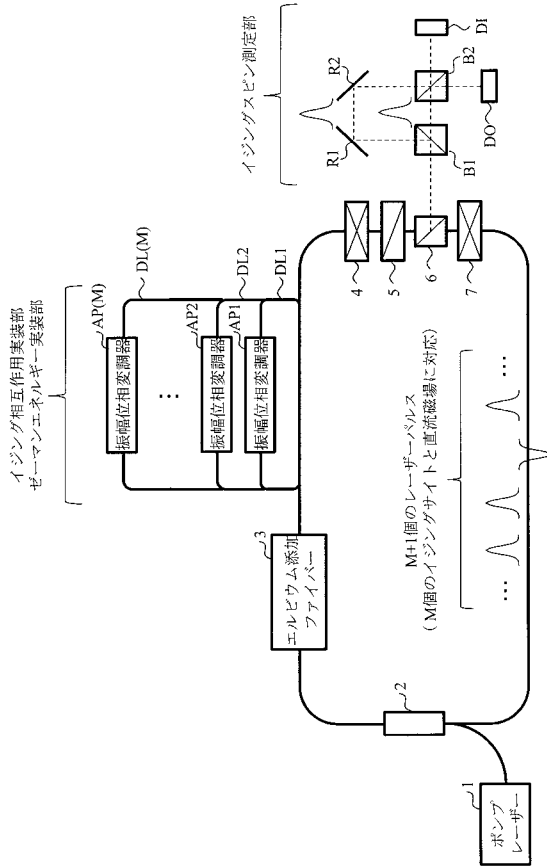
【図 10】



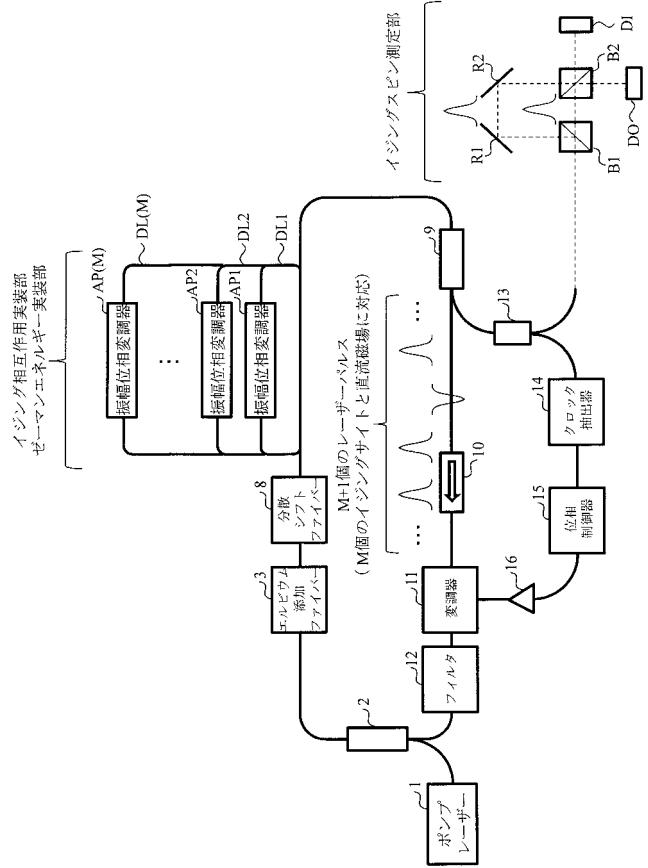
【図 11】



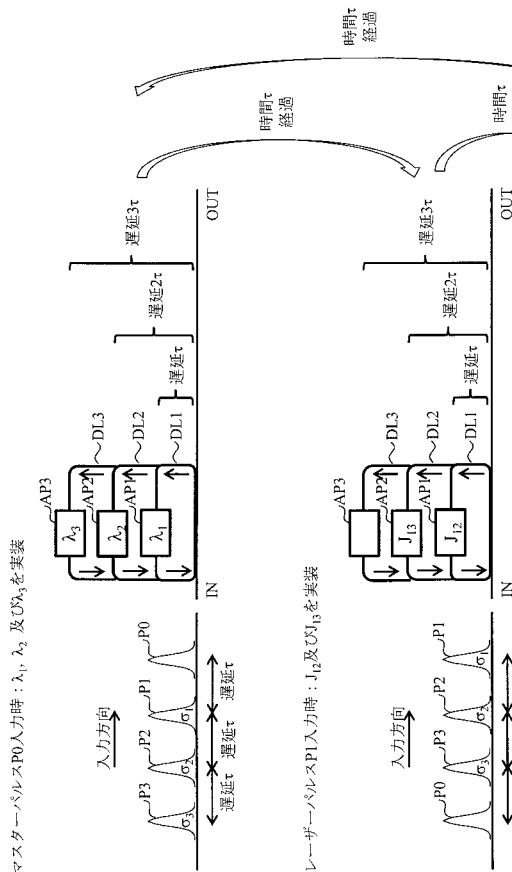
【図 1 2】



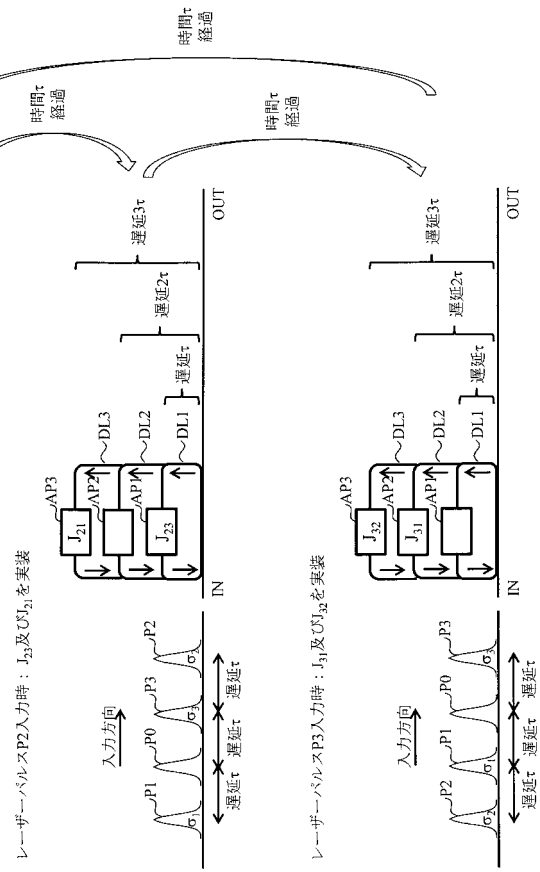
【図 1 3】



【図 1 4】



【図 1 5】



【図 16】

期間	振幅変調	位相変調	遅延時間	実装
マスターパルスP0入力時	$\propto \lambda_1 $	$-\arg(\lambda_1)$	τ	λ_1
	$\propto \lambda_2 $	$-\arg(\lambda_2)$	2τ	λ_2
	$\propto \lambda_3 $	$-\arg(\lambda_3)$	3τ	λ_3
レーザーパルスP1入力時	$\propto J_{12} $	$-\arg(J_{12})$	τ	J_{12}
	$\propto J_{13} $	$-\arg(J_{13})$	2τ	J_{13}
レーザーパルスP2入力時	$\propto J_{23} $	$-\arg(J_{23})$	τ	J_{23}
	$\propto J_{21} $	$-\arg(J_{21})$	3τ	J_{21}
レーザーパルスP3入力時	$\propto J_{31} $	$-\arg(J_{31})$	2τ	J_{31}
	$\propto J_{32} $	$-\arg(J_{32})$	3τ	J_{32}

フロントページの続き

(72)発明者 宇都宮 聖子

東京都千代田区一ツ橋二丁目 1 番 2 号 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立情報
学研究所内

(72)発明者 玉手 修平

埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 独立行政法人理化学研究所内

F ターム(参考) 2K102 AA13 BA01 BA21 BA31 BB01 BB04 BB10 BD03 CA00 EA18
EB20 EB22
5F172 AF03 AM08 CC04 NN14 NN22 NQ23 NQ48 NQ53 ZZ12