(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2024-518457
(P2024-518457A)
(43)公表日　令和6年5月1日(2024.5.1)

(51)国際特許分類　ＦＩ
Ｇ０６Ｎ　10/40　(2022.01)　Ｇ０６Ｎ　10/40

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全46頁）

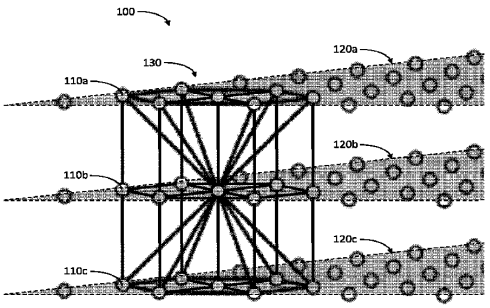
(21)出願番号　特願2023-568663(P2023-568663)
(86)(22)出願日　令和4年5月6日(2022.5.6)
(85)翻訳文提出日　令和6年1月9日(2024.1.9)
(86)国際出願番号　PCT/US2022/028209
(87)国際公開番号　WO2022/250933
(87)国際公開日　令和4年12月1日(2022.12.1)
(31)優先権主張番号　63/186,037
(32)優先日　令和3年5月7日(2021.5.7)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,
最終頁に続く

(71)出願人　523421395
ケービーアール ワイル サービシーズ エルエルシー
アメリカ合衆国 テキサス州 ７７００２ ヒューストン ジェファーソン アヴェニュー ６０１
(74)代理人　110000578
名古屋国際弁理士法人
(72)発明者　ヘンドリクソン ピーター カール
アメリカ合衆国 テキサス州 ７７００２ ヒューストン ジェファーソン アヴェニュー ６０１ シー／オー ケロッグ ブラウン アンド ルート エルエルシー
(72)発明者　アーウィン ジェイドン ダニエル
アメリカ合衆国 テキサス州 ７７００２
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　量子コンピューティングのための多層光格子量子ビット配列を用いたシステム及び方法

(57)【要約】
量子コンピューティング（ＱＣ）システムは、第１の実質的に平面状の領域における第１の複数の論理量子ビットと、第１の実質的に平面状の領域と実質的に平行な第２の実質的に平面状の領域における第２の複数の論理量子ビットと、を含む。第１の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように構成され、第２の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように、及び第１の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかと相互作用するように構成される。ＱＣシステムは、第１及び第２の実質的に平面状の領域と実質的に平行な追加的な実質的に平面状の領域に、追加的な複数の論理量子ビットを含むことができ、第２の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、追加的な複数の論理量子ビットのうち１つ以上と相互作用するように構成されることができる。

FIG. 1:



【特許請求の範囲】
【請求項１】
量子コンピューティング（ＱＣ）システムであって、
第１の実質的に平面状の領域における第１の複数の論理量子ビットであって、前記第１の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように構成される、第１の複数の論理量子ビットと、
前記第１の実質的に平面状の領域と実質的に平行な第２の実質的に平面状の領域における第２の複数の論理量子ビットであって、前記第２の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように、及び、前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかと相互作用するように構成される、第２の複数の論理量子ビットと、
を備えるシステム。
【請求項２】
請求項１記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかと、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかは、互いに直接的に相互作用して、２つを超える論理量子ビットが同時に関与する多量子ビットゲート操作を受けるように構成された少なくとも１つの三次元（３Ｄ）ゲートセル配列を形成するように構成されるシステム。
【請求項３】
請求項１記載のシステムであって、
前記第２の実質的に平面状の領域と実質的に平行な第３の実質的に平面状の領域に、第３の複数の論理量子ビットを更に備え、前記第３の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように、及び、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかと相互作用するように構成されるシステム。
【請求項４】
請求項３記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビット、前記第２の複数の論理量子ビット、前記第３の複数の論理量子ビットの前記論理量子ビットは、個々にアドレス可能であるシステム。
【請求項５】
請求項３記載のシステムであって、
前記第３の実質的に平面状の領域と実質的に平行な少なくとも１つの追加的な実質的に平面状の領域に少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビットを更に備え、
前記少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビットは、互いに相互作用するように、及び／又は、前記第３の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかと相互作用するように構成され、
前記少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビットは、個々にアドレス可能であるシステム。
【請求項６】
請求項１記載のシステムであって、
実質的に平面状の第１の光格子に配置された第１の閉じ込め領域と、前記第１の光格子と実質的に平行な実質的に平面状の第２の光格子に配置される第２の閉じ込め領域と、を備える複数の閉じ込め領域を画定する複数の光ビームを更に備え、
前記第１の複数の論理量子ビットは、前記第１の光格子にあり、前記第２の複数の論理量子ビットは前記第２の光格子にあるシステム。
【請求項７】
請求項１記載のシステムであって、
前記複数の閉じ込め領域は、前記第２の光格子と実質的に平行な実質的に平面状の第３の光格子に配置される第３の閉じ込め領域を更に備え、
前記第３の複数の論理量子ビットは、前記第３の光格子にあるシステム。
【請求項８】
請求項７記載のシステムであって、

前記複数の閉じ込め領域は、前記第３の光格子と実質的に平行な少なくとも１つの追加的な光格子に配置される、少なくとも１つの追加的な閉じ込め領域を更に備え、
前記少なくとも１つの追加的な光格子は、少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビットを備える、システム。
【請求項９】
請求項７記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビット、前記第２の複数の論理量子ビット、及び前記第３の複数の論理量子ビットの前記論理量子ビットは、複数の多量子ビット３Ｄゲートセルとして構成され、
前記複数の多量子ビット３Ｄゲートセルのうちの１つの多量子ビット３Ｄゲートセルの各論理量子ビットは、前記多量子ビット３Ｄゲートセルの少なくとも１つの他の論理量子ビットと量子力学的にエンタングルされるように構成されるシステム。
【請求項１０】
請求項７記載のシステムであって、
前記第１の光格子、前記第２の光格子、及び前記第３の光格子のそれぞれの前記閉じ込め領域は、実質的に対称形の正方形パターン、ダイヤモンド形のパターン、又は菱形のパターンである二次元のパターンに配置されるシステム。
【請求項１１】
請求項１記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかは、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかと完全にエンタングルされるシステム。
【請求項１２】
請求項１記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつか、及び／又は、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかは、前記第１の複数の論理量子ビット及び前記第２の複数の論理量子ビットの最近傍論理量子ビット及び次最近傍論理量子ビットと完全にエンタングルされるシステム。
【請求項１３】
請求項１２記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつか、及び／又は、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかは、前記第１の複数の論理量子ビット及び前記第２の複数の論理量子ビットの次次最近傍論理量子ビットと完全にエンタングルされるシステム。
【請求項１４】
請求項１記載のシステムであって、
前記第１の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつか、及び／又は、前記第２の複数の論理量子ビットの前記少なくともいくつかは、天然に存在する原子、中性原子、荷電原子、イオン、分子、人工的に形成された原子、リュードベリ原子、ダイヤモンドの窒素空孔（ＮＶ）中心、ボース・アインシュタイン凝縮体、電子、光子、量子粒子、量子ドット、フォノン、トランスモン、量子粒子としてふるまう量子状態からなる群から選択される、少なくとも１つの物理的な量子ビットを備えるシステム。
【請求項１５】
二次元を超える次元を備える多層量子ビット格子配列において量子ゲートを形成する論理量子ビットを含むように構成された複数の閉じ込め領域を備える量子コンピューティング（ＱＣ）システムであって、
前記量子ゲートは、１量子ビットゲート及び２量子ビットゲートの連結に依存することなくネイティブに３つ以上の論理量子ビットを巻き込む量子論理演算を実行するように構成されるシステム。
【請求項１６】
請求項１５記載のシステムであって、

少なくともいくつかの前記量子論理演算は、ネイティブに１つ以上のターゲット量子ビットに作用する２つ以上の制御量子ビットを利用するシステム。
【請求項１７】
請求項１６記載のシステムであって、
前記量子論理演算は、単一制御の多重ＮＯＴゲート、ファンアウトゲート、多重制御ＮＯＴゲート、トフォリゲート、スーパートフォリゲート、多重制御位相ゲートからなる群から選択されるシステム。
【請求項１８】
請求項１５記載のシステムであって、
多量子ビット論理演算を実行するように構成された電気的及び光学的要素を更に備えるシステム。
【請求項１９】
請求項１５記載のシステムであって、
前記多層量子ビット格子配列における個々の量子ビットの低ノイズのアドレッシング及び読み出しを可能にするように構成された電気トレース、光ビーム構成、検出器、及び迷光管理要素を更に備えるシステム。
【請求項２０】
請求項１５記載のシステムであって、
前記多層量子ビット格子配列は、複数の実質的に平行な平面状の量子ビット格子配列を備えるシステム。
【請求項２１】
請求項２０記載のシステムであって、
前記複数の実質的に平行な平面状の量子ビット格子配列は、少なくとも第１の平面状の量子ビット格子配列と、第２の平面状の量子ビット格子配列とを備え、前記第１の平面状の量子ビット格子配列の前記量子ビットは、前記第１の平面状の量子ビット格子配列と実質的に平行な方向に沿って前記第２の平面状の量子ビット格子配列の前記量子ビットからオフセットされるシステム。
【請求項２２】
請求項２１記載のシステムであって、
前記第１の平面状の量子ビット格子配列の前記量子ビットに位置合わせされた量子ビット、前記第２の配列の前記量子ビットに位置合わせされた量子ビット、又は前記第１の平面状の量子ビット格子配列と前記第２の平面状の量子ビット格子配列の間の前記オフセットと実質的に等しい大きさで前記第２の平面状の量子ビット格子配列と実質的に平行な方向に沿ってオフセットを有する量子ビットを備える、少なくとも１つの追加的な平面状の量子ビット格子配列を更に備える、システム。
【請求項２３】
請求項２１記載のシステムであって、
前記第１の平面状の量子ビット格子配列と前記第２の平面状の量子ビット格子配列の間の前記オフセットは、ネイティブに複数の量子ビットゲート操作を行うことができるように、各論理量子ビットが個々に光学的にアドレスされ、かつ、各論理量子ビットの状態が個々に検出される複数の視野角を可能にするシステム。
【請求項２４】
請求項２１記載のシステムであって、
前記第１の平面状の量子ビット格子配列と前記第２の平面状の量子ビット格子配列の間の前記オフセットは、正方形及び立方体の格子構成においてよりも、より多くの量子ビットの同時エンタングルメントを所与の相互距離及び所与の体積内で可能にするシステム。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
［背景］
［技術分野］

本願は概して、量子コンピューティング（ＱＣ）に関し、より詳しくは複数次元の格子配列構造を採用した量子コンピュータアーキテクチャに関する。

【０００２】

［関連技術の説明］

スケーラブルな量子コンピューティングに向けた技術の道筋は多岐にわたってきた。様々な評価指数において実証された性能は、各手法で使用する物理的な量子ビット（「量子ビット」とも呼ぶ）の種類によって大きく変化する。トラップされた原子イオン、又は超伝導量子ビットに基づく手法は、２０年以上にわたって一貫してこの分野を導いてきた。最近のトラップされたリュードベリ原子の手法の進歩により、当該分野での実行可能性及び重要性が高まってきている。

【０００３】

［概要］

本明細書に開示される特定の実施形態は、２つ以上の論理量子ビット（例えば、１つ以上の物理的な量子ビットを備える各論理ビット）が同時にエンタングルされる（もつれ合う）ことができる量子ゲートを実施及び相互接続するための、複数の次元の格子配列構造を用いた量子コンピュータアーキテクチャを提供する。本明細書で開示する特定の実施形態は、ある程度の再構成可能性を有利に提供できるフィールドプログラマブルゲートアレイ（ＦＰＧＡ）に類似した、量子処理チップのための量子マイクロプロセッサ構成及びゲートアレイ設計プラットフォームを提供する。本明細書で開示する特定の実施形態は、特定用途に有利に最適化でき、カスタム設計の柔軟性を有利に提供できる特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ）に類似した、量子処理チップ又はボード（例えば、電気及び／又は光学回路；集積光格子）用の量子マイクロプロセッサ構成及びゲートアレイ設計プラットフォームを提供する。

【０００４】

本明細書に開示される特定の実施形態は、互いに実質的に平行である複数の実質的に平面状の領域（例えば、平面；層）に実質的に配置される複数の量子ビットを備える量子コンピューティング（ＱＣ）システムを提供するものであり、少なくともいくつかの実質的に平面状の領域は、２つ以上の量子ビットを備え、各実質的に平面状の領域の１つ以上の量子ビットは、少なくとも１つの隣接した実質的に平面状の領域の１つ以上の量子ビットと相互作用するように構成される。例えば、ＱＣシステムは、（例えば、原子的；光子的に）複数の二次元格子層を備えることができ、その格子層は互いに実質的に平行であり、ＱＣシステムは、複数の格子層にまたがる領域に位置する、複数の多量子ビットゲートとして配置される複数の量子ビットを備える多量子ビットゲートアレイを備えることができる。多量子ビットゲートアレイは、窒素－空孔又はＮＶ中心（例えば、ダイヤモンド又は他の結晶において設計される）、トラップされたボース・アインシュタイン凝縮体（ＢＥＣ）の配列、その他の多層格子配列に閉じ込められた、中性（例えば、非荷電）原子、リュードベリ原子、及び／又は他の量子ビットを含むように、及び／又は選択的にアドレスするように構成された格子を備えることができる。特定のこのような例において、これらの実質的に平行な格子配列層は、複数の実質的に平面状の領域（例えば、平面；レベル）に実質的に配置されることができ、少なくとも１つの実質的に平面状の領域の、少なくともいくつかの量子ビットは、少なくとも１つの他の（例えば、隣接した）実質的に平面状の領域の少なくともいくつかの量子ビットと相互作用する（例えば、量子力学的にエンタングルされる）ように構成される。

【０００５】

本明細書に開示される特定の実施形態は、（例えば、ゲートを形成するために）三次元（３Ｄ）格子構造の配列として配置される複数の全結合（ｆｕｌｌｙ－ｃｏｎｎｅｃｔｅｄ）量子ビットを備える格子構成を備え、幾何学的レイアウトで配列される量子ビットによって、同時の多量子ビットゲート操作（ｏｐｅｒａｔｉｏｎ／演算）が可能である。本明細書で開示される特定の実施形態は、最適に効率的な量子コンピュータを構築するために共通の重要な課題に対処する。これらの課題のうち主要なものは、最大数の最近傍、次

最近傍、次次最近傍等の量子ビットが同時にエンタングルされて、多量子ビットの量子ゲート操作をネイティブに（ｎａｔｉｖｅｌｙ）、又は単一ゲート操作で幾何学的に実現することができる、実装可能で幾何学的な量子ビットの構造をどのように設計するかである（２０２１年５月７日出願の米国特許仮出願第６３／１８６，０３７号、２０２０年１１月５日に出願の米国特許出願第１７／０９０７４７号；２０１９年１１月８日に出願の米国特許仮出願第６２／９３３，１４８号を参照。それぞれ、参照によりその全体が本明細書に組み込まれる。）

【０００６】

特定の実施形態において、量子コンピューティング（ＱＣ）システムは、第１の実質的に平面状の領域の中の第１の複数の論理量子ビットと、第１の実質的に平面状の領域と実質的に平行である第２の実質的に平面状の領域における第２の複数の論理量子ビットと、を備える。第１の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように構成され、第２の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、互いに相互作用するように、及び、第１の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかと相互作用するように構成される。特定の実施形態において、ＱＣシステムは、第１及び第２の実質的に平面状の領域と実質的に平行な、追加の実質的に平面状の領域に、追加の複数の論理量子ビットを備え、第２の複数の論理量子ビットの少なくともいくつかは、追加の複数の論理量子ビットのうちの１つ以上と相互作用するように構成される。

【０００７】

特定の実施形態において、量子コンピューティング（ＱＣ）システムは、二次元を超える次元を備える多層量子ビット格子配列において量子ゲートを形成する論理量子ビットを含むように構成された複数の閉じ込め領域を備える。量子ゲートは、１量子ビットゲート及び２量子ビットゲートの連結に依存することなくネイティブに３つ以上の論理量子ビットを巻き込む量子論理演算を実行するように構成される。

【０００８】

［図面の簡単な説明］

添付図面は、本明細書に組み込まれ、本明細書の一部を構成し、本明細書に記載される１つ以上の実施形態を例示し、説明と共に、これらの実施形態を説明する。

【図面の簡単な説明】

【０００９】

【図１】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、実質的に平面状の領域に論理量子ビットを備える例示的な量子コンピューティング（ＱＣ）システムの斜視図を概略的に示す。

【図２Ａ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、互いに実質的に平行な３つの実質的に平面状の領域に３６個の論理量子ビットを備える例示的なシステムの斜視図を概略的に示す。

【図２Ｂ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、互いに実質的に平行な３つの実質的に平面状の領域に６０個の論理量子ビットを備える別の例示的なシステムの斜視図を概略的に示す。

【図３Ａ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、互いに実質的に平行な３つの実質的に平面状の領域（例えば、図２Ａ及び図２Ｂの例示的なシステムと互換性がある）に配置される複数の論理量子ビットの斜視図を概略的に示す。

【図３Ｂ】図３Ｂ及び図３Ｃは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、互いに実質的に平行である５つの実質的に平面状の領域に配置される複数の論理量子ビットの斜視図をそれぞれ概略的に示す。

【図３Ｃ】図３Ｂ及び図３Ｃは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、互いに実質的に平行である５つの実質的に平面状の領域に配置される複数の論理量子ビットの斜視図をそれぞれ概略的に示す。

【図４Ａ】図４Ａ及び図４Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた例示的なシステムの

一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図４Ｂ】図４Ａ及び図４Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備える例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図５Ａ】図５Ａ及び図５Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図５Ｂ】図５Ａ及び図５Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図５Ｃ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図５Ｂと同様の斜視図を概略的に示す。
【図６Ａ】図６Ａ及び図６Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた更に別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図６Ｂ】図６Ａ及び図６Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた更に別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図６Ｃ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図６Ｂと同様の斜視図を概略的に示す。
【図６Ｄ】図６Ｄ及び図６Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた更に別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図６Ｅ】図６Ｄ及び図６Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、各々が対応する複数の論理量子ビットを備える３つの平面状の領域を備えた更に別の例示的なシステムの一部の（例えば、ｚ軸に沿う）上面図及び斜視図をそれぞれ概略的に示す。
【図６Ｆ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図６Ｅと同様の斜視図を概略的に示す。
【図７Ａ】図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、複数の二次元平面光学トラップ領域内に形成される、複数のアドレッシングレーザー光ビームを有する、例示的な多量子ビットゲートセル（例えば、ターゲット量子ビットを中心に有し、制御量子ビットを他の場所に有するパイロクロア構成において２１個の量子ビットを有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル）の様々な図を概略的に示す。
【図７Ｂ】図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、複数の二次元平面光学トラップ領域内に形成される、複数のアドレッシングレーザー光ビームを有する、例示的な多量子ビットゲートセル（例えば、ターゲット量子ビットを中心に有し、制御量子ビットを他の場所に有するパイロクロア構成において２１個の量子ビットを有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル）の様々な図を概略的に示す。
【図７Ｃ】図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、複数の二次元平面光学トラップ領域内に形成される、複数のアドレッシングレーザー光ビームを有する、例示的な多量子ビットゲートセル（例えば、ターゲット量子ビットを中心に有し、制御量子ビットを他の場所に有するパイロクロア構成において２１個の量子ビットを有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル）の様々な図を概略的に示す。
【図７Ｄ】図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、複数の二次元平面光学トラップ領域内に形成される、複数のアドレッシングレーザー光ビームを有する、例示的な多量子ビットゲートセル（例えば、ターゲット量子ビットを中心に有し、制御量子ビットを他の場所に有するパイロクロア構成において２１個の量子ビットを有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル）の様々な図を概略的に示す。
【図７Ｅ】図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、複数の二次元平面光学トラップ領域内に形成される、複数のアドレッシングレーザー光ビームを有

する、例示的な多量子ビットゲートセル（例えば、ターゲット量子ビットを中心に有し、制御量子ビットを他の場所に有するパイロクロア構成において２１個の量子ビットを有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル）の様々な図を概略的に示す。

【図８Ａ】図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの様々な図を概略的に示す。

【図８Ｂ】図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの様々な図を概略的に示す。

【図８Ｃ】図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの様々な図を概略的に示す。

【図８Ｄ】図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの様々な図を概略的に示す。

【図８Ｅ】図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの様々な図を概略的に示す。

【図９Ａ】図９Ａ－図９Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの交差する配列によって作成された３層の１０×１０の原子トラップ格子の斜視図を概略的に示す。

【図９Ｂ】図９Ａ－図９Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、トラッピングレーザー光ビームの交差する配列によって作成された３層の１０×１０の原子トラップ格子の斜視図を概略的に示す。

【図９Ｃ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図９Ａ－図９Ｂの構造の上面図を概略的に示す。

【図１０Ａ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、３組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列とを有する３層の１０×１０の原子格子を備えた、部分的に組み立てられたＱＣシステムの斜視図を概略的に示す。

【図１０Ｂ】図１０Ｂ－図１０Ｄは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図１０Ａの３組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列とを異なる方向から見た他の図を示す。

【図１０Ｃ】図１０Ｂ－図１０Ｄは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図１０Ａの３組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列とを異なる方向から見た他の図を示す。

【図１０Ｄ】図１０Ｂ－図１０Ｄは、本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図１０Ａの３組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列とを異なる方向から見た他の図を示す。

【図１０Ｅ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、４組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列とを有する３層の１０×１０の原子格子を備えた、別の部分的に組み立てられたＱＣシステムの斜視図を概略的に示す。

【図１０Ｆ】図１０Ｆ－図１０Ｈは、本明細書に記載される特定の他の実施形態に従って、図１０Ｅの４組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列を異なる方向から見た他の図を示す。

【図１０Ｇ】図１０Ｆ－図１０Ｈは、本明細書に記載される特定の他の実施形態に従って、図１０Ｅの４組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列を異なる方向から見た他の図を示す。

【図１０Ｈ】図１０Ｆ－図１０Ｈは、本明細書に記載される特定の他の実施形態に従って、図１０Ｅの４組のアドレッシングレーザー光ビームとトラッピングレーザー光ビームの２つの交差する配列を異なる方向から見た他の図を示す。

【図１１Ａ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、第１の光検出器ポート２４２ａを通して見た、図９Ａ－図９Ｃ、図１０Ａ－図１０Ｄの３層の１０×１０の３Ｄ原子格子の図を概略的に示す。

【図１１Ｂ】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図１１Ａの構造の側断面図を概略的に示す。
【図１２】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、図８Ｅ、図９Ａ、図１０Ａ、及び図１１Ａに対応する例示的な組立てられたＱＣシステムの斜視図を概略的に示す。
【図１３】本明細書に記載される特定の実施形態に従って、様々な多層量子ビット格子配列について所与のゲートフィデリティで同時にエンタングルできる量子ビットの総数を比較する３つの表を示す。
【発明を実施するための形態】
【００１０】
［概要］
本明細書で開示する特定の実施形態は、三次元（３Ｄ）格子構造（例えば、セル）の配列として配置される複数の全結合量子ビットを備える格子構成を備え、幾何学的レイアウトで配列された量子ビットによって同時多量子ビットゲート操作（演算）が可能である。本明細書で開示する特定の実施形態は、有利には、格子層の数を増やし、同時にエンタングル可能な（もつれることが可能な）量子ビットの数を、リュードベリ原子についての現在の正方形ベースのフォトニック格子を用いて現在達成可能な限界を超えて（例えば、許容範囲のゲートフィデリティで）、そしてイオンについての六角形の多層表面トラップ幾何学的配置で達成可能な量子ビット密度を潜在的に超えて増加させる。
【００１１】
本明細書で開示する特定の実施形態は、最適で効率的な量子コンピュータを構築するための課題に対処するものである。そのような課題の１つは、最大数の最近傍、次最近傍、次次最近傍等の量子ビットが同時にエンタングル可能で、多量子ビットの量子ゲート操作を（例えば、幾何学的に単一ゲート操作の範囲内で）ネイティブに提供できる実装可能な量子ビットの幾何学的構造をどのように設計するかである。この工学的課題は、２つの等価な部分で構成される。一方は、量子ビットをどのように最適なエンタングリング幾何学的配置に閉じ込める（例えば、トラップする；結晶格子サイト位置を設計する）かである。このような閉じ込めは概して、結晶、電極及び／又は磁場の欠陥部位の正確な周期的位置と併せて、複数のレーザーの複雑な交差を設計する必要がある。他方の工学的課題は、どのように可能な限り選択的に（例えば、個々に）量子ビットをアドレス（例えば、照射；励起；操作）して、読み出す（例えば、検出；撮像する）かである。このアドレッシングは、グローバルアドレッシングで頻繁に行われる、可能な限り多くの量子ビットの間に同時エンタングルメントを生成することを越えることができる。むしろ、多数のエンタングルされた量子ビットの最大限の計算能力を活用することは、所望の多量子ビットゲート操作の個々の量子ビット状態を操作して読み出すことを含むこともでき、これは、必要に応じて個々に各量子ビットをアドレスする能力を利用するものである。この能力は極めて重要でありえる。なぜなら、各量子コンピューティングゲートの本来備わった計算能力は、各ゲート操作において論理量子ビットとして完全に関与することができる同時にエンタングルされた量子ビットの量子ビット数に指数関数的である（例えば、２のべき乗に比例する）ためである。また、オーバーヘッド（例えば、誤り訂正量子ビット；冗長量子ビット；アンシラ量子ビット）を考慮しなければならない。これは、非常に多数の量子ビットの誤りを訂正するために、表面符号が使われるスケールまで量子コンピューティングアーキテクチャのサイズが大きくなるにつれ、劇的に（例えば、桁違いに）増大する。このため、ゲートセルにおいてより個々にアドレス可能な（例えば、論理）量子ビットを同時にエンタングルするという総合的な利点は実に、表面符号誤り訂正が必要とする追加的な桁違いのオーバーヘッドの使用を更に大幅に低減、又は排除し、上述した初期の指数関数的な高速化さえ大幅に上回ることを可能にする。
【００１２】
本明細書で開示する特定の実施形態は、互いに実質的に平行で、三次元（３Ｄ）セルの配列を形成する、複数の二次元（２Ｄ）（例えば、平面）量子ビット配列（例えば、層）として構成することができる。セルの配列は、３Ｄ結晶構造に類似させることもできるし

、又は、そのように呼ぶことができる。利用される（例えば、最適化される）量子相互作用の性質を説明するために、光格子構造においてトラップされた中性（例えば、非荷電）原子量子ビット又はリュードベリ原子量子ビットを利用するものとして（例えばＩ．Ｂｌｏｃｈ，”Ｑｕａｎｔｕｍ ｃｏｈｅｒｅｎｃｅ ａｎｄ ｅｎｔａｎｇｌｅｍｅｎｔ ｗｉｔｈ ｕｌｔｒａｃｏｌｄ ａｔｏｍｓ ｉｎ ｏｐｔｉｃａｌ ｌａｔｔｉｃｅｓ，”Ｎａｔｕｒｅ ４５３，１０１６（２００８）参照）、本明細書では、様々な実施形態を説明するが、他の実施形態は、構造と機能の両面で同等な、格子構造における１つ以上の代替する量子ビット技術（例えば、天然結晶格子；人工的に形成された結晶構造にトラップされた量子ビット）を用いることができる。（例えば、最大数の最近傍、次最近傍、次次最近傍等の量子ビットが同時にエンタングルされることを可能にする、パイロクロアに似た構造の拡張を形成でき、それにより、従来は数百、数千の１量子ビット及び２量子ビットの量子ゲート操作の連結で提供されていたものを、単一ゲート内で提供することができる。）

【００１３】

結晶における原子空孔中心（例えば、ダイヤモンドにおける窒素空孔中心、以下、単に「ＮＶ中心」と呼ぶ）の１つの例示的な代替技術もまた、フィデリティ（ｆｉｄｅｌｉｔｙ）、コヒーレンス時間、最大１０個の量子ビット間での全結合、最大７個の量子ビットとの多体エンタングル状態といった点で最近進歩している（例えば、Ｃ．Ｅ．Ｂｒａｄｌｅｙらによる「Ａ １０－ｑｕｂｉｔ ｓｏｌｉｄ－ｓｔａｔｅ ｓｐｉｎ ｒｅｇｉｓｔｅｒ ｗｉｔｈ ｑｕａｎｔｕｍ ｍｅｍｏｒｙ ｕｐ ｔｏ ｏｎｅ ｍｉｎｕｔｅ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｘ９，０３１０４５（２０１９）参照。）。原子のような特性とともに、ＮＶ中心が示すこのような特性は、本明細書に記載される特定の実施形態に直接適用できる量子ビット技術のもう１つの例を形成し、例えば、最大数の量子ビットを同時にエンタングルすることと、多層光格子において量子ビットを個々にアドレッシング（例えば、初期化、ゲート操作の実行、及び値の読み出し）するための最適な幾何学的アクセスと、の両方を可能にする３Ｄ格子を形成する上での問題に対する実質的に等価な解決策である。更に他の実施形態は、他の代替的な量子ビット技術、例えば、トラップされたボース・アインシュタイン凝縮（ＢＥＣ）；中性分子；フォノン；光子；及びその他を使用できる。

【００１４】

本明細書に記載される量子コンピューティング（ＱＣ）システムの特定の実施形態は、有利には、最近傍、次最近傍、次次最近傍、及び潜在的にそれ以上の間で、最適な数の量子ビットを同時にエンタングルできる多層アーキテクチャを提供する。特定の実施形態は、スケーラブルな量子プロセッサを設計するために必要な、電気的、磁気的、及び光学的アドレッシング、制御、検出、及び読出しの最適な組み合わせを可能にするように構成された幾何学的配置を含む。全結合の量子ビットの配列は、使用される量子ビットの種類又はそれらのレイアウトにより、エンタングルされたゲート操作が特定のペアに限られる設計よりも効率的で柔軟性がある、ハードウェアにおいて量子アルゴリズムを実行するための選択肢を提供する。この向上した効率及び柔軟性は、配列の中の量子ビット数とともに急速に増大する。一度に２つを超える量子ビットを巻き込むゲート操作を実行する能力を追加することで、１量子及び２量子ビットゲートに限定された設計よりも効率向上を著しく加速することができ、何十ものそれらを、１つの４量子ビットゲートと置き換えることができる。本明細書に記載される特定の実施形態は、複数の量子ビット配列（例えば、複数の直接接続（ｄｉｒｅｃｔｌｙ－ｃｏｎｎｅｃｔｅｄ）された平面格子）を使用して、一次元及び二次元の幾何学構成の課題（例えば、結合性に対する制限；二次元のみに限られる場合に、ますます高密度になるゲートアレイの中で各量子ビットを制御するのに必要なコンポーネントの混み合い）を有利に回避する。特定の実施形態において、パイロクロアのような結晶に類似した、量子ビットの多次元セルが形成される。特定の実施形態において、量子ビットの多次元セルは再構成可能であり、様々な結晶構造に形成でき、結晶構造に従って、（例えば、セル内；セル間；層間での）最近傍、次最近傍量子ビット、及び

それ以上が、選択されたゲート操作のために同時にエンタングルされる。ゲート当たりの関与する量子ビットを多く利用することで、回路の深さ、誤り訂正、及び干渉軽減の要件を減らすこともできる。再構成可能なコンポーネントセルは、量子ＦＰＧＡ（ＱＦＰＧＡ）及び量子ＡＳＩＣ（ＱＡＳＩＣ）レイアウト（例えば、チップ）を可能にすることができる。

【００１５】

本明細書に記載されるＱＣシステムの特定の実施形態は、三次元（３Ｄ）格子構造（例えば、セル）の配列として配置される複数の全結合量子ビットを備える多層構成を備え、幾何学的レイアウトで配列される量子ビットによって同時多量子ビットゲート操作が可能である。例えば、層における複数の平面的な量子ビット配列（例えば、行及び列；格子）は、互いに実質的に平行であり得て、結晶構造と類似にされ得る、又は結晶構造と呼ばれ得る３Ｄセルの配列を形成し得る。特定の実施形態において、量子ビットは、複数の量子ビット格子閉じ込めゾーン（例えば、並列中性原子トラップ配列；ＮＶ中心）内に局在化（例えば、トラップ；浮遊；閉じ込め）されて、複数の最近傍量子ビット、複数の次最近傍量子ビットなどの間に直接的に最適なコヒーレント結合（例えば、エンタングルメント）を可能にし、それは複数の実質的に平面な配列領域（例えば、層；レベル；平面）にわたり、インシチュー（ｉｎ　ｓｉｔｕ）処理の量子ビットを他の種又はデータビットへと損失の多い変換をしたり、又は著しい時間遅延を伴ったりする非効率的なフォトニック又は他の相互接続（例えば、量子テレポーテーション）を必要としない。特定のこのような実施形態は、１量子及び２量子ビットゲートに限定された設計に比べて、効率向上を著しく加速することができる、一度に２つを超える量子ビットを巻き込むゲート操作を実行する能力を提供する幾何学的に対称なセル構造を利用する。特定の他の実施形態は、互いに実質的に平行な複数の二次元の（２Ｄ）量子ビット格子配列（例えば、平面格子；グリッド；行及び列）として構成され得て、複数の２Ｄ層の間に３Ｄ構造を形成することを可能にする。

【００１６】

中性原子（例えば、非荷電原子、リュードベリ原子）量子ビット手法の物理学に従い、様々な実施形態を本明細書に記載するが、他の量子ビット手法（例えば、ＮＶ中心；超伝導量子ビット；本明細書において引用される他のもの）も、一般性を損なうことなく、本明細書に記載される特定の実施形態に従い使用することができる。

【００１７】

本明細書に記載されるＱＣシステムの特定の他の実施形態は、複数の多量子ビット三次元（３Ｄ）ゲートセルであって、各セルが三次元にわたって同時に全結合できる少なくとも３つの量子ビットを備えるゲートセルと、２つ以上の多量子ビットゲートのゲート操作のために構成された複数の多量子ビットセルと、を備える。特定のこのような実施形態に係るＱＣシステムは、例えば並列中性原子トラップ配列といった、複数の実質的に平行な量子ビット閉じ込め格子を備えることができ、これは、複数の最近傍量子ビット、複数の次最近傍量子ビットなどの間でダイレクトに、複数の配列層、複数のレベル、又は複数の平面にわたって、フォトニック量子ビットへ及びフォトニック量子ビットからの変換、又は他の非効率的な相互接続（例えば、著しい損失及び／又は時間遅延を伴う相互接続）を必要とせずに、最適なコヒーレント結合又はエンタングルメントを可能にする。多量子ビットセルは、幾何学的対称性を用いて、複数の１量子ビットゲート及び２量子ビットゲートの連結に依存することなく、１つのゲート操作で、多量子ビットゲートをネイティブに実現できるように構成され得る。セルにおける複数の量子ビットの間の等辺連結距離の対称性を利用することで、一度に２つを超えるエンタングルされた量子ビットが、そうでなければ１つのみの量子ビットゲート及び２つの量子ビットゲートからなるより多くの量子ビットゲート操作を必要としたであろうゲート操作を実行できる。

【００１８】

本明細書に開示される他の実施形態は、互いに実質的に平行な複数の２Ｄ配列層（例えば、２Ｄ格子；平面；グリッド）において実質的に配置される複数の量子ビットを備える

ＱＣシステムを提供し、少なくともいくつかの２Ｄ配列層は、２つ以上の量子ビットを備え、各配列層の１つ以上の量子ビットは少なくとも１つの隣接する２Ｄ配列層の１つ以上の量子ビットと相互作用するように構成される。ＱＣシステムは、互いに実質的に平行な複数の原子トラップ層（例えば、２Ｄ光格子トラップ）を備えることができ、ＱＣシステムは、トラップ層間及び／又はトラップ層内の領域に位置する複数の多量子ビットゲートとして配置される複数の量子ビットを備える多量子ビット３Ｄゲートアレイを更に備えることができる。例えば、多量子ビットゲートアレイの量子ビットは、中性原子（例えば、非荷電原子、リュードベリ状態）、ＮＶ中心又は他の量子ビット種を備える原子量子ビットを含むように構成された２Ｄトラップ配列を備えることができる。リュードベリ原子、ＮＶ中心及び他の原子量子ビット種の例として、量子ビットは、格子に閉じ込められ（例えば、ポテンシャル井戸；原子空孔中心内にトラップされ）、それは光ビーム（例えば、レーザー）格子によって作成され得て、複数の実質的に平行なトラップ配列層（例えば、格子；レベル；平面）に、実質的に配置されることができ、少なくとも１つの２Ｄトラップ配列層の量子ビットのうち少なくともいくつかは、少なくとも１つの他の（例えば隣接する）実質的に平行なトラップ配列層の少なくともいくつかの量子ビットと直接相互作用する（例えば、量子力学的にエンタングルする）ように構成される。

【００１９】

本明細書に記載されるＱＣシステムの各実施形態において、セルごとの複数の量子ビットの対称的又は等辺的なカップリング形状は、単一のゲート操作でより複雑な量子ゲートを実行することを可能にし、更に、回路の深さ、誤り訂正及び干渉軽減の要件を低減することが可能である。交換可能なコンポーネントセルは、量子ＦＰＧＡ（ＱＦＰＧＡ）及びＡＳＩＣ（ＱＡＳＩＣ）レイアウト（例えば、チップ）を可能にし、高度に再構成可能であり得る。

【００２０】

本明細書に記載されるＱＣシステムの特定の実施形態は、有利には、一次元（１Ｄ）レイアウト又は二次元（２Ｄ）レイアウトを用いて提供されるよりも多くの量子ビット及び／又は量子ビットゲートが計算に使用されることを容易にする、量子ビット及び／又は量子ビットゲートの三次元（３Ｄ）レイアウトを提供する（例えば、Ｊ．Ｉ．Ｃｉｒａｃ、Ｐ．Ｚｏｌｌｅｒによる「Ａ ｓｃａｌａｂｌｅ ｑｕａｎｔｕｍ ｃｏｍｐｕｔｅｒ ｗｉｔｈ ｉｏｎｓ ｉｎ ａｎ ａｒｒａｙ ｏｆ ｍｉｃｒｏｔｒａｐｓ」，Ｎａｔｕｒｅ，Ｖｏｌ．４０４，ｐ．５７９（２０００）；Ｊ．ＣｈｉａｖｅｒｉｎｉらによるＱｕａｎｔ．Ｉｎｆ．Ｃｏｍｐ．Ｖｏｌ．５，４１９（２００５）参照。）。例えば、本明細書に記載される特定の実施形態は、量子ビットゲートの３Ｄレイアウトを提供し、それぞれが複数の原子量子ビット（例えば、３つ以上の同時にエンタングルされた中性原子、荷電原子、ＮＶ中心量子ビットなど）を備え、同時に各量子ビットのアドレッシング、操作、制御、読出し、及びポテンシャルサイドバンド冷却のための電気的接続と光経路とを容易にするのに充分な間隔を提供し、更には、照準線アクセス角度（ｌｉｎｅ ｏｆ ｓｉｇｈｔ ａｃｃｅｓｓ ａｎｇｌｅｓ）を提供する。

【００２１】

量子ビットの特定の配置又は組が、任意の量子ビットがその組の内の他の任意の量子ビットと直接的に量子力学的にエンタングルされる（もつれ合う）ことを可能にする場合、その量子ビットは「全結合（ｆｕｌｌｙ ｃｏｎｎｅｃｔｅｄ）」であると記述することができる。例えば、一次元の（１Ｄ）線形原子トラップにおいて全結合するイオン（例えば、荷電原子）を備えた少数の量子ビットであっても、対にしか結合しない同じ数の量子ビットよりも、測定できるほどに大きな潜在的処理能力を示すことができる（例えば、Ｎ．Ｍ．Ｌｉｎｋｅらによる「Ｅｘｐｅｒｉｍｅｎｔａｌ ｃｏｍｐａｒｉｓｏｎ ｏｆ ｔｗｏ ｑｕａｎｔｕｍ ｃｏｍｐｕｔｉｎｇ ａｒｃｈｉｔｅｃｔｕｒｅｓ」，ＰＮＡＳ，Ｖｏｌ．１１４，ｎｏ．１３（２０１７）参照。）。

【００２２】

過去２０年にわたり実証された量子コンピューティング（ＱＣ）の設計は、どのくらい

迅速に量子コンピュータが、それに匹敵する古典的コンピュータを性能的に上回ることができるかに最も影響するパラメータが、単純に何個の量子ビットが何らかの方法で接続されるか、に基づくものではないことを示している。このようなシステムの実証された性能は、量子ビットのフィデリティ（例えば、システムがどれだけ正確にゲート操作を実行することができるか）、どのように量子ビットが相互接続されるか、及び、量子ビットが協働して難しい問題の解を計算できるようにするためにどれだけのオーバーヘッドが使用されるか、に帰着してきた。

【００２３】

１量子ビットゲートは、単に量子ビットそれ自体を、「０」から「１」に反転させること、又は、「０」及び「１」の特別な量子重ね合わせ（量子スーパーポジション）に反転させることを伴う。２量子ビットゲートは、量子もつれ（エンタングルメント）で結合した重ね合わせを使って２つの量子ビットを結合し、量子ビットの一方に何かを行うと、他方にも影響が及ぶようにする。このような２量子ビットゲートでは、ターゲット量子ビットは、状態「０」又は状態「１」でスタートしてもよく、「０」と「１」の任意の重ね合わせ（例えば、「０」と「１」の中間）であることができる。例えば、量子制御ＮＯＴ（ＣＮＯＴ）ゲートの機能は、制御量子ビットが状態「１」の場合、ターゲット量子ビットを反転させる；そうでなければ何もしない。１量子又は２量子ビットゲートは、多くの様々な量子ゲートベースのアーキテクチャにおいて直接実施することができる。より複雑なゲート操作について、一度に２つを超える量子ビットをエンタングルできる実施形態は、操作を達成するために実行されるステップと量子ビットの総数と、それらを組み込んだアルゴリズムとに著しい影響を与え得る（例えば、Ｃ．Ｆｉｇｇａｔｔらによる「Ｐａｒａｌｌｅｌ ｅｎｔａｎｇｌｉｎｇ ｏｐｅｒａｔｉｏｎｓ ｏｎ ａ ｕｎｉｖｅｒｓａｌ ｉｏｎ－ｔｒａｐ ｑｕａｎｔｕｍ ｃｏｍｐｕｔｅｒ」，Ｎａｔｕｒｅ，Ｖｏｌ．５７１（２０１９）；Ｙ．Ｌｕらによる「Ｇｌｏｂａｌ ｅｎｔａｎｇｌｉｎｇ ｇａｔｅｓ ｏｎ ａｒｂｉｔｒａｒｙ ｑｕｂｉｔｓ」，Ｎａｔｕｒｅ，Ｖｏｌ．５７１（２０１９）参照。）。前もって使用される量子ビット及びステップの数が、測定可能に削減できることで、ある場合には、成功した結果を達成するためのオーバーヘッドを劇的に減少できる。一例としては、時間の一部であっても大規模な誤り訂正をせず、より少ないアンシラで、そうでなければ解決困難な問題に解を与えることができるプロトタイプ実証が挙げられる。

【００２４】

本明細書に記載される特定の実施形態は、複数の全結合した高フィデリティの量子ビットを使用する。このような特定の実施形態の利点（例えば、１量子ビット及び２量子ビットゲートの組合せを使用することとは対照的に、特定の量子ゲート操作が、どれくらいより効率的でありえるか）は、４つの全結合、高フィデリティの量子ビットを備える例示的な量子三重制御ＮＯＴ（C^3ＮＯＴ）ゲートを考慮することにより説明できる。C^3ＮＯＴゲートは、スーパートフォリ（ｓｕｐｅｒ－Ｔｏｆｆｏｌｉ）ゲートとも呼ばれる。この例示的なC^3ＮＯＴゲートにおいては、４つ目のターゲット量子ビットを「１」から「０」へ反転させるためには、３つの制御量子ビットの全てが特定の状態（例えば、「１、１、１」）でなければならない。このような多量子ビットの量子ゲートは、１つ以上の単一量子ビットゲート操作と組み合わせて使用され得て、量子コンピューティングのためのユニバーサルセットを完成させることができる。多重制御ＮＯＴゲートは、参考文献において、概して、拡張された一連の１量子及び２量子ビットゲート操作を備えるものとして記載される（例えば、Ｍ．Ａ．ＮｉｅｌｓｅｎとＩ．Ｌ．Ｃｈｕａｎｇによる「Ｑｕａｎｔｕｍ Ｃｏｍｐｕｔｉｎｇ ａｎｄ Ｑｕａｎｔｕｍ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ」，１ｓｔ ｅｄ．（Ｃａｍｂｒｉｄｇｅ Ｕｎｉｖ．Ｐｒｅｓｓ，２０００）参照。）。物理的な実装において、これらの１量子及び２量子ビットゲート系列がどの程度まで更にいっそう増加するかは、使用される量子ビットのタイプと、どれくらいの量子ビットを全結合して互いにエンタングルできるかに依存する。しかし、４つの全結合した、同時に多重にエンタングルされたイオンを使用して実装されるC^3ＮＯＴゲートは、適切な物理的レイ

アウトであれば、１量子及び２量子ビットゲートのみで実装されるＣ^{3}ＮＯＴゲートで使用される量子ゲート操作のごく一部で構成できる。よりシンプルなＣ^{2}ＮＯＴトフォリゲートを実装する方法は、トラップされたイオンを用いて最初に説明され（例えば、Ｊ．Ｉ．ＣｉｒａｃとＰ．Ｚｏｌｌｅｒによる「Ｑｕａｎｔｕｍ Ｃｏｍｐｕｔａｔｉｏｎｓ ｗｉｔｈ Ｃｏｌｄ Ｔｒａｐｐｅｄ Ｉｏｎｓ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．Ｖｏｌ．７４（２０）（１９９５）参照。）、その後、実証された（例えば、Ｔ．Ｍｏｎｚらによる「Ｒｅａｌｉｚａｔｉｏｎ ｏｆ ｔｈｅ Ｑｕａｎｔｕｍ Ｔｏｆｆｏｌｉ ｇａｔｅ ｗｉｔｈ Ｔｒａｐｐｅｄ Ｉｏｎｓ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．Ｖｏｌ．１０２，０４０５０１（２００９）を参照。）。３量子ビットＣ^{2}ＮＯＴの実装は、寄与するゲート数と、全てのゲート操作を完了するのに必要な時間を著しく減少させることを既に示しており、１量子及び２量子ビットゲートの連結よりも、たとえそれらの個々のフィデリティがはるかに高くても、ゲートエラーの総計により、正味のフィデリティを向上させた。この３量子ビットゲートは、幾何学的対称性を強く要求することなく、線形トラップにおいて実現することができた。対照的に、本明細書に記載される特定の実施形態は、本明細書に記載される設計の完全な３Ｄ対称性を利用することにより、Ｃ^{n}ＮＯＴゲートを提供する。このように、上記で示した効率改善例は、各Ｃ^{n}ＮＯＴゲートの制御数に応じて、それらを実装するために必要な量子ゲートの付随的な削減を通じて、大幅に倍増することができる。位相回転を含む他の多重制御ゲート操作は、同時に２つを越えるエンタングルされた量子ビットを巻き込む物理的構成を使用して、同様の効率改善を示すことができる。これらの改善により、誤り訂正を実に大幅に減らすことができる。

【００２５】

最高品質の量子ビットでさえ、顕著な誤り率を示し、これは、量子ビット当たりでは小さくても、アルゴリズムを実行するために用いるゲート数により増加し得る。量子操作の小セットであっても、信頼性の高い結果が得られるそれなりの確率を伴う形でこれを実行するために、誤り訂正が必要であるような閾値に、誤り率の総計が達する場合、アーキテクチャの効率は、誤り訂正のために使用するオーバーヘッドの量に比例して直ちに低下する。

【００２６】

論理演算を実行することを目的とする数百の比較的高品質な量子ビットを有する小規模量子コンピュータの場合、誤り訂正量子ビットとアンシラのオーバーヘッドは、量子ビットの数を１桁の大きさ増やすことになり、すなわち約１０倍増やすことになり、それに比例して効率が減少する。より大規模システムの場合、オーバーヘッドは、更に多数桁の大きさまで、増加する可能性がある。しかし、本明細書に記載される特定の実施形態では、全結合、高品質の量子ビットの総計の効率からの恩恵を受け、（例えば、多次元の幾何学的配置を利用することによって、ネイティブに実行される）多量子ビットゲート操作を採用する量子コンピュータは、大幅に少ないステップ及び大幅に少ない総数の量子ビットを使用できる。本明細書で使用する場合、「ネイティブ」なゲート操作という用語は、幾何学的レイアウトのおかげで、２つを超える量子ビットが同時に関与できることを示す。本明細書に記載される特定のネイティブな多量子ビットゲートの実施形態は、有利には、大規模な誤り訂正オーバーヘッドを使用することなく、アルゴリズムを実行することができる。更に、数桁少ない量子リソースを用いて、オーバーヘッドの減少による、全体的な設計効率の顕著な改善を達成することができ、それにより、基本的な量子コンピューティングアルゴリズム又はサブルーチンを実行しつつ、古典的コンピューティングシステムと比較して高速化された実用的な有用性を示すことができる。

【００２７】

現在まで、原子量子ビットを用いた多くのＱＣシステムは、一次元の（例えば、線形の）トラップを採用しており、これらのトラップはその後、電気的に、又は、光を用いて相互接続され得る（例えば、米国特許第９，８５８，５３１号；Ｄｅｂｎａｔｈらによる「Ｄｅｍｏｎｓｔｒａｔｉｏｎ ｏｆ ａ ｓｍａｌｌ ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ ｑｕａｎｔｕｍ ｃｏｍｐｕｔｅｒ ｗｉｔｈ ａｔｏｍｉｃ ｑｕｂｉｔｓ」，Ｎａｔｕｒ

ｅ，Ｖｏｌ．５３６，ｐ．６３（２０１６）」参照。）。このような１Ｄトラップの多くは、共通のポテンシャル井戸又はトラッピングゾーン内で量子ビットの線形鎖が全結合することを可能にする。全結合の範囲は、線形鎖の対向する端点の又はその近傍にある量子ビット間の結合の強さが弱すぎて信頼性の高い多量子ビットゲート操作に使用できなくなる前に、どれくらい多くの量子ビットを互いに連鎖させることができるかにより制限されるため、限られた長さの複数の線形トラップの間に相互接続を形成することが望ましい場合がある。光相互接続（インターコネクト）は、例えば、量子ビット状態を原子量子ビットから光子へ転送し、その後、量子状態を別の原子へ転送する別の線形トラップにその光子を送ることにより使用することができる。このようなプロセスに一般的に用いられるプロトコルの一種は、「量子テレポーテーション」と呼ばれる。このような相互接続は、（例えば、原子量子ビットから光子へ、そして、第２の原子への）変換に時間遅延及び潜在的非効率性をもたらす。本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、光相互接続を伴う線形又は２Ｄ要素を用いて効率的に行うことができるよりも、より直接的な量子ビット対量子ビットの相互作用を同時に最適化するための代替的な構成を提供する。より多数の量子ビットへスケールアップする場合、特定のこのような実施形態は、有利には、関連するペナルティ（例えば、時間遅延；イオン－光子変換損失）を伴うノード間の光相互接続の数を減少させるか、回避することができる。

【００２８】

長方形の二次元の（２Ｄ）グリッド構成は、トラップイオン手法や超伝導量子ビット（ＳＣＱ）方式において以前から採用されてきた。このような２Ｄグリッド手法において、量子ビット間の相互作用は概して、トラップされたイオンのグリッドレーン内で発生する１量子及び２量子ビット操作（例えば、交差点を介してレーンに量子ビットを往復して出入りさせることによる）に限られ、通常は顕著な冗長性に依存し、アルゴリズム実行中の成功確率を使用可能なレベルにまで引き上げるために、誤り耐性度を強めるものである。例えば、ある手法では、量子ビットのアンサンブルのグローバルアドレッシングを使用し、グリッドにおいて整列する交差点に対して、量子ビットをイン／アウトさせるように往復させることにより、多数の量子ビット内で、単一の１量子又は２量子ビット操作を冗長的に行い、平均化して誤りを減らす。このような手法のオーバーヘッドは、単一の論理演算を十分なフィデリティで実行するための冗長量子ビット数の観点から、量子コンピュータにより実行され得る論理演算のスケールに比例して急速に増大する。これに対し、本明細書に記載される特定の実施形態では、同時に巻き込まれるように、直接的又はネイティブに多量子ビットゲート操作を行うことができるように、量子ビットを２つ以上の次元に配置することにより、２つを超える量子ビット間のエンタングルメントが可能となる。

【００２９】

他に提案及び／又は採用されてきた２Ｄ格子手法として、まずは、リュードベリブロッケード（Ｒｙｄｂｅｒｇ－ｂｌｏｃｋａｄｅ）法を適用した、中性原子を使用した手法が挙げられる（例えば、Ｍ．Ｓａｆｆｍａｎらによる「Ｑｕａｎｔｕｍ ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ ｗｉｔｈ Ｒｙｄｂｅｒｇ ａｔｏｍｓ」，Ｒｅｖ．Ｍｏｄ．Ｐｈｙｓ．８２，２３１３（２０１０）；Ｋ．Ｍａｌｌｅｒらによる「Ｒｙｄｂｅｒｇ－ｂｌｏｃｋａｄｅ ｃｏｎｔｒｏｌｌｅｄ－ｎｏｔ ｇａｔｅ ａｎｄ ｅｎｔａｎｇｌｅｍｅｎｔ ｉｎ ａ ｔｗｏ－ｄｉｍｅｎｓｉｏｎａｌ ａｒｒａｙ ｏｆ ｎｅｕｔｒａｌ－ａｔｏｍ ｑｕｂｉｔｓ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ａ９２，０２２３３６（２０１５）参照。）。初期のリュードベリブロッケード方法のフィデリティは、コンピューティング用の量子ゲートを形成するには競争力がなかったが、これらのリュードベリブロッケード法がそれ以降、リュードベリ原子をエンタングルする改善された方法に凌駕されてきた（例えば、Ｄ．Ｐｅｔｒｏｓｙａｎ ｅｔらによる「Ｈｉｇｈ－ｆｉｄｅｌｉｔｙ Ｒｙｄｂｅｒｇ ｑｕａｎｔｕｍ ｇａｔｅ ｖｉａ ａ ｔｗｏ－ａｔｏｍ ｄａｒｋ ｓｔａｔｅ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ａ９６，０４２３０６（２０１７）；Ｍ．Ｋｈａｚａｌｉ及びＫ．Ｍｏｌｍｅｒによる「Ｆａｓｔ Ｍｕｌｔｉｑｕｂｉｔ Ｇａｔｅｓ ｂｙ Ａｄｉａｂａｔｉｃ Ｅｖｏｌｕｔｉｏｎ ｉｎ Ｉｎｔｅｒａｃｔｉｎｇ Ｅｘｃｉｔｅｄ－Ｓｔａｔｅ

Ｍａｎｉｆｏｌｄｓ ｏｆ Ｒｙｄｂｅｒｇ Ａｔｏｍｓ ａｎｄ Ｓｕｐｅｒｃｏｎｄｕｃｔｉｎｇ Ｃｉｒｃｕｉｔｓ」，Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｘ１０，０２１０５４（２０２０）参照。）。

【００３０】

本明細書に記載される特定の実施形態を、記述的な用語及び視覚的なレイアウトが類似していると思われる可能性のある他の手法と区別するために、例えば規則的な幾何学的格子トラップなど、２Ｄの周期的な結晶構造の全体のレイアウトは、多体相互作用の物理学を研究するために有用である方法で形成されてきたが、これは、複数の量子ビットの間でゲート操作を実施するためではないことに注意されたい。例えば、三角形のイオントラップ（例えば、ペニングトラップ）は、周期的な電位井戸の表面として形成することができ、その中に、イオンを配置することができ、それにより、特定の種類の量子シミュレータに使用できる拡張２Ｄ結晶又は三角格子を形成することができる。これらのトラップは、モデル化される量子システムの、それらを模倣したエネルギートポロジーを形成するために（例えば、ある分子の最低電子エネルギー構成を見つけるために）用いることができる。同様に、四面体、六角形のキタエフモデル（例えば、Ａ．Ｋｉｔａｅｖによる「Ａｎｙｏｎｓ ｉｎ ａｎ ｅｘａｃｔｌｙ ｓｏｌｖｅｄ ｍｏｄｅｌ ａｎｄ ｂｅｙｏｎｄ」，Ａｎｎ．Ｐｈｙｓ．Ｖｏｌ．３２１，２（２００６）；Ｒ．Ｓｃｈｍｉｅｄらによる「Ｑｕａｎｔｕｍ ｓｉｍｕｌａｔｉｏｎ ｏｆ ｔｈｅ ｈｅｘａｇｏｎａｌ Ｋｉｔａｅｖ ｍｏｄｅｌ ｗｉｔｈ ｔｒａｐｐｅｄ ｉｏｎｓ」，Ｎｅｗ Ｊ．Ｐｈｙｓ．１３ １１５０１１（２０１１）参照）；ハイブリッド格子；カゴメ光格子（Ｒ．Ｓａｍａｊｄａｒによる「Ｑｕａｎｔｕｍ ｐｈａｓｅｓ ｏｆ Ｒｙｄｂｅｒｇ ａｔｏｍｓ ｏｎ ａ ｋａｇｏｍｅ ｌａｔｔｉｃｅ」，Ｐｒｏｃ．Ｎａｔｌ．Ａｃａｄ．Ｓｃｉ．Ｕ．Ｓ．Ａ．１１８，ｅ２０１５７８５１１８（２０２１）参照）、及びその他の規則的な格子構造は類似し得るが、設計の複雑性及び目的において本明細書に記載される特定の実施形態とは根本的に異なる。例えば、このような結晶格子構造は、量子システムのシミュレーションのために設計されてきたが、このような構造は概して、ゲート操作を行うことを意図していない。特に、本明細書に記載される特定の実施形態に従うイオン（例えば、キタエフモデルに従う）又は中性原子（例えば、カゴメ光格子内の）の２Ｄ六角格子を備える量子シミュレータは、概して、量子ゲート操作可能な「フルアップ」量子コンピュータのそのような構造の複雑性及び数と比較して、より少ないレーザーで（例えば、個々にアドレッシングするレーザーではなくグローバルアドレッシングで）、より簡単な量子ビット制御、アドレッシング及び読出しスキームを使用することができ、検出スキームが簡単で、使用する電極構造が少ない。

【００３１】

本明細書に記載される特定の実施形態は、２Ｄトラップ原子格子からスケールアップしたゲートモデルＱＣ構造を設計する際に急速に成長し得、困難又は実行不可能に思われるハードウェアに係る課題解決を有利に促進する。例えば、本明細書に記載される特定の実施形態は、各量子ビットのアドレッシング、操作、読出し及びポテンシャル・サイドバンド・トラッピング及び／又は冷却のための光学要素（例えば、レーザー；光学ポート；ファイバー；検出器）をＱＣ構造に統合し、照準線アクセス角度（ｌｉｎｅ ｏｆ ｓｉｇｈｔ ａｃｃｅｓｓ ａｎｇｌｅｓ）を提供する。

【００３２】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、最適な数の隣接する量子ビット間で同時のエンタングルメントを可能にすることによって、複雑な量子アルゴリズムを直接「書き込み」、実行することができるスケーラブルなハードウェア構成を提供する。特定の実施形態において、例えばフィールドプログラマブルゲートアレイ（ＦＰＧＡ）などの従来のファームウェアに類似した、多次元の量子ゲートの実装は、多量子ビットゲートの形態で直接書き込むことができ、柔軟に再プログラムできる。

【００３３】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、多次元の幾何学的配置を利用する

ことによって、多重制御量子ゲート操作をネイティブに実行することを可能にする。特定の実施形態において、量子ゲート操作は、最少のステップ数で（例えば、多重制御ＮＯＴ操作を実現するのに１量子及び２量子ビットゲート操作の連結に頼ることなく）量子ファームウェアプラットホーム上で実行される。

【００３４】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、ユニバーサル量子コンピューティングを可能にするために、回路モデルアーキテクチャにおける各量子ビットの完全な制御と読み出しのための電気的及び光学的アクセスを統合することによって、量子ファームウェアプラットホームを必要に応じてスケールアップできる、実現可能な工学構成を提供する。

【００３５】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、最適な数の量子ビットが、最近傍、次最近傍、次次最近傍及びそれ以上の量子ビット間で同時にエンタングルされることを可能にするように構成された多層量子コンピューティング構造を提供する。特定のこのような実施形態は、スケーラブルな量子プロセッサにおいて、量子ビットのアドレッシング、制御、及び読出しのための電気チャネル及び光学アクセスを含む。例えば、全結合の量子ビットの配列は、有利には、エンタングルされたゲート操作が特定のペアに（例えば、採用される量子ビットの種類又はそれらのレイアウトのために）限定される他の設計よりも、ハードウェアにおいて量子アルゴリズムを実行するのにより効率的な、柔軟性がある選択肢を提供する。この改良された効率及び柔軟性は、配列における量子ビットの数に応じて、急速に成長可能である。

【００３６】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、一度に２つを超える量子ビットを含むゲート操作を実行することが可能であり、それにより、１量子及び２量子ビットゲートに限定された従来の設計よりも大幅な効率向上を提供する（例えば、数十のそのようなゲートを１つの４量子ビットゲートに置き換えることによって）。本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、一次元及び二次元の量子ビットの幾何学的配置（例えば、線形トラップイオン；２Ｄグリッドにトラップされたイオン；２Ｄダイヤモンド格子のＮＶ中心；他の１Ｄ及び２Ｄ量子ビット格子）に存在する接続の制限を克服する。例えば、量子ビット配列の間に直接的な結合（例えば、エンタングルメント）を持たせて、量子ビットを複数の量子ビット配列（例えば、複数の平面及び／又は線形の量子ビット配列）に配列することにより、１Ｄ鎖又は２Ｄグリッドにおいて数十の原子からスケールアップを継続するためにイオン量子ビットからフォトニック量子ビットに変換し、再び戻すために生じる、著しい時間遅延及び非効率性の問題を解決できる。

【００３７】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、複雑な３Ｄ結晶構造（例えば、パイロクロア）に類似した多次元もつれ（エンタングリング）幾何形状を提供する。加えて、特定の実施形態で設計した、特定の、非妨害の照準線（ｕｎｏｂｓｔｒｕｃｔｅｄ　ｌｉｎｅｓ　ｏｆ　ｓｉｇｈｔ）は、各原子量子ビットを個々にかつ一意的にそして量子ビットのアンサンブルをグローバルにアドレッシングするための複数の角度からの光アクセスを有利に提供する。特定の実施形態は、有利には、検出器による個々の原子量子ビット状態の読出しのための複数の光アクセスを提供する。

【００３８】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、中性原子量子ビット（例えば、外殻電子が高励起状態まで高まった非荷電リュードベリ原子）を利用して多層量子ビット格子配列を形成し、これは、、代替の量子ビットの種類に対する本システム及び本方法の適用可能性を示すとともに、情報処理能力を更に説明するのに役立つ。近年、リュードベリ原子をエンタングルする技術が向上し、量子コンピューティングへの適用がますます現実的となっている（例えば、Ｍ．Ｋｈａｚａｌｉ及びＫ．Ｍｏｌｍｅｒ（２０２０）；Ｄ．Ｐｅｔｒｏｓｙａｎら（２０１７）参照。）。技術向上の結果、リュードベリ原子は、本

明細書に記載されるシステム及び方法のための別の例示的な量子ビットとして機能することにも非常に適している。リュードベリ量子ビット格子を成形する技術は、コヒーレント光ビーム（例えば、レーザー）を交差させて、光学サイドバンドとの電磁界相互作用を作り、エネルギーポテンシャル井戸を形成することを含むことができ、これにより、交差する光ビーム内（例えば、赤色サイドバンドによって形成されるポテンシャル井戸内）、又は、光ビーム間（例えば、青色サイドバンドによって形成されるポテンシャル井戸内）のスペース（例えば、セル）内に、個々の中性原子量子ビットをトラップするものであり、これは、電気的ポテンシャルを使ってイオン量子ビットをトラップするのと類似しており、トラップされたイオン格子配列と同じ利点を多く備え、いくつかの特定の長所を備える。例えば、リュードベリ量子ビットは、トラップされたイオンに関連する、最高の量子ビットゲートフィデリティ及び最長のライフタイムを未だ実証していないが、リュードベリ原子を六角形格子層に構成することによって、結晶幾何学配置（例えば、パイロクロア構造）であって、主な例としてイオン量子ビットを用いた米国特許出願公開番号２０２１／０１４２２０４Ａ１に記載される結晶幾何学配置と同等及び／又はそれに連続するものを作ることができる。リュードベリ原子をトラップするために利用されるフォトニック格子構造は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、非常に接近した量子ビット間隔及び追加的な配列層を可能にすることができる。

【００３９】

本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、（例えば、主に荷電原子量子ビットの例を使用する）米国特許出願公開番号２０２１／０１４２２０４Ａ１に記載されるものと同等の幾何学的配置における多層格子構造の量子ビット配列にリュードベリ原子を利用し、これには、ポテンシャルであって、格子層の数を増大させ、リュードベリ原子についての現在の正方形ベースのフォトニック格子を用いて、現在達成可能な限界を超えて（例えば、許容可能なゲートフィデリティで）、そして潜在的には、イオンについて本明細書に記載する六角形の多層表面トラップ幾何学的配置で達成可能な量子ビット密度を超えて、同時にエンタングルされ得る量子ビットの数を増加させるポテンシャルがある。小規模な線形及び／又は正方形の配列に中性のリュードベリ原子をトラップすることに係る最近の実験データによると、スケーラブルなフォールトトレラント量子コンピューティングに十分な多量子ビットゲートフィデリティで２Ｄの正方形格子において、およそ２０量子ビットが同時にエンタングルされ得ることが示されている（例えば、Ｍ．Ｋｈａｚａｌｉ及びＫ．Ｍｏｌｍｅｒ（２０２０）参照。）。

【００４０】

コヒーレントフォトニックビーム（例えば、レーザー）の多軸配列を３Ｄ光トラップ格子に統合して、３Ｄ格子セルの形状と間隔を調整し、多方向の最大数のセルにわたって量子ビットの間でエンタングル操作の数及びフィデリティを最適化することによって、本明細書に記載される特定の実施形態は、有利には、多次元エンタングリング幾何学的配置を提供し、この幾何学的配置は、荷電原子量子ビット（例えば、イオン）のそれと同等であり、３Ｄ結晶構造（例えば、パイロクロア）に類似し、複雑性と処理能力が同等、場合によっては増大するものである。例えば、本明細書に記載される特定の実施形態は、フォトニック多層量子ビット格子配列においてリュードベリ原子を利用することで、量子ビット間の間隔（例えば、フォトニックトラップ格子において１０ミクロン未満）を有利に最小化することができる。本明細書に記載される特定の実施形態は、イオンについて本明細書に記載されたものと同等の、六角形の多層格子配列を組み込み、それにより、格子層の追加（例えば、３、４、５層以上）を可能にしながら、１２個を越える同時にエンタングルされた量子ビットの全結合を可能にする。これらの例示的な実施形態は、より多くの量子ビットを同時にエンタングルする能力をもたらすことができる。処理能力は、同時にエンタングルできる実質的に同等なフィデリティの量子ビットの数とともに指数的に増加するため、この数を例えば１２個のエンタングルされた原子量子ビットから４２個の量子ビットに増加させた場合、３０個の量子ビットの差は、2^{30}の計算能力の増加、又は１０億倍以上の優位性へ変換できる。

【００４１】
［例示的な実施形態］
本明細書に記載される特定の実施形態は、量子ビットの多次元構成（例えば、セル；ノード）を利用し、それらは３Ｄ結晶構造（例えば、パイロクロア）に類似し得る。特定の実施形態は、ゲートごとに多くの量子ビットを利用し、回路の深さ、誤り訂正、及び干渉軽減を有利に低減（最小化）できる。特定の実施形態は、有利には、量子ＦＰＧＡ（ＱＦＰＧＡ）及び量子ＡＳＩＣ（ＱＡＳＩＣ）チップを可能にすることができる交換可能なコンポーネントセルを利用する。
【００４２】
特定の実施形態の物理的構成は、高フィデリティのトラップされた原子量子ビット（例えば、低エラー率を伴う）を使用するものとして本明細書に記載されるが、複数の他の量子ビットと同時に多次元でエンタングルされ得る任意の種類の量子ビット（例えば、天然に存在する；人工的に形成された）を、本明細書に記載される特定の実施形態に従い使用できる。本明細書に記載される特定の実施形態に適合する量子ビットの例は、以下を含むが、これらに限定されるものではない：素粒子；中性原子；イオン；中性分子；荷電分子；ボース・アインシュタイン凝縮体（ＢＥＣ）；電子；電子ホール；励起子；磁気量子ビット；（例えば、ダイヤモンドの）窒素空孔（ＮＶ）中心；フォノン；光子；量子ドット；リュードベリ原子；シリコンスピン；及び、場合によっては超伝導量子ビットが挙げられる。特定の実施形態において、量子ビットは、特定の構成において２つを超える量子ビットとの間に直接（例えば、ネイティブに）ゲート操作を行うのに適する。例えば、特定の実施形態の物理的アーキテクチャは、有利には、１量子及び２量子ビットゲートの直列的な連結に頼ることなく、例えば多重制御ＮＯＴ又は位相回転といった、複雑なゲート操作を直接的に提供することができる。
【００４３】
本明細書に記載される特定の実施形態において利用されるトラップされた原子量子ビットは、最適化されるべき量子相互作用の性質を示す。トラップされた原子が示すメリットの関連する姿は、以下を含むが、これらに限定されるものではない：（ｉ）それらが所与の種の範囲内で同一であり、従って、広範囲なキャリブレーション又はチューニングを有利に回避できるという事実、（ｉｉ）それらの潜在的なゲートサイクル時間に対し、良好な安定性とコヒーレンス時間とを有する量子ビットを形成する能力、及び（ｉｉｉ）競合する量子ビット技術と比較して、継続的に実証された高フィデリティのゲート操作。本明細書に記載される特定の実施形態において、同時の多量子ビットゲート操作は、複数の同一の全結合量子ビットを３Ｄ幾何学レイアウトで配列した原子によって可能となる。特定の実施形態において、全結合量子ビットの３Ｄ幾何学的配置は、複数の量子ビットの種類を有利に統合できる。（例えば、複数の制御量子ビットに１種の原子を採用し、ターゲットとして第２の原子種を採用する；隣接するセルに異なる原子種を採用するなど。）
【００４４】
本明細書に記載される特定の実施形態は、様々な量子ビット技術を利用した多層量子ビット配列を備え、以下を含むがこれらに限定されるものではない：天然に存在する原子；中性原子；荷電原子；イオン；分子；人工的に形成された原子；リュードベリ原子；ダイヤモンドの窒素空孔（ＮＶ）中心；ボース・アインシュタイン凝縮体（ＢＥＣ）；電子；光子；量子粒子；量子ドット；フォノン；トランスモン；量子粒子としてふるまう量子状態。本明細書の図は、非荷電原子（例えば、中性原子；リュードベリ状態；中性リュードベリ原子）を備える様々な例示的な多層量子ビット配列を表すが、これらの例示的な多層量子ビット配列は、他の量子ビット技術とも互換性があると理解される。
【００４５】
図１は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、論理量子ビット１１０を、実質的に平面状の領域１２０に備える、例示的な量子コンピューティング（ＱＣ）システム１００の斜視図を概略的に示す。システム１００は、第１の実質的に平面状の領域１２０ａに、第１の複数の論理量子ビット１１０ａを備え、第１の複数の論理量子ビット１１０ａ

の少なくともいくつかは、互いに相互作用するように構成される。システム１００は、第１の実質的に平面状の領域１２０ａと実質的に平行である第２の実質的に平面状の領域１２０ｂに、第２の複数の論理量子ビット１１０ｂを更に備える。第２の複数の論理量子ビット１１０ｂの少なくともいくつかは、互いに相互作用するよう構成され、かつ、第１の複数の論理量子ビット１１０ａの少なくともいくつかと相互作用するように構成される。図１の複数の論理量子ビット１１０は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、複数の２Ｄ平面光学トラップ層にわたって、多量子ビットゲートを形成する。

【００４６】

特定の実施形態において、図１に概略的に示すように、例示的なシステム１００は、第２の実質的に平面状の領域１２０ｂと実質的に平行である、第３の実質的に平面状の領域１２０ｃに、第３の複数の論理量子ビット１１０ｃを更に備える。第３の複数の論理量子ビット１１０ｃの少なくともいくつかは、互いに相互作用するよう構成され、かつ、第２の複数の論理量子ビット１１０ｂの少なくともいくつかと相互作用するように構成される。本明細書に記載される特定の実施形態と互換性を持つ他の例示的なシステム１００は、第１、第２及び第３の実質的に平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃと実質的に平行である、少なくとも１つの追加的な実質的に平面状の領域１２０に、少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビット１１０を備えることができ、少なくとも１つの付加的な複数の論理量子ビット１１０は、互いに相互作用するよう構成され、かつ、第１、第２及び／又は第３の複数の論理量子ビット１１０ａ，ｂ，ｃの少なくともいくつかと相互作用するように構成される。特定のこのような実施形態において、システム１００は、互いに実質的に平行である４つ、５つ、６つ、又はそれ以上の実質的に平面状の領域１２０に配置された、４つ、５つ、６つ、又はそれ以上のひとまとまりの複数の論理量子ビット１１０と、様々な平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０であって、互いに相互作用（例えば、平面内相互作用及び平面間相互作用）するように構成された、様々な平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０と、を備えることができる。

【００４７】

特定の実施形態において、複数の論理量子ビット１１０（例えば、第１の複数の論理量子ビット１１０ａ、第２の複数の論理量子ビット１１０ｂ及び／又は第３の複数の論理量子ビット１１０ｃ）は、以下からなる群から選択される少なくとも１つの物理的な量子ビットを備える：天然に存在する原子；中性原子；荷電原子；イオン；分子；人工的に形成された原子；リュードベリ原子；ダイヤモンドの窒素空孔（ＮＶ）中心；ボース・アインシュタイン凝縮体（ＢＥＣ）；電子；光子；量子粒子；量子ドット；フォノン；トランスモン；量子粒子としてふるまう量子状態。特定の実施形態において、複数の論理量子ビット１１０（例えば、第１、第２及び／又は第３の複数の論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃ）の論理量子ビット１１０は、個々にアドレス可能（ａｄｄｒｅｓｓａｂｌｅ）である。

【００４８】

特定の実施形態において、少なくともいくつかの論理量子ビット１１０（例えば、第１の複数の論理量子ビット１１０ａの少なくともいくつか、第２の複数の論理量子ビット１１０ｂの少なくともいくつか、及び／又は第３の複数の論理量子ビット１１０ｃの少なくともいくつか）は、互いに直接的に相互作用するように構成され、２つを超える論理量子ビット１１０が同時に関与する多量子ビットゲート操作を経験するように構成された少なくとも１つの三次元（３Ｄ）ゲートセル配列（例えば、複数の多量子ビット３Ｄゲートセル１３０を備える）を形成する。例えば、３Ｄゲートセル１３０の各論理量子ビット１１０は、３Ｄゲートセル１３０の少なくとも１つの他の論理量子ビット１１０と量子力学的にエンタングルされる（もつれ合う）ように構成され得る。

【００４９】

特定の実施形態において、第１の平面状の領域１２０ａの第１の論理量子ビット１１０ａのそれぞれは、第１の平面状の領域１２０ａにおけるいくつかの（例えば、最近傍の、及び次最近傍の）他の第１の論理量子ビット１１０ａと直接的に相互作用するように構成され得る。同様に、第２の平面状の領域１２０ｂにおいて、第２の論理量子ビット１１０

ｂのそれぞれは、第２の平面状の領域１２０ｂにおけるいくつかの（例えば、最近傍の、及び次最近傍の）他の第２の論理量子ビット１１０ｂと直接的に相互作用するように構成され得て、第３の平面状の領域１２０ｃの第３の論理量子ビット１１０ｃのそれぞれは、第３の平面状の領域１２０ｃにおけるいくつかの（例えば、最近傍の、及び次最近傍の）他の第３の論理量子ビット１１０ｃと直接的に相互作用するように構成され得る。更に、第１の平面状の領域１２０ａにおける第１の論理量子ビット１１０ａのそれぞれは、第２の平面状の領域１２０ｂ内のいくつかの（例えば、最近傍の、及び次最近傍の）第２の論理量子ビット１１０ｂと直接的に相互作用するように構成され得て、第２の平面状の領域１２０ｂにおける第２の論理量子ビット１１０ｂのそれぞれは、第３の平面状の領域１２０ｃ内のいくつかの（例えば、最近傍の、及び次最近傍の）第３の論理量子ビット１１０ｃと直接的に相互作用するように構成され得て、第３の平面状の領域１２０ｃの第３の論理量子ビット１１０ｃのそれぞれは、第２の平面状の領域１２０ｂ内のいくつかの（例えば、最近傍、及び次最近傍の）第２の論理量子ビット１１０ｂと直接的に相互作用するように構成され得る。図１には示されていないが、特定の実施形態において、少なくともいくつかの論理量子ビット１１０は、同一の平面状の領域１２０及び／又は隣接する平面状の領域１２０の更に遠い論理量子ビット１１０（例えば、次次最近傍論理量子ビット１１０；次次次最近傍論理量子ビット１１０）とさえも、直接的に相互作用することができる。

【００５０】

図２Ａは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、互いに実質的に平行である３つの実質的に平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃに３６個の論理量子ビット１１０を備える例示的なシステム１００の斜視図を概略的に示す。図２Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、互いに実質的に平行である３つの実質的に平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃに６０個の論理量子ビット１１０を備える他の例示的なシステム１００の斜視図を概略的に示す。図２Ａ及び図２Ｂの例示的なシステム１００はそれぞれ、多量子ビットゲートを形成する複数の２Ｄ平面光格子層を備える３Ｄ格子量子ビット配列（例えば、隣接する実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０間に直交する結合を有し、複数の平面層に論理量子ビット１１０が浮遊又はトラップされた３Ｄ正六角形又は「パイロクロア」格子量子ビット配列構成において）を備える。

【００５１】

特定の実施形態において、図２Ａ又は図２Ｂに示される論理量子ビット１１０は、例示的なシステム１００の全ての論理量子ビット１１０であるが、特定の他の実施形態において、図２Ａ又は図２Ｂに示される論理量子ビットは、例示的なシステム１００の論理量子ビット１１０のサブセットにすぎない。論理量子ビット１１０は、少なくとも１つの多量子ビット３Ｄゲートセル１３０を形成する。例えば、隣接した３Ｄゲートセル１３０の各ペアはそれぞれ、第１の平面状の領域１２０ａに２つの第１の論理量子ビット１１０ａを、第２の平面状の領域１２０ｂに２つの第２の論理量子ビット１１０ｂを、及び第３の平面状の領域１２０ｃに２つの第３の論理量子ビット１１０ｃを共有する。

【００５２】

図２Ａの平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃのそれぞれは、実質的に六角形の２Ｄパターンに配置された１２個の論理量子ビット１１０を備え、図２Ｂの平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃのそれぞれは、実質的に六角形の２Ｄパターンに配置された２０個の論理量子ビット１１０を備える。図２Ａ及び図２Ｂの論理量子ビット１１０は、各平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃ内で各論理量子ビット１１０とその最近傍論理量子ビット１１０との間に平面内最近傍（ｎｎ）距離d_1を有し、図２Ａ及び図２Ｂの場合、各論理量子ビット１１０と他の平面状の領域１２０における最近傍論理量子ビット１１０の間の平面内最近傍（ｎｎ）距離は、平面間距離d_2に等しい。特定の実施形態において、各平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃの平面内ｎｎ距離d_1は互いに実質的に等しいが、特定の他の実施形態において、平面状の領域１２０ａ，ｂ，ｃの少なくとも２つの平面内ｎｎ距離d_1は互いに異なる。特定の実施形態において、平面状の領域１２０ａ，ｂ間、及び平面状の領域１２０ｂ，ｃ

間の平面間距離d_2は互いに実質的に等しいが、特定の他の実施形態において、平面状の領域１２０ａ，ｂ間、及び平面状の領域１２０ｂ，ｃ間の平面間距離d_2は互いに異なる。

【００５３】

特定の実施形態において、平面内ｎｎ距離d_1及び平面間距離d_2は、実質的に互いに等しく（例えば１５ミクロン未満；３ミクロン～１５ミクロンの範囲内；８ミクロン～１１ミクロンの範囲内）、一方で、特定の他の実施形態において、平面内ｎｎ距離d_1及び平面間距離d_2は互いに異なり、（例えば、１ミクロン～３ミクロンの範囲内の差で）$d_1 > d_2$又は$d_1 < d_2$である。例えば、図２Ａ及び図２Ｂのシステム１００の平面状の領域１２０における量子ビット１１０の２Ｄ六角形パターンは、平面間距離d_2に等しい平面内ｎｎ距離d_1を有することができ、平面間次最近傍（ｎｎｎ）距離は、$d_1\sqrt{2}$に等しく、平面内ｎｎｎ距離は、$d_1\sqrt{3}$に等しく、平面内次次最近傍（ｎｎｎｎ）距離は$2d_1$に等しく、平面間ｎｎｎｎ距離は$2d_1$に等しく、平面間次次次最近傍（ｎｎｎｎｎ）距離は、$d_1\sqrt{5}$に等しく、平面内ｎｎｎｎｎ距離は、$d_1\sqrt{7}$に等しい。

【００５４】

複数の平面状の領域１２０の量子ビット１１０の２Ｄ六角形パターンの他の構成は、複数の平面状の領域１２０間で異なる横方向のオフセットを有し得る（例えば、１つの平面状の領域１２０における量子ビット１１０は、隣接する平面状の領域１２０の量子ビット１１０の真上にない、といった平面状の領域１２０に平行なオフセット；例えば図５Ａ－図５Ｃ、図６Ａ－図６Ｆ参照。）。本明細書に記載されるように、このような構成は、平面内ｎｎ距離d_1、平面間距離d_2、及び様々な平面内・平面間ｎｎｎ、ｎｎｎｎ、ｎｎｎｎｎ距離について他の値を有し得る。

【００５５】

特定の実施形態では、図２Ａに示すように、２１個の論理量子ビット１１０が、第１の多量子ビット３Ｄゲートセル１３０ａ（例えば、C^{20}ＮＯＴゲートセル又は$C^{20}\phi$ゲートセル）を形成し、２１個の論理量子ビット１１０が、第２の多量子ビット３Ｄゲートセル１３０ｂ（例えば、C^{20}ＮＯＴゲートセル又は$C^{20}\phi$ゲートセル）を形成する。例えば、平面状の領域１２０ｂにおける論理量子ビット１１０（図２Ａに黒で示す）は、第１のゲートセル１３０ａのターゲット量子ビットであることができ、その２０個の制御量子ビット（図２Ａに濃い灰色で示す）と同時に量子力学的にエンタングルされる（もつれ合う）ことができ、すなわち、その６個の平面内最近傍論理量子ビット１１０と、その２個の平面間最近傍論理量子ビット１１０（例えば、平面状の領域１２０ａ，ｃそれぞれに１個）と、１２個の平面間次最近傍論理量子ビット１１０（例えば、平面状の領域１２０ａ，ｃにそれぞれ６個）と、エンタングルされることができる。同様に、平面状の領域１２０ｂにおける別の論理量子ビット１１０（図２Ａに白で示す）は、第２のゲートセル１３０ｂのターゲット量子ビットであることができ、その２０個の制御量子ビット１１０と、同時に量子力学的にエンタングルされることができる（例えば、そのうち１４個は淡い灰色で図２Ａに示され、６個は第１のゲートセル１３０ａの制御量子ビットでもあるため濃い灰色である）。特定の実施形態において、図２Ｂ示すように、２１個の論理量子ビット１１０は、第３の多量子ビット３Ｄゲートセル１３０ｃを形成することができ、２１個の論理量子ビット１１０は、第４の多量子ビット３Ｄゲートセル１３０ｄを形成することができる。

【００５６】

図２Ａ及び図２Ｂの各C^{20}ＮＯＴ／$C^{20}\phi$ゲートセル１３０は、その配置がパイロクロア結晶構造の配置と似ていることから、「パイロクロアセル」と呼ぶことができる。本明細書に記載するように、特定の実施形態において、より多くの論理量子ビット１１０を互いに同時に量子力学的にエンタングルして、より大きい多量子ビットゲートセル１３０を形成することができる（例えば、C^{34}ＮＯＴゲートセル；$C^{34}\phi$ゲートセル；C^{94}ＮＯＴゲートセル；$C^{94}\phi$ゲートセルなど。）。これらのより大きいゲートセル１３０はそれぞれ、「スーパー・パイロクロアセル」と呼ぶことができる。

【００５７】
図２Ａ、図２Ｂは、様々な論理量子ビット１１０の間のいくつかのエンタングルメント（もつれ）を様々な太さの破線及び実線で示すが、ゲートセル１３０（例えば、第１のゲートセル１３０ａ）の論理量子ビット１１０の全ては、互いに直接的に相互作用する（例えば、同時に量子力学的にエンタングルされる；フルにエンタングルされる；完全にエンタングルされる）ことができ、別のゲートセル１３０（例えば、第２のゲートセル１３０ｂ）の論理量子ビット１１０の全ては、互いに直接的に相互作用する（例えば、同時に量子力学的にエンタングルされる）ことができる。特定の実施形態において、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍（ｎｎ）論理量子ビット１１０、その平面間最近傍（ｎｎ）論理量子ビット１１０、及びその平面間次最近傍（ｎｎｎ）論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。特定の他の実施形態において、各論理量子ビット１１０は更に、その平面内次最近傍（ｎｎｎ）論理量子ビット１１０、その平面間次次最近傍（ｎｎｎｎ）論理量子ビット１１０、その平面内次次最近傍（ｎｎｎｎ）論理量子ビット１１０、及び／又は平面間次次次最近傍（ｎｎｎｎｎ）論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。特定の他の実施形態において、各論理量子ビット１１０は更に、その平面内次次次最近傍（ｎｎｎｎｎ）量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。図２Ａは、いくつかの例示的な論理量子ビット１１０を、黒で示す単一の論理量子ビット１１０との関係でラベル付けする。論理量子ビット１１０を、追加的な論理量子ビット１１０と直接相互作用させることによって、ゲートセル１３０内の論理量子ビット１１０の数を増加させることができ、それによってゲートセル１３０の計算能力を増加させることができる。

【００５８】
特定の実施形態において、各多量子ビットゲートセル１３０は、「ネイティブな」Ｃ^{20}ＮＯＴゲート（例えば、２０制御ＮＯＴゲート）として及び／又は「ネイティブな」Ｃ^{20}φゲート（例えば、２０制御位相ゲート）として作動させることができる２１個のエンタングルされた量子ビット１１０（例えば、図２Ａ及び図２Ｂに示す）によって形成される。このようなネイティブなＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートは、１量子又は２量子ビットゲートだけによって使用されるよりもはるかに少ないゲート操作で達成され得る。特定の実施形態において、例示的な２１量子ビットゲートセル１３０により提供されるネイティブなＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートの正味のフィデリティは、個々のゲートフィデリティが非常に高い可能性のある２量子ビットゲートを多く備えるＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートのフィデリティよりも著しく大きい。なぜなら、２１量子ビットゲートセル１３０は、多くの連続した操作の誤りを集積せず結果を成し遂げるためである。特定のこのような実施形態において、例示的な２１量子ビットゲートセル１３０が提供するＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートは、複数の２量子ビットゲートを備えたＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートのステップのごく一部しか使わず、このため、例示的な２１量子ビットゲートセル１３０により提供されるＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲートは、両方の構造とフィデリティの見積もりを用いたゲート操作の成功率の比較でわかるように、より高速でよりエラーが発生しにくい（例えば、そのため最初に利用する誤り訂正が著しく少ない）。

【００５９】
特定の実施形態において、実質的に平面状の領域１２０の数を増加させることによって、及び／又は論理量子ビット１１０が互いに直接的に相互作用することができる距離を長くすることによって、ゲートセル１３０当たりの論理量子ビット１１０の数を増加させることができる。例えば、図３Ａは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、（例えば、図２Ａ及び図２Ｂの例示的なシステム１００と互換性を持つ）互いに実質的に平行な３つの実質的に平面状の領域１２０に配置された複数の論理量子ビット１１０の斜視図を概略的に示す。図３Ａの斜視図は、全ての論理量子ビット１１０が見える方向に沿ったものである（例えば、論理量子ビット１１０のいずれも、別の論理量子ビット１１０によって隠されていない。）。図３Ａはいくつかの論理量子ビット１１０の間に線を含み、この線は、ゲートセル１３０の論理量子ビット１１０の間の直接的な相互作用の一部を示す。

各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０及びその平面間次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成され、図３Ａのゲートセル１３０は、C^{20}ＮＯＴゲートセル又は$C^{20}\phi$ゲートセルである（例えば、例示的なターゲット量子ビットは黒で、その制御量子ビットは濃い灰色で示される）。

【００６０】

他の例として、図３Ｂ及び図３Ｃのそれぞれは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、互いに実質的に平行である５つの実質的に平面状の領域１２０に配置された複数の論理量子ビット１１０の斜視図を概略的に示す。図３Ｂ、図３Ｃの斜視図は、全ての論理量子ビット１１０が見える（例えば、論理量子ビット１１０のいずれも、別の論理量子ビット１１０によって隠されていない）方向に沿ったものであり、いくつかの論理量子ビット１１０の間に線を含み、この線は、ゲートセル１３０の論理量子ビット１１０の間の直接的な相互作用の一部を示す。図３Ｂについて、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０、及びその平面間次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成され、図３Ｂのゲートセル１３０は、C^{34}ＮＯＴゲートセル又は$C^{34}\phi$ゲートセルである（例えば、例示的なターゲット量子ビットは黒で、その制御量子ビットは濃い灰色で示す）。図３Ｃについて、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０、その平面内次最近傍論理量子ビット１１０、及びその平面内次次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。図３Ｃのゲートセル１３０は、C^{94}ＮＯＴゲートセル又は$C^{94}\phi$ゲートセルである（例えば、例示的なターゲット量子ビットは黒で、その制御量子ビットは濃い灰色で示す）。図３Ａ－図３Ｃの例示的な配置は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、「スーパーパイロクロア」セルを形成する六角形セルのＮ層光格子により形成される、中性（例えば、リュードベリ）原子トラップを用いて可能である、同時の結合（例えば、エンタングルメント）の程度が有利に増加することを示す（例えば、３層の正六角形の原子格子における２１量子ビットC^{20}ＮＯＴ／$C^{20}\phi$ゲート１３０；５層の正六角形の原子格子における３５量子ビットC^{34}ＮＯＴ／$C^{34}\phi$ゲート１３０；５層の正六角形の原子格子における９５量子ビットC^{94}ＮＯＴ／$C^{94}\phi$ゲート１３０など。）。

【００６１】

図４Ａ－図４Ｂ、図５Ａ－図５Ｃ及び図６Ａ－図６Ｄは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、複数の実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０の間に、異なる相対変位を有する例示的なシステム１１０の一部を概略的に示す。図４Ａ及び図４Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、それぞれが対応する複数の論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃを備えた３つの平面状の領域１２０ａ、ｂ、ｃを備えた例示的なシステム１００の一部の平面図（例えば、ｚ軸に沿った）と斜視図をそれぞれ概略的に示す。各平面状の領域１２０内の論理量子ビット１１０は、実質的に六角形の２Ｄパターンで配置され、平面状の領域１２０は互いに実質的に平行である。図４Ａ及び図４Ｂの六角形の規則的な格子配列において、３Ｄ構成は隣接する平面状の領域１２０の量子ビットの間に直交する結合を含む。図４Ａ及び図４Ｂにおいて、実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０は、隣接する実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０から、平面状の領域１２０と実質的に平行な方向に沿って実質的に変位していない。例えば、図４Ａに示すように、最上部の平面状の領域１２０ａの論理量子ビット１１０ａは、他の２つの平面状の領域１２０ｂ、ｃの対応する論理量子ビット１１０ｂ、ｃに対し、論理量子ビット１１０ｂ、ｃが論理量子ビット１１０ａによって見えなくされると同時に、論理量子ビット１１０ａが（例えば、ｚ軸に沿って）上方から見えるように整列される。図４Ａ及び図４Ｂのこの例示的なシステム１００は、図２Ａ及び図２Ｂの例示的なシステムに対応する（例えば、例示的な２１量子ビットC^{20}ＮＯＴ／$C^{20}\phi$ゲート１３０は、互いに実質的に等しい平面内ｎｎ距離d_1及び平面間距離d_2を有し、各論理量子ビット１１０がその平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０

、及びその平面間次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。）。

【００６２】

図５Ａ及び図５Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、それぞれが対応する複数の論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃを備えた３つの平面状の領域１２０ａ、ｂ、ｃを備えた別の例示的なシステム１１０の一部についての、平面図（例えば、ｚ軸に沿った）と、斜視図とをそれぞれ概略的に示す。各平面状の領域１２０内の論理量子ビット１１０は、実質的に六角形の２Ｄパターンで配置され、平面状の領域１２０は互いに実質的に平行である。図５Ａ－図５Ｃの代替的な六角形の格子配列において、３Ｄ構成は、隣接する平面状の領域１２０の量子ビット間に非直交の結合を含み、このような代替的な構造は、光格子のための最適なアクセス角度の選択肢を工学的にトレードする空間を拡大することができる。図５Ａ及び図５Ｂにおいて、実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０は、隣接する実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０から、平面状の領域１２０と実質的に平行な方向に沿ってずれている（例えば、オフセットする）。

【００６３】

例えば、図５Ａ及び図５Ｂに示すように、論理量子ビット１１０ａは、ｙ軸に沿った方向（例えば、ｘ及びｚ軸と直角をなす；図５Ａにおいて破線の両頭矢印で示す）において論理量子ビット１１０ｂに対し、$\delta_1 = d_1\sqrt{3}/2$の変位の大きさでずれているが、平面状の領域１２０ａ、ｂの論理量子ビット１１０ａ、ｂが上方から（例えば、ｚ軸に沿って）見えるように、一方で、論理量子ビット１１０ｃが論理量子ビット１１０ａによって隠れるように、論理量子ビット１１０ｃと位置合わせされている。図５Ｃは、図５Ｂと同様の斜視図を概略的に示し、平面内ｎｎ距離d_1と平面間最近傍量子ビットの間の距離は、互いに実質的に等しく、それにより、平面間距離d_2が$d_1\sqrt{3}/2$に実質的に等しく、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０、その平面内次最近傍論理量子ビット１１０、その平面間次最近傍論理量子ビット１１０、及びその平面間次次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。図５Ｃに示すように、例示的な２３量子ビットC^{22}ＮＯＴ／$C^{22}\phi$ゲート１３０は、ターゲット量子ビット（黒）と２２個の制御量子ビット（濃い灰色）と、を有する。

【００６４】

図６Ａ及び図６Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、それぞれが対応する複数の論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃを備えた３つの平面状の領域１２０ａ、ｂ、ｃを備えた更に別の例示的なシステム１１０の一部についての、平面図（例えば、ｚ軸に沿った）と斜視図とをそれぞれ概略的に示す。各平面状の領域１２０内の論理量子ビット１１０は、実質的に六角形の２Ｄパターンで配置され、平面状の領域１２０は互いに実質的に平行である。図６Ａ及び図６Ｂにおいて、実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０は、隣接する実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０から、平面状の領域１２０と実質的に平行な方向に沿ってずれている。例えば、図６Ａ及び図６Ｂに示すように、論理量子ビット１１０ａは、ｘ軸に沿った方向（例えば、ｙ及びｚ軸と直角をなす；図６Ａにおいて破線の両頭矢印で示す）において論理量子ビット１１０ｂに対して$\delta_2 = d_1/2$の変位の大きさでずれているが、平面状の領域１２０ａ、ｂの論理量子ビット１１０ａ、ｂが上方から（例えば、ｚ軸に沿って）見えるように、一方で論理量子ビット１１０ｃが論理量子ビット１１０ａによって隠れるように、論理量子ビット１１０ｃと位置合わせされている。図６Ｃは、図６Ｂと同様の斜視図を概略的に示し、平面内ｎｎ距離d_1と平面間最近傍量子ビットの間の距離は、互いに実質的に等しく、それにより、平面間距離d_2が$d_1\sqrt{3}/2$に実質的に等しく、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０、その平面内次最近傍論理量子ビット１１０、その平面間次最近傍論理量子ビット１１０、及びその平面間次次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。図６Ｃに示すように、例示的な２５量子ビットC^{24}Ｎ

ＯＴ／Ｃ^{24}φゲート１３０は、ターゲット量子ビット（黒）と２４個の制御量子ビット（濃い灰色）とを有する。

【００６５】

図６Ｄ及び図６Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、それぞれが対応する複数の論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃを備えた３つの平面状の領域１２０ａ、ｂ、ｃを備えた更に他の例示的なシステム１１０の一部についての、平面図（例えば、ｚ軸に沿った）と斜視図とをそれぞれ概略的に示す。各平面状の領域１２０内の論理量子ビット１１０は、実質的に六角形の２Ｄパターンで配置され、平面状の領域１２０は互いに実質的に平行である。図６Ｄ及び図６Ｅにおいて、実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０は、隣接する実質的に平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０から、平面状の領域１２０と実質的に平行な方向に沿ってずれている。例えば、図６Ｄ及び図６Ｅに示すように、論理量子ビット１１０ａは、d_1に実質的に等しい変位の大きさδ_3だけ、論理量子ビット１１０ｂに対しずれており、ｙ軸に沿った大きさ$\delta_1 = d_1\sqrt{3}/2$の第１のコンポーネントと、ｘ軸に沿った大きさ$\delta_2 = d_1/2$の第２のコンポーネントと、を有する。論理量子ビット１１０ａは、図６Ｄにおいて、論理量子ビット１１０ｂ、ｃが論理量子ビット１１０ａによって隠れるように、論理量子ビット１１０ｂ、ｃと位置合わせされる。

【００６６】

図６Ｆは、図６Ｅと同様の斜視図を概略的に示し、平面内ｎｎ距離d_1と平面間最近傍量子ビットの間の距離は、互いに実質的に等しく、それにより、平面の間の平面間距離（例えば、間隔）は$d_2 = d_1\sqrt{3}/2$であり、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、各論理量子ビット１１０は、その平面内最近傍論理量子ビット１１０、その平面間最近傍論理量子ビット１１０、その平面内次最近傍論理量子ビット、その平面間次最近傍論理量子ビット１１０、及びその平面間次次最近傍論理量子ビット１１０と直接相互作用するように構成される。図６Ｆに示すとおり、例示的な２１量子ビットＣ^{20}ＮＯＴ／Ｃ^{20}φゲート１３０は、ターゲット量子ビット（黒で示す）と２０個の制御量子ビットとを有する。この例、及び上記の全ての例において、全ての論理量子ビット１１０ａ、ｂ、ｃを見ることが可能であり、個々にアドレス可能で個々に検出可能である角度が存在する。

【００６７】

図５Ａ－図５Ｃ及び図６Ａ－図６Ｆは、平面状の領域１２０の論理量子ビット１１０の間の例示的な変位を概略的に示し、その変位は例示的な方向及び大きさを有する。特定の他の実施形態は、他方向の（例えば、ｘ軸及びｙ軸の両方に沿った大きさを有する）及び／又は他の大きさの（例えば１／２セル幅；１／３セル幅）変位を有する。特定の他の実施形態は、異なる平面間距離d_2を有する。例えば、平面状の領域１２０の間の間隔は、隣接する平面状の領域１２０をまたがる最近傍論理量子ビット１１０の間の垂直線からの角度に従って減少し得る（例えば、d_2は$d_1/2$；$2 \cdot d_1/3$；$3 \cdot d_1/4$；$0.85 \cdot d_1$に等しい）。また、図５Ａ－図５Ｃ及び図６Ａ－図６Ｆは、２Ｄの実質的に六角形のパターンを有する例示的なシステム１００を概略的に示すが、他の２Ｄパターンもまた、本明細書に記載される特定の実施形態に適合する。

【００６８】

特定の実施形態において、第１の複数の論理量子ビット１１０ａは、個々にアドレス可能で、実質的に平面な第１の光格子に配置され、第２の複数の論理量子ビット１１０ｂは、個々にアドレス可能で、第１の光格子と実質的に平行な、実質的に平面な第２の光格子に配置され、第３の複数の論理量子ビット１１０ｃは、個々にアドレス可能で、第２の光格子と実質的に平行な、実質的に平面な第３の光格子に配置される。特定の実施形態において、システム１００は、第３の実質的に平面状の領域１２０ｃと実質的に平行な、少なくとも１つの追加的な実質的に平面状の領域１２０に、少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビット１１０を備え、少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビット１１０は、互いに相互作用するように、及び／又は、第３の複数の論理量子ビット１１０ｃの少なくともいくつかと相互作用するように構成され、そこにおいて、少なくとも１つの追加的

な複数の論理量子ビット１１０は、個々にアドレス可能である。例えば、複数の量子ビットの実質的に平行な光格子の数は、第４の光格子、第５の光格子、第６の光格子、第７の光格子等を更に備えることができる。複数の閉じ込め領域は更に、第３の光格子と実質的に平行な少なくとも１つの追加的な光格子に配置される少なくとも１つの追加的な閉じ込め領域を更に備えることができ、少なくとも１つの追加的な光格子は、少なくとも１つの追加的な複数の論理量子ビットを備える。

【００６９】

例えば、図７Ａ－図７Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、複数の２Ｄ平面光学トラップ領域の間に形成され、複数のアドッシングレーザ光ビーム２１０を有する例示的な多量子ビットゲートセル１３０の様々な図を概略的に示す（例えば、中心にターゲット量子ビットを、その他の場所に制御量子ビットを有するパイロクロア構成に２１個の量子ビット１１０を有するＣ^{20}ＮＯＴゲートセル又はＣ^{20}φゲートセル。）。図７Ａは、多量子ビットゲートセル１３０の多層格子構造の原子量子ビットを示す。図７Ａの量子ビット１１０間の線は、量子ビット１１０間のエンタングルメントの一部のみを示し、量子ビット１１０間のその他のエンタングルメントを示す線は、明瞭化のために省略される。図７Ｂは、原子を個々に照射するように構成された（例えば、光学ポート２１２から発される）アドレッシングレーザー光ビーム２１０の一部のみを有する多量子ビットゲートセル１３０を示し、原子を含む光学ポテンシャル井戸を形成するトラッピングレーザー光ビーム２２０の配列は、明瞭化のため省略される。図７Ｃ及び図７Ｄに見られるように、各アドレッシングレーザー光ビーム２１０は、多量子ビットゲートセル１３０の単一の原子を照射する。２Ｄの図の限界は、１つの図示それ自体では、単一のレーザー光ビームが複数の原子と交差しているように見え得ることである。しかし、レーザー光ビーム２１０は、交互の行に配列されて、透明なものとして示される。その結果、実際には各原子が多くても１つのアドレッシングレーザー光ビームに交差している場合でも、１つの原子が複数のレーザー光ビームの中にあるように見えたり、１つのレーザー光ビームが複数の原子と交差するように見えたり、といったように、複数のレーザー光ビーム２１０の間又は背後にある原子は、その原子をアドレスしないビームを「通って」いるように見えるかもしれない。本明細書に記載される特定の実施形態は、より多くの量子ビット１１０が単一のネイティブなゲート操作に関与できるように、最近傍、次最近傍、次次最近傍等の量子ビット間で同時に最大数の量子ビットをエンタングルするように構成される。各ゲートセルの潜在的処理能力は、各ゲート操作に同時に関与する量子ビット１１０の数とともに指数関数的に増加するため、本明細書に記載される特定の実施形態の処理能力も同様に、全体として指数関数的に増加する。特定の実施形態のゲート構造及び配置の動的再構成可能性もまた、同様に大幅に改善される。

【００７０】

図８Ａ－図８Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、トラッピングレーザー光ビーム２２０の様々な図を概略的に示す。図８Ａ－図８Ｄのこれらの例示的な実施形態は、交差するトラッピング光ビーム２２０（例えば、光学ポート２２２から発されるトラッピングレーザー光ビーム）の中、又はその間に形成されるポテンシャル井戸の３Ｄ光格子（例えば、Ｉ．Ｂｌｏｃｈ、Ｎａｔｕｒｅ　Ｐｈｙｓｉｃｓ、１、２３（２００５）参照）にトラップされた中性の（例えば、非荷電の）リュードベリ原子を利用する。本明細書に記載される特定の実施形態において、相互に配列され、交差する光ビーム（図８Ａ及び図８Ｂ参照）の間の格子空間に形成される最小のポテンシャルエネルギー（例えば、ヌル）領域において、原子はトラップされ、その一方で、特定の他の実施形態において、交差する光ビーム（図８Ｃ及び図８Ｄ参照）の内で、原子はトラップされ得る。このような交差するトラッピング光ビーム２２０の範囲内のトラッピングは、Ｓ．Ｅ．Ａｎｄｅｒｓｏｎらによる Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．１０７、２６３００１（２０１１）；Ｔ．Ｍ．Ｇｒａｈａｍらによる Ｐｈｙｓ．Ｒｅｖ．Ｌｅｔｔ．１２３、２３０５０１（２０１９））に記載される。

【００７１】

図８Ａ－図８Ｅは、最近傍量子ビット１１０間の８ミクロン～１１ミクロン（例えば、１２ミクロン未満）の範囲の格子間距離を採用する。｜１０１Ｓ＞；｜１０９Ｓ＞のセシウム（Ｃｓ）リュードベリ遷移（例えば、７７Ｋ、３００Ｋ又は他の温度に冷却される）が利用される例の場合、ノミナル値８ミクロンの格子セルサイズは、参照されたデータ曲線に基づき、特定の多重制御量子ゲート操作のための最適値の範囲内である。特定のこのような実施形態は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、設計実現可能性と特定の設計上の利点の両方を提供することができる。

【００７２】

特定の実施形態において、交互の列に配置された原子量子ビットは、隣接する平面の間に、互い違いのオフセット（例えば、ｘ又はｙに沿った１／２セルオフセット間隔、ｘ又はｙに沿った１／３セルオフセット間隔、ｘ及びｙに沿った１／４×１／４セルオフセット間隔）を有する、交互の平面に存在することができ、これは全結合でエンタングルされた原子量子ビットの、正六角柱構成の形成を可能にし、特定の視界から見て傾斜した六角柱構成を可能にすることができる。例えば、交差するトラッピングレーザー光ビーム２２０の３Ｄ交差が直交に近くなることができるように、基準面（例えば、水平；ｘ－ｙ平面）に関して、交差するトラッピングレーザー光ビーム２２０は、平面ベースの長さｘと幅ｙ（例えば、水平次元）とともに、例示的な量子コンピューティングシステムの高さｚ（例えば、垂直次元）として定義され得る座標系に関して複合角度を形成することができる（例えば、ｚ軸の方へｘ軸＋１８．５度、ｙ＝０に沿って整列したトラッピングレーザー光ビーム２２０の第１の配列は、ｙ軸の方へｘ軸＋６０度、ｚ＝０に沿って整列したトラッピングレーザー光ビーム２２０の第２の配列と交差する）。トラッピングレーザー光ビーム２２０の間に形成されるポテンシャル井戸は、特定の角度で見た場合に、平面において実質的に対称であることができ（例えば、断面が正方形又は菱形）、実質的に均一のポテンシャル井戸（例えば、鞍形のウェル；鞍点）を形成することができる。例えば、図８Ｂ及び図８Ｄにおいて、トラッピングレーザー光ビーム２２０の第１及び第２の配列は、特定の視界からは矩形又は台形に見え得る。しかしながら、図８Ｂ及び図８Ｄにおいて、左下から右上へと角度をなしているように見えるトラッピングレーザー光ビーム２２０は、３Ｄ構造において下方へ角度をつけることもでき、その結果、図８Ｂ及び図８Ｄにおいて水平に描かれたトラッピングレーザー光ビームの第１及び第２の配列の交点は、特定のアクセス角度から斜めに見ると、ほぼ直交するように見える。特定の実施形態において、原子閉じ込め構造は、（例えば、図１Ａ、１Ｂ、１Ｄに示すように）平面を横切る正六角柱を形成することができ、特定の他の実施形態において、原子－原子間の幾何学的配置構造は、傾斜した六角柱構成を形成するように斜め又は角度をなして見え得る。特定の実施形態において、様々な視点及び角度から光ビームの交差は非直交であるように見え得るが、特定の実施形態の角度のついた３Ｄ格子構造は、量子ビットの最適なアドレッシング及び読出し（例えば、検出）のための角度から見る場合、原子間に最大の空間的な離間を可能にするように設計される。

【００７３】

図９Ａ－図９Ｂは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、トラッピングレーザー光ビーム２２０の交差する配列によって作成された、３層の１０×１０の原子トラップ格子の斜視図を概略的に示す。図９Ｃは、図９Ａ－図９Ｂの構造の上面図を概略的に示す。本明細書に記載される特定の実施形態に従った、３つのアドレッシングレーザー光ビーム２１０を合わせた配列も示される。

【００７４】

図１０Ａは、本願明細書に記載される特定の実施形態に従い、３組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ，ｂ，ｃとレーザー光ビーム２２０ａ，ｂの２つの交差する配列とを有する、３層の１０×１０原子格子を備えた、部分的に組み立てられたＱＣシステム１００の斜視図を概略的に示す。図１０Ａはまた、アドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃが通って延在する光学ポート２１４ａ、ｂ、ｃと、トラッピングレーザー光ビーム２２０ａ、ｂを放出する光ファイバポート２２２ａ、ｂと、光学トラップ構成の一

部として磁場を生成するように構成される磁場源２３０（光学トラップ構成の一部として電場を生成するように構成される電極２３４は図１０Ａに示される）と、対応する光検出器ポート２４２ａ、ｂを介して量子ビットからの蛍光を受信し、検出するように構成された、第１及び第２の光検出器２４０ａ、ｂ（例えば、ＣＣＤ検出器配列）と、を示す。図１０Ｂ－図１０Ｄは、本明細書に記載される特定の実施形態に従った、３組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃと、図１０Ａのトラッピングレーザー光ビーム２２０ａ、ｂの２つの交差する配列と、を異なる方向から見た他の図を示す。

【００７５】

図１０Ａ－図１０Ｄは３組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃを有する例示的なＱＣシステム１００を概略的に示すが、特定の他の実施形態において、ＱＣシステム１００は、４組以上のアドレッシングレーザー光ビーム２１０を備えることができる。例えば図１０Ｅは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、４組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃ、ｄとトラッピングレーザー光ビーム２２０ａ、ｂの２つの交差する配列とを有する、３層の１０×１０の原子格子を備えた、別の部分的に組み立てられたＱＣシステム１００の斜視図を概略的に示す。図１０Ｆ－図１０Ｈは、本明細書に記載される特定の他の実施形態に従った、４組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃ、ｄと、図１０Ｅのトラッピングレーザー光ビーム２２０ａ、ｂの２つの交差する配列と、を異なる方向から見た他の図を示す。

【００７６】

本明細書で使用する場合、ｘ－ｙ平面に位置している全ての方向は仰角０度（例えば、水平）として定義され、ｘ及びｙに直交する方向（例えば、垂直）はｚとして定義される。更に、ｙに沿った方向は方位角０度（例えば、ｚを中心とした回転）と定義され、方位角０度、仰角０度の方向は（０°，０°）と表される。例えば、本明細書に記載される特定の実施形態において、レーザー配列は、図１０Ａ－１０Ｃに示すように交差するよう方向付けされ得る。（例えば、トラッピングレーザー光ビーム２２０ａ及び２２０ｂの交差が、ｘ－ｙ平面から＋２０度の角度の平面において２Ｄ格子を形成するように、トラッピングレーザー光ビーム２２０ａを（０°，０°）、トラッピングレーザー光ビーム２２０ｂを（９０°，＋２０°）、レーザー２２０ａの行を、＋２０度の断面傾斜（例えば、仰角）で配置することができる。特定のこのような実施形態において、実質的に直交するレーザーによって形成されるトラッピングセルは、実質的に正方形であり得る。アドレッシングレーザー光ビーム２１０ａを（２９３．５°，＋５３．５°）とし、アドレッシングレーザー光ビーム２１０ｂを（２４６．５°，＋５３．５°）とし、アドレッシングレーザー光ビーム２１０ｃを（７１．５°，＋５８°）とする）。本明細書に記載される特定の他の実施形態において、トラッピングレーザー光ビームの交差は、有利にも他の角度で配置され、ダイヤモンド形又は菱形のトラッピングセルを形成してより多くの平面量子ビット格子配列の追加を可能にすると同時に、３Ｄ格子において各量子ビットを個々にアドレッシングするための複数のアドレッシングレーザー角度を可能にし続けることができる。例えば、説明が簡易である別の実施形態において、トラッピングレーザービーム２２０ａは（３０°，０°）で配置でき、トラッピングレーザービーム２２０ｂは（９０°，＋２０°）で配置でき、アドレッシングレーザーを（０°，６０°）、（１２０°，６０°）、（２４０°，６０°）とすることができる。図１０Ｂに図示するようなこの特定の角度の組み合わせは、視覚的に明瞭にするため；すなわち、垂直に近いように見える角度で現れる３つのアドレッシングレーザー光ビーム２１０のコンパクトな配列に対し、横方向に向いて見える２つのトラッピングレーザー光ビーム２２０のコンパクトな配列（例えば、クラスタ；バンク）を区別しやすいように選択されていることに注意されたい。他の実施形態は、本明細書に記載される特定の他の実施形態に従い、３Ｄ構造内で格子レーザーの実質的に直交する交差を形成すると同時に、個々の量子ビットをアドレッシング及び検出するための照準線の状況を同様に最適化する、複合角度の代替的な組合せを利用することができる。

【００７７】

図１１Ａは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、第１の光検出器ポート２４２ａを通して見た、図９Ａ－図９Ｃ、図１０Ａ－図１０Ｄの３層の１０×１０の３Ｄ原子格子の図を概略的に示す。この視点からは、多次元の多層量子ビット格子配列の各原子は、第１の光検出器２４０ａから別々に見ることができ、その結果、１つの専用の光アドレッシングビームによってアドレスされる場合に、各原子の状態を個々に検出及び識別できる。図１１Ｂは、図１１Ａの構造の側断面図を概略的に示す。図１１Ａは、３層の１０×１０の３Ｄ原子格子を示すが、格子構造の上下の最適なアクセス角度から格子における各原子が別々に及び個々にアドレスされ、見られる（例えば、第１の光検出器２４２ａにより検出される）ことができるように他の原子格子を構成することもできる。例えば、コンピュータ支援設計（ＣＡＤ）及び分析を用いて、他の原子格子について他のこのような構成を確認することができる。特定のこのような実施形態により、最近傍、次最近傍、次次最近傍などの量子ビット間に最大数の量子ビットを同時にエンタングルすることができ、単一のネイティブゲート操作でより多くの量子ビットが関与できるようにする。図１１Ａはまた、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、ゲート操作及び読出しを達成するために量子ビットをアドレッシング及び操作するための、電極領域２３４、磁場（例えば、磁場Ｂ）源２３０、検出器配列２４０（例えば、ＣＣＤカメラなど）及び光ビームポート２４２ａ、２１４ａ、ｂ、ｃの相対的な配置を概略的に示す。

【００７８】

図１２は、図１０Ａの例示的な組立てられたＱＣシステムの斜視図を概略的に示すものであり、当該システムは、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、３組のアドレッシングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃと、トラッピングレーザー光ビーム２２０ａ、ｂの２つ交差する配列と、有する、３層の１０×１０の原子格子を備える。図１２はまた、（例えば、図１１Ａに示すような）第１の光検出器ポート２４２ａを通して見た図と、（例えば、図８Ｅ及び図９Ａに示すような）トラッピングレーザー光ビーム２１０ａ、ｂ、ｃの交差する配列の２つの異なる図とを概略的に示す。

【００７９】

図１３は、本明細書に記載される特定の実施形態に従い、様々な多層量子ビット格子配列について所与のゲートフィデリティで同時にエンタングルされ得る量子ビットの総数を比較する３つの表を示す。

【００８０】

本発明は、いくつかの非限定的な実施形態において説明されてきた。実施形態は互いに排他的ではなく、一実施形態に関して説明された要素を、適切な方法で他の実施形態と組み合わせたり、再編成したり、又は他の実施形態から削除したりして所望の設計目的を達成してもよいことを理解されたい。各実施形態について、いずれの単一の特徴又は特徴群も、必要又は必須ではない。

【００８１】

本発明を要約する目的で、本発明の特定の態様、利点及び新しい特徴を、本明細書に記載する。しかし、このような利点のすべてが、任意の特定の実施形態に従い必ずしも達成されるとは限らないことを理解されたい。従って、本発明は、本明細書において教示又は示唆され得る他の利点を必ずしも達成することなく、１つ又は複数の利点を達成する方法で具体化又は実施され得る。

【００８２】

本明細書で使用する場合、「一実施形態」又は「いくつかの実施形態」又は「ある実施形態」に言及する場合、その実施形態に関連して説明される特定の要素、特徴、構造又は特徴が、少なくとも１つの実施形態に含まれることを意味する。本明細書の様々な箇所で「一実施形態において」という表現が出てくるが、必ずしも全てが同一の実施形態を指すものではない。本明細書において使用される条件つきの言語、特に「～できる」「～する可能性がある」、「～かもしれない」、「～してもよい」「例えば」などは、特に別段の記載がない限り、又は使用される文脈内で別段理解されない限り、通常、他の実施形態は含まない特定の特徴、要素、及び／又はステップをその特定の実施形態が含むことを伝え

る意図を有する。また、本明細書及び添付の請求の範囲において用いられる冠詞「ａ」又は「ａｎ」又は「ｔｈｅ」は、別段の指定がない限り「１つ以上」又は「少なくとも１つ」を意味するものと解釈されるべきである。

【００８３】

本明細書において使用される、程度を表す表現、例えば「およそ」、「約」、「概して」、「実質的に」などの用語は、そうであっても所望の機能を果たす、又は所望の結果を達成する、記載された値、量、又は特性、に近い値、量、又は特性を表す。例えば、「およそ」、「約」、「概して」、及び「実質的に」という用語は、記載された量の±１０％以内、±５％以内、±２％以内、±１％以内、又は±０．１％以内の量を指してもよい。別の例として、「概して平行」及び「実質的に平行」という用語は、完全に平行な状態から±１０度、±５度、±２度、±１度、又は、±０．１度だけ逸脱した値、量、又は特性を指し、「概して直交する」及び「実質的に直交する」という用語は、完全に直交する状態から±１０度、±５度、±２度、±１度、又は、±０．１度だけ逸脱した値、量、又は特性を指す。本明細書に開示される範囲は、あらゆる重複、部分範囲、及びそれらの組み合わせも含む。「～まで」、「少なくとも」、「～よりおおきい」「～より小さい」、「～の間」等の表現は、記載された数値を含む。本明細書で使用する場合、「ａ」「ａｎ」及び「前記」は、文脈からそうではないと明確に指示されない限り、複数の参照を含む。また、本明細書で使用する場合、文脈からそうではないと明確に指示されない限り、「ｉｎ」の意味は「ｉｎｔｏ」及び「ｏｎ」を含む。

【００８４】

本明細書で使用する場合、「備える」、「備えた」、「含む」、「含んだ」、「有する」、「有した」等の用語、又はそれらの他の変形は、オープンエンドな用語であり、非排他的な包含を網羅することを意図する。例えば、要素のリストを備えるプロセス、方法、物、又は装置は、必ずしもそれらの要素のみに限定されず、明示的に列挙されない、又はこのようなプロセス、方法、物、又は装置に固有の、他の要素を含んでもよい。更に、明示的に反対の記載がない限り、「又は」は包括的な「又は」の意味であり、排他的な「又は」の意味ではない。例えば、条件Ａ又はＢは、次のいずれか１つによって満たされる：Ａは真であり（又は存在する）、Ｂは偽である（又は存在しない）；Ａは偽であり（又は存在しない）、Ｂは真である（又は存在する）；又は、Ａ及びＢはともに真である（又は存在する）。本明細書で使用する場合、項目のリストのうち「少なくとも１つの」という語句は、単一の部材を含む、それらの項目の任意の組み合わせを指す。例えば、「Ａ、Ｂ又はＣ：の少なくとも１つの」は、Ａ、Ｂ、Ｃ、Ａ＆Ｂ、Ａ＆Ｃ、Ｂ＆Ｃ、Ａ＆Ｂ＆Ｃを網羅することを意図する。例えば「Ｘ、Ｙ及びＺの少なくとも１つ」といったフレーズの接続的な表現は、特に別段の記載がない限り、項目、用語などがＸ、Ｙ又はＺの少なくとも１つであってもよいことを伝えるために一般的に用いられるものとして文脈と共に理解される。従って、このような接続的な表現は概して、特定の実施形態が少なくとも１つのＸ、少なくとも１つのＹ、及び少なくとも１つのＺがそれぞれ存在しなければならないことを意図するものではない。

【００８５】

従って、特定の実施形態のみを本明細書で具体的に説明したが、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく本発明に多数の変更が行われ得ることは明らかであろう。更に、略語は、単に明細書及び請求項の読みやすさを高めるために使用される。これらの略語は、使用される用語の一般性を低減させる意図はなく、特許請求の範囲を本明細書に記載される実施形態に制限すると解釈されるべきではない点に留意すべきである。

【図面】

【図１】

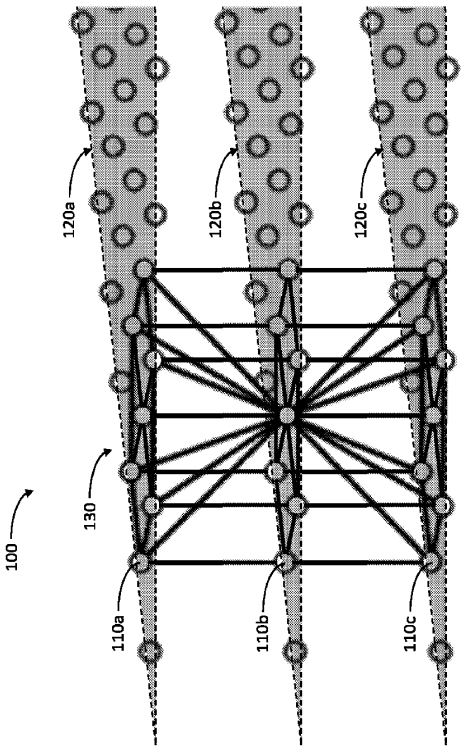


FIG. 1:

【図２Ａ】

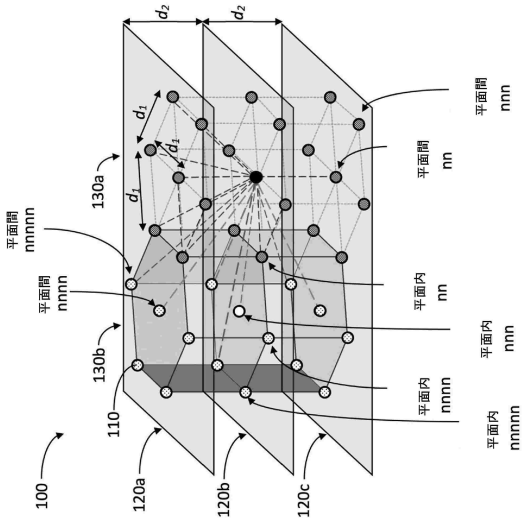


FIG. 2A:

【図２Ｂ】

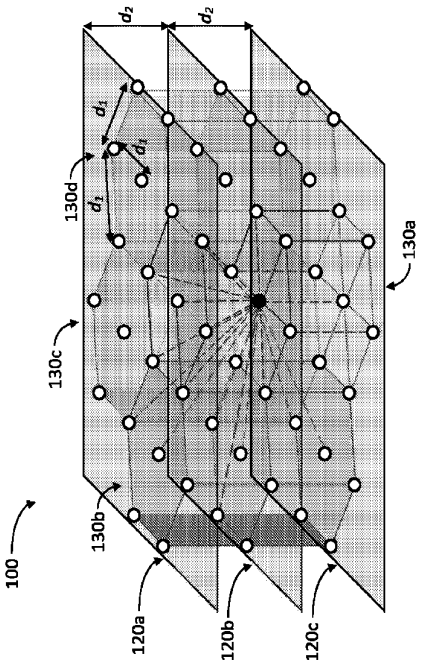


FIG. 2B:

【図３Ａ】

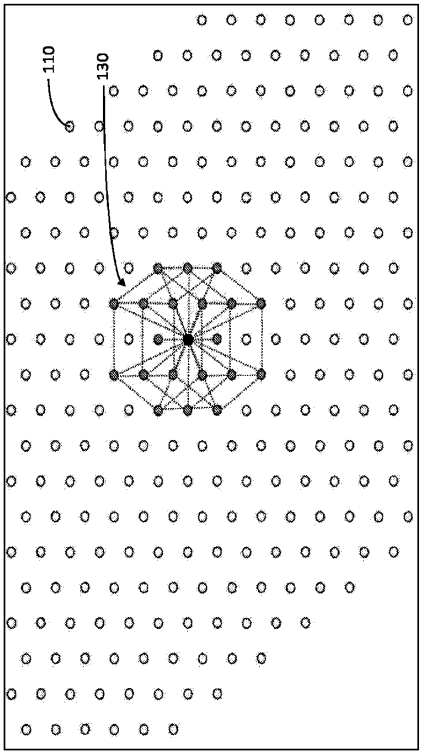


FIG. 3A:

【図３Ｂ】

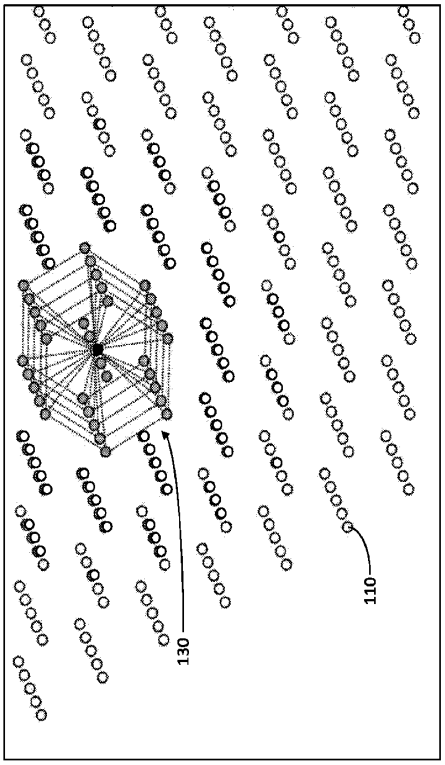


FIG. 3B:

【図３Ｃ】

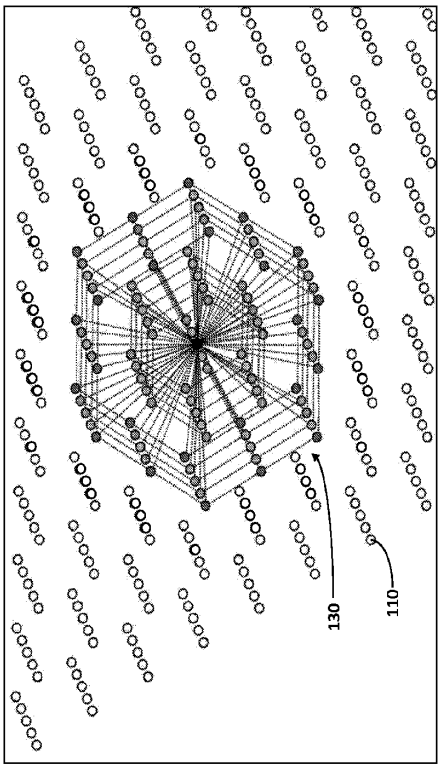
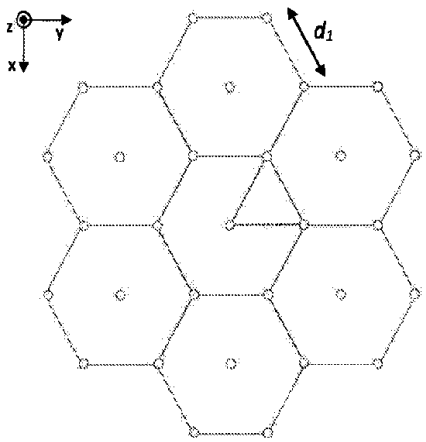


FIG. 3C:

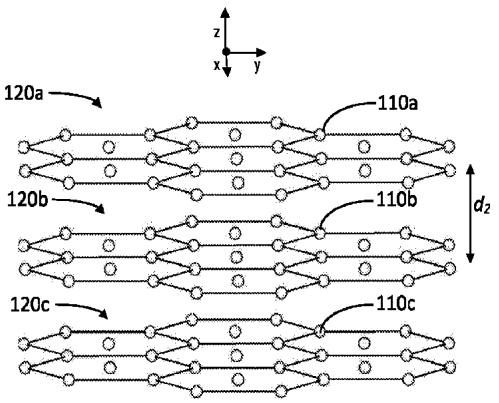
【図４Ａ】

FIG. 4A:



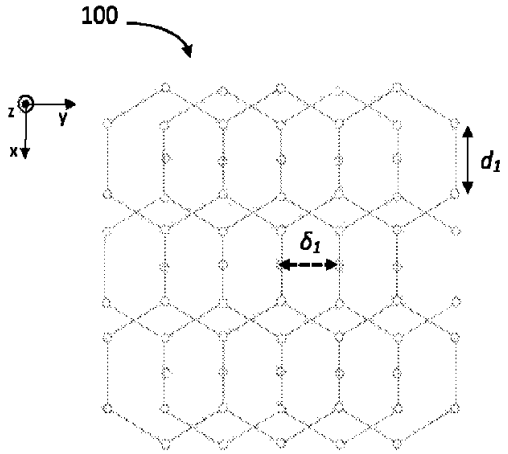
【図４Ｂ】

FIG. 4B:



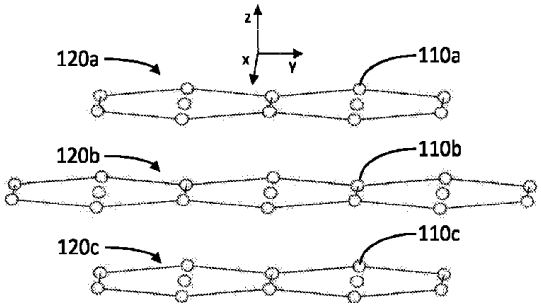
【図５Ａ】

FIG. 5A:



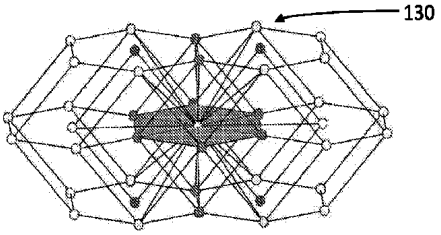
【図５Ｂ】

FIG. 5B:



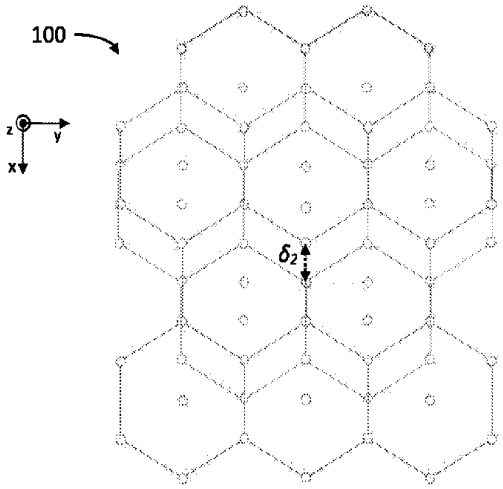
【図５Ｃ】

FIG. 5C:



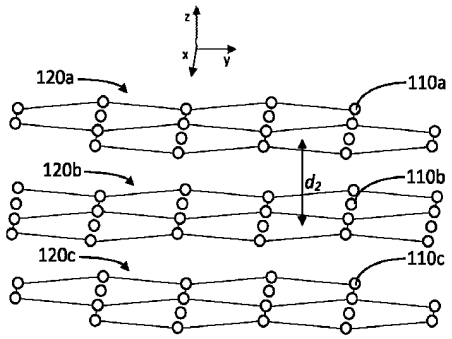
【図６Ａ】

FIG. 6A:



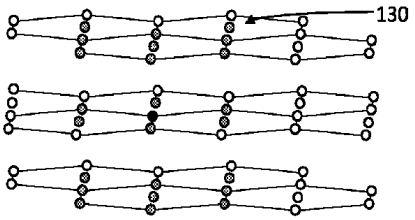
【図６Ｂ】

FIG. 6B:



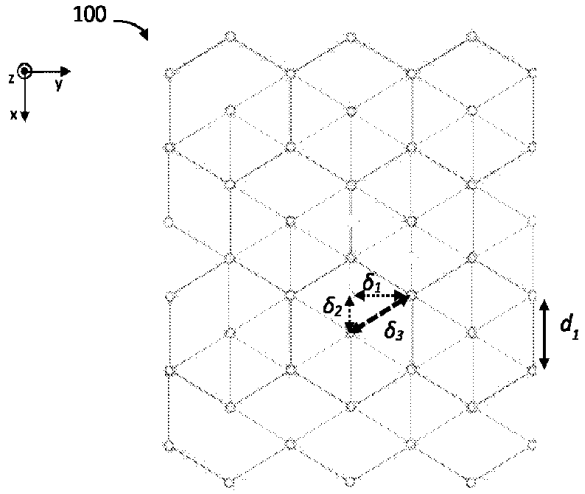
【図６Ｃ】

FIG. 6C:



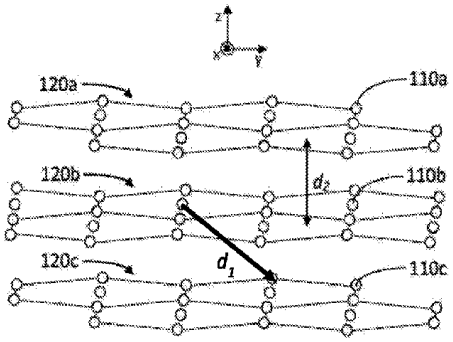
【図６Ｄ】

FIG. 6D:



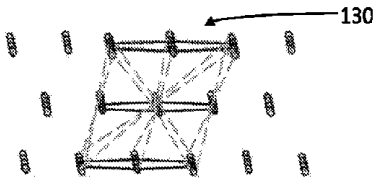
【図６Ｅ】

FIG. 6E:



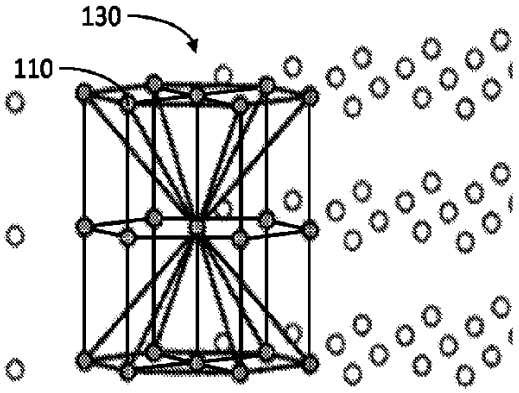
【図６Ｆ】

FIG. 6F:



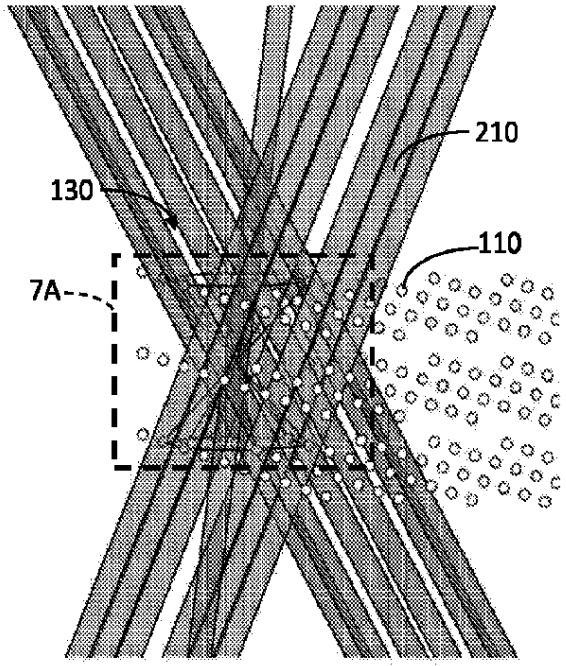
【図７Ａ】

FIG. 7A:



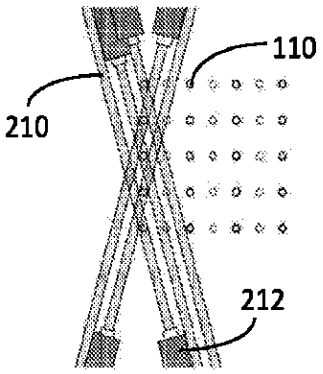
【図７Ｂ】

FIG. 7B:



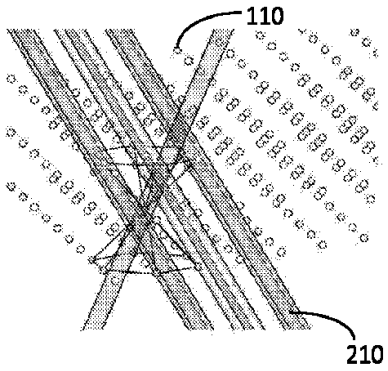
【図７Ｃ】

FIG. 7C:



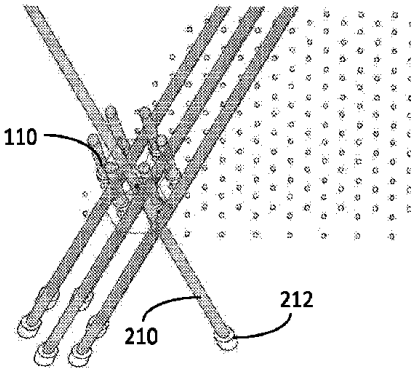
【図７Ｄ】

FIG. 7D:



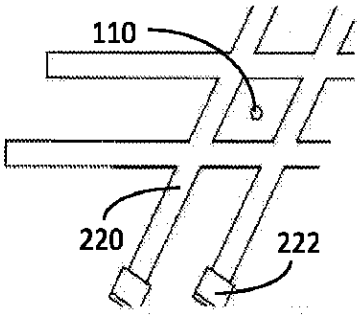
【図７Ｅ】

FIG. 7E:



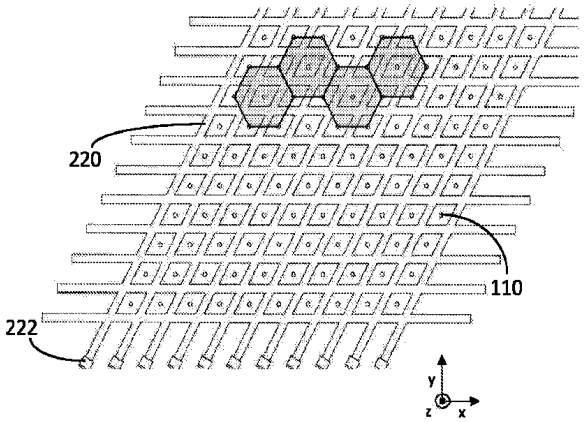
【図８Ａ】

FIG. 8A:



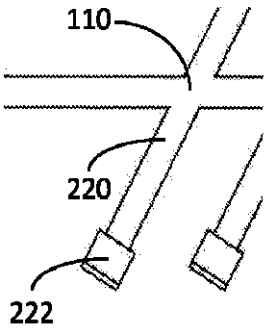
【図８Ｂ】

FIG. 8B:



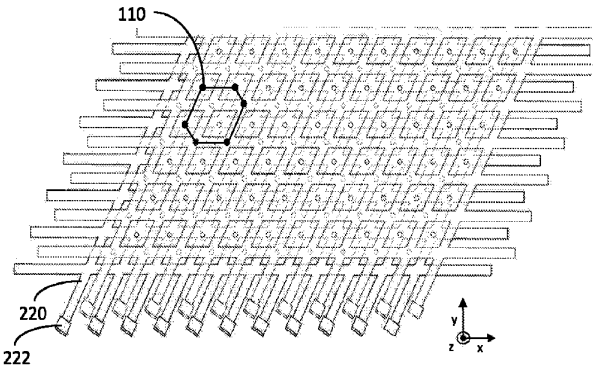
【図８Ｃ】

FIG. 8C:



【図８Ｄ】

FIG. 8D:



【図８Ｅ】

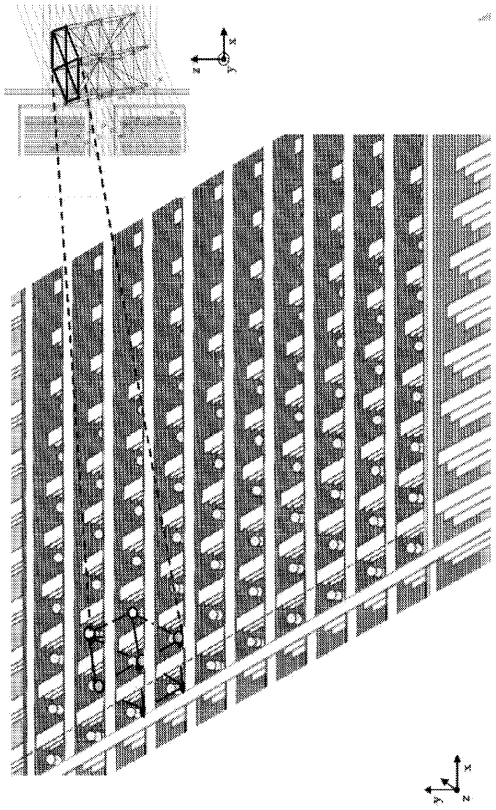
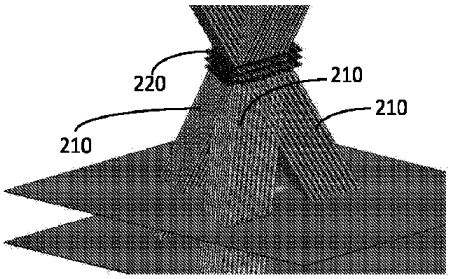


FIG. 8E:

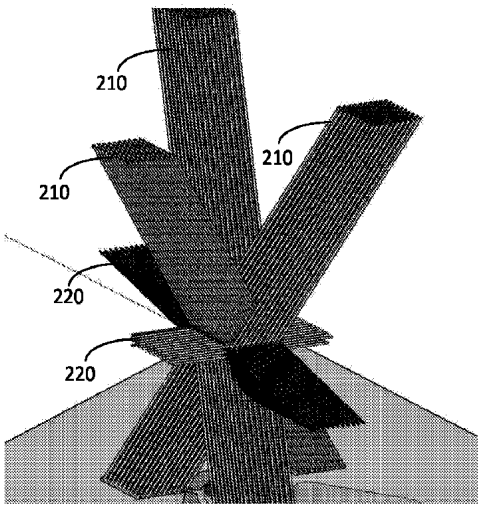
【図９Ａ】

FIG. 9A:



【図９Ｂ】

FIG. 9B:



【図９Ｃ】

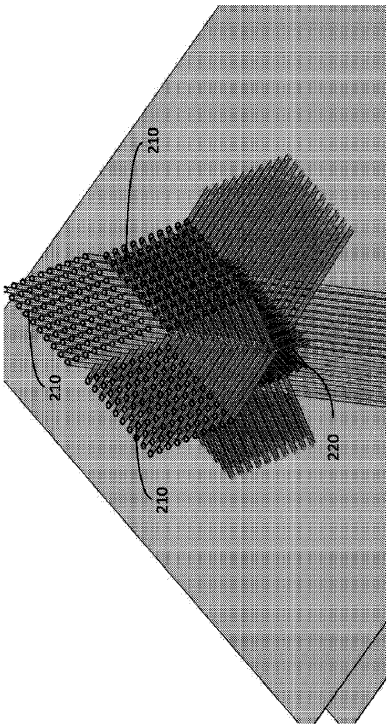


FIG. 9C:

【図１０Ａ】

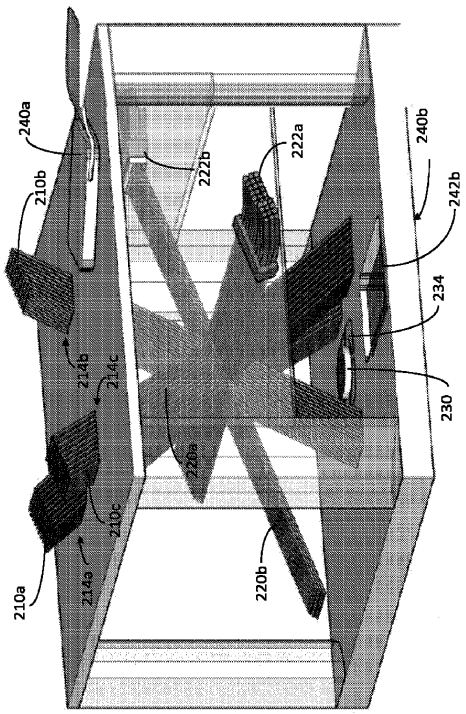
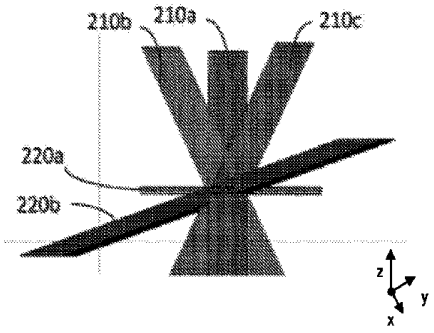


FIG. 10A:

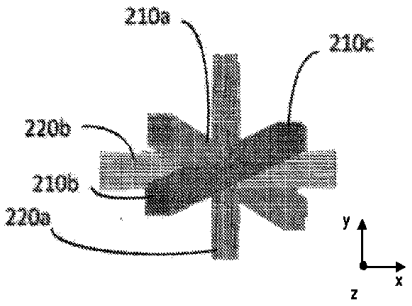
【図１０Ｂ】

FIG. 10B:



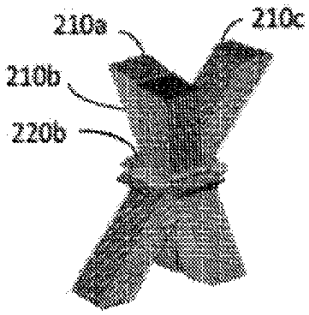
【図１０Ｃ】

FIG. 10C:



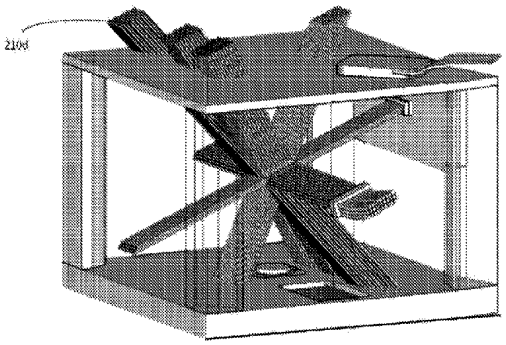
【図１０Ｄ】

FIG. 10D:



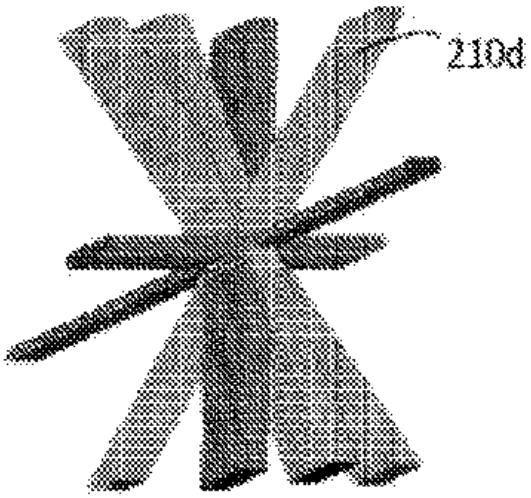
【図１０Ｅ】

FIG. 10E:



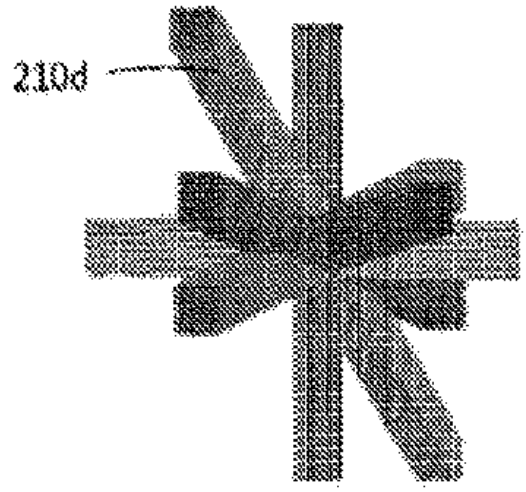
【図１０Ｆ】

FIG. 10F:



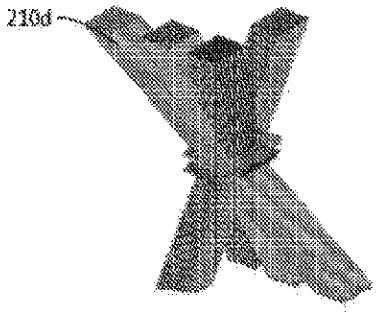
【図１０Ｇ】

FIG. 10G:



【図１０Ｈ】

FIG. 10H:



【図１１Ａ】

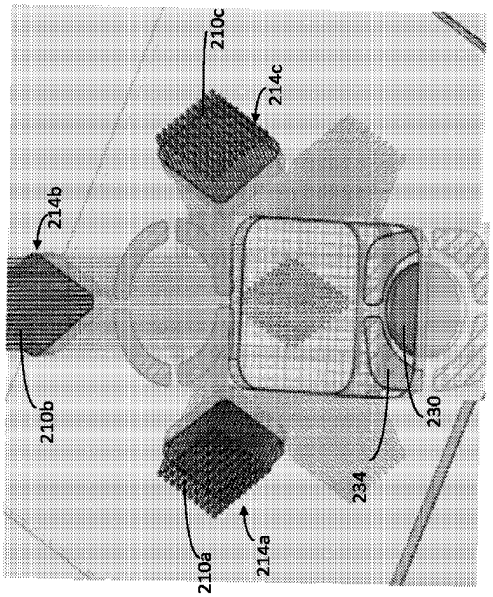


FIG. 11A:

【図１１Ｂ】

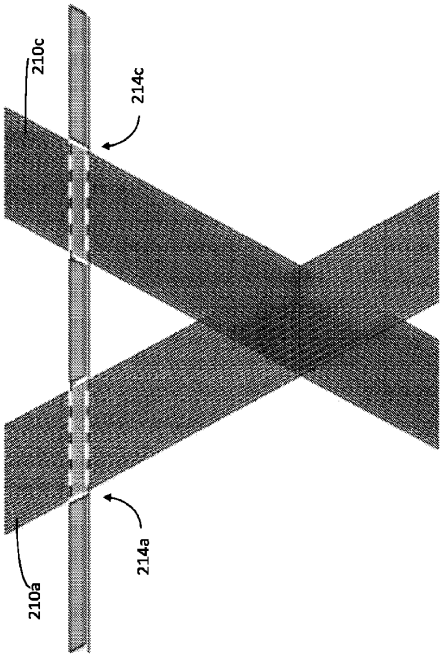


FIG. 11B:

【図１２】

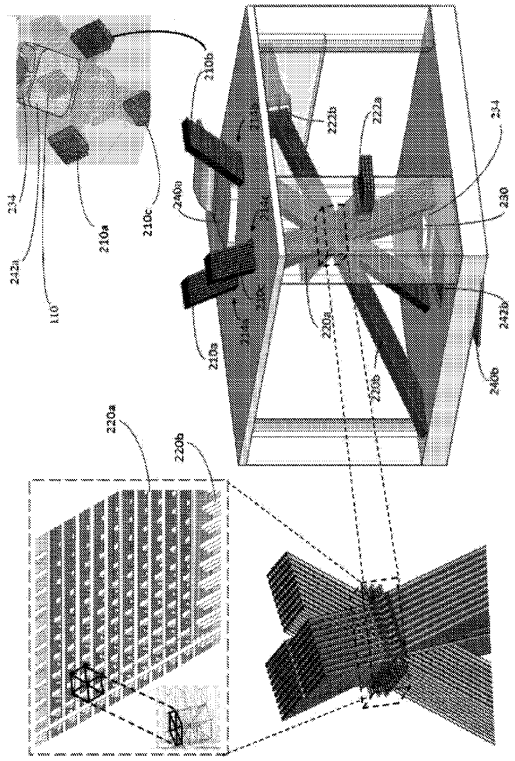


FIG. 12:

【図１３】

FIG. 13:

	2D正方形グリッド				
	＃距離（d）の量子ビット	トータル「C」量子ビット（n）	最近傍量子ビットdミクロン単位で（μ）	次最近傍量子ビットまでの最大d単位μで	CnNOT/ファンアウト形から算出したフィデリティの見積り
	4	4	8.0		≥0.999
	4	8	11.3		≥0.997
	4	12		16.0	≥0.992
$C^{20}NOT$	8	20		17.9	≥0.990
$C^{24}NOT$	4	24		< 22.6	≤0.988

	3Dパイロクロア格子，3層				
	＃距離（d）の量子ビット	トータル「C」量子ビット（n）	最近傍量子ビットdミクロン単位で（μ）	次最近傍量子ビットまでの最大d単位μで	CnNOT/ファンアウト形から算出したフィデリティの見積り
	6	6	8.0		≥0.999
	2	8	8.0		≥0.999
	12	20	11.3		≥0.997
	6	26	13.9		≥0.995
	6	32		16.0	≥0.992
	12	44		16.0	≥0.992
$C^{56}NOT$	12	56		17.9	≥0.990
	12	68		≤ 21.2	≤0.988
$C^{92}NOT$	24	92		≤ 22.7	≤0.988

	3Dパイロクロア格子，5層				
	＃距離（d）の量子ビット	トータル「C」量子ビット（n）	最近傍量子ビットdミクロン単位で（μ）	次最近傍量子ビットまでの最大d単位μで	CnNOT/ファンアウト形から算出したフィデリティの見積り
	6	6	8.0		≥0.999
	2	8	8.0		≥0.999
	12	20	11.3		≥0.997
	6	26	13.9		≥0.995
	6	32		16.0	≥0.992
	14	46		16.0	≥0.992
$C^{70}NOT$	24	70		17.9	≥0.990
	24	94		≤ 21.2	≤0.988
$C^{130}NOT$	36	130		≤ 22.7	≤0.988

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US22/28209

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC - INV. G06N 10/00; G02F 1/33; G06E 3/00; G06N 3/04; G06N 7/00 (2022.01)
ADD. B82Y 10/00; B82Y 20/00; G06N 5/02 (2022.01)
CPC - INV. G06N 10/00; G02F 1/33; G06E 3/00; G06N 3/0472; G06N 7/005
ADD. B82Y 10/00; B82Y 20/00; G06N 5/025
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
See Search History document

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
See Search History document

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
See Search History document

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 10,192,168 B2 (RIGETTI & CO., INC.) 29 January 2019; Entire Document	1-24
A	US 2016/0335560 A1 (GOOGLE INC) 17 November 2016; Entire Document	1-24
A	US 2018/0175241 A1 (JAIN, F) 21 June 2018; Entire Document	1-24

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
12 January 2023 (12.01.2023)	FEB 07 2023
Name and mailing address of the ISA/US Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450 Facsimile No. 571-273-8300	Authorized officer Shane Thomas Telephone No. PCT Helpdesk: 571-272-4300

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2019)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US22/28209

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:
-***-Please See Supplemental Page-***-

1. ☒ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.

2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.

3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.

☒ No protest accompanied the payment of additional search fees.

Form PCT/ISA/210 (continuation of first sheet (2)) (July 2019)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US22/28209

-***-Continued From Box No. III: Observations where unity of invention is lacking-***-

This application contains the following inventions or groups of inventions which are not so linked as to form a single general inventive concept under PCT Rule 13.1. In order for all inventions to be examined, the appropriate additional examination fee must be paid.

Group I: Claims 1-14 are directed towards a system of quibits.
Group II: Claims 15-24 are directed towards a system of quantum gates.

The inventions listed as Groups I-II do not relate to a single general inventive concept under PCT Rule 13.1 because, under PCT Rule 13.2, they lack the same or corresponding special technical features for the following reasons:

The special technical features of Group I include at least at least some of the first plurality of logical qubits configured to interact with one another, at least some of the second plurality of logical qubits configured to interact with one another and to interact with the at least some of the first plurality of logical qubits which are not present in Group II.

The special technical features of Group II include at least forming quantum gates, the quantum gates configured to perform quantum logic operations involving three or more logical qubits natively without reliance on concatenations of one- and two-qubit gates, which are not present in Group I.

The common technical features shared by Groups I and II are a quantum computing system with a first plurality of logical qubits in a first substantially planar region and a second plurality of logical qubits in a second substantially planar region that is substantially parallel to the first substantially planar region.

However, these common features are previously disclosed by US 10,248,491 B1 to RIGETTI & CO., INC. (hereinafter "RIGETTI"). RIGETTI discloses a quantum computing system with a first plurality of logical qubits in a first substantially planar region and a second plurality of logical qubits in a second substantially planar region that is substantially parallel to the first substantially planar region (a quantum computing system 100 includes a three-dimensional lattice of qubits, a lattice comprising two parallel planar regions; col 2, line 40 – col 3, line 6).

Since the common technical features are previously disclosed by the RIGETTI reference, these common features are not special and so Groups I and II lack unity.

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

ヒューストン ジェファーソン アヴェニュー ６０１ シー／オー ケロッグ ブラウン アンド ルート エルエルシー