

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7546610号

(P7546610)

(45)発行日 令和6年9月6日(2024.9.6)

(24)登録日 令和6年8月29日(2024.8.29)

(51)国際特許分類

F I

H 1 0 N 60/00 (2023.01)

H 1 0 N 60/00

C

H 0 1 L 25/07 (2006.01)

H 0 1 L 25/08

H

H 0 1 L 25/065(2023.01)

H 0 1 L 25/04

Z

H 0 1 L 25/18 (2023.01)

H 1 0 N 60/80

W Z A A

H 0 1 L 25/04 (2023.01)

H 0 1 L 23/12

5 0 1 B

請求項の数 18 (全13頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2021-576724(P2021-576724)

(86)(22)出願日 令和2年6月23日(2020.6.23)

(65)公表番号 特表2022-538247(P2022-538247
A)

(43)公表日 令和4年9月1日(2022.9.1)

(86)国際出願番号 PCT/EP2020/067450

(87)国際公開番号 WO2020/260251

(87)国際公開日 令和2年12月30日(2020.12.30)

審査請求日 令和4年11月21日(2022.11.21)

(31)優先権主張番号 16/455,043

(32)優先日 令和1年6月27日(2019.6.27)

(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(73)特許権者 390009531

インターナショナル・ビジネス・マシ
ンズ・コーポレーションINTERNATIONAL BUSI
NESS MACHINES CORPO
RATIONアメリカ合衆国10504 ニューヨー
ク州 アーモンク ニュー オーチャード
ロードNew Orchard Road, A
rmonk, New York 105
04, United States of
America

(74)代理人 100112690

弁理士 太佐 種一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 量子情報の光変換のための超伝導インターポーザ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

量子情報の光変換のためのシステムであって、

マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビ
ット・チップと、前記量子ビット・チップから離間された変換チップであって、マイクロ波 - 光周波数変
換器を備える前記変換チップと、前記量子ビット・チップおよび前記変換チップに結合されたインターポーザであって、
内部に複数の超伝導マイクロ波導波路が形成された誘電体材料を含む前記インターポーザ
と、を備え、前記複数の超伝導マイクロ波導波路が、量子情報を前記複数のデータ量子ビ
ットから前記変換チップ上の前記マイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成され、
前記マイクロ波 - 光周波数変換器が、前記量子情報を前記マイクロ波周波数から光周波数
に変換するように構成され、前記インターポーザが、迷光場を、前記複数のデータ量子ビ
ットから分離する、システム。

【請求項2】

前記マイクロ波 - 光周波数変換器が、量子情報を前記光周波数から前記マイクロ波周波
数に変換するようにさらに構成され、前記複数の超伝導マイクロ波導波路が、前記量子情
報を前記変換チップ上の前記マイクロ波 - 光周波数変換器から前記複数のデータ量子ビ
ットに伝送するように構成されている、請求項1に記載のシステム。

【請求項 3】

前記マイクロ波 - 光周波数変換器が、光周波数領域で動作するように構成されたデバイスに結合されたマイクロ波導波路を備える、請求項 1 または 2 に記載のシステム。

【請求項 4】

前記光周波数領域で動作するように構成された前記デバイスが光共振器を備える、請求項 3 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記変換チップが前記光共振器に結合された光ポンプ線路をさらに備え、前記光ポンプ線路が前記量子情報を光周波数信号として伝送するように構成されている、請求項 4 に記載のシステム。

10

【請求項 6】

前記光周波数領域で動作するように構成された前記デバイスがバルク音響波共振器、機械的カプラ、または膜を備える、請求項 3 に記載のシステム。

【請求項 7】

前記変換チップが複数の変換量子ビットを備え、前記複数の変換量子ビットのうちの少なくとも 1 つが前記マイクロ波 - 光周波数変換器に結合され、前記複数の超伝導マイクロ波導波路が、量子情報を前記複数のデータ量子ビットから、マイクロ波光子を介して前記複数の変換量子ビットに伝送するように構成されている、請求項 1 ないし 6 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 8】

前記変換チップが複数のマイクロ波 - 光周波数変換器をさらに備え、前記複数の変換量子ビットのそれぞれが、前記複数のマイクロ波 - 光周波数変換器のうちの 1 つに結合されている、請求項 7 に記載のシステム。

20

【請求項 9】

前記複数のデータ量子ビットのそれぞれが、量子計算を実行するのに十分な緩和時間およびコヒーレンス時間を有し、前記複数の変換量子ビットのそれぞれが、前記マイクロ波 - 光周波数変換器の変換時間を超える緩和時間およびコヒーレンス時間を有する、請求項 8 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記変換チップが電気光学材料もしくは圧電材料を含む基板、または、シリコン・オン・インシュレータ基板を備える、請求項 1 ないし 9 のいずれかに記載のシステム。

30

【請求項 11】

前記マイクロ波 - 光周波数変換器が光学機械システムを備える、請求項 1 ないし 10 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 12】

前記インターポーザが、第 1 の表面と、前記第 1 の表面の反対側の第 2 の表面とを備え、前記量子ビット・チップが前記第 1 の表面に結合され、前記変換チップが前記第 2 の表面に結合されている、請求項 1 ないし 11 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 13】

前記量子ビット・チップおよび前記変換チップが、前記インターポーザの同じ表面に結合されている、請求項 1 ないし 11 のいずれかに記載のシステム。

40

【請求項 14】

前記誘電体材料が、SiO₂、プリント回路板、有機ラミネート、セラミック、ガラス強化エポキシ・ラミネート材料、デュロイド、PEEK、およびテフロン(R)からなる群から選択された 1 つまたは複数を含む、請求項 1 ないし 13 のいずれかに記載のシステム。

【請求項 15】

量子情報の光変換を実行するための方法であって、
マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップを提供することと、

50

量子情報を前記複数のデータ量子ビットから、前記量子ビット・チップから離間された変換チップに転送することであって、前記変換チップがマイクロ波 - 光周波数変換器を備える、前記転送することと、

前記量子ビット・チップと前記変換チップとの間に配置された誘電体インターポーザを使用して、前記複数のデータ量子ビットを迷光場から遮蔽しながら、前記量子情報のマイクロ波 - 光周波数変換を実行することと、

前記量子情報を光周波数信号として出力することと、
を含む、量子情報の光変換を実行するための方法。

【請求項 16】

量子コンピュータであって、

封じ込め容器を備える真空下の冷却システムと、

請求項 1 ないし 14 のいずれかに記載のシステムであって、前記封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容されている、前記システムと、
を備える、量子コンピュータ。

【請求項 17】

前記量子情報を光周波数信号として、前記封じ込め容器によって画定された前記冷却真空環境から前記封じ込め容器の外部に伝送するように構成されている第 2 の光ポンプ線路をさらに備える、請求項 16 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 18】

前記変換チップが、光リング共振器に結合された第 3 の光ポンプ線路をさらに備え、前記第 3 の光ポンプ線路が、前記量子情報を光周波数信号として、前記変換チップから第 2 の量子ビット・チップに結合された第 2 の変換チップに伝送するように構成されている、請求項 16 または 17 に記載の量子コンピュータ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の現在請求されている実施形態は、量子情報の光変換のためのシステムおよび方法に関し、より詳細には、量子情報の光変換のための超伝導インターポーザに関する。

【背景技術】

【0002】

超伝導量子ビットは、電磁スペクトルのマイクロ波領域で動作する。マイクロ波周波数では、マイクロ波伝送線路（すなわち、同軸ケーブル、プリント回路板のストリップ線路）は、損失が非常に大きい（約 1 dB / フィートの減衰）。これらの損失は、量子情報が遠くに輸送されるのを妨げる。例えば、損失は、量子情報がマイクロ波伝送線路を使用して希釈冷却機環境の外に輸送されることを妨げる。光変換は、マイクロ波の光子を光の周波数（すなわち、通信範囲約 1550 nm）に変換する。電磁スペクトルのこの領域では、光子は、光ファイバまたは自由空間を通して実質的に無損失（約 0.2 dB / km）で伝搬することができる。しかしながら、量子ビットおよび光変換器の材料と動作は、多くの場合互換性がない。

【0003】

したがって、当技術分野では、前述の問題に対処する必要がある。

【発明の概要】

【0004】

第 1 の態様から見ると、本発明は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップと、前記量子ビット・チップから離間された変換チップであって、マイクロ波 - 光周波数変換器を備える変換チップと、前記量子ビット・チップおよび前記変換チップに結合されたインターポーザであって、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路が形成された誘電体材料を含む、インターポーザと、を備え、前記複数の超伝導マイクロ波導波路が、量子情報を前記複数のデータ量子ビットから前記変換チップ上のマイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成され、前記マイクロ波 -

10

20

30

40

50

光周波数変換器が、前記量子情報を前記マイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている、量子情報の光変換のためのシステムを提供する。

【0005】

さらなる態様から見ると、本発明は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップを提供することと、量子情報を前記複数のデータ量子ビットから、前記量子ビット・チップから離間された変換チップに転送することと、前記変換チップがマイクロ波 - 光周波数変換器を備える、転送することと、前記量子ビット・チップと前記変換チップとの間に配置された誘電体インターポーザを使用して、前記複数のデータ量子ビットを迷光場から遮蔽しながら、前記量子情報のマイクロ波 - 光周波数変換を実行することと、前記量子情報を光周波数信号として出力することと、を含む、量子情報の光変換を実行するための方法を提供する。

10

【0006】

さらなる態様から見ると、本発明は、封じ込め容器を備える真空下の冷却システムと、本発明のシステムを備え、システムは封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容されている、量子コンピュータを提供する。

【0007】

さらなる態様から見ると、本発明は、封じ込め容器を備える真空下の冷却システムと、前記封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容された量子ビット・チップであって、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップと、前記封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容された変換チップであって、前記量子ビット・チップから離間され、マイクロ波 - 光周波数変換器を備える変換チップと、前記封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容され、前記量子ビット・チップおよび前記変換チップに結合されたインターポーザであって、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路が形成された誘電体材料を含むインターポーザと、を備え、前記複数の超伝導マイクロ波導波路が、量子情報を前記複数のデータ量子ビットから前記変換チップ上の前記マイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成されており、前記マイクロ波 - 光周波数変換器が、前記量子情報を前記マイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている、量子コンピュータを提供する。

20

【0008】

本発明の一実施形態によると、量子情報の光変換のためのシステムは、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップと、量子ビット・チップから離間された変換チップであって、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む変換チップと、を含む。本システムは、量子ビット・チップおよび変換チップに結合されたインターポーザであって、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路が形成された誘電体材料を含むインターポーザを含む。複数の超伝導マイクロ波導波路は、量子情報を複数のデータ量子ビットから変換チップ上のマイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成されており、マイクロ波 - 光周波数変換器は、量子情報をマイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている。

30

【0009】

本発明の一実施形態によると、量子情報の光変換を実行する方法は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップを提供することと、量子情報を複数のデータ量子ビットから、量子ビット・チップから離間された変換チップであって、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む変換チップに転送することと、を含む。本方法は、量子ビット・チップと変換チップとの間に配置された誘電体インターポーザを使用して、複数のデータ量子ビットを迷光場から遮蔽しながら、量子情報のマイクロ波 - 光周波数変換を実行することと、量子情報を光周波数信号として出力することとを含む。

40

【0010】

本発明の一実施形態によると、量子コンピュータは、封じ込め容器を備える真空下の冷却システムと、封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に収容された量子ビット

50

・チップであって、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップとを含む。本システムは、封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に收容された変換チップであって、量子ビット・チップから離間され、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む変換チップをさらに含む。本システムは、封じ込め容器によって画定された冷却真空環境内に收容され、量子ビット・チップおよび変換チップに結合された、インターポーザであって、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路が形成された誘電体材料を含むインターポーザを含む。複数の超伝導マイクロ波導波路は、量子情報を複数のデータ量子ビットから変換チップ上のマイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成されており、マイクロ波 - 光周波数変換器は、量子情報をマイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている。

10

【0011】

ここで、本発明は、以下の図に示されるような好ましい実施形態を参照して、例としてのみ説明される。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の一実施形態による、量子情報の光変換のためのシステムの概略図である。

【図2A】本発明の一実施形態による変換チップの概略図である。

【図2B】本発明の一実施形態による量子ビット・チップの概略図である。

【図2C】本発明の一実施形態によるインターポーザの概略図である。

【図2D】本発明の一実施形態による、図2Aの変換チップおよび図2Bの量子ビット・チップに結合された図2Cのインターポーザの概略図である。

20

【図3A】2つの変換量子ビットを含む変換チップの概略図である。

【図3B】本発明の一実施形態によるインターポーザの概略図である。

【図3C】図3Aの変換チップおよび量子ビット・チップに結合された図3Bのインターポーザの概略図である。

【図4】インターポーザの同じ表面に結合された量子ビット・チップおよび変換チップの概略図である。

【図5】量子情報の光変換を実行するための方法を示す流れ図である。

【図6】本発明の一実施形態による量子コンピュータの概略図である。

【発明を実施するための形態】

30

【0013】

図1は、本発明の一実施形態による、量子情報の光変換のためのシステム100の概略図である。システム100は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビット104、106、108を含む量子ビット・チップ102を含む。システム100は、量子ビット・チップ102から離間された変換チップ110を含む。変換チップ110は、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む(図1には図示せず、図2A参照)。システム100は、量子ビット・チップ102および変換チップ110に結合されたインターポーザ112を含む。インターポーザ112は、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路116、118、120が形成された誘電体材料114を含む。複数の超伝導マイクロ波導波路116、118、120は、量子情報を複数のデータ量子ビット104、106、108から変換チップ110上のマイクロ波 - 光周波数変換器に伝送するように構成されている。マイクロ波 - 光周波数変換器は、量子情報をマイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている。図1の実施形態は、特定の数のデータ量子ビット、マイクロ波 - 光周波数変換器、および超伝導マイクロ波導波路を有する例を示すが、本発明の実施形態は、これらの特定の数に限定されない。本発明の実施形態は、より多くのまたはより少ないデータ量子ビット、マイクロ波 - 光周波数変換器、および超伝導マイクロ波導波路を含むことができる。

40

【0014】

本発明の一実施形態によると、マイクロ波 - 光周波数変換器は、量子情報を光周波数からマイクロ波周波数に変換するようにさらに構成され、複数の超伝導マイクロ波導波路1

50

116、118、120は、量子情報を変換チップ上のマイクロ波 - 光周波数変換器から複数のデータ量子ビット104、106、108に伝送するように構成されている。

【0015】

図1に示すように、本発明の一実施形態によるインターポーザ112は、第1の表面122と、第1の表面122の反対側の第2の表面124とを含む。量子ビット・チップ102は、インターポーザ112の第1の表面122に結合され、変換チップ110は、インターポーザ112の第2の表面124に結合されている。

【0016】

本発明の一実施形態によると、量子ビット・チップは、インターポーザに結合されている。図1では、量子ビット・チップ102は、複数のはんだバンプ126、128、130を使用してインターポーザ112に結合されている。はんだバンプ126、128、130は、超伝導マイクロ波導波路116、118、120に直接結合されてもよく、データ量子ビット104、106、108に容量結合されてもよい。はんだバンプは、超伝導材料から形成されてもよいが、本発明の実施形態は、超伝導材料から形成されたはんだバンプに限定されない。はんだバンプの材料の一例は、インジウムである。本発明の実施形態は、図1に示す例に示されるはんだバンプの数に限定されない。

10

【0017】

本発明の一実施形態によると、変換チップは、インターポーザに結合されている。図1では、変換チップ110は、複数のはんだバンプ132、134、136を使用してインターポーザ112に結合されている。はんだバンプ132、134、136は、マイクロ波 - 光周波数変換器を超伝導マイクロ波導波路116、118、120に結合する。本発明の一実施形態によるシステム100は、複数の量子ビット・チップおよび変換チップを含むことができる。量子ビット・チップおよび変換チップは、単一のインターポーザまたは複数のインターポーザに接合されてもよい。

20

【0018】

本発明の一実施形態によるシステムは、量子情報を超伝導量子ビット・チップから、誘電体インターポーザに埋め込まれた超伝導導波路を介して、光変換を実行するチップに転送することを可能にする。本システムは、変換チップ上に配置されたマイクロ波 - 光変換器によって生成される迷光場を、パッケージング・ソリューションを介して超伝導量子ビット・チップ上のデータ量子ビットから分離する。すなわち、データ量子ビットを1つのチップ上に形成することができ、一方、マイクロ波 - 光変換器を別のチップ上に形成することができる。したがって、材料処理工程が量子ビット・チップと光変換チップとの間で分離される。量子ビット・チップ上のデータ量子ビットは、量子ビットのコヒーレンスを最適化する材料およびプロセスを使用して製造することができる。一方、変換チップは、データ量子ビットの品質に影響を与えることなく、マイクロ波 - 光変換を容易にする材料およびプロセスを使用して製造することができる。

30

【0019】

本システムはまた、変換チップ上に量子ビットを含むことができる。この場合、量子ビット・チップは、高品質の量子ビットを有することができるが、変換チップ上の量子ビットは、 $10\text{ ns} \sim 1\text{ }\mu\text{ s}$ の範囲の変換時間よりも長い寿命を有していればよい。さらに、変換チップを形成するのに有用である可能性がある電気光学材料または圧電材料などの基板は、多くの場合、量子ビットの高寿命と両立しない。また、変換基板としてしばしば使用されるシリコン・オン・インシュレータ(SOI)上に長寿命の量子ビットを製造することも困難である。SOI上に形成された量子ビットは、しばしば、 $3\text{ }\mu\text{ s}$ のオーダのT1およびT2時間を有する。複数のリソグラフィ工程などの、マイクロ波 - 光変換器を形成するのに有用な処理技術は、接合アニーリングまたは2レベルシステムの導入あるいはその両方(すなわち、誘電損失)に起因して量子ビットの寿命を低下させる可能性がある。データ量子ビットとマイクロ波 - 光変換器を異なるチップ上に分離することによって、最適な処理技術を使用して、各チップおよびその上に含まれる構造体を形成することができる。

40

50

【 0 0 2 0 】

本発明の一実施形態によると、マイクロ波 - 光周波数変換器は、光周波数領域で動作するように構成されたデバイスに結合されたマイクロ波導波路を備える。図 2 A は、変換チップ 2 0 0 の概略図である。変換チップ 2 0 0 は、光周波数領域で動作するように構成されたデバイス 2 0 6 に結合されたマイクロ波導波路 2 0 4 を含むマイクロ波 - 光周波数変換器 2 0 2 を含む。デバイス 2 0 6 は、例えば、リング、楕円、レース・トラック、または二重の 8 の字形の形状の光共振器であってもよい。デバイス 2 0 6 は、例えば、バルク音響波共振器、機械的カプラ、または膜であってもよい。変換チップ 2 0 0 はまた、デバイス 2 0 6 に結合された光ポンプ線路 2 0 8 を含むことができる。光ポンプ線路 2 0 8 は、量子情報を光周波数信号として伝送するように構成されている。

10

【 0 0 2 1 】

図 2 B は、本発明の一実施形態による量子ビット・チップ 2 1 2 の概略図である。量子ビット・チップ 2 1 2 は、マイクロ波周波数で動作するように構成されたデータ量子ビット 2 1 4 を含む。

【 0 0 2 2 】

図 2 C は、本発明の一実施形態によるインターポーザ 2 1 6 の概略図である。インターポーザ 2 1 6 は、内部に超伝導マイクロ波導波路 2 2 0 が形成された誘電体材料 2 1 8 を含む。本発明の一実施形態によると、誘電体材料 2 1 8 は、例えば、プリント回路板、有機ラミネート、シリコン・チップ、セラミック、FR - 4 などのガラス強化エポキシ・ラミネート材料、デュロイド、またはポリエーテル・エーテル・ケトン (P E E K) のうちの 1 つもしくは複数を含む。本発明の一実施形態によると、超伝導マイクロ波導波路 2 2 0 は、例えば、ニオブ、アルミニウム、スズ、電気めっきレニウム、またはインジウムのうちの 1 つもしくは複数から形成されてもよい。

20

【 0 0 2 3 】

図 2 D は、本発明の一実施形態による、変換チップおよび量子ビット・チップに結合されたインターポーザの概略図である。超伝導マイクロ波導波路 2 2 0 は、量子情報をデータ量子ビット 2 1 4 から変換チップ上のマイクロ波 - 光周波数変換器 2 0 2 に伝送するように構成されている。図 2 B および図 2 D は、単一のデータ量子ビット 2 1 4 を有する量子ビット・チップを示しているが、本発明の実施形態による量子ビット・チップは、複数のデータ量子ビットを含むことができる。図 2 C および図 2 D は、単一の超伝導マイクロ波導波路 2 2 0 を有するインターポーザを示しているが、本発明の実施形態によるインターポーザは、複数の超伝導マイクロ波導波路を含むことができる。

30

【 0 0 2 4 】

本発明の一実施形態によると、変換チップは、複数の変換量子ビットを含む。図 3 A は、2 つの変換量子ビット 3 0 2、3 0 4 を含む変換チップ 3 0 0 の概略図である。変換量子ビット 3 0 2、3 0 4 のそれぞれは、マイクロ波 - 光周波数変換器 3 0 6、3 0 8 に結合されている。本発明の一実施形態によるマイクロ波 - 光周波数変換器 3 0 6、3 0 8 はそれぞれ、光領域で動作するように構成された共振器 3 1 4、3 1 6 に結合されたマイクロ波導波路 3 1 0、3 1 2 を含む。共振器 3 1 4、3 1 6 は、様々な形状、例えば、リング、レース・トラック、または 8 の字形を有することができる。共振器 3 1 4、3 1 6 はそれぞれ、光ポンプ線路 3 1 8、3 2 0 に結合されてもよい。

40

【 0 0 2 5 】

図 3 B は、本発明の一実施形態によるインターポーザ 3 2 2 の概略図である。インターポーザ 3 2 2 は、内部に 2 つの超伝導マイクロ波導波路 3 2 6、3 2 8 が形成された誘電体材料 3 2 4 を含む。

【 0 0 2 6 】

図 3 C は、図 3 A の変換チップ 3 0 0 と、図 2 B に示す量子ビット・チップ 2 1 2 などの量子ビット・チップとに結合された図 3 B のインターポーザ 3 2 2 の概略図である。超伝導マイクロ波導波路 3 2 6、3 2 8 は、量子情報をデータ量子ビット 3 3 0 から、変換量子ビット 3 0 2、3 0 4 を介してマイクロ波 - 光周波数変換器 3 0 6、3 0 8 に伝送す

50

るように構成されている。マイクロ波導波路 3 2 6、3 2 8 は、量子情報をデータ量子ビット 3 3 0 から、マイクロ波光子を介して変換量子ビット 3 0 2、3 0 4 に伝送する。本発明の実施形態は、図 3 A ~ 図 3 C に示す例に示される特定の数のデータ量子ビット、超伝導マイクロ波導波路、および変換量子ビットに限定されない。

【0027】

本発明の一実施形態によると、複数のデータ量子ビットのそれぞれは、量子計算を実行するのに十分な緩和時間 (T_1) およびコヒーレンス時間 (T_2) を有する。本発明の一実施形態によるデータ量子ビットは、 $75 \mu s$ を超える T_1 時間および T_2 時間を有することができる。本発明の一実施形態によるデータ量子ビットは、 $100 \mu s$ 以上のオーダの T_1 時間および T_2 時間を有することができる。

10

【0028】

本発明の一実施形態によると、複数の変換量子ビットのそれぞれは、マイクロ波 - 光周波数変換器の変換時間を超える緩和時間およびコヒーレンス時間を有する。例えば、マイクロ波 - 光周波数変換に必要な時間が約 $10 ns \sim 1 \mu s$ の場合、変換量子ビットは、約 $3 \mu s$ 以上のオーダの T_1 時間および T_2 時間を有することができる。本発明の一実施形態によると、マイクロ波 - 光周波数変換器の変換時間は、 $1 \mu s$ 未満である。本発明の一実施形態によると、変換量子ビットは、データ量子ビットの T_1 時間および T_2 時間よりも小さい T_1 時間および T_2 時間を有する。

【0029】

本発明の一実施形態によると、変換チップは、電気光学材料、圧電材料、またはシリコン・オン・インシュレータ基板のうちの一つもしくは複数を含む基板を含む。本発明の一実施形態によると、マイクロ波 - 光周波数変換器は、例えば、膜などの光学機械システムを含む。

20

【0030】

図 1 に示す構成の代替として、量子ビット・チップおよび変換チップは、インターポーザの同じ表面に結合されてもよい。図 4 は、インターポーザ 4 0 6 の同じ表面 4 0 4 に結合された量子ビット・チップ 4 0 0 および変換チップ 4 0 2 の概略図である。

【0031】

図 5 は、量子情報の光変換を実行するための方法 5 0 0 を示す流れ図である。方法 5 0 0 は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビットを含む量子ビット・チップを提供すること (5 0 2) を含む。方法 5 0 0 は、量子情報を複数のデータ量子ビットから、量子ビット・チップから離間された変換チップであって、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む、変換チップに転送すること (5 0 4) を含む。方法 5 0 0 は、量子ビット・チップと変換チップとの間に配置された誘電体インターポーザを使用して、複数のデータ量子ビットを迷光場から遮蔽しながら、量子情報のマイクロ波 - 光周波数変換を実行すること (5 0 6) と、量子情報を光周波数信号として出力すること (5 0 8) とを含む。

30

【0032】

図 6 は、本発明の一実施形態による量子コンピュータ 6 0 0 の概略図である。量子コンピュータ 6 0 0 は、封じ込め容器 6 0 2 を備える真空下の冷却システムを含む。量子コンピュータ 6 0 0 は、封じ込め容器 6 0 2 によって画定された冷却真空環境内に收容された量子ビット・チップ 6 0 4 を含む。量子ビット・チップ 6 0 4 は、マイクロ波周波数で動作するように構成された複数のデータ量子ビット 6 0 6、6 0 8、6 1 0 を含む。量子コンピュータ 6 0 0 は、封じ込め容器 6 0 2 によって画定された冷却真空環境内に收容された変換チップ 6 1 2 を含む。変換チップ 6 1 2 は、量子ビット・チップ 6 0 4 から離間されており、マイクロ波 - 光周波数変換器を含む。量子コンピュータ 6 0 0 は、封じ込め容器 6 0 2 によって画定された冷却真空環境内に收容されたインターポーザ 6 1 4 を含む。インターポーザ 6 1 4 は、量子ビット・チップ 6 0 4 および変換チップ 6 1 2 に結合されている。インターポーザ 6 1 4 は、内部に複数の超伝導マイクロ波導波路 6 1 8、6 2 0、6 2 2 が形成された誘電体材料 6 1 6 を含む。複数の超伝導マイクロ波導波路 6 1 8、

40

50

620、622は、量子情報を複数のデータ量子ビット606、608、610から変換チップ612上のマイクロ波-光周波数変換器に伝送するように構成され、マイクロ波-光周波数変換器は、この量子情報をマイクロ波周波数から光周波数に変換するように構成されている。

【0033】

本発明の一実施形態によると、誘電体材料616は、プリント回路板、有機ラミネート、シリコン・ウエハ、セラミック、FR-4などのガラス強化エポキシ・ラミネート材料、デュロイド、テフロン(R)、またはポリエーテル・エーテル・ケトン(PEEK)のうちの1つもしくは複数を含む。本発明の一実施形態によると、マイクロ波-光周波数変換器は、光周波数領域で動作するように構成されたデバイスに結合されたマイクロ波導波路を含む。変換チップ612は、図2の光ポンプ線路208などの、光周波数領域で動作するように構成されたデバイスに結合された光ポンプ線路をさらに含むことができる。光ポンプ線路は、量子情報を、封じ込め容器602によって画定された冷却真空環境から封じ込め容器602の外部に光周波数信号として伝送するように構成されてもよい。代替的または追加的に、光ポンプ線路は、量子情報を光周波数信号として、変換チップ612から、第2の量子ビット・チップに結合された第2の変換チップに伝送するように構成されてもよい。

10

【0034】

本発明の一実施形態による量子コンピュータは、複数のデータ量子ビット・チップ、変換チップ、およびインターポーザを含むことができる。さらに、本発明の実施形態は、図6に示す特定の数のデータ量子ビット、マイクロ波-光周波数変換器、および超伝導マイクロ波導波路に限定されない。

20

【0035】

本発明の様々な実施形態の説明は、例示の目的で提示されてきたが、網羅的であることを意図するものではなく、または開示された実施形態に限定されることを意図するものではない。説明された実施形態の範囲から逸脱することなく、多くの修正および変形が当業者には明らかであろう。本明細書で使用される用語は、実施形態の原理、市場で見られる技術に対する実際の適用または技術的改善を最もよく説明するために、または当業者が本明細書に開示される実施形態を理解できるようにするために選択された。

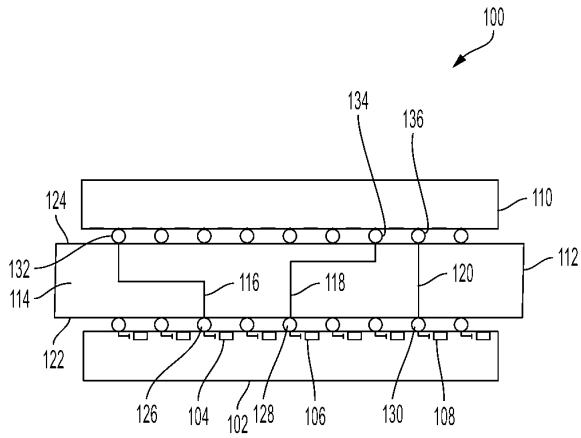
30

40

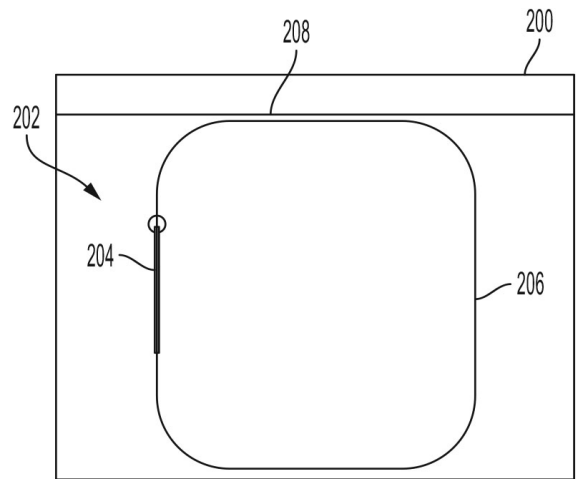
50

【図面】

【図 1】

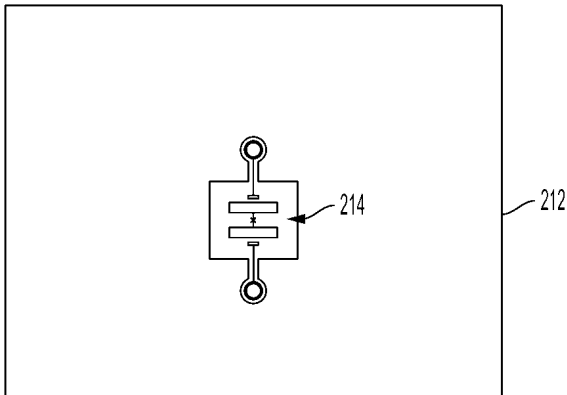


【図 2 A】

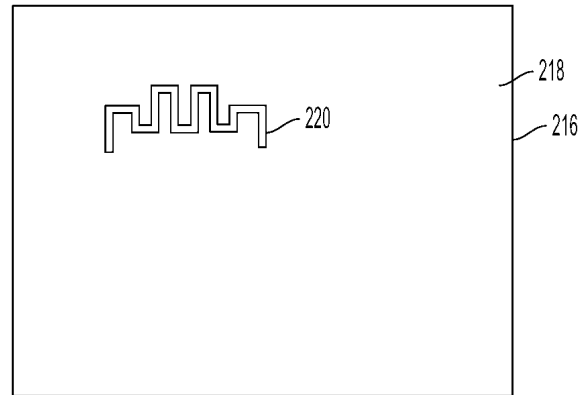


10

【図 2 B】



【図 2 C】



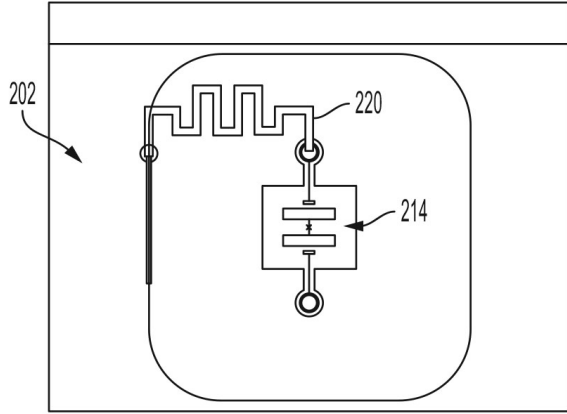
20

30

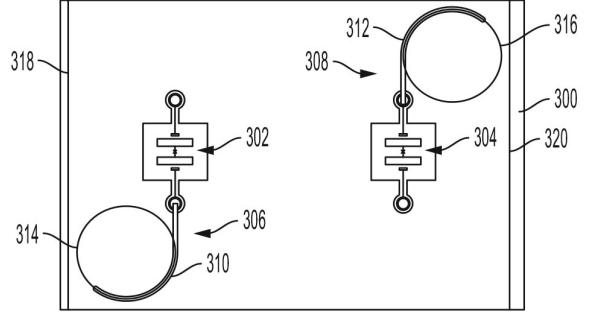
40

50

【図 2 D】

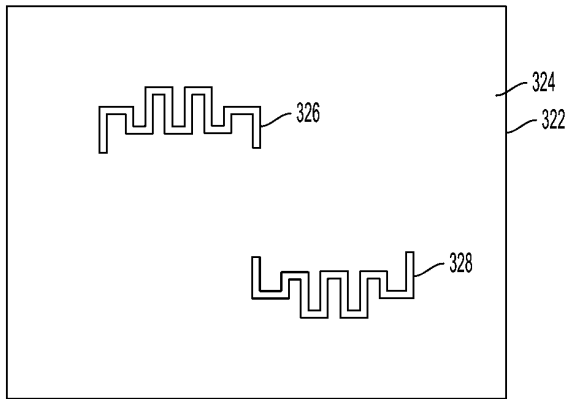


【図 3 A】

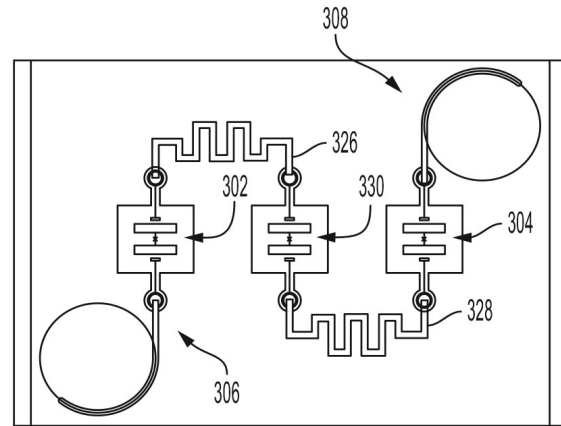


10

【図 3 B】



【図 3 C】



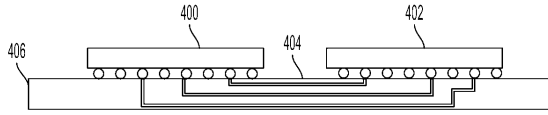
20

30

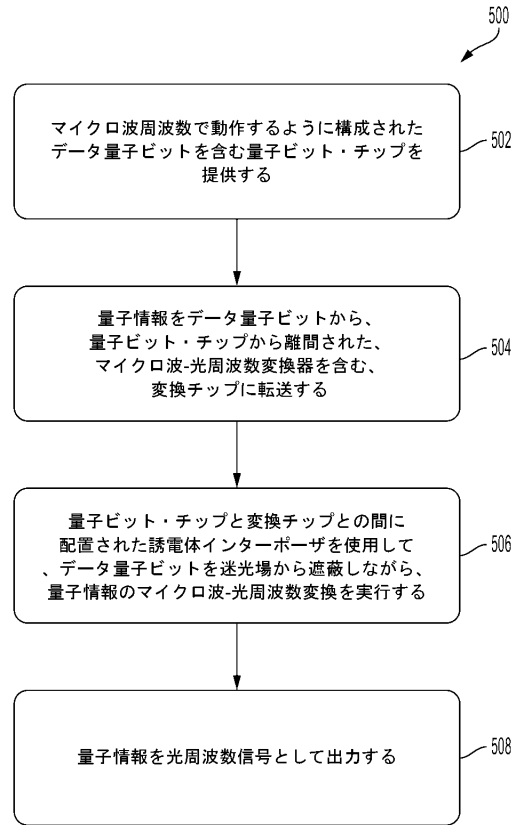
40

50

【 図 4 】



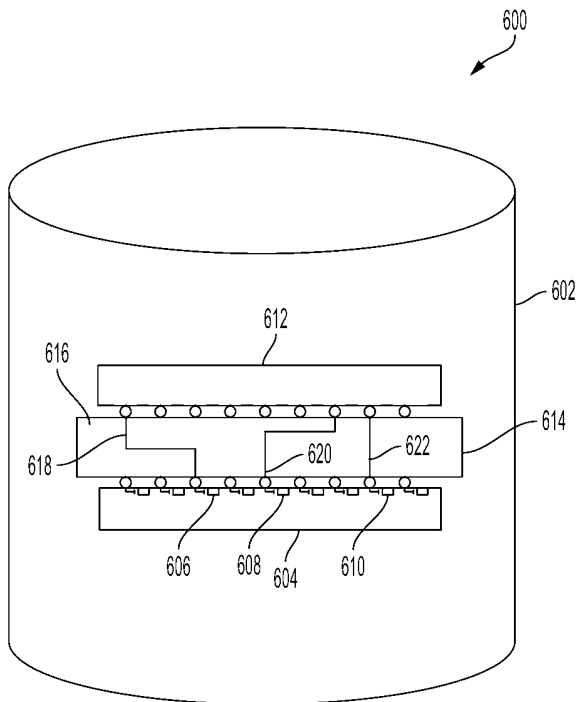
【 図 5 】



10

20

【 図 6 】



30

40

50

フロントページの続き

- (51)国際特許分類 F I
H 1 0 N 60/80 (2023.01) H 0 1 L 23/14 M
 H 0 1 L 23/12 (2006.01)
 H 0 1 L 23/14 (2006.01)
- (72)発明者 ブロン、ニコラス、トーレイフ
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- (72)発明者 ボゴリン、ダニエラ、フロレンティーナ
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- (72)発明者 グマン、パトリク
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- (72)発明者 ハート、シーン
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- (72)発明者 オリヴァデーセ、サルヴァトーレ、ベルナルド
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- (72)発明者 オーカット、ジェイソン
 アメリカ合衆国 1 0 5 9 8 ニューヨーク州ヨークタウン・ハイツ キッチャワン・ロード 1 1 0 1
- 審査官 恩田 和彦
- (56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 8 / 0 0 0 3 7 5 3 (U S , A 1)
 米国特許出願公開第 2 0 1 8 / 0 1 0 2 4 6 9 (U S , A 1)
 国際公開第 2 0 1 8 / 1 6 0 6 7 4 (W O , A 1)
 米国特許出願公開第 2 0 1 6 / 0 1 3 3 8 1 9 (U S , A 1)
 特開 2 0 0 5 - 3 2 2 7 5 6 (J P , A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
 H 1 0 N 6 0 / 0 0
 H 1 0 N 6 0 / 8 0
 H 0 1 L 2 5 / 0 7
 H 0 1 L 2 5 / 0 4
 H 0 1 L 2 3 / 1 2
 H 0 1 L 2 3 / 1 4