(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 117616433 A
(43)申请公布日 2024.02.27

(21)申请号 202280047758.3
(22)申请日 2022.05.06
(30)优先权数据
63/186037 2021.05.07 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.01.04
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2022/028209 2022.05.06
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2022/250933 EN 2022.12.01
(71)申请人 KBR威尔服务有限责任公司
地址 美国德克萨斯州
(72)发明人 P·C·亨德里克森 J·D·欧文
(74)专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理有限公司 11280
专利代理师 王博
(51)Int.Cl.
G06N 10/00(2022.01)
B82Y 20/00(2011.01)
B82Y 10/00(2011.01)
G06E 3/00(2006.01)
G02F 1/33(2006.01)

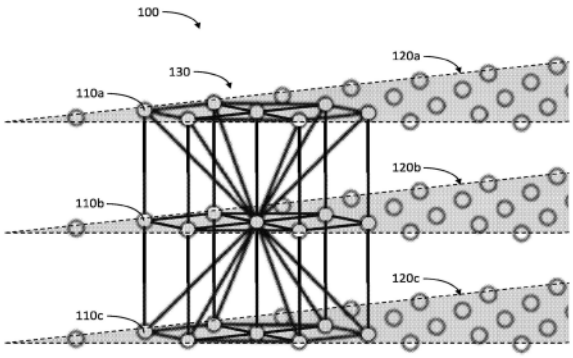
权利要求书3页 说明书22页 附图27页

(54)发明名称

使用多层光学晶格量子比特阵列进行量子计算的系统和方法

(57)摘要

一种量子计算(QC)系统,包括第一基本平坦区域中的第一多个逻辑量子比特和基本平行于第一基本平坦区域的第二基本平坦区域中的第二多个逻辑量子比特。第一多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用,并且第二多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与第一多个逻辑量子比特中的至少一些相互作用。QC系统可以包括基本平行于第一基本平坦区域和第二基本平坦区域的附加的基本平坦区域中的附加的多个逻辑量子比特,并且第二多个逻辑量子比特中的至少一些可以被配置为与附加的多个逻辑量子比特中的一个或多个相互作用。



CN 117616433 A

1.一种量子计算(QC)系统,包括:

第一基本平坦区域中的第一多个逻辑量子比特,所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用;和

基本平行于所述第一基本平坦区域的第二基本平坦区域中的第二多个逻辑量子比特,所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些相互作用。

2.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些和所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此直接相互作用以形成至少一个三维(3D)门单元阵列,所述至少一个三维(3D)门单元阵列被配置为进行其中多于两个逻辑量子比特同时参与的多量子比特门操作。

3.根据权利要求1所述的系统,还包括基本平行于所述第二基本平坦区域的第三基本平坦区域中的第三多个逻辑量子比特,所述第三多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些相互作用。

4.根据权利要求3所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特、第二多个逻辑量子比特和第三多个逻辑量子比特中的逻辑量子比特是单独可寻址的。

5.根据权利要求3所述的系统,还包括基本平行于所述第三基本平坦区域的至少一个附加的基本平坦区域中的至少一个附加的多个逻辑量子比特,所述至少一个附加的多个逻辑量子比特被配置为彼此相互作用和/或与所述第三多个逻辑量子比特中的至少一些相互作用,其中所述至少一个附加的多个逻辑量子比特是单独可寻址的。

6.根据权利要求1所述的系统,还包括限定多个限制区域的多个光束,所述多个限制区域包括布置在基本平坦的第一光学晶格中的第一限制区域和布置在与所述第一光学晶格基本平行的基本平坦的第二光学晶格中的第二限制区域,其中所述第一多个逻辑量子比特位于所述第一光学晶格中并且所述第二多个逻辑量子比特位于所述第二光学晶格中。

7.根据权利要求1所述的系统,其中多个限制区域还包括布置在基本平行于第二光学晶格的基本平坦的第三光学晶格中的第三限制区域,其中第三多个逻辑量子比特位于所述第三光学晶格中。

8.根据权利要求7所述的系统,其中所述多个限制区域还包括布置在基本平行于所述第三光学晶格的至少一个附加光学晶格中的至少一个附加的限制区域,所述至少一个附加光学晶格包括至少一个附加的多个逻辑量子比特。

9.根据权利要求7所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特、第二多个逻辑量子比特和第三多个逻辑量子比特中的逻辑量子比特被配置为多个多量子比特3D门单元,其中所述多个多量子比特3D门单元中的多量子比特3D门单元的每个逻辑量子比特被配置为与所述多量子比特3D门单元的至少一个其它逻辑量子比特量子力学地纠缠。

10.根据权利要求7所述的系统,其中所述第一光学晶格、所述第二光学晶格和所述第三光学晶格中的每一个的所述限制区域被布置成二维图案,所述二维图案是基本上对称的正方形图案、钻石形图案、或菱形图案。

11.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些与所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些完全纠缠。

12.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些和/或

所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些与所述第一多个逻辑量子比特和第二多个逻辑量子比特中的最近邻逻辑量子比特和次最近邻逻辑量子比特完全纠缠。

13.根据权利要求12所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些和/或所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些与所述第一多个逻辑量子比特和第二多个逻辑量子比特中的再次最近邻逻辑量子比特完全纠缠。

14.根据权利要求1所述的系统,其中所述第一多个逻辑量子比特中的至少一些和/或所述第二多个逻辑量子比特中的至少一些包括选自由以下各项组成的组的至少一个物理量子比特:天然存在的原子;中性原子;带电原子;离子;分子;人工形成的原子;里德伯原子;金刚石中的氮空位(NV)中心;玻色-爱因斯坦凝聚体;电子;光子;量子粒子;量子点;声子;反式蛋白;表现得像量子粒子的量子态。

15.一种量子计算(QC)系统,包括多个限制区域,所述多个限制区域被配置为包含在包括多于两个维度的多层量子比特晶格阵列中形成量子门的逻辑量子比特,所述量子门被配置为原生地执行涉及三个或更多个逻辑量子比特的量子逻辑操作,而不依赖于一量子比特门和二量子比特门的级联。

16.根据权利要求15所述的系统,其中所述量子逻辑操作中的至少一些利用原生地作用于一个或多个目标量子比特的两个或更多个控制量子比特。

17.根据权利要求16所述的系统,其中所述量子逻辑操作选自由以下各项组成的组:单控制多非门;扇出门;多重控制非门;托佛利门;超级托佛利门;多重控制相位门。

18.根据权利要求15所述的系统,还包括被配置为执行多量子比特逻辑操作的电气元件和光学元件。

19.根据权利要求15所述的系统,还包括被配置为实现所述多层量子比特晶格阵列中的各个量子比特的低噪声寻址和读出的电迹线、光束配置、检测器和杂散光管理元件。

20.根据权利要求15所述的系统,其中所述多层量子比特晶格阵列包括多个基本平行的平面量子比特晶格阵列。

21.根据权利要求20所述的系统,其中所述多个基本平行的平面量子比特晶格阵列至少包括第一平面量子比特晶格阵列和第二平面量子比特晶格阵列,所述第一平面量子比特晶格阵列的量子比特沿着基本上平行于所述第一平面量子比特晶格阵列的方向从所述第二平面量子比特晶格阵列的量子比特偏移。

22.根据权利要求21所述的系统,还包括至少一个附加的平面量子比特晶格阵列,所述至少一个附加的平面量子比特晶格阵列包括与所述第一平面量子比特晶格阵列的量子比特对准的、与第二阵列的量子比特对准的,或沿着基本上平行于第二平面量子比特晶格阵列的方向具有基本上等于第一平面量子比特晶格阵列和第二平面量子比特晶格阵列之间的偏移的量值的偏移的量子比特。

23.根据权利要求21所述的系统,其中所述第一平面量子比特晶格阵列和所述第二平面量子比特晶格阵列之间的偏移实现多个视角,从所述多个视角单独光学寻址每个逻辑量子比特并且从所述多个视角单独检测每个逻辑量子比特的状态,以便原生地实现多量子比特门操作。

24.根据权利要求21所述的系统,其中与正方晶格配置和立方晶格配置相比,所述第一平面量子比特晶格阵列与所述第二平面量子比特晶格阵列之间的偏移使得在给定相互作

用距离处且在给定体积内更多的量子比特的同时纠缠。

使用多层光学晶格量子比特阵列进行量子计算的系统和方法

技术领域

[0001] 本申请总体上涉及量子计算(QC),并且更具体地涉及采用多于一维的晶格阵列结构的量子计算机架构。

背景技术

[0002] 实现可扩展量子计算的技术路径是多种多样的。根据每种方法所采用的物理量子比特(也称为“量子比特”)的类型,所展示的各种品质因数的表现差异很大。二十多年来,基于捕获原子离子或超导量子比特的方法一直引领该领域。捕获里德伯原子方法的最新进展增加了其在该领域的可行性和重要性。

发明内容

[0003] 本文公开的某些实施方式提供了一种采用多于一维的晶格阵列结构来实现和互连量子门的量子计算机架构,其中多于两个逻辑量子比特(例如,每个逻辑量子比特包括一个或多个物理量子比特)可以同时纠缠。本文公开的某些实施方式提供了用于量子处理芯片的量子微处理器配置和门阵列设计平台,类似于可以有利地提供一定程度的可重构性的现场可编程门阵列(FPGA)。本文公开的某些实施方式提供了用于量子处理芯片或板(例如,电气和/或光学线路;集成光学晶格)的量子微处理器配置和门阵列设计平台,类似于专用集成电路(ASIC),其可以有利地针对特定应用进行优化,并可以有利地提供定制设计的灵活性。

[0004] 本文公开的某些实施方式提供了一种量子计算(QC)系统,该系统包括基本上布置在基本上彼此平行的多个基本平坦区域(例如,平面;层)中的多个量子比特,基本平坦区域中的至少一些包括两个或更多个量子比特,并且每个基本平坦区域的一个或多个量子比特被配置为与至少一个相邻基本平坦区域的一个或多个量子比特相互作用。例如,QC系统可以包括多个2D晶格层(例如,原子的、光子的),晶格层基本上彼此平行,并且QC系统可以包括多量子比特门阵列,该多量子比特门阵列包括多个量子比特,所述多个量子比特被布置为位于跨越多个晶格层的区域中的多个多量子比特门。多量子比特门阵列可以包括晶格,所述晶格被配置为包含和/或选择性地寻址中性(例如,不带电)原子、里德伯原子、和/或限制在多层晶格阵列中的其它量子比特,例如氮空位或NV中心(例如,由金刚石或其它晶体制成)、捕获的玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC)的阵列以及其它。在某些此类示例中,这些基本平行的晶格阵列层可以基本上布置在多个基本平坦区域(例如,平面、级)中,其中至少一个基本平坦区域的至少一些量子比特被配置为与至少一个其它(例如,相邻的)基本平坦区域的至少一些量子比特相互作用(例如,量子力学地纠缠)。

[0005] 本文公开的某些实施方式包括晶格配置,该晶格配置包括布置为三维(3D)晶格结构的阵列(例如,以形成门)的多个完全连接的量子比特,其中通过以几何布局排列的量子比特来实现同时多量子比特门操作。本文公开的某些实施方式解决了构建最佳高效量子计算机的一组常见关键挑战。这些挑战中的重点是如何设计可实现的量子比特几何结构,其

中最大数量的最近邻、次最近邻、再次最近邻等量子比特可以同时纠缠以原生地实现可达多量子比特量子门操作,或几何地在单个门内操作(例如,参见2021年5月7日提交的美国临时申请No.63/186,037;2020年11月5日提交的美国专利申请No.17/090,747;2019年11月8日提交的美国临时申请No.62/933,148,每一申请的全部内容均通过引用并入本文)。

[0006] 在某些实施方式中,量子计算(QC)系统包括第一基本平坦区域中的第一多个逻辑量子比特和基本平行于第一基本平坦区域的第二基本平坦区域中的第二多个逻辑量子比特。第一多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用,并且第二多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与第一多个逻辑量子比特中的至少一些相互作用。在某些实施方式中,QC系统包括基本平行于第一基本平坦区域和第二基本平坦区域的附加的基本平坦区域中的附加的多个逻辑量子比特,并且第二多个逻辑量子比特中的至少一些被配置为与附加的多个逻辑量子比特中的一个或多个相互作用。

[0007] 在某些实施方式中,量子计算(QC)系统包括多个限制区域,所述多个限制区域被配置为包含在包括多于两个维度的多层量子比特晶格阵列中形成量子门的逻辑量子比特。量子门被配置为原生地执行涉及三个或更多个逻辑量子比特的量子逻辑操作,而不依赖于一量子比特门和二量子比特门的级联。

附图说明

[0008] 并入本文并构成本说明书的一部分的附图示出了本文描述的一个或多个实施方式,并且与说明书一起解释了这些实施方式。

[0009] 图1示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的示例量子计算(QC)系统的透视图,该系统包括基本平坦区域中的逻辑量子比特。

[0010] 图2A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的示例系统的透视图,该系统包括基本上彼此平行的三个基本平坦区域中的36个逻辑量子比特。

[0011] 图2B示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的另一示例系统的透视图,该系统包括基本上彼此平行的三个基本平坦区域中的60个逻辑量子比特。

[0012] 图3A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的布置在基本上彼此平行的三个基本平坦区域中的多个逻辑量子比特(例如,与图2A和图2B的示例系统兼容)的透视图。

[0013] 图3B和图3C各自示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的布置在基本上彼此平行的五个基本平坦区域中的多个逻辑量子比特的透视图。

[0014] 图4A和图4B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域的示例系统的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特。

[0015] 图5A和图5B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域的另一示例系统的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特。

[0016] 图5C示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图5B的透视图。

[0017] 图6A和图6B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域的又一示例系统的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应

的多个逻辑量子比特。

[0018] 图6C示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图6B的透视图。

[0019] 图6D和图6E分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域的又一示例系统的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特。

[0020] 图6F示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图6E的透视图。

[0021] 图7A-7E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的在多个2D平面光阱区域之间形成并具有多个寻址激光光束的示例性多量子比特门单元(例如,具有烧绿石配置中的21个量子比特的C^{20}NOT门单元或$C^{20}\varphi$门单元,其中目标量子比特在中心并且控制量子比特在别处)的各种视图。

[0022] 图8A-8E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的捕获激光光束的各种视图。

[0023] 图9A-9B示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的由捕获激光光束的相交阵列创建的三层10×10原子阱晶格的透视图。

[0024] 图9C示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的图9A-9B的结构的俯视图。

[0025] 图10A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的部分组装的QC系统的透视图,该QC系统包括具有三组寻址激光光束和捕获激光光束的两个相交阵列的三层10×10原子晶格。

[0026] 图10B-10D示出了根据本文描述的某些实施方式的图10A的三组寻址激光光束和捕获激光光束的两个相交阵列的不同方向的其它视图。

[0027] 图10E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的另一个部分组装的QC系统的透视图,该QC系统包括具有四组寻址激光光束和捕获激光光束的两个相交阵列的三层10×10原子晶格。

[0028] 图10F-10H示出了根据本文描述的某些实施方式的图10E的四组寻址激光光束和捕获激光光束的两个相交阵列的不同方向的其它视图。

[0029] 图11A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的通过第一光学检测器端口242a观察到的图9A-9C和图10A-10D的三层10×10三维原子晶格的视图。

[0030] 图11B示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的图11A的结构的侧剖视图。

[0031] 图12示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的对应于图8E、9A、10A和11A的示例性组装的QC系统的透视图。

[0032] 图13示出了根据本文描述的某些实施方式的三个表,所述表对各种多层量子比特晶格阵列在给定门保真度下可以同时纠缠的量子比特总数进行比较。

具体实施方式

[0033] 概述

[0034] 本文公开的某些实施方式包括晶格配置,该晶格配置包括布置为三维(3D)晶格结构(例如,单元)的阵列的多个完全连接的量子比特,其中通过以几何布局排列的量子比特来实现同时多量子比特门操作。本文公开的某些实施方式有利地增加了晶格层的数量并且增加了可以同时纠缠的量子比特的数量,超过了使用当前的里德伯原子的正方光子晶格目

前可达到的极限(例如,具有可接受的门保真度),并且可能超过离子的六边形多层表面阱几何结构中可实现的量子比特密度。

[0035] 本文公开的某些实施方式解决了构建最佳高效量子计算机的挑战。其中一个挑战是如何设计可实现的量子比特几何结构,其中最大数量的最近邻、次最近邻、再次最近邻等量子比特可以同时纠缠以原生地提供多量子比特量子门操作(例如,几何地在单个门操作内)。这项设计挑战由两个同等的部分组成。其中一部分是如何将量子比特限制(例如,捕获;设计其晶体晶格位点位置)在最佳纠缠几何结构中。这种限制通常需要设计多个激光器的复杂相交点以及晶体、电极和/或磁场中缺陷位点的精确周期性定位。设计挑战的另一部分是如何尽可能有选择性地(例如,单独地)寻址(例如,照明;激发;操纵)和读出(例如,检测;成像)量子比特。这一寻址可以超越在尽可能多的量子比特之间同时创建纠缠,其通常可以通过全局寻址来完成。相反,开发多个纠缠量子比特的全部计算能力还可以包括操纵和读出所需多量子比特门操作的各个量子比特状态,这利用了根据需要单独寻址每个量子比特的能力。这种能力至关重要,因为每个量子计算门的固有计算能力与同时纠缠的量子比特的量子比特数量呈指数关系(例如,与2的幂成正比),这些量子比特可以作为逻辑量子比特完全参与每个门操作。此外,还需要考虑开销(例如,纠错量子比特、冗余量子比特、辅助量子比特),随着量子计算架构的规模增加到使用表面代码来纠正大量量子比特的错误的尺度,开销会急剧增长(例如,按数量级)。因此,预先在门单元中使更多单独可寻址的(例如,逻辑)量子比特同时纠缠的总体优势甚至可以通过进一步大大减少或排除表面代码纠错所带来的几个数量级的额外开销的使用而大大超过上述初始指数加速。

[0036] 本文公开的某些实施方式可以被配置为多个二维(2D)(例如,平面)量子比特阵列(例如,层),其基本上彼此平行并且形成三维(3D)单元的阵列。单元的阵列可以类比或称为3D晶体结构。虽然本文将各种实施方式描述为利用光学晶格结构中的捕获中性(例如,不带电)原子量子比特或里德伯原子量子比特(例如,参见I.Bloch,“Quantum coherence and entanglement with ultracold atoms in optical lattices,”Nature 453,1016(2008))来说明要利用(例如,优化)的量子相互作用的性质,其它实施方式可以在晶格结构中使用一种或多种替代量子比特技术(例如,在自然晶体晶格中捕获的量子比特;人工形成的晶体结构),这些技术在结构和功能上都是等效的(例如,可以形成类似烧绿石的结构的扩展,其能使得最大数量的最近邻、次最近邻、再次最近邻等量子比特同时纠缠,以在单门个内提供之前通过数百或数千个一量子比特量子门操作和二量子比特量子门操作的级联所提供的功能。

[0037] 晶体中原子空位中心(例如,氮空位中心,下文简称为金刚石中的“NV中心”)的一种示例性替代技术最近也在保真度、相干时间、多达10个量子比特之间的完全连接性和最多7个量子比特的多部分纠缠态方面取得了进展(例如,C.E.Bradley et al.,“A 10-qubit solid-state spin register with quantum memory up to one minute,”Phys.Rev.X 9,031045(2019))。NV中心所表现出的这些特性以及类原子特性使它们成为量子比特技术的又一示例,其能够被直接应用到本文描述的某些实施方式,例如形成3D晶格的问题的基本上等效的解决方案,这些解决方案能够实现最大数量的量子比特的同时纠缠和用于在多层光学晶格中单独寻址(例如,初始化,执行门操作,以及读出其值)量子比特的最佳几何访问。还有其它实施方式可以使用其它替代量子比特技术,例如捕获的玻色-爱因斯坦凝聚体

(BEC);中性分子;声子;光子;以及其它。

[0038] 本文描述的量子计算(QC)系统的某些实施方式有利地提供了多层架构,以使得最佳数量的量子比特能够在最近邻、次最近邻和再次最近邻以及可能的更远处之间同时纠缠。某些实施方式包括被配置为实现设计可扩展量子处理器所需的电、磁和光寻址、控制、检测和读出的最佳组合的几何结构。与纠缠门操作由于所使用的量子比特类型或其布局而限于特定对的设计相比,完全连接的量子比特阵列为在硬件中执行量子算法提供了更高效、更灵活的选择。这种效率和灵活性的提高随着阵列中量子比特数量的增加而迅速增长。与限于一量子比特门和二量子比特门的设计相比,增加一次执行涉及多于两个量子比特的门操作的能力可以显著加快效率增益,其中可以将数十个量子比特门替换为一个四量子比特门。本文描述的某些实施方式使用多个量子比特阵列(例如,多个直接连接的平面晶格)来有利地避免一维和二维几何配置的问题(例如,对连接性的限制;当仅限于二维时,控制日益密集的门阵列中的每个量子比特所需的组件的拥挤)。在某些实施方式中,形成类似于晶体例如烧绿石的量子比特的多维单元。在某些实施方式中,量子比特的多维单元是可重构的并且可以形成各种晶体结构,根据该晶体结构,对于选定的门操作,最近邻、次最近邻量子比特(例如,在单元内;跨单元;跨层)和更远处的量子比特同时纠缠。利用许多量子比特参与每个门还可以降低对线路深度、纠错和干扰抑制的要求。可重构组件单元可以实现量子FPGA(QFPGA)和ASIC(QASIC)布局(例如芯片)。

[0039] 本文描述的QC系统的某些实施方式包括多层配置,该多层配置包括布置为三维(3D)晶格结构(例如,单元)的阵列的多个完全连接的量子比特,其中通过以几何布局排列的量子比特来实现同时多量子比特门操作。例如,层(例如,行和列;晶格)中的多个平面量子比特阵列可以基本上彼此平行,并且可形成可以类比或称为晶体结构的3D单元阵列。在某些实施方式中,量子比特可以被局域化(例如,捕获;悬浮;限制)在多个量子比特晶格遏制区(例如,平行中性原子阱阵列;NV中心)内,以直接在跨多个基本平坦的阵列区域(例如,层;级;平面)的最近邻量子比特、次最近邻量子比特等之间实现最佳相干连接性(例如,纠缠),而无需导致原位处理量子比特到其他种类或数据比特的有损转换或显著的时间延迟的低效的光子或其它互连(例如,量子隐形传态)。某些此类实施方式利用几何对称的蜂窝结构,该结构提供了一次执行涉及多于两个量子比特的门操作的能力,与限于一量子比特门和二量子比特门的设计相比,这可以显著加速效率增益。某些其它实施方式可以被配置为基本上彼此平行的多个二维(2D)量子比特晶格阵列(例如,平面晶格;网格;行和列),以使得能够在多个2D层之间形成3D结构。

[0040] 虽然本文根据中性原子(例如,不带电原子、里德伯原子)量子比特方法的物理学描述了各种实施方式,但不失一般性,也可以根据使用本文描述的某些实施方式使用其它量子比特方法(例如,NV中心;超导量子比特;本文引用的其它方法)。

[0041] 本文描述的QC系统的某些实施方式包括多个多量子比特三维(3D)门单元,每个单元包括可以跨三个维度同时完全连接的至少三个量子比特,以及配置用于两个或更多个多量子比特门的门操作的多个多量子比特单元。某些此类实施方式的QC系统可以包括多个基本平行的量子比特遏制晶格,例如平行的中性原子阱阵列,其能够直接在跨多个阵列层、级或平面的最近邻量子比特、次最近邻量子比特等之间实现最佳相干连接或纠缠,而无需到光子量子比特或从光子量子比特的转换或其它低效互连(例如,造成显著损耗和/或时间延

迟的互连)。可以使用几何对称性来配置多量子比特单元,以使得多量子比特门能够在一个门操作中原生地实现,而不依赖于多个一量子比特门和二量子比特门的级联。利用单元中多个量子比特之间的等边耦合距离的对称性,可以一次使多于两个纠缠量子比特执行门操作,否则将需要更多仅包含一量子比特门和二量子比特门的量子比特门操作。

[0042] 本文公开的某些其它实施方式提供了一种QC系统,其包括基本上布置在基本上彼此平行的多个2D阵列层(例如,2D晶格;平面;网格)中的多个量子比特,2D阵列层中的至少一些包括两个或更多个量子比特,并且每个阵列层的一个或多个量子比特被配置为与至少一个相邻2D阵列层的一个或多个量子比特相互作用。QC系统可以包括基本上彼此平行的多个原子阱层(例如,2D光学晶格阱),并且QC系统可以进一步包括多量子比特3D门阵列,该阵列包括布置为位于阱层之间和/或内部的区域中的多个多量子比特门的多个量子比特。例如,多量子比特门阵列的量子比特可以包括2D阱阵列,该阵列被配置为包含原子量子比特,所述原子量子比特包括中性原子(例如,不带电原子、里德伯态)、NV中心或其它量子比特种类。对于里德伯原子、NV中心和其它原子量子比特种类的示例,量子比特被限制在晶格中(例如,被捕获在势阱中;在原子空位中心中),其可以由光束(例如,激光)晶格创建,且可以基本上布置在多个基本平行的阱阵列层(例如,晶格、级、平面)中,其中至少一个2D阱阵列层的至少一些量子比特被配置为与至少一个其它(例如,相邻的)基本平行的阱阵列层的至少一些量子比特直接相互作用(例如,量子力学地纠缠)。

[0043] 在本文描述的QC系统的每个实施方式中,每个单元的多个量子比特的对称或等边耦合几何形状可以使得能够在单个门操作中执行更复杂的量子门,并且可以额外地降低对线路深度、纠错和干扰抑制的要求。可互换的组件单元可以实现量子FPGA(QFPGA)和ASIC(QASIC)布局(例如芯片),并且可以是高度可重构的。

[0044] 本文描述的QC系统的某些实施方式有利地提供了量子比特和/或量子比特门的三维(3D)布局,其有利于比使用一维(1D)布局或二维(2D)布局提供的量子比特和/或量子比特门更多的量子比特和/或量子比特门用于计算(例如,J.I.Cirac and P.Zoller,"A scalable quantum computer with ions in an array of microtraps,"Nature,Vol.404,p.579(2000);J.Chiaverini et al.,Quant.Inf.Comp.Vol.5,419(2005))。例如,本文描述的某些实施方式提供了量子比特门的3D布局,每个量子比特门包括多个原子量子比特(例如,三个或更多个同时纠缠的中性原子、带电原子、NV中心量子比特等),同时提供足够的间距以促进用于每个量子比特的寻址、操纵、控制、读出和潜在边带冷却以及提供视线访问角度的电连接和光学路径。

[0045] 当量子比特的特定排列或集合允许任何量子比特与该集合中的任何其它量子比特直接量子力学地纠缠时,量子比特可以被描述为"完全连接"。例如,即使是包括在一维(1D)线性原子阱中完全连接的离子(例如,带电原子)的少量量子比特也在某种程度上可以表现出比相同数量的仅成对连接的量子比特更大的潜在处理能力。(例如,参见N.M.Linke et al.,"Experimental comparison of two quantum computing architectures",PNAS,Vol.114,no.13(2017))。

[0046] 过去二十年演示的量子计算(QC)设计表明,最影响量子计算机超越其经典计算机的速度的参数并不简单地基于有多少量子比特以某种方式连接在一起。此类系统所展示的性能取决于量子比特保真度(例如,系统可执行门操作的精确程度)、量子比特如何互连,以

及允许量子比特协同工作以计算难题的解决方案使用多少开销。

[0047] 一量子比特门仅需要将量子比特本身从“0”翻转到“1”或者翻转到“0”和“1”的特殊量子叠加。二量子比特门使用与量子纠缠相结合的叠加方式连接两个量子比特,这样对其中一个量子比特所做的任何操作都会影响另一个量子比特。在这样的二量子比特门中,目标量子比特可以从状态“0”或状态“1”开始,并且可以处于“0”和“1”的任意叠加(例如,“0”和“1”的中间))。例如,量子受控非(CNOT)门的功能是,如果控制量子比特处于状态“1”,则翻转目标量子比特;否则不进行任何操作。一量子比特门或二量子比特门可以直接在许多不同的基于量子门的架构中实现。对于更复杂的门操作,可以使多于两个量子比特同时纠缠的实施方式可能会对量子比特总数和为实现操作而执行的步骤以及包括它们的算法产生重大影响(例如,参见C.Figgatt et al.,“Parallel entangling operations on a universal ion-trap quantum computer,”Nature,Vol.571(2019);Y.Lu et al.,“Global entangling gates on arbitrary qubits,”Nature,Vol.571(2019))。在某些情况下,预先使用的量子比特和步骤数量的显著减少可以使得实现成功结果的开销大幅减少。一个示例是可以为其它棘手的问题提供解决方案而无需进行大量的纠错并且只需很少的辅助量子比特甚至是部分时间的原型演示。

[0048] 本文描述的某些实施方式使用多个完全连接的高保真度量子比特。此类某些实施方式的优点(例如,与使用一量子比特门和二量子比特门的组合相比,特定量子门操作的效率可以提高多少)可以通过考虑量子三重控制非(C^3NOT)门来说明,所述量子三重控制非门由四个完全连接的高保真量子比特组成。C^3NOT门也称为超级托佛利(Toffoli)门。在此示例C^3NOT门中,三个控制量子比特必须全部处于指定状态(例如“1,1,1”),以便将第四个目标量子比特从“1”翻转为0”。当与一个或多个单量子比特门操作结合时,这些多量子比特量子门可用于完成量子计算的通用集合。多重控制非门在参考资料中通常被描述为包括一量子比特门操作和二量子比特门操作的扩展序列(例如,参见M.A.Nielsen and I.L.Chuang,“Quantum Computing and Quantum Information,”1st ed.(Cambridge Univ.Press,2000))。这些一量子比特门和二量子比特门的序列在物理实施方式中增加的程度甚至更多,该程度取决于所使用的量子比特的类型以及有多少量子比特可以完全连接并相互纠缠。然而,在适当的物理布局中,同时使用四个完全连接的多重纠缠离子实现的C^3NOT门可以使用仅用一量子比特门和二量子比特门实现的C^3NOT门中使用的量子门操作数量的一小部分来配置。首先使用捕获的离子描述了实现更简单的C^2NOT托佛利门的方法(例如,参见J.I.Cirac and P.Zoller,“Quantum Computations with Cold Trapped Ions,”Phys.Rev.Lett.Vol.74(20)(1995))以及随后的演示(例如,参见T.Monz et al.,“Realization of the Quantum Toffoli gate with Trapped Ions,”Phys.Rev.Lett.Vol.102,040501(2009))。三量子比特C^2NOT实施方式已经显著减少了贡献门的数量和完成完整门操作所需的时间,同时相比于一量子比特门和二量子比特门的级联提高了净保真度,即使是一量子比特门和二量子比特门由于聚合的门的错误而具有高得多的个体保真度。这种三量子比特门可以在线性阱中实现,而无需对几何对称性的强的需求。相反,本文描述的某些实施方式通过利用本文描述的设计的完全3D对称性来提供C^nNOT门。这样,通过同时减少实现控制所需的量子门,可以根据每个C^nNOT门中的控制数量大大增加上面提到的效率改进示例。其它多重控制的门操作,包括相位旋转,可以使用同时涉及多于

两个纠缠量子比特的物理配置来表现出类似的效率改进。这些预先的改进可以大大减少纠错。

[0049] 即使是最高质量的量子比特也表现出明显的错误率,该错误率在每个量子比特的基础上可能很小,但会由于用于运行算法的门的数量而增多。当总错误率达到阈值时,其中有合理的机会给出可靠的结果的即使一小部分量子操作也需要执行纠错,架构的效率会立即与用于纠错的开销成比例地下降。

[0050] 对于具有数百个欲用于执行逻辑操作的相对高质量量子比特的小规模量子计算机,纠错量子比特加上辅助量子比特的开销可以代表量子比特数量增加一个数量级或大致十倍,同时效率相应下降。对于更大规模的系统,开销可能会进一步增加到多个数量级。然而,在本文描述的某些实施方式中,受益于完全连接的高质量量子比特的聚合效率并采用多量子比特门操作(例如,通过利用多维几何结构原生地执行)的量子计算机可以使用显著更少的步骤以及显著更少的量子比特总数。如本文所使用的,术语“原生”门操作表示多于两个量子比特可以凭借几何布局同时参与。本文描述的某些原生多量子比特门实施方式可以有利地执行算法而不使用大量的纠错开销。此外,由于开销减少,使用少了多个数量级的量子资源可以实现整体设计效率的显著提高,既可以执行基本的量子计算算法或子例程,又可以与经典计算系统相比以更高的速度显示实用性。

[0051] 迄今为止,大多数使用原子量子比特的QC系统都采用一维(例如,线性)阱,然后它们可以电气地或光子地互连(例如,参见美国专利No.9,858,531;Debnath et al.,“Demonstration of a small programmable quantumcomputer with atomic qubits,”Nature,Vol.536,p.63(2016))。大多数此类1D阱能够使量子比特的线性链在公共势阱或捕获区内完全连接。完全连接的程度受到在线性链的相对端点处或附近的量子比特之间的耦合强度太弱而无法用于可靠的多量子比特门操作之前可以链接在一起的量子比特数量的限制,因此可能需要在有限长度的多个线性阱之间创建互连。例如,光学互连可以通过以下方式被采用:将量子比特态从原子量子比特转移到光子,然后将光子发送到另一个线性阱,在另一个线性阱中量子态被转移到另一个原子。常用于此过程的一种协议称为“量子隐形传态”。这种互连会导致转换(例如,从原子量子比特到光子,再到第二原子)的时间延迟和潜在的低效率。本文描述的某些实施方式有利地提供替代配置,以同时优化比使用具有光学互连的线性或2D元件可以有效完成的更直接的量子比特与量子比特的相互作用。当扩大到更大数量的量子比特时,某些此类实施方式可以有利地减少或避免节点之间的光学互连的数量及其相关的损失(例如,时间延迟;离子-光子转换损失)。

[0052] 矩形二维(2D)网格配置先前已被用于一些捕获离子方法和超导量子比特(SCQ)方案。在这些2D网格方法中,量子比特之间的相互作用通常限于发生在捕获的离子的网格通道内的一量子比特操作和二量子比特操作(例如,使量子比特通过相交点在通道中来回穿梭),并且通常依靠大量冗余来增加容错程度,从而将算法运行成功的概率提高到可用水平。例如,一些方法使用量子比特集合的全局寻址,这些量子比特在网格中的对准的相交点中来回穿梭,以便在许多量子比特之间冗余地实现一量子比特操作或二量子比特操作,然后进行平均以减少错误。就用于以足够的保真度实现单个逻辑操作的冗余量子比特的数量而言,这种方法的开销随着量子计算机要执行的逻辑操作的规模而快速增长。相反,在本文描述的某些实施方式中,通过使量子比特布置在两个或更多个维度中来实现多于两个量子

比特之间的纠缠,以同时被涉及,并直接或原生地实现多量子比特门操作。

[0053] 已经提出和/或采用的其它2D晶格方法包括使用中性原子,最初应用里德伯封锁方法(例如,参见M.Saffman et al.,"Quantuminformation with Rydberg atoms," Rev.Mod.Phys.82,2313(2010);K.Maller et al.,"Rydberg-blockade controlled-not gate and entanglement in a two-dimensional array of neutral-atom qubits," Phys.Rev.A92,022336(2015))。早期里德伯封锁方法的保真度对于形成用于计算的量子门来说并不具有竞争力,但是这些里德伯封锁方法后来被纠缠里德伯原子的改进方法所超越(例如,参见D.Petrosyan et al.,"High-fidelity Rydberg quantum gate via a two-atom dark state,"Phys.Rev.A 96,042306(2017);M.Khazali and K.Molmer,"Fast Multiqubit Gates by Adiabatic Evolution in Interacting Excited-State Manifolds of Rydberg Atoms and Superconducting Circuits,"Phys.Rev.X 10,021054 (2020))。

[0054] 为了将本文描述的某些实施方式与其中描述性术语和视觉布局可能看起来相似的其它方法区分开,应当注意,2D周期性晶体结构的整体布局(例如规则几何晶格阱)的形成方式可用于研究多体相互作用的物理原理,但不适用于在多个量子比特之间实现门操作。例如,三角形离子阱(例如,潘宁阱)可以形成为周期性电势阱的表面,离子可以放置在其中以形成可用于某些类型的量子模拟器的扩展的2D晶体或三角形晶格。这些阱可用于形成模拟要建模的量子系统的能量拓扑(例如,找到给定分子的最低电子能量配置)。类似地,四面体、六边形的Kitaev模型(例如,参见A.Kitaev,"Anyons in an exactly solved model and beyond,"Ann.Phys.Vol.321,2(2006);R.Schmied et al."Quantum simulation of the hexagonal Kitaev model with trapped ions,"New J.Phys.13 115011(2011))、混合晶格、kagome光学晶格(例如,参见R.Samajdar,"Quantum phases of Rydberg atoms on akagome lattice,"Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.118,e2015785118 (2021))和其它规则晶格结构可能相似,但其设计复杂性和目的与本文描述的某些实施方式根本不同。例如,虽然这种晶格结构是为了模拟量子系统而设计的,但这种结构通常并不旨在执行门操作。具体地,根据本文描述的某些实施方式的具有离子(例如,遵循Kitaev模型)或中性原子(例如,在光学kagome晶格中)的2D六边形晶格的量子模拟器,与能够进行量子门操作的"完整"量子计算机的此类结构的复杂性和数量相比,通常可以使用更简单的使用更少的激光器(例如,全局寻址而不是单独寻址激光器)的量子比特控制、寻址和读出方案、更简单的检测方案、更少的电极结构等。

[0055] 本文描述的某些实施方式有利地促进了对硬件挑战的解决方案,这些硬件挑战在设计从2D捕获原子晶格按比例放大的门模型QC结构时可能快速增长并且显得令人生畏或不可行。例如,本文描述的某些实施方式将光学元件(例如,激光器;光学端口;光纤;检测器)集成到QC结构中,用于每个量子比特的寻址、操纵、读出和潜在的边带捕获和/或冷却,并提供视线访问角度。

[0056] 本文描述的某些实施方式有利地提供了可扩展的硬件配置,在该硬件配置上可以通过实现最佳数量的相邻量子比特之间的同时纠缠来直接"写入"并运行复杂的量子算法。在某些实施方式中,多维量子门实施方式类似于诸如现场可编程门阵列(FPGA)的传统固件,可以直接以多量子比特门的形式写入并灵活地重新编程。

[0057] 本文描述的某些实施方式有利地使得多重控制的量子门操作能够通过利用多维几何结构来原生地运行。在某些实施方式中,量子门操作以最少数量的步骤在量子固件平台上运行(例如,不依靠一量子比特门操作和二量子比特门操作的级联来实现多重控制的NOT操作)。

[0058] 本文描述的某些实施方式有利地提供了可实现的设计配置,该配置使得量子固件平台能够根据需要通过集成电气和光学访问来按比例放大,以用于线路模型架构中的每个量子比特的完全控制和读出,以实现通用量子计算。

[0059] 本文描述的某些实施方式有利地提供多层量子计算结构,该结构被配置为使得最佳数量的量子比特能够在最近邻、次最近邻、再次最近邻等之间以及更远处同时纠缠。某些此类实施方式包括用于可扩展量子处理器中的量子比特的寻址、控制和读出的电气通道和光学访问。例如,与纠缠门操作限于特定对(例如,由于所采用的量子比特的类型或其布局)的其它设计相比,完全连接的量子比特阵列有利地为在硬件中执行量子算法提供了更有效、更灵活的选择。这种效率和灵活性的提高可以随着阵列中量子比特数量的增加而快速增长。

[0060] 本文描述的某些实施方式有利地能够执行一次涉及多于两个量子比特的门操作,从而相对于限于一量子比特门和二量子比特门的先前设计提供效率的显著改进(例如,通过将数十个量子比特门替换为一个四量子比特门)。本文描述的某些实施方式有利地克服了一维量子比特几何结构和二维量子比特几何结构(例如,线性捕获的离子;捕获在2D网格中的离子、2D金刚石晶格中的NV中心;其它1D和2D量子比特晶格)中发现的连接性限制。例如,将量子比特排列成多个量子比特阵列(例如,多个平面和/或线性量子比特阵列)并且在量子比特阵列之间具有直接连接(例如,纠缠)可以解决从离子量子比特转换到光子量子比特并再次转换回来以继续从1D链或2D网格中的数十个原子按比例放大的显著时间延迟和低效率的问题。

[0061] 本文描述的某些实施方式有利地提供了类似于复杂3D晶体结构(例如,烧绿石)的多维纠缠几何结构。此外,设计在某些实施方式中的特定的、无障碍的视线有利地提供来自多个角度的光学访问,用于单独且唯一地寻址每个原子量子比特以及全局地寻址量子比特的集合。某些实施方式有利地提供多个光学访问以用于通过检测器读出各个原子量子比特状态。

[0062] 本文描述的某些实施方式有利地利用中性原子量子比特(例如,其中外部电子被提升到高激发态的不带电的里德伯原子)来形成多层量子比特晶格阵列,这既证明了该系统和方法对替代量子比特类型的适用性,又有助于进一步说明处理潜力。最近改进的里德伯原子纠缠技术使它们越来越适用于量子计算(例如,参见M.Khazali and K.Molmer (2020);D.Petrosyan et al.(2017))。由于改进的技术,里德伯原子也非常适合用作本文描述的系统和方法的另一个示例量子比特。用于形成里德伯量子比特晶格的技术可以包括使相干光束(例如,激光)交叉以及与光学边带产生电磁场相互作用,以在相交光束内(例如,在由红边带形成的势阱中)或者在光束之间的空间(例如,单元)内(例如,在由蓝边带形成的势阱中)形成能量势阱,从而捕获各个中性原子量子比特,其类似于使用电势来捕获离子量子比特,具有许多与捕获离子晶格阵列相同的优点以及一些特定的优点。例如,虽然里德伯量子比特尚未展示与捕获离子相关的最高量子比特门保真度和最长寿命,但里德伯原

子可以被配置为六边形晶格层,以创建与使用离子量子比特作为主要示例的美国专利申请公开No.2021/0142204A1中所描述的晶体几何结构等效和/或延续的晶体几何结构(例如,烧绿石结构)。根据本文描述的某些实施方式,用于捕获里德伯原子的光子晶格结构可以实现非常接近的量子比特间距和附加阵列层。

[0063] 本文描述的某些实施方式有利地利用与美国专利申请公开No.2021/0142204A1中描述的晶格结构等效的多层晶格结构的量子比特阵列中的里德伯原子(例如,主要使用带电原子的量子比特示例),可以增加晶格层的数量,并增加可以同时纠缠的量子比特的数量以超过使用当前的里德伯原子的基于方形的光子晶格当前可实现的极限(例如,具有可接受的门保真度),并且可以超过在本文描述的离子的六边形多层表面阱几何结构中可实现的量子比特密度。最近在小规模线性和/或方形阵列中捕获中性里德伯原子的实验数据表明,20个量子比特可以以足以进行可扩展的容错量子计算的多量子比特门保真度在2D方形晶格中同时纠缠(例如,参见M.Khazali and K.Molmer(2020))。

[0064] 通过将相干光子(例如,激光)束的多轴阵列集成到3D光阱晶格中并调整3D晶格单元形状和间距来优化多个方向上跨最大数量单元的量子比特之间的纠缠操作的数量和保真度,本文描述的某些实施方式有利地提供了与带电原子量子比特(例如,离子)的几何结构等效并且类似于复杂性和处理能力等效(在某些情况下增加)的3D晶体结构(例如烧绿石)的多维纠缠几何结构。例如,本文描述的某些实施方式利用在光子多层量子比特晶格阵列中的里德伯原子,其有利地使得量子比特间的间距最小化(例如,在光子阱晶格中小于10微米)。本文描述的某些实施方式结合了与本文针对离子描述的阵列等效的六边形多层晶格阵列,以实现多于12个同时纠缠量子比特的完全连接性,同时能够增加晶格层(例如,增加到3层、4层、5层或更多层)。这些示例性实施方式可以产生使更多量子比特同时纠缠的能力。由于处理能力随着可同时纠缠的保真度基本相同的量子比特的数量呈指数级增加,因此将这个数量例如从12个纠缠原子量子比特增加到42个量子比特,对于30个量子比特的差异,意味着计算能力增加2^{30}倍或超过十亿倍的优势。

[0065] 示例性实施方式

[0066] 本文描述的某些实施方式利用量子比特的多维配置(例如,单元;节点),该配置可以类似于3D晶体结构(例如,烧绿石)。某些实施方式利用每个门的许多量子比特,有利地减少(例如,最小化)线路深度、纠错和干扰抑制。某些实施方式利用可互换的组件单元,这可以有利地启用量子FPGA(QFPGA)和量子ASIC(QASIC)芯片。

[0067] 虽然某些实施方式的物理配置在本文中被描述为使用高保真度捕获原子量子比特(例如,具有低错误率),但根据本文描述的某些实施方式,可使用可以与多个其他量子比特在多个维度中同时纠缠的任何类型的量子比特(例如,天然存在的;人工形成的)。与本文描述的某些实施方式兼容的量子比特的示例包括但不限于:亚原子粒子;中性原子;离子;中性分子;带电分子;玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC);电子;电子空穴;激子;磁性量子比特;氮空位(NV)中心(例如,在金刚石中);声子;光子;量子点;里德伯原子;硅中的自旋;以及可能的超导量子比特。在某些实施方式中,量子比特适合于在指定配置中的多于两个量子比特之间直接(例如,原生地)实现门操作。例如,某些实施方式的物理架构可以有利地直接提供复杂的门操作,例如多重控制的NOT或相位旋转,而依靠一量子比特门和二量子比特门的串行级联。

[0068] 本文描述的某些实施方式中使用的捕获原子量子比特说明了待优化的量子相互作用的性质。捕获原子表现出的密切相关的品质因数包括但不限于:(i)它们在给定种类内是相同的因此可以有利地避免广泛的校准或调整的这一事实,(ii)形成具有相对于其潜在门周期时间的良好的稳定性和相干时间的量子比特的能力,以及(iii)与竞争的量子比特技术相比,持续展示了高保真度门操作。在本文描述的某些实施方式中,可以通过以多个相同的、完全连接的量子比特的3D几何布局排列的原子来实现同时的多量子比特门操作。在某些实施方式中,完全连接的量子比特的3D几何布局可以有利地集成多于一种量子比特类型(例如,将一种原子种类用于多个控制量子比特并且将第二原子种类用作目标;将不同原子种类用于相邻单元)。

[0069] 本文描述的某些实施方式包括利用各种量子比特技术的多层量子比特阵列,包括但不限于:天然存在的原子;中性原子;带电原子;离子;分子;人工形成的原子;里德伯原子;金刚石中的氮空位(NV)中心;玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC);电子;光子;量子粒子;量子点;声子;反式蛋白;表现得像量子粒子的量子态。虽然本文的附图描绘了包含不带电原子(例如,中性原子;里德伯态;中性里德伯原子)的各种示例性多层量子比特阵列,但是应当理解,这些示例性多层量子比特阵列也与其它量子比特技术兼容。

[0070] 图1示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的示例量子计算(QC)系统100的透视图,该系统100包括基本平坦区域120中的逻辑量子比特110。系统100包括第一基本平坦区域120a中的第一多个逻辑量子比特110a,第一多个逻辑量子比特110a中的至少一些被配置为彼此相互作用。系统100还包括基本平行于第一基本平坦区域120a的第二基本平坦区域120b中的第二多个逻辑量子比特110b。第二多个逻辑量子比特110b中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与第一多个逻辑量子比特110a中的至少一些相互作用。根据本文描述的某些实施方式,图1的逻辑量子比特110形成跨多个2D平面光阱层的多量子比特门。

[0071] 在某些实施方式中,如图1示意性地示出的,示例系统100还包括基本平行于第二基本平坦区域120b的第三基本平坦区域120c中的第三多个逻辑量子比特110c。第三多个逻辑量子比特110c中的至少一些被配置为彼此相互作用并且与第二多个逻辑量子比特110b中的至少一些相互作用。与本文描述的某些实施方式兼容的其它示例系统100可以包括至少一个附加的基本平坦区域120中的至少一个附加的多个逻辑量子比特110,该至少一个附加的基本平坦区域120基本平行于第一基本平坦区域120a、第二基本平坦区域120b和第三基本平坦区域120c,其中至少一个附加的多个逻辑量子比特110被配置为彼此相互作用并且与第一多个逻辑量子比特110a、第二多个逻辑量子比特110b和/或第三多个逻辑量子比特110c中的至少一些相互作用。在某些这样的实施方式中,系统100可以包括布置在基本上彼此平行的四个、五个、六个或更多个基本平坦区域120中的四个、五个、六个或更多的多个逻辑量子比特110,并且各个平坦区域120的逻辑量子比特110被配置为彼此相互作用(例如,平面内相互作用和平面间相互作用)。

[0072] 在某些实施方式中,多个逻辑量子比特110(例如,第一多个逻辑量子比特110a、第二多个逻辑量子比特110b和/或第三多个逻辑量子比特110c)包括选自由以下各项组成的组的至少一个物理量子比特:天然存在的原子;中性原子;带电原子;离子;分子;人工形成的原子;里德伯原子;金刚石中的氮空位(NV)中心;玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC);电子;光子;量子粒子;量子点;声子;反式蛋白;表现得像量子粒子的量子态。在某些实施方式中,多

个逻辑量子比特110中的逻辑量子比特110(例如,第一多个逻辑量子比特110a、第二多个逻辑量子比特110b和/或第三多个逻辑量子比特110c)是单独可寻址的。

[0073] 在某些实施方式中,逻辑量子比特110中的至少一些(例如,第一多个逻辑量子比特110a中的至少一些、第二多个逻辑量子比特110b中的至少一些和/或第三多个逻辑量子比特110c中的至少一些)被配置为彼此直接相互作用以形成至少一个三维(3D)门单元阵列(例如,包括多个多量子比特3D门单元130)),该3D门单元阵列被配置为进行其中多于两个逻辑量子比特110同时参与的多量子比特门操作。例如,3D门单元130的每个逻辑量子比特110可以被配置为与3D门单元130的至少一个其它逻辑量子比特110量子力学地纠缠。

[0074] 在某些实施方式中,第一平坦区域120a中的每个第一逻辑量子比特110a可以被配置为与第一平坦区域120a中的一些(例如,最近邻和次最近邻)其它第一逻辑量子比特110a直接相互作用。类似地,第二平坦区域120b中的每个第二逻辑量子比特110b可以被配置为与第二平坦区域120b中的一些(例如,最近邻和次最近邻)其它第二逻辑量子比特110b直接相互作用,并且第三平面区域120c中的每个第三逻辑量子比特110c可以被配置为与第三平面区域120c中的一些(例如,最近邻和次最近邻)其他第三逻辑量子比特110c直接相互作用。此外,第一平坦区域120a中的每个第一逻辑量子比特110a可以被配置为与第二平坦区域120b内的一些(例如,最近邻和次最近邻)第二逻辑量子比特110b直接相互作用,第二平坦区域120b中的每个第二逻辑量子比特110b可以被配置为与第三平坦区域120c内的一些(例如,最近邻和次最近邻)第三逻辑量子比特110c直接相互作用,并且第三平坦区域120c中的每个第三逻辑量子比特110c可以被配置为与第二平坦区域120b内的一些(例如,最近邻和次最近邻)第二逻辑量子比特110b直接相互作用。尽管图1中未示出,在某些实施方式中,至少一些逻辑量子比特110还可以与同一个平坦区域120和/或相邻的平坦区域120中的甚至更远的逻辑量子比特110(例如,再次最近邻逻辑量子比特110;再再次最近邻逻辑量子比特110)直接相互作用。

[0075] 图2A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的示例系统100的透视图,该系统100包括基本上彼此平行的三个基本平坦区域120a、120b、120c中的36个逻辑量子比特110。图2B示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的另一示例系统100的透视图,该系统100包括基本上彼此平行的三个基本平坦区域120a、120b、120c中的60个逻辑量子比特110。图2A和图2B的示例系统100各包括一3D晶格量子比特阵列,该阵列包括形成多量子比特门的2D平面光学晶格层(例如,在3D六边形规则或“烧绿石”晶格量子比特阵列配置中,其中逻辑量子比特110悬浮或捕获在多个平面层,在相邻的基本平坦区域120中的逻辑量子比特110之间具有正交连接。

[0076] 在某些实施方式中,图2A或图2B所示的逻辑量子比特是示例系统100的所有逻辑量子比特110,而在某些其它实施方式中,图2A或图2B所示的逻辑量子比特仅是示例系统100的逻辑量子比特110的子集。逻辑量子比特110形成至少一个多量子比特3D门单元130。例如,每对相邻的3D门单元130共享第一平坦区域120a中的两个第一逻辑量子比特110a、第二平坦区域120b中的两个第二逻辑量子比特110b以及第三平坦区域120c中的两个第三逻辑量子比特110c。

[0077] 图2A的平坦区域120a、120b、120c中的每一个包括以基本上六边形2D图案布置的12个逻辑量子比特110,并且图2B的平坦区域120a、120b、120c中的每一个包括以基本上六

边形2D图案布置的20个逻辑量子比特110。图2A和图2B的逻辑量子比特110具有每个逻辑量子比特110与其在每个平面区域120a、120b、120c内的最近邻逻辑量子比特110之间的平面内最近邻(nn)距离d_1,并且对于图2A和图2B,每个逻辑量子比特110与其在其他平面区域120中的最近邻逻辑量子比特110之间的平面内最近邻(nn)距离等于平面间距离d_2。在某些实施方式中,平坦区域120a、120b、120c中的每一个的平面内nn距离d_1基本上彼此相等,而在某些其它实施方式中,平坦区域120a、120b、120c中的至少两个的平面内nn距离d_1彼此不同。在某些实施方式中,平坦区域120a、120b之间以及平坦区域120b、120c之间的平面间距离d_2基本上彼此相等,而在某些其它实施方式中,平坦区域120a、120b之间以及平坦区域120b、120c之间的平面间距离d_2彼此不同。

[0078] 在某些实施方式中,平面内nn距离d_1和平面间距离d_2基本上彼此相等(例如,小于15微米;在3微米至15微米的范围内;在8微米至11微米的范围内),而在某些其它实施方式中,平面内nn距离d_1和平面间距离d_2彼此不同(例如,相差在1微米至3微米的范围内),其中$d_1>d_2$或$d_1<d_2$。例如,图2A和图2B的系统100的平坦区域120中的量子比特110的2D六边形图案可以使平面内nn距离d_1等于平面间距离d_2,平面间次最近邻(nnn)距离等于$d_1\sqrt{2}$,平面内nnn距离等于$d_1\sqrt{3}$,平面内再次最近邻(nnnn)距离等于$2d_1$,平面间nnnn距离等于$2d_1$,平面间再再次最近邻(nnnnn)距离等于$d_1\sqrt{5}$,平面内nnnnn距离等于$d_1\sqrt{7}$。

[0079] 平坦区域120中的量子比特110的2D六边形图案的其它配置可以在平坦区域120之间具有不同的横向偏移(例如,平行于平坦区域120的偏移,使得一个平坦区域120中的量子比特110不位于相邻平坦区域120的量子比特110的正上方;例如参见图5A-5C、6A-6F)。如本文所述,这样的配置可以具有平面内nn距离d_1、平面间距离d_2以及各种平面内和平面间nnn、nnnn和nnnnn距离的其它值。

[0080] 在某些实施方式中,如图2A所示,21个逻辑量子比特110形成第一多量子比特3D门单元130a(例如,C^{20}NOT门单元或$C^{20}\varphi$门单元)并且21个逻辑量子比特110形成第二多量子比特3D门单元130b(例如,C^{20}NOT门单元或$C^{20}\varphi$门单元)。例如,平坦区域120b中的逻辑量子比特110(在图2A中显示为黑色)可以是第一门单元130a的目标量子比特,并且可以与其20个控制量子比特(在图2A中显示为深灰色)即其六个平面内最近邻逻辑量子比特110、其两个平面间最近邻逻辑量子比特110(例如,每个平坦区域120a、120c中各一个)以及其十二个平面间次最近邻逻辑量子比特(例如,每个平坦区域120a、120c中各六个)同时量子力学地纠缠。类似地,平坦区域120b中的另一个逻辑量子比特110(在图2A中显示为白色)可以是第二门单元130b的目标量子比特,并且可以与其20个控制量子比特110(例如,在图2A中,其中14个显示为浅灰色,其中六个为深灰色,因为它们也是第一门单元130a的控制量子比特)同时量子力学地纠缠。在某些实施方式中,如图2B所示,21个逻辑量子比特110可以形成第三多量子比特3D门单元130c,并且21个逻辑量子比特110可以形成第四多量子比特3D门单元130d。

[0081] 图2A和图2B的每个C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门单元130可称为“烧绿石单元”,因为其排列与烧绿石晶体结构的排列相似。如本文所述,在某些实施方式中,更多的逻辑量子比特110可以同时量子力学地相互纠缠以形成更大的多量子比特门单元130(例如,C^{34}NOT门单元;$C^{34}\varphi$门单元;C^{94}NOT门单元;$C^{94}\varphi$门单元等)。这些较大的门单元130均可以称为“超级烧绿石单元”。

[0082] 虽然图2A和图2B用不同权重的虚线和实线指示了各个逻辑量子比特110之间的一些纠缠,但门单元130(例如,第一门单元130a)的所有逻辑量子比特110可以彼此直接相互作用(例如,可以同时量子力学纠缠;充分纠缠;完全纠缠),并且另一门单元130(例如,第二门单元130b)的所有逻辑量子比特110可以彼此直接相互作用(例如,可以同时量子力学地纠缠)。在某些实施方式中,每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最近邻(nn)逻辑量子比特110、其平面间最近邻(nn)逻辑量子比特110以及其平面间次最近邻(nnn)逻辑量子比特110直接相互作用。在某些其它实施方式中,每个逻辑量子比特110还被配置为与其平面内次最近邻(nnn)逻辑量子比特110、其平面间再次最近邻(nnnn)逻辑量子比特110、其平面内再次最近邻(nnnn)逻辑量子比特110和/或其平面间再再次最近邻(nnnnn)逻辑量子比特110直接相互作用。在某些其它实施方式中,每个逻辑量子比特110还被配置为与其平面内再再次最近邻(nnnnn)量子比特110直接相互作用。图2A标记了一些示例逻辑量子比特110,其中这些示例逻辑量子比特110与单个逻辑量子比特110的关系显示为黑色。通过使逻辑量子比特110与附加的逻辑量子比特110直接相互作用,可以增加门单元130内的逻辑量子比特110的数量,从而增加门单元130的计算能力。

[0083] 在某些实施方式中,每个多量子比特门单元130由21个纠缠量子比特110形成(例如,如图2A和图2B中所示),其可以作为"原生"C^{20}NOT门(例如,20个控制的NOT门)操作和/或作为"原生"$C^{20}\varphi$门(例如,20个控制的相位门)。这种原生C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门可以通过比单独使用一量子比特门或二量子比特门少得多的门操作来实现。在某些实施方式中,由示例21量子比特门单元130提供的原生C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门的净保真度显著大于包括可能具有高得多的各门保真度的许多二量子比特门的C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门的净保真度,因为21量子比特门单元130在实现其结果时不会聚合许多连续操作的错误。在某些此类实施方式中,由示例21量子比特门单元130提供的C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门使用包括许多二量子比特门的C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门的步骤的非常小部分,如在使用结构和保真度估计两者的成功门操作的概率的比较中可以看出的,因此由示例21量子比特门单元130提供的C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门更快并且更不易出错(例如,从而在开始时利用显著更少的纠错)。

[0084] 在某些实施方式中,每个门单元130的逻辑量子比特110的数量可以通过增加基本平坦区域120的数量和/或通过延长逻辑量子比特110可以彼此直接相互作用的距离来增加。例如,图3A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的布置在基本上彼此平行的三个基本平坦区域120中的多个逻辑量子比特110(例如,与图2A和图2B的示例系统100兼容)的透视图。图3A的透视图沿着所有逻辑量子比特110可见的方向(例如,没有一个逻辑量子比特110被另一逻辑量子比特110遮挡)。图3A包括一些逻辑量子比特110之间的线,这些线表示门单元130的逻辑量子比特110之间的一些直接相互作用。每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最近邻逻辑量子比特110、其平面间最近邻逻辑量子比特110以及其平面间次最近邻逻辑量子比特110直接相互作用,图3A的门单元130是C^{20}NOT门单元或$C^{20}\varphi$门单元(例如,示例目标量子比特显示为黑色,其控制量子比特显示为深灰色)。

[0085] 对于其它示例,图3B和图3C的每一个示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的布置在基本上彼此平行的五个基本平坦区域120中的多个逻辑量子比特110的透视图。图3B和图3C的透视图沿着所有逻辑量子比特110可见的方向(例如,没有一个逻辑量子比特

110被另一个逻辑量子比特110遮挡)并且包括一些逻辑量子比特110之间的线,这些线表示门单元130的逻辑量子比特110之间的一些直接相互作用。对于图3B,每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最近邻逻辑量子比特110、其平面间最近邻逻辑量子比特110以及其平面间次最近邻逻辑量子比特110直接相互作用,图3B的门单元130是C^{34}NOT门单元或$C^{34}\varphi$门单元(例如,示例目标量子比特显示为黑色,其控制量子比特显示为深灰色)。对于图3C,每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最近邻逻辑量子比特110、其平面间最近邻逻辑量子比特110、其平面内次最近邻逻辑量子比特110以及其平面内再次最近邻逻辑量子比特110直接相互作用。图3C的门单元130是C^{94}NOT门单元或$C^{94}\varphi$门单元(例如,示例目标量子比特显示为黑色,其控制量子比特显示为深灰色)。图3A-3C的示例布置示出了根据本文描述的某些实施方式,通过使用由六边形单元N层光学晶格形成的中性(例如,里德伯)原子阱来形成"超级烧绿石"单元(例如,3层规则六边形原子晶格中的21量子比特C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门130、5层规则六边形原子晶格中的35量子比特C^{34}NOT/$C^{34}\varphi$门130、5层规则六边形原子晶格中的95量子比特C^{94}NOT/$C^{94}\varphi$门130),可能有利地增加同时连接性(例如,纠缠)的程度。

[0086] 图4A-4B、图5A-5C和图6A-6D示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的在多个基本平坦区域120的逻辑量子比特110之间具有不同相对位移的示例系统110的部分。图4A和4B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域120a、120b、120c的示例系统100的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特110a、110b、110c。每个平坦区域120内的逻辑量子比特110被布置成基本上六边形的2D图案,并且平坦区域120基本上彼此平行。在图4A和图4B的六边形规则晶格阵列中,3D配置包括相邻平坦区域120中的量子比特之间的正交连接。在图4A和图4B中,基本平坦区域120的逻辑量子比特110基本上没有沿着基本平行于平坦区域120的方向从相邻的基本平坦区域120的逻辑量子比特110移位。例如,如图4A所示,最顶部平坦区域120a的逻辑量子比特110a与其它两个平坦区域120b、120c中的对应逻辑量子比特110b、110c对准,使得逻辑量子比特110a从上方(例如,沿着z轴)可见,而逻辑量子比特110b、110c被逻辑量子比特110a遮挡。图4A和图4B的该示例系统100对应于图2A和图2B的示例系统(例如,其中示例21量子比特C^{20}NOT/$C^{20}\varphi$门130具有基本上彼此相等的平面内nn距离d_1和平面间距离d_2,并且其中每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最近邻逻辑量子比特110、其平面间最邻近逻辑量子比特110以及其平面间次最邻近逻辑量子比特110直接相互作用)。

[0087] 图5A和图5B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域120a、120b、120c的另一示例系统110的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特110a、110b、110c。每个平坦区域120内的逻辑量子比特110被布置成基本上六边形的2D图案,并且平坦区域120基本上彼此平行。在图5A-5C所示的替代六边形晶格阵列中,3D配置包括相邻平坦区域120中的量子比特之间的非正交连接,并且这种替代配置可以扩展光学晶格的最佳访问角度选择的工程交易空间。在图5A和图5B中,基本平坦区域120的逻辑量子比特110沿着基本平行于平坦区域120的方向从相邻的基本平坦区域120的逻辑量子比特110移位(例如,偏移)。

[0088] 例如,如图5A和图5B所示,逻辑量子比特110a相对于逻辑量子比特110b在沿着y轴

的方向(例如,垂直于x轴和z轴;由图5A中的双头虚线箭头示出)上移位了位移量值$\delta_1 = d_1\sqrt{3}/2$,但与逻辑量子比特110c对准,使得平坦区域120a、120b的逻辑量子比特110a、110b从上方(例如,沿着z轴)可见,而逻辑量子比特110c被逻辑量子比特110a遮挡。图5C示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图5B的透视图,其中平面内nn距离d_1和平面间最近邻量子比特之间的距离基本上彼此相等,使得平面间距离d_2基本上等于$d_1\sqrt{3}/2$,并且其中每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最邻近逻辑量子比特110、其平面间最邻近逻辑量子比特110、其平面内次最邻近逻辑量子比特110、其平面间次最邻近逻辑量子比特110以及其平面间再次最邻近逻辑量子比特110直接相互作用。如图5C所示,示例23量子比特$C^{22}NOT/C^{22}\varphi$门130具有目标量子比特(黑色)和22个控制量子比特(深灰色)。

[0089] 图6A和图6B分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域120a、120b、120c的又一示例系统110的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特110a、110b、110c。每个平坦区域120内的逻辑量子比特110被布置成基本上六边形的2D图案,并且平坦区域120基本上彼此平行。在图6A和图6B中,基本平坦区域120的逻辑量子比特110沿着基本平行于平坦区域120的方向从相邻的基本平坦区域120的逻辑量子比特110移位。例如,如图6A和图6B所示,逻辑量子比特110a相对于逻辑量子比特110b在沿着x轴的方向(例如,垂直于y轴和z轴;由图6A中的双头虚线箭头示出)上移位了位移量值$\delta_2 = d_1/2$,但与逻辑量子比特110c对准,使得平坦区域120a、120b的逻辑量子比特110a、110b从上方(例如,沿着z轴)可见,而逻辑量子比特110c被逻辑量子比特110a遮挡。图6C示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图6B的透视图,其中平面内nn距离d_1和平面间最近邻量子比特之间的距离基本上彼此相等,使得平面间距离d_2基本上等于$d_1\sqrt{3}/2$,并且其中每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最邻近逻辑量子比特110、其平面间最邻近逻辑量子比特110、其平面内次最邻近逻辑量子比特110、其平面间次最邻近逻辑量子比特110以及其平面间再次最邻近逻辑量子比特110直接相互作用。如图6C所示,示例25量子比特$C^{24}NOT/C^{24}\varphi$门130具有目标量子比特(黑色)和24个控制量子比特(深灰色)。

[0090] 图6D和图6E分别示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的包括三个平坦区域120a、120b、120c的又一示例系统110的一部分的俯视图(例如,沿着z轴)和透视图,每个平坦区域包括对应的多个逻辑量子比特110a、110b、110c。每个平坦区域120内的逻辑量子比特110被布置成基本上六边形的2D图案,并且平坦区域120基本上彼此平行。在图6D和图6E中,基本平坦区域120的逻辑量子比特110沿着基本平行于平坦区域120的方向从相邻的基本平坦区域120的逻辑量子比特110移位。例如,如图6D和图6E所示,逻辑量子比特110a相对于逻辑量子比特110b移位了基本上等于d_1的位移量值δ_3,该位移量值具有沿着y轴的量值$\delta_1 = d_1\sqrt{3}/2$的第一分量以及沿x轴的量值$\delta_2 = d_1/2$的第二分量。逻辑量子比特110a与逻辑量子比特110b、110c对准,使得逻辑量子比特110b、110c被图6D中的逻辑量子比特110a遮挡。

[0091] 图6F示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的类似于图6E的透视图,其中平面内nn距离d_1和平面间最近邻量子比特之间的距离基本上彼此相等,使得平面之间的平

面间距离(例如,间隔)$d_2 = d_1\sqrt{3}/2$并且其中每个逻辑量子比特110被配置为与其平面内最邻近逻辑量子比特110、其平面间最邻近逻辑量子比特110、其平面内次最邻近逻辑量子比特、其平面间次最邻近逻辑量子比特110以及其平面间再次最邻近逻辑量子比特110直接相互作用。如图6F所示,示例21量子比特$C^{20}NOT/C^{20}\varphi$门130具有目标量子比特(显示为黑色)和20个控制量子比特。在这个示例和上面的所有示例中,存在所有逻辑量子比特110a、110b、110c都是可见的并且单独可寻址和单独可检测的角度。

[0092] 图5A-5C和图6A-6F示意性地示出了平坦区域120的逻辑量子比特110之间的示例位移,该位移具有示例方向和量值。某些其它实施方式具有其它方向上的位移(例如,具有沿着x轴和y轴的量值)和/或具有其它量值(例如,1/2单元宽度;1/3单元宽度)。某些其它实施方式具有不同的平面间距离d_2。例如,平坦区域120之间的间隔可以根据跨相邻平坦区域120的最近邻逻辑量子比特110之间与垂直方向的角度来减小(例如,d_2等于$d_1/2$;$2\cdot d_1/3$;$3\cdot d_1/4$;$0.85\cdot d_1$)。另外,虽然图5A-5C和图6A-6F示意性地示出了具有2D基本上六边形图案的示例系统100,其它2D图案也与本文描述的某些实施方式兼容。

[0093] 在某些实施方式中,第一多个逻辑量子比特110a是单独可寻址的并布置在基本平坦的第一光学晶格中,第二多个逻辑量子比特110b是单独可寻址的并布置在基本平行于第一光学晶格的基本平坦的第二光学晶格中,并且第三多个逻辑量子比特110c是单独可寻址的并布置在基本平行于第二光学晶格的基本平坦的第三光学晶格中。在某些实施方式中,系统100包括基本平行于第三基本平坦区域120c的至少一个附加的基本平坦区域120中的至少一个附加的多个逻辑量子比特110,该至少一个附加的多个逻辑量子比特110被配置为彼此相互作用和/或与第三多个逻辑量子比特110c中的至少一些相互作用,其中至少一个附加的多个逻辑量子比特110是单独可寻址的。例如,多个量子比特的多个基本平行的光学晶格还可以包括第四光学晶格、第五光学晶格、第六光学晶格、第七光学晶格等。多个限制区域还可以包括布置在基本平行于第三光学晶格的至少一个附加光学晶格中的至少一个附加的限制区域,该至少一个附加光学晶格包括至少一个附加的多个逻辑量子比特。

[0094] 例如,图7A-7E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的在多个2D平面光阱区域之间形成并具有多个寻址激光光束210的示例性多量子比特门单元130(例如,具有烧绿石配置中的21个量子比特110的$C^{20}NOT$门单元或$C^{20}\varphi$门单元,其中目标量子比特在中心并且控制量子比特在别处)的各种视图。图7A描绘了多量子比特门单元130的多层晶格结构的原子量子比特。图7A中的量子比特110之间的线仅表示量子比特110之间的一些纠缠,并且为了清楚起见,省略了表示量子比特110之间的其它纠缠的线。图7B描绘了该多量子比特门单元130,其仅具有被配置为分别照射原子的一些寻址激光光束210(例如,从光学端口212发射),以及为了清楚起见,省略了产生包含原子的光学势阱的捕获激光光束220的阵列。如图7C和图7D所示,每个寻址激光光束210照射多量子比特门单元130的单个原子。2D视图的限制是一个图示本身可能使得单个激光光束看起来与多个原子相交。然而,激光光束210被布置成交替的行并且被示为透明的。结果,可能看到位于多个激光光束210之间或后面的原子“通过”不寻址它的光束,从而可能使一个原子看起来在多个激光光束中或者使一个激光光束看起来与多个原子相交,而实际上每个原子最多与一个寻址激光光束相交。本文描述的某些实施方式被配置为使最大数量的量子比特在最近邻、次最近邻、再次最近邻等之间同时纠缠,使得更多的量子比特110可以参与单个原生门操作。由于每个门单元的潜

在处理能力随着同时参与每个门操作的量子比特110的数量呈指数级增加,因此本文描述的某些实施方式的处理能力总体上也呈指数级增加。某些实施方式的门结构和布置的动态可重构性也得到极大改善。

[0095] 图8A-8E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的捕获激光光束220的各种视图。图8A-8D的这些示例性实施方式利用在相交的捕获光束220(例如,捕获从光学端口222发射的捕获激光光束)中或之间形成的势阱的3D光学晶格中捕获的中性(例如,不带电的)里德伯原子(例如,参见I.Bloch,Nature Physics,1,23(2005))。在本文描述的某些实施方式中,原子被捕获在形成于共对准和交叉的光束之间的晶格空间中的最小势能(例如,零)区域中(例如,参见图8A和图8B),而在某些其它实施方式中,原子可以被捕获在相交光束内(例如,参见图8C和图8D)。S.E.Anderson,et al.Phys.Rev.Lett.107,263001(2011)和T.M.Graham etal.,Phys.Rev.Lett.123,230501(2019)中描述了相交捕获光束220内的这种捕获。

[0096] 图8A-8E在最近邻量子比特110之间采用8微米至11微米的范围内的晶格间距(例如,小于12微米)。例如,其中利用|101S>;|109S>铯(Cs)的里德伯跃迁(例如,冷却到77K、300K或某个其它温度),根据参考数据曲线,标称8微米晶格单元尺寸在某些多重控制量子门操作的最佳值范围内。根据本文描述的某些实施方式,某些这样的实施方式可以提供设计可行性和某些设计优点。

[0097] 在某些实施方式中,布置在交替列中的原子量子比特可以位于相邻平面之间具有交错偏移(例如,沿着x或y的1/2单元偏移间距、沿着x或y的1/3单元偏移间距、沿着x和y的1/4x1/4单元偏移单元间距)的交替平面内,这可以形成完全连接的纠缠原子量子比特的规则六角棱柱配置,并且可以实现从某些方向可见的倾斜六角棱柱配置。例如,相交的捕获激光光束220可以相对于坐标系形成复合角,该坐标系可以被定义为示例量子计算系统的平面基底的长度x和宽度y(例如,水平尺寸)以及示例量子计算系统相对于参考平面(水平的;x-y平面)的高度z(例如,垂直尺寸)(例如,沿x轴朝向z轴+18.5度、y=0对准的捕获激光光束220的第一阵列,与沿x轴朝向y轴+60度、z=0对准的捕获激光光束220的第二阵列相交),以使得相交的捕获激光光束220的3D交叉可以接近正交。当以某些角度观察时,捕获激光光束220之间形成的势阱可以在平面内基本上对称(例如,具有正方形或菱形的横截面),这可以产生基本上均匀的势阱(例如,马鞍形势阱;鞍点)。例如,在图8B和图8D中,从某些视图来看,捕获激光光束220的第一阵列和第二阵列可以呈现矩形或梯形。然而,在图8B和图8D中看起来从左下到右上成角度的捕获激光光束220也可以在3D结构中向下成角度,使得当从某些访问角度对角线观察时,在图8B和图8D中描绘为水平的捕获激光光束的第一阵列和第二阵列的相交,看起来几乎正交。在某些实施方式中,原子限制结构可以形成跨平面的规则六角棱柱(例如,如图1A、图1B、图1D所示),并且在某些其它实施方式中,原子间几何结构可以呈现倾斜或有角度以形成倾斜的六角棱柱配置。在某些实施方式中,光束的相交从各种视图和角度看来可能是非正交的,然而,某些实施方式的有角度的3D晶格结构被设计成当从那些角度观察时允许原子之间的最大空间分离,以实现量子比特的最佳寻址和读出(例如,检测)。

[0098] 图9A-9B示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的由捕获激光光束220的相交阵列创建的三层10×10原子阱晶格的透视图。图9C示意性地示出了图9A-9B的结构的

俯视图。还示出了根据本文描述的某些实施方式的寻址激光光束210的三个交错阵列。

[0099] 图10A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的部分组装的QC系统100的透视图,该QC系统100包括具有三组寻址激光束210a、210b、210c和捕获激光光束220a、220b的两个相交阵列的三层10×10原子晶格。图10A还示出了寻址激光光束210a、210b、210c延伸通过的光学端口214a、214b、214c、发射捕获激光光束220a、220b的光纤端口222a、222b、被配置为产生磁场作为光阱配置的一部分的磁场源230(图10A中示出了被配置为产生电场作为光阱配置的一部分的电极234),以及被配置为经由相应的光学检测器端口242a、242b接收并检测来自量子比特的荧光的第一光学检测器240a和第二光学检测器240b(例如,CCD检测器阵列)。图10B-10D示出了根据本文描述的某些实施方式的图10A的三组寻址激光光束210a、210b、210c和捕获激光光束220a、220b的两个相交阵列的不同方向的其它视图。

[0100] 虽然图10A-10D示意性地示出了具有三组寻址激光光束210a、210b、210c的示例QC系统100,但在某些其它实施方式中,QC系统100可以包括四组或更多组寻址激光光束210。例如,图10E示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的另一个部分组装的QC系统100的透视图,该QC系统100包括具有四组寻址激光光束210a、210b、210c、210d和捕获激光光束220a、220b的两个相交阵列的三层10×10原子晶格。图10F-10H示出了根据本文描述的某些其它实施方式的图10E的四组寻址激光束210a、210b、210c、210d和捕获激光光束220a、22b的两个相交阵列的不同方向的其它视图。

[0101] 如本文所使用的,位于x-y平面内的所有方向被定义为仰角0度(例如,水平),并且正交于x和y的方向(例如,垂直)被定义为z。此外,沿y的方向被定义为方位角0度(例如,绕z旋转),并且方位角0度、仰角0度的方向表示为(0°,0°)。例如,在本文描述的某些实施方式中,激光器阵列可以被定向为相交,如图10A-10C所示(例如,捕获激光光束220a在(0°,0°)处,捕获激光光束220b在(90°,+20°)处,并且激光器220a的行可以以横截面倾斜+20度(例如,仰角)来布置,使得捕获激光束220a和220b的相交形成位于与x-y平面成+20度角的平面内的2D晶格。在某些这样的实施方式中,由基本正交的激光器形成的捕获单元可以是基本上正方形的。在(293.5°,+53.5°)处寻址激光光束210a,在(246.5°,+53.5°)处寻址激光光束210b,并且在(71.5°,+58°)处寻址激光光束210c。在本文描述的某些其它实施方式中,捕获激光束的相交可以有利地以其它角度布置以形成钻石形或菱形的捕获单元,以使得能够添加更多平面量子比特晶格阵列,同时继续实现多个寻址激光角度来单独地寻址3D晶格中的每个量子比特。例如,在描述简单的另一实施方式中,捕获激光束220a可以布置在(30°,0°)处并且捕获激光束220b可以布置在(90°,+20°)处,寻址激光器在(0°,60°)处,(120°,60°)处,(240°,60°)处。注意,如图10B所示的这种特定的角度组合是为了如下目的而选择的:视觉清晰;易于区分出现横向定向的捕获激光光束220的两个紧凑阵列(例如,簇;组)与以看起来更接近垂直的角度出现的寻址激光光束210的三个紧凑阵列。根据本文描述的某些其它实施方式,其它示例可以利用在3D结构内形成晶格激光器的基本正交相交的复合角度的替代组合,同时类似地优化用于寻址和检测各个量子比特的视线的机会。

[0102] 图11A示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的通过第一光学检测器端口242a观察到的图9A-9C和10A-10D的三层10×10 3D原子晶格的视图。从这个角度来看,多维多层量子比特晶格阵列的每个原子对于第一光学检测器240a是分开可见的,使得当由一个专用光学寻址光束寻址时,每个原子的状态都可以单独检测和区分。图11B示意性地示出了

图11A的结构的侧剖视图。虽然图11A示出了三层10×10 3D原子晶格,但其它原子晶格也可以被配置为允许晶格中的每个原子被分开且单独地从晶格结构上方和下方的最佳访问角度寻址和看到(例如,由第一光学检测器242a检测到)。例如,计算机辅助设计(CAD)和分析可用于确认其它原子晶格的其它此类配置。某些这样的实施方式允许最大数量的量子比特在最近邻、次最近邻、再次最近邻等之间同时纠缠,使得更多的量子比特可以参与单个原生门操作。图11A还示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的电极区域234、磁场(例如,B场)源230、检测器阵列240(例如,CCD相机等)和光束端口242a、214a、214b、214c的相对放置,用于寻址和操纵量子比特以实现门操作和读出。

[0103] 图12示意性地示出了根据本文描述的某些实施方式的图10A的示例组装的QC系统的透视图,该QC系统包括具有三组寻址激光束210a、210b、210c和捕获激光光束220a、220b的两个相交阵列的三层10×10原子晶格。图12还示意性地示出了通过第一光学检测器端口242a(例如,如图11A中所示)的视图和捕获激光光束210a、210b、210c的相交阵列的两个不同视图(例如,如图8E和图9A中所示)。

[0104] 图13示出了根据本文描述的某些实施方式的三个表,所述表对各种多层量子比特晶格阵列在给定门保真度下可以同时纠缠的量子比特总数进行比较。

[0105] 已经以几个非限制性实施方式描述了本发明。应当理解,这些实施方式不是相互排斥的,并且结合一个实施方式描述的元件可以以适当的方式与其它实施方式组合、重新布置或从其它实施方式中消除,以实现期望的设计目标。单个特征或特征组对于每个实施方式都不是必要或需要的。

[0106] 为了概述本发明的目的,本文描述了本发明的某些方面、优点和新颖特征。然而,应当理解,不一定可以根据任何特定实施方式来实现所有这些优点。因此,本发明可以以实现一个或多个优点而不必实现如本文中教导或暗示的其它优点的方式来体现或实施。

[0107] 如本文所使用的,对“一个实施方式”或“一些实施方式”或“一种实施方式”的任何引用意味着结合该实施方式描述的特定元件、特征、结构或特性被包括在至少一个实施方式中。说明书中不同地方出现的短语“在一个实施方式中”不一定都指同一个实施方式。本文使用的条件语言,例如“可”、“可以”、“可能”、“也许”、“例如”等,除非另外具体说明,或者在所使用的上下文中以其它方式理解,否则一般旨在传达某些实施方式包括某些特征、元件和/或步骤,而其它实施方式不包括。此外,除非另有说明,否则本说明书和所附权利要求中使用的冠词“一”或“一个”或“该”应被解释为表示“一个或多个”或“至少一个”。

[0108] 本文所用的程度语言,例如术语“大约”、“约”、“大致”和“基本上”,表示接近所描述的值、量或特性的值、量或特性,其仍然执行所需的功能或达到所需的结果。例如,术语“大约”、“约”、“大致”和“基本上”可以指在±10%内、在±5%内、在±2%内、在±1%内、或在±0.1%内的量。作为另一个示例,术语“大致平行”和“基本平行”指的是偏离精确平行±10度、±5度、±2度、±1度或±0.1度的值、量或特性。并且术语“大致垂直”和“基本垂直”是指偏离完全垂直±10度、±5度、±2度、±1度或±0.1度的值、量或特征。本文公开的范围还涵盖任何和所有重叠、子范围及其组合。诸如“最多”、“至少”、“大于”、小于、“之间”等语言包括所引用的数字。如本文所使用的,“一”、“一个”和“所述”的含义包括复数引用,除非上下文另有明确说明。此外,如本文的描述中所使用的,“在……中”的含义包括“到……中”和“在……上”,除非上下文另有明确说明。

[0109] 如本文所使用的,术语“包含”、“包括”、“含有”、“包括了”、“具有”、“具备”或其任何其它变体是开放式术语并且旨在覆盖非排他性包含。例如,包括一系列元素的过程、方法、物品或装置不必仅限于那些元素,而是可以包括未明确列出的或此类过程、方法、物品或装置固有的其它元素。此外,除非明确相反地说明,否则“或”是指包含性或而不是排他性或。例如,条件A或B通过以下任一条件满足:A为真(或存在)且B为假(或不存在)、A为假(或不存在)且B为真(或存在),或者A和B都为真(或存在)。如本文所使用的,提及一系列项中的“至少一个”的短语是指那些项的任意组合,包括单个成员。作为示例,“A、B或C中的至少一个”旨在涵盖:A、B、C、A和B、A和C、B和C以及A、B和C。连词语言例如短语“X、Y和Z中的至少一个”,除非另外具体说明,否则根据通常使用的上下文来理解,以表达项、术语等可以是X、Y和Z中的至少一个。因此,这种连词语言通常并不旨在暗示某些实施方式需要X中的至少一个、Y中的至少一个和Z中的至少一个均存在。

[0110] 因此,虽然本文仅具体描述了某些实施方式,但显然可以对其进行多种修改而不脱离本发明的精神和范围。此外,使用首字母缩略词仅是为了增强说明书和权利要求书的可读性。应当注意,这些首字母缩略词并不旨在削弱所使用的术语的通用性,并且它们不应当被解释为将权利要求的范围限制于其中描述的实施方式。

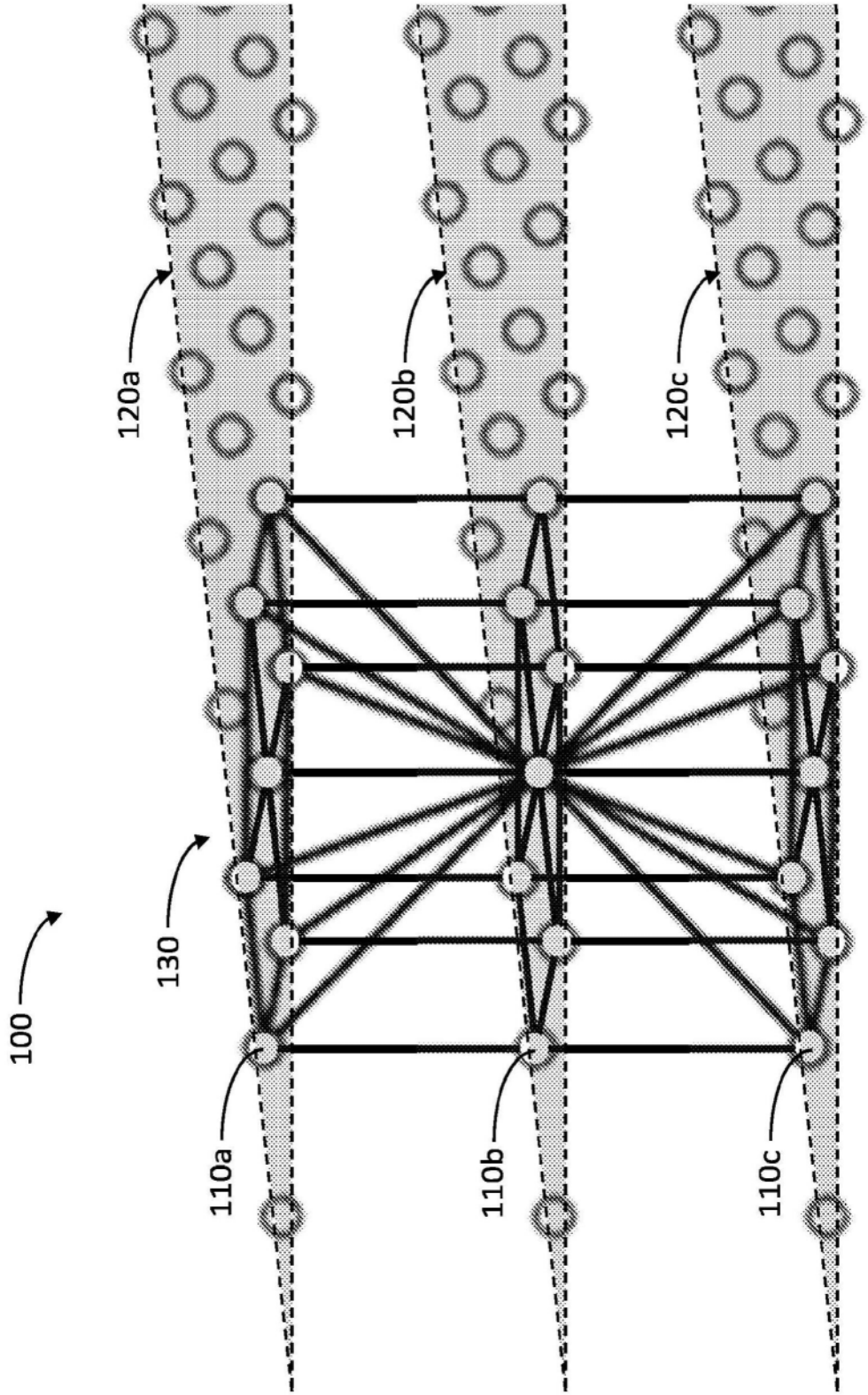


图1

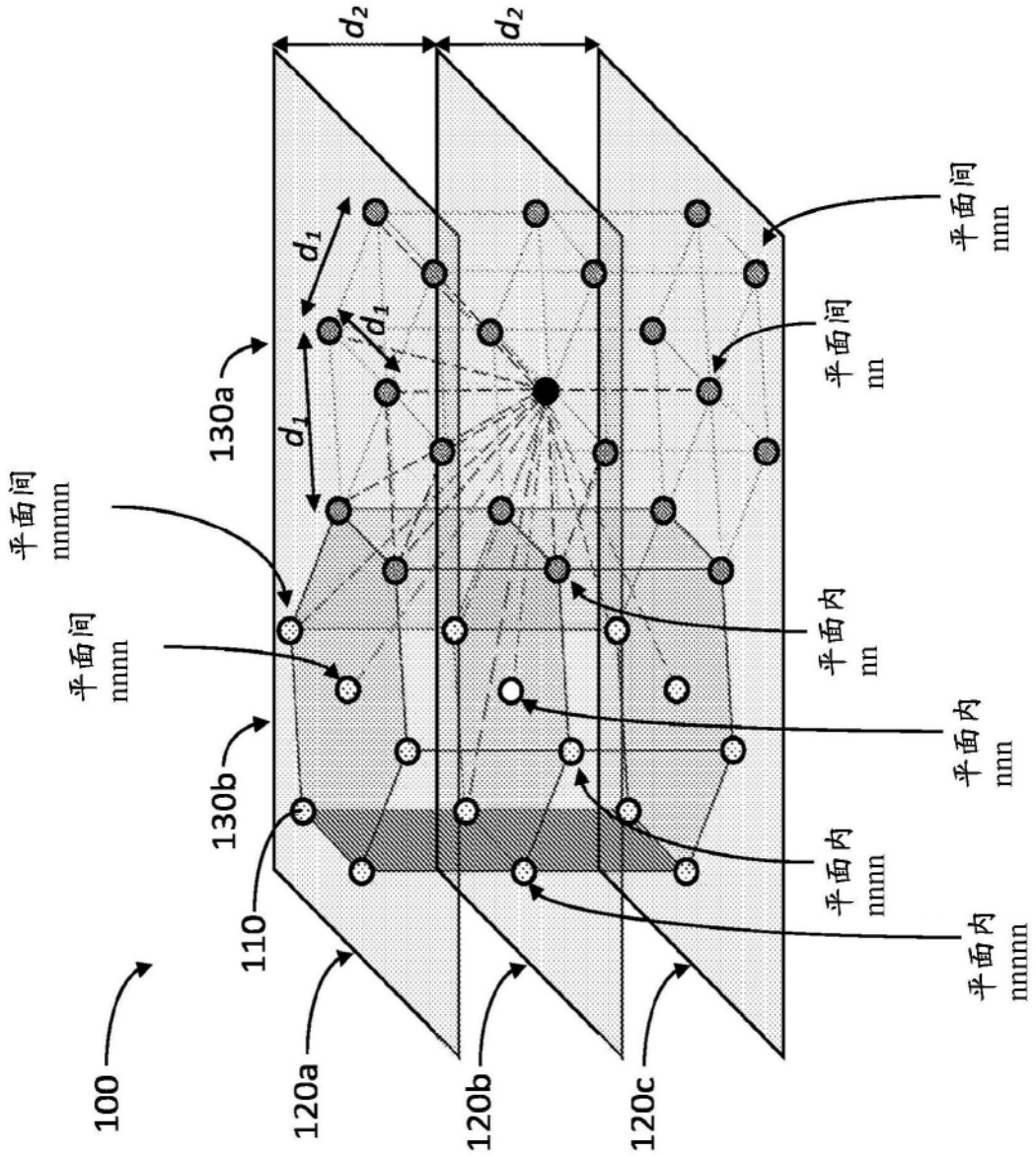

d2
d2
d1
d1
d1
130a
130b
110
100
120a
120b
120c
平面间
nnnnn
平面间
nnnn
平面间
nnn
平面间
nn
平面内
nn
平面内
nnn
平面内
nnnn
平面内
nnnnn

图2A

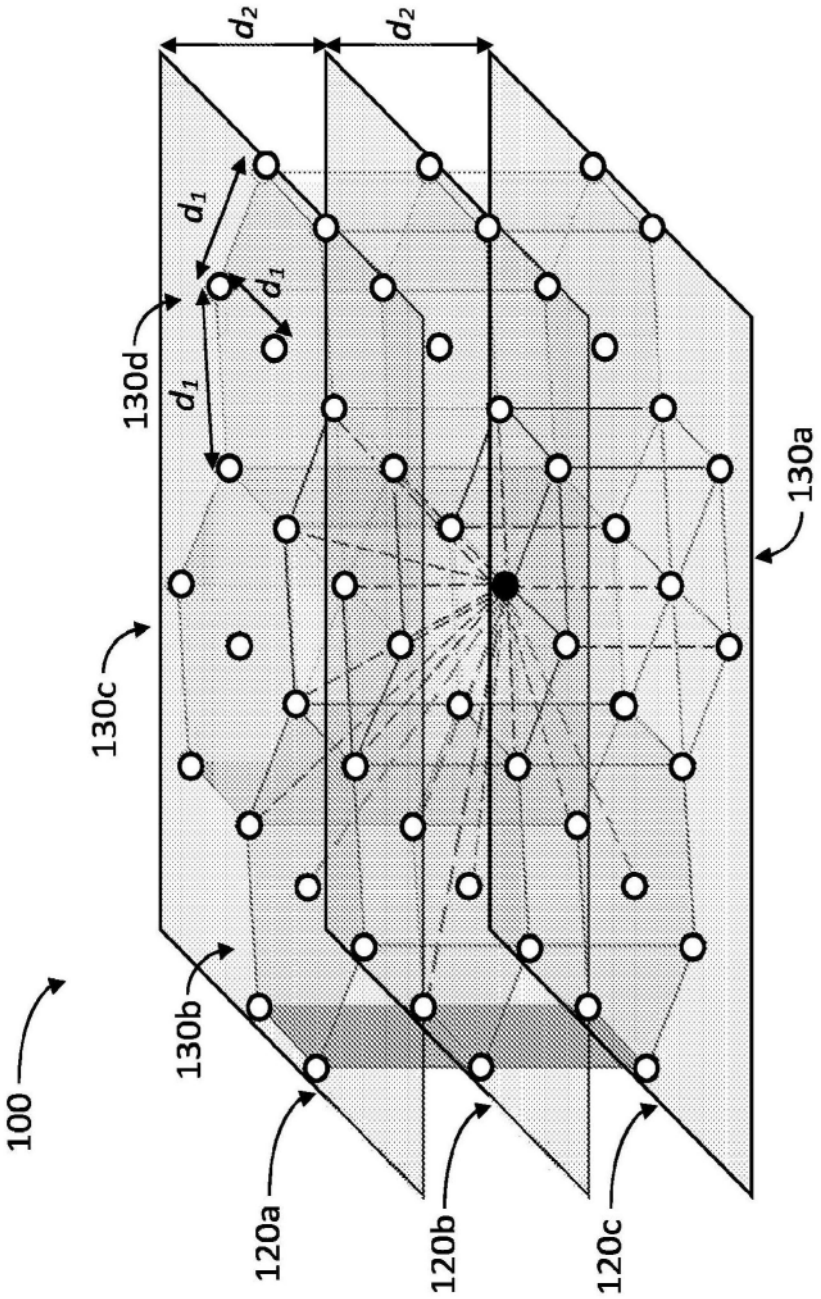


图2B

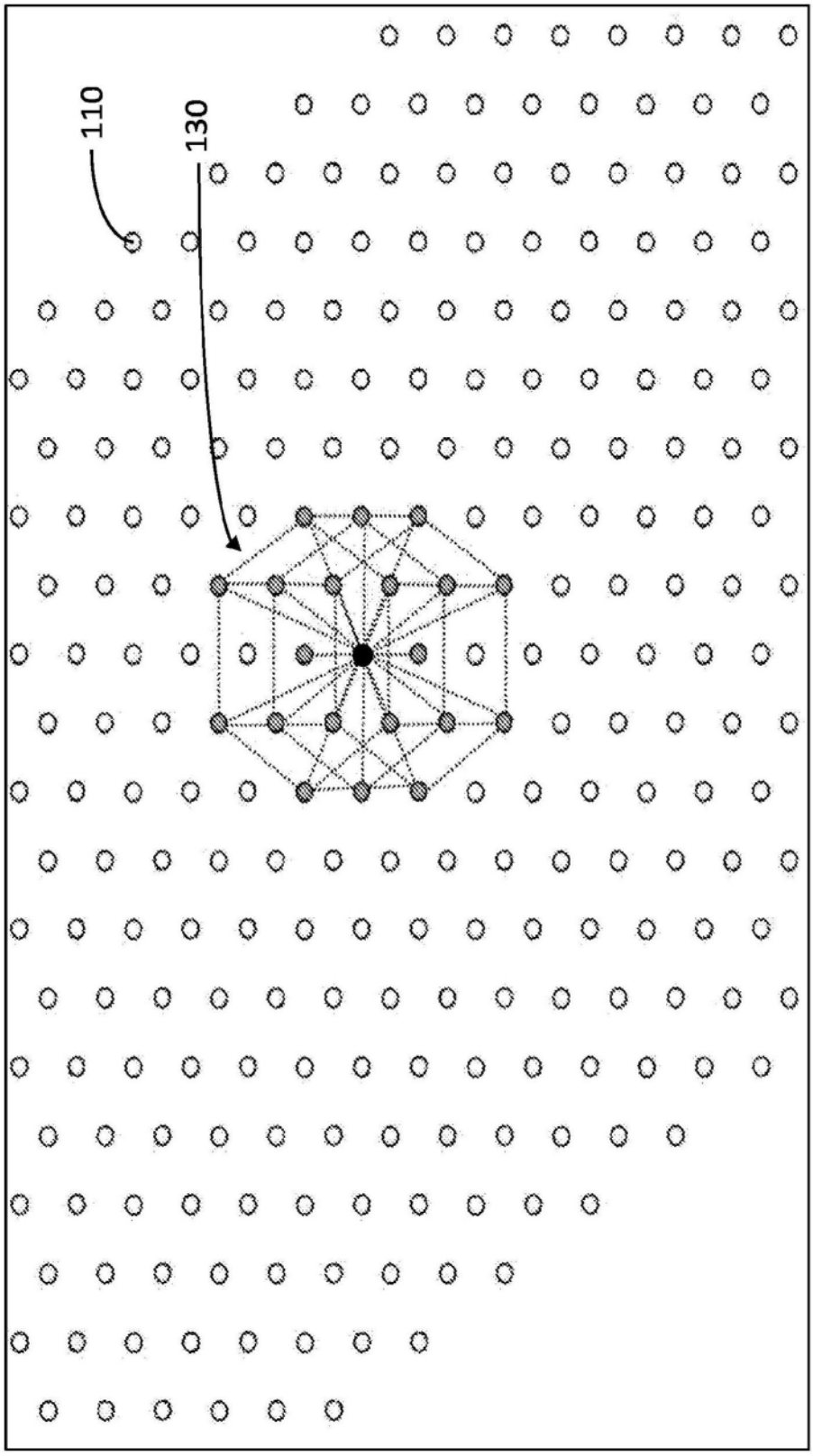


图3A

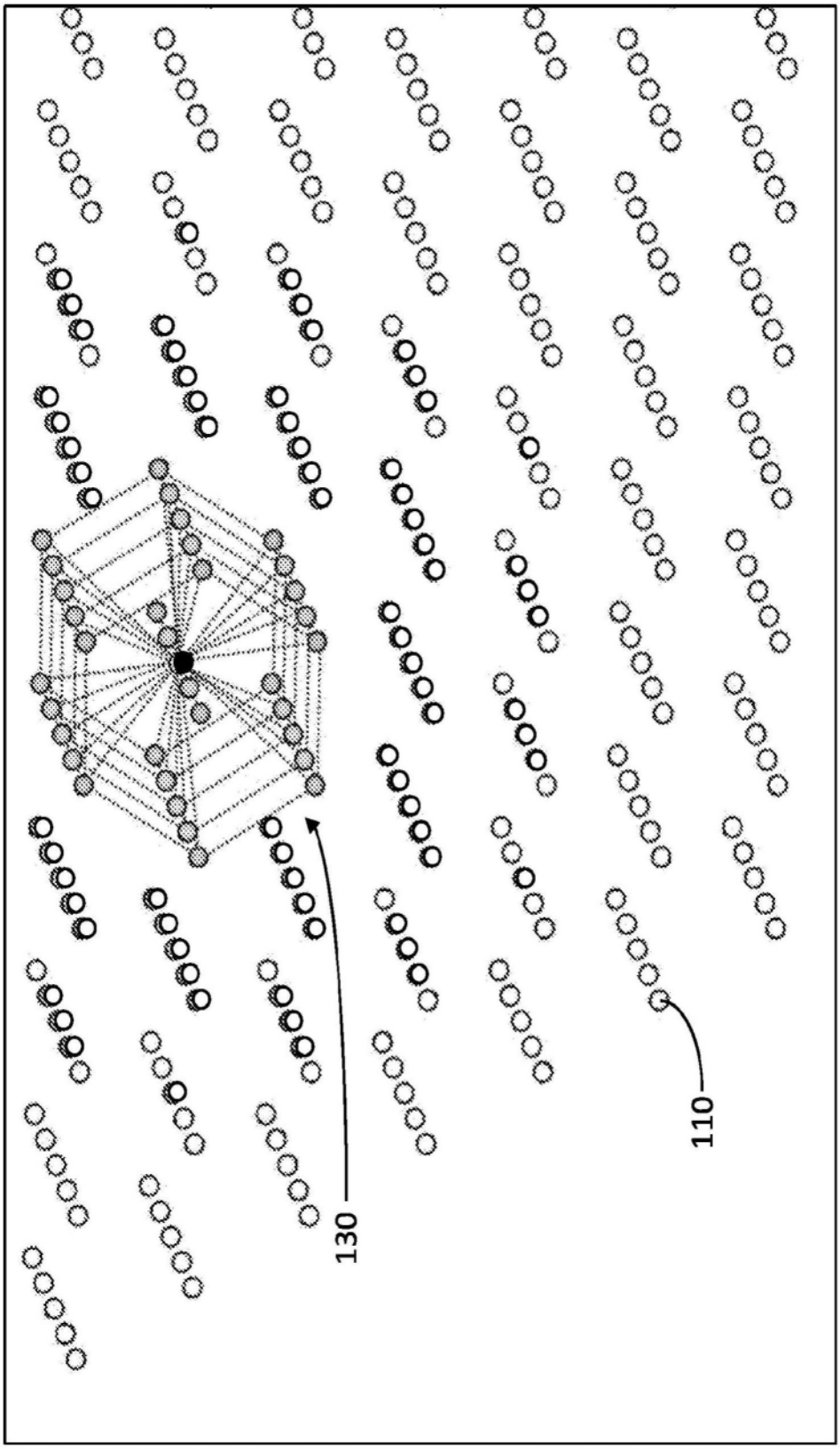


图3B

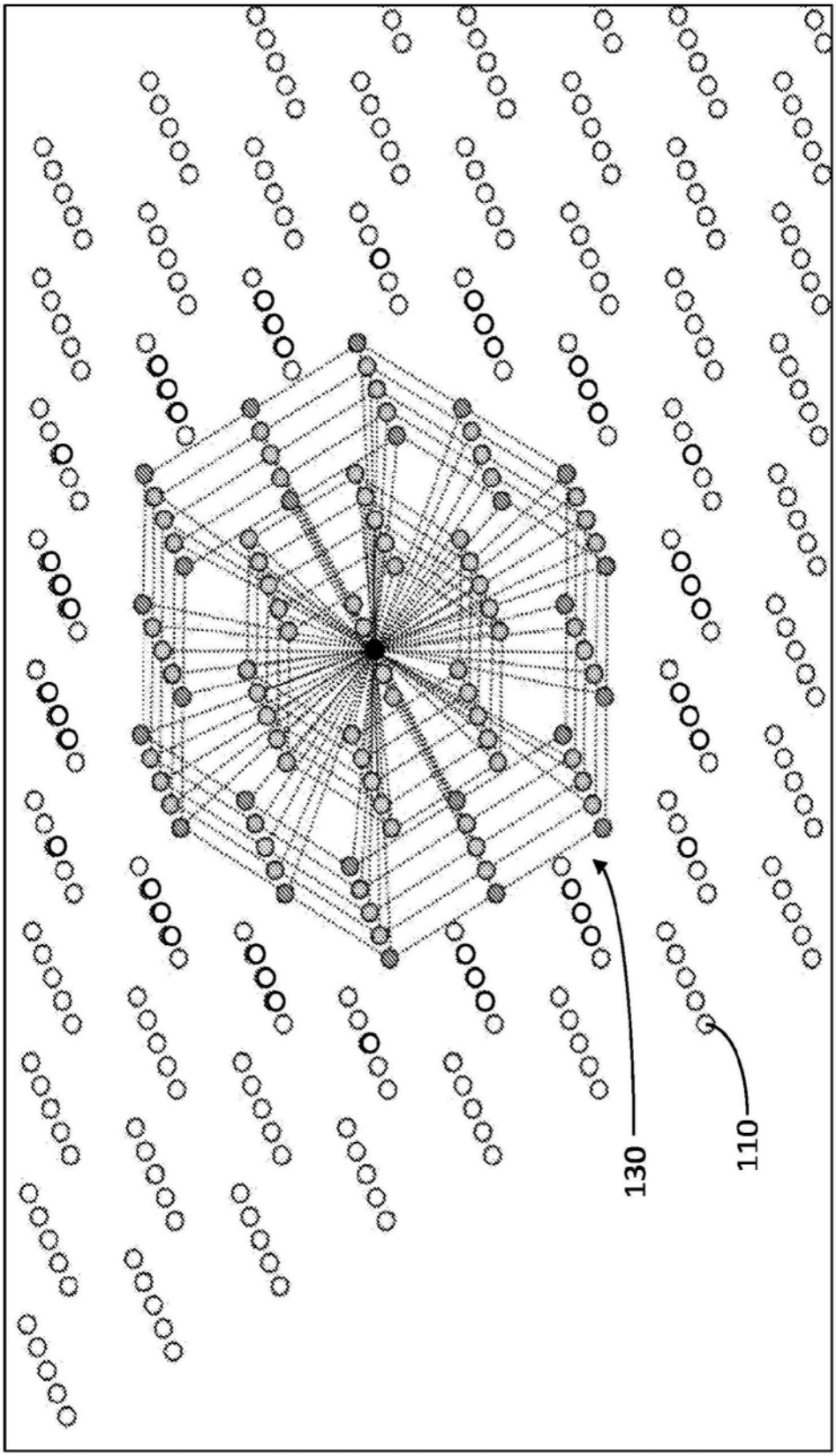


图3C

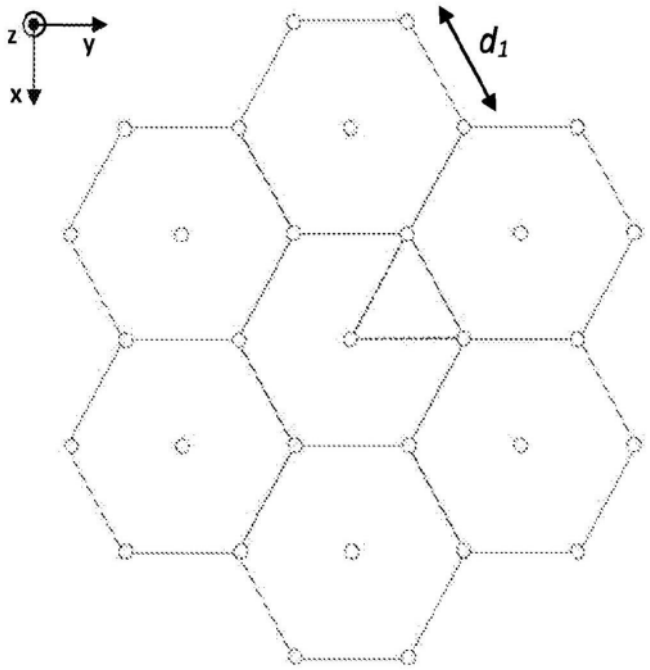


图4A

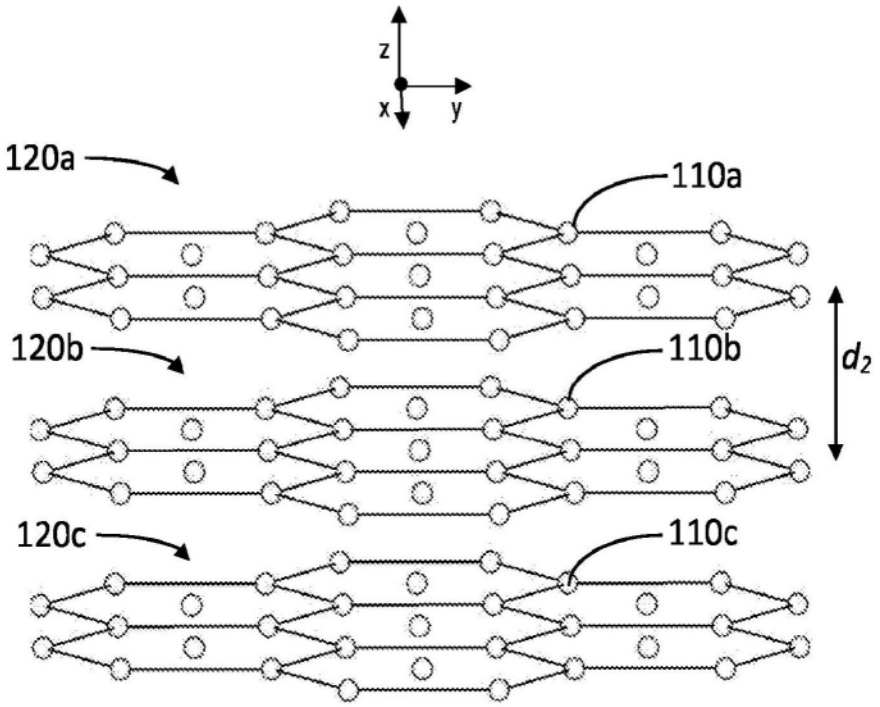


图4B

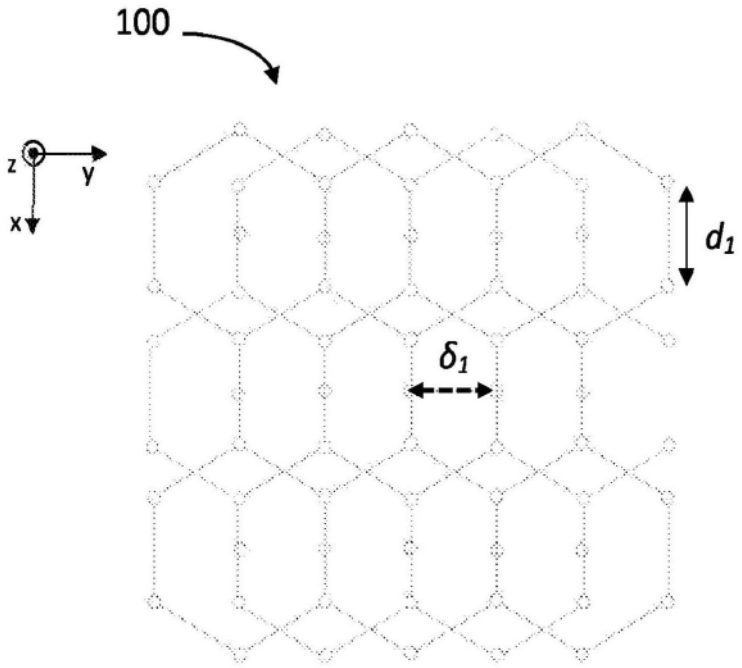


图5A

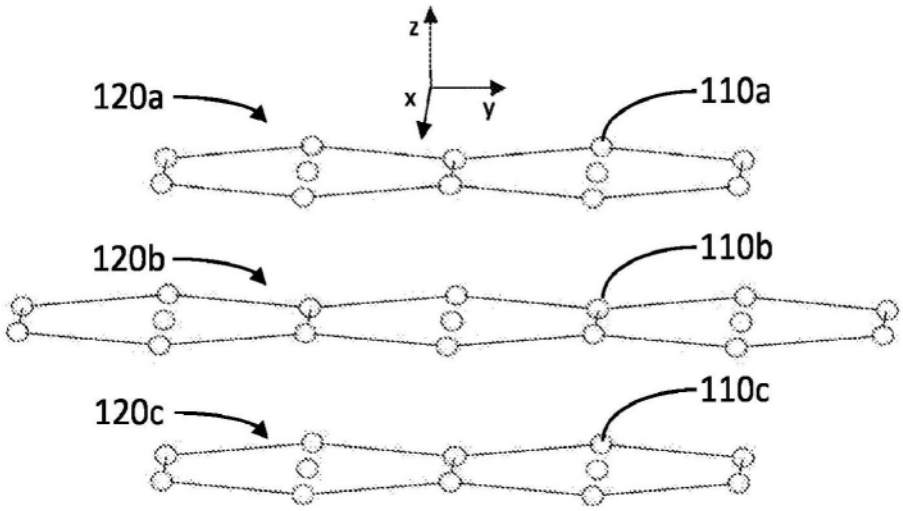


图5B

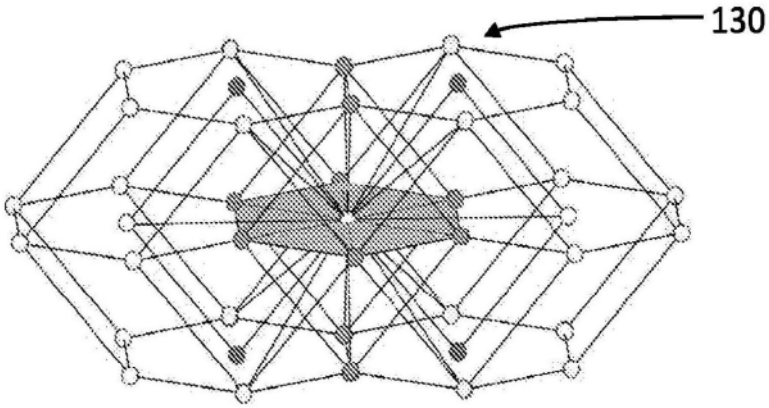


图5C

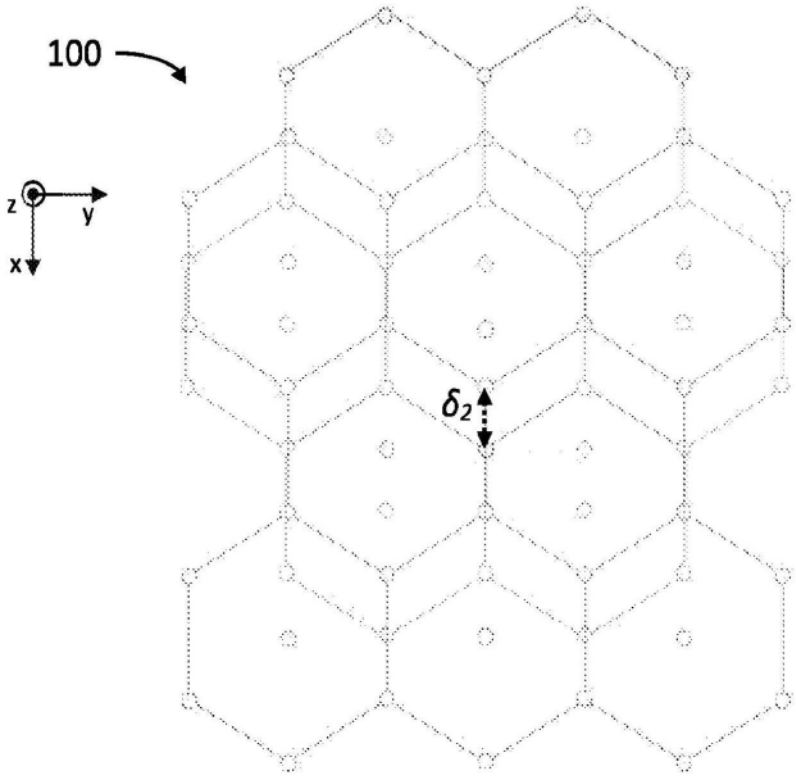


图6A

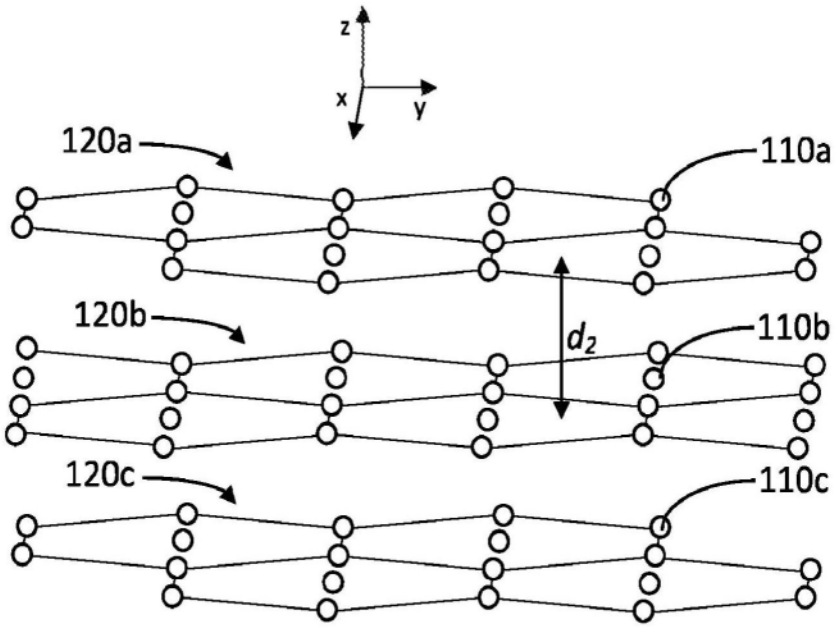


图6B

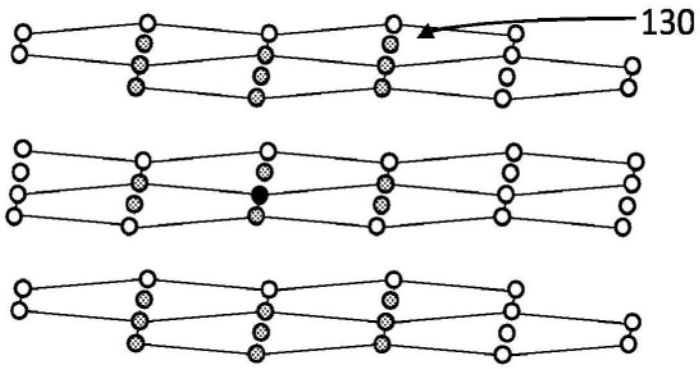


图6C

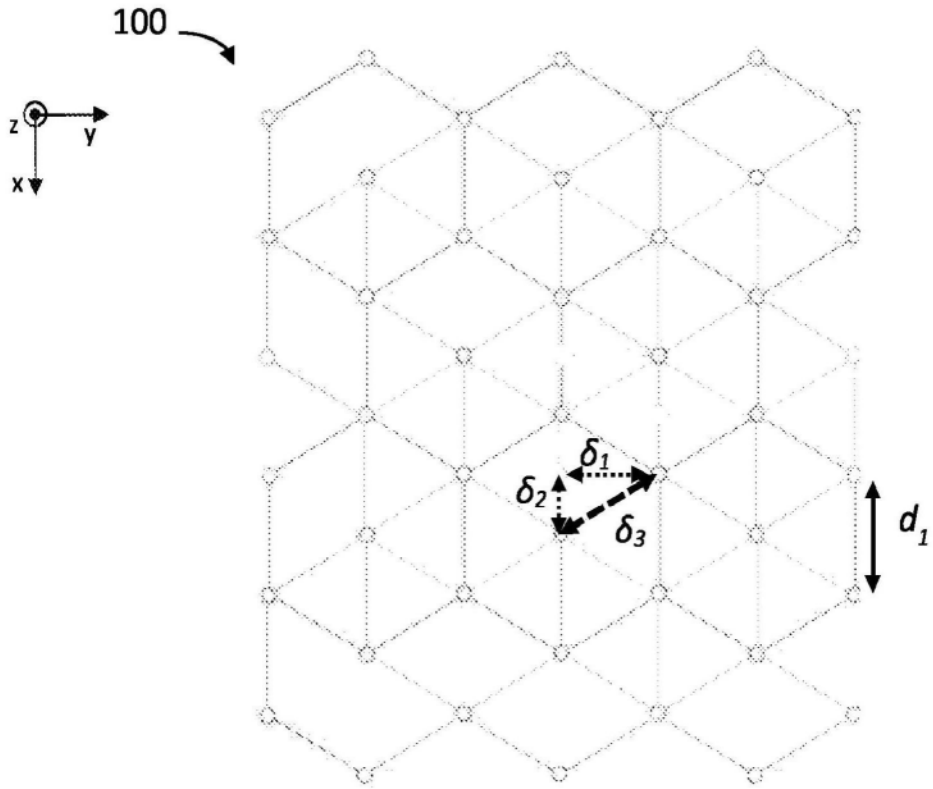

100
z
y
x
δ_1
δ_2
δ_3
d_1

图6D

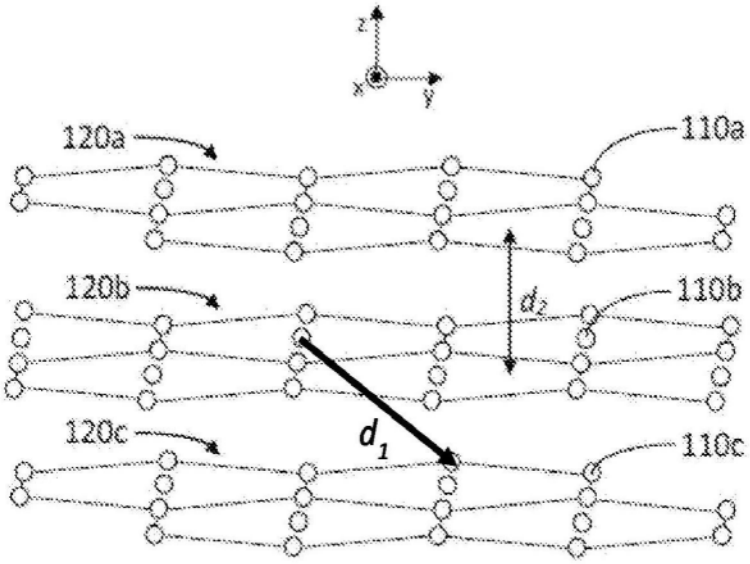

z
x
y
120a
110a
120b
d_2
110b
120c
d_1
110c

图6E

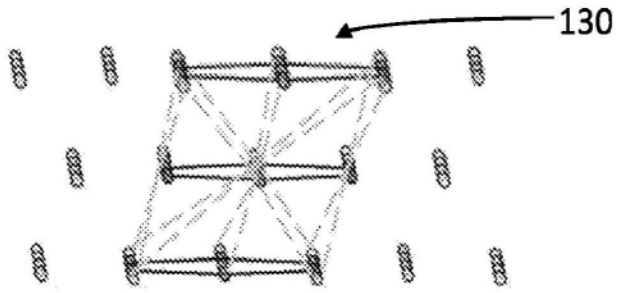


图6F

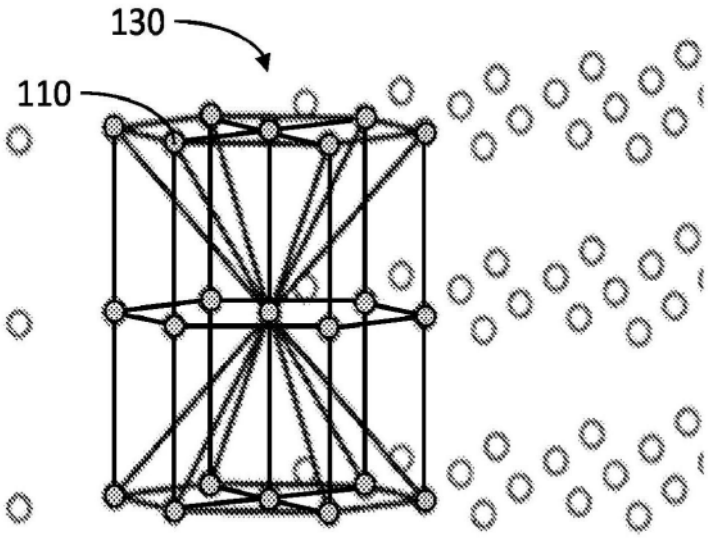


图7A

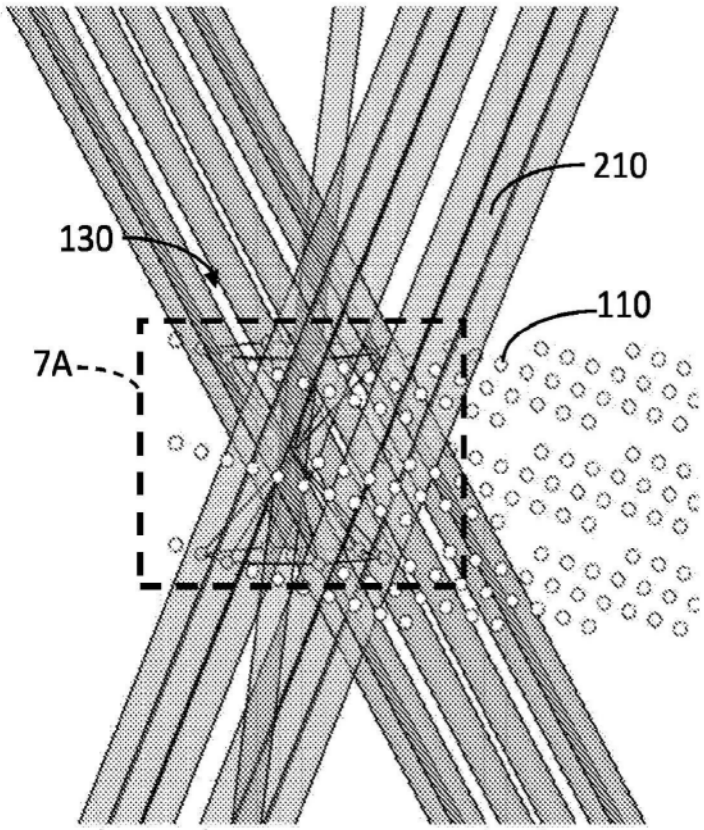


图7B

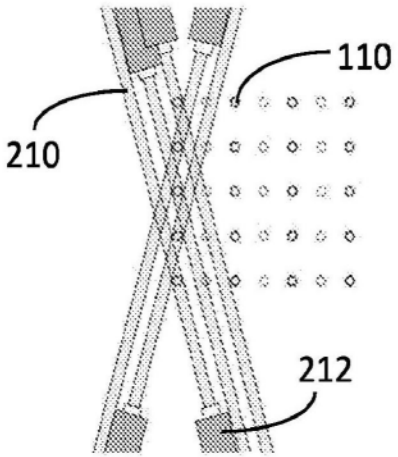


图7C

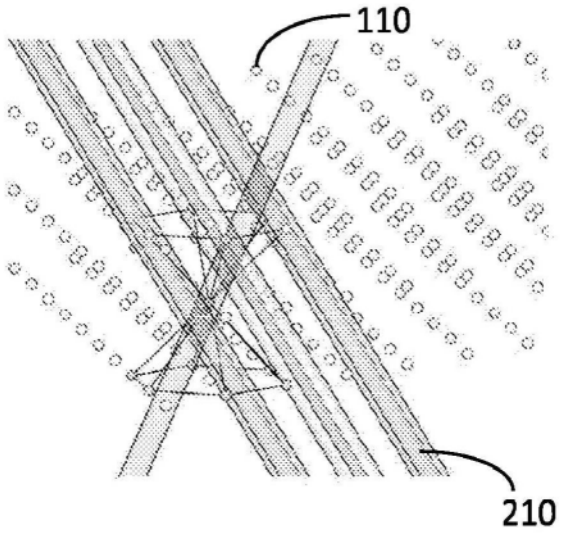


图7D

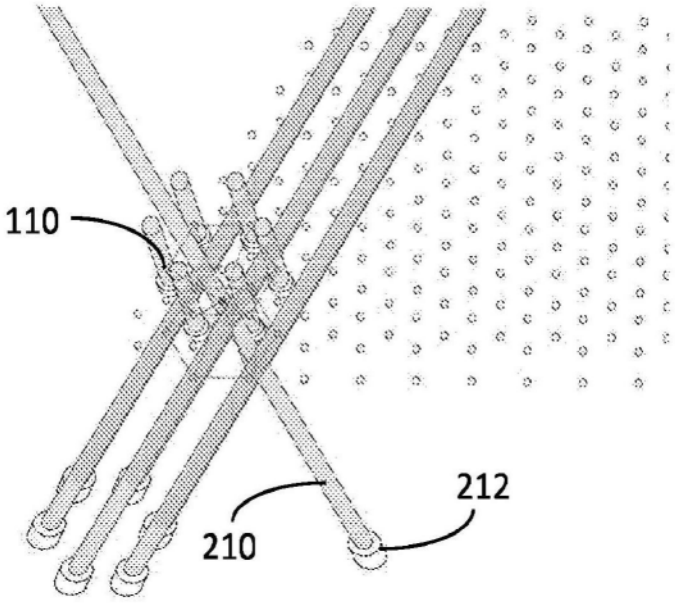


图7E

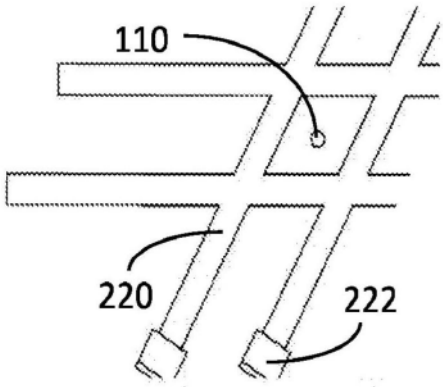


图8A

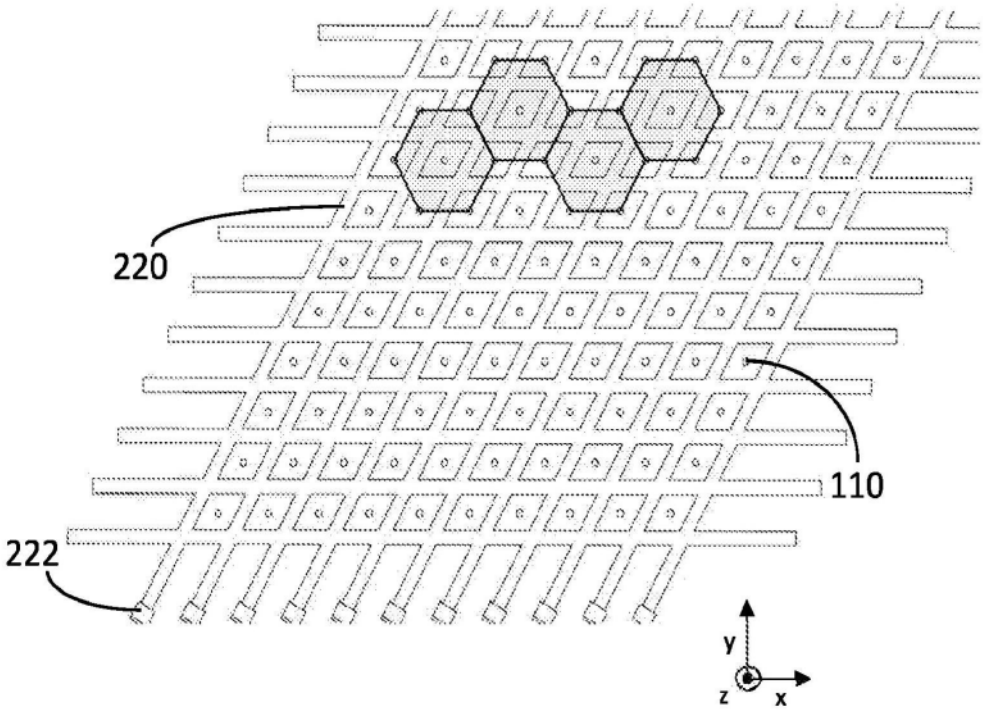


图8B

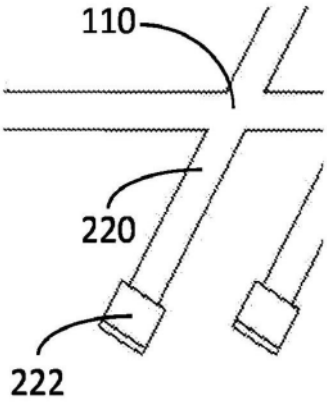


图8C

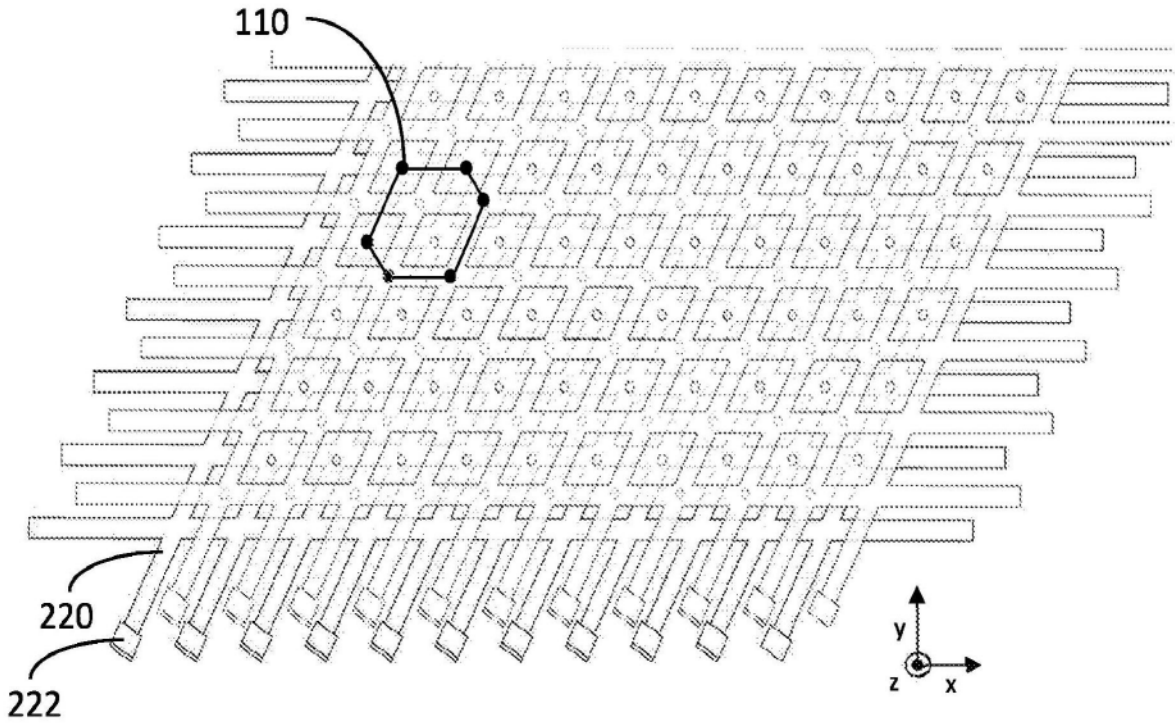


图8D

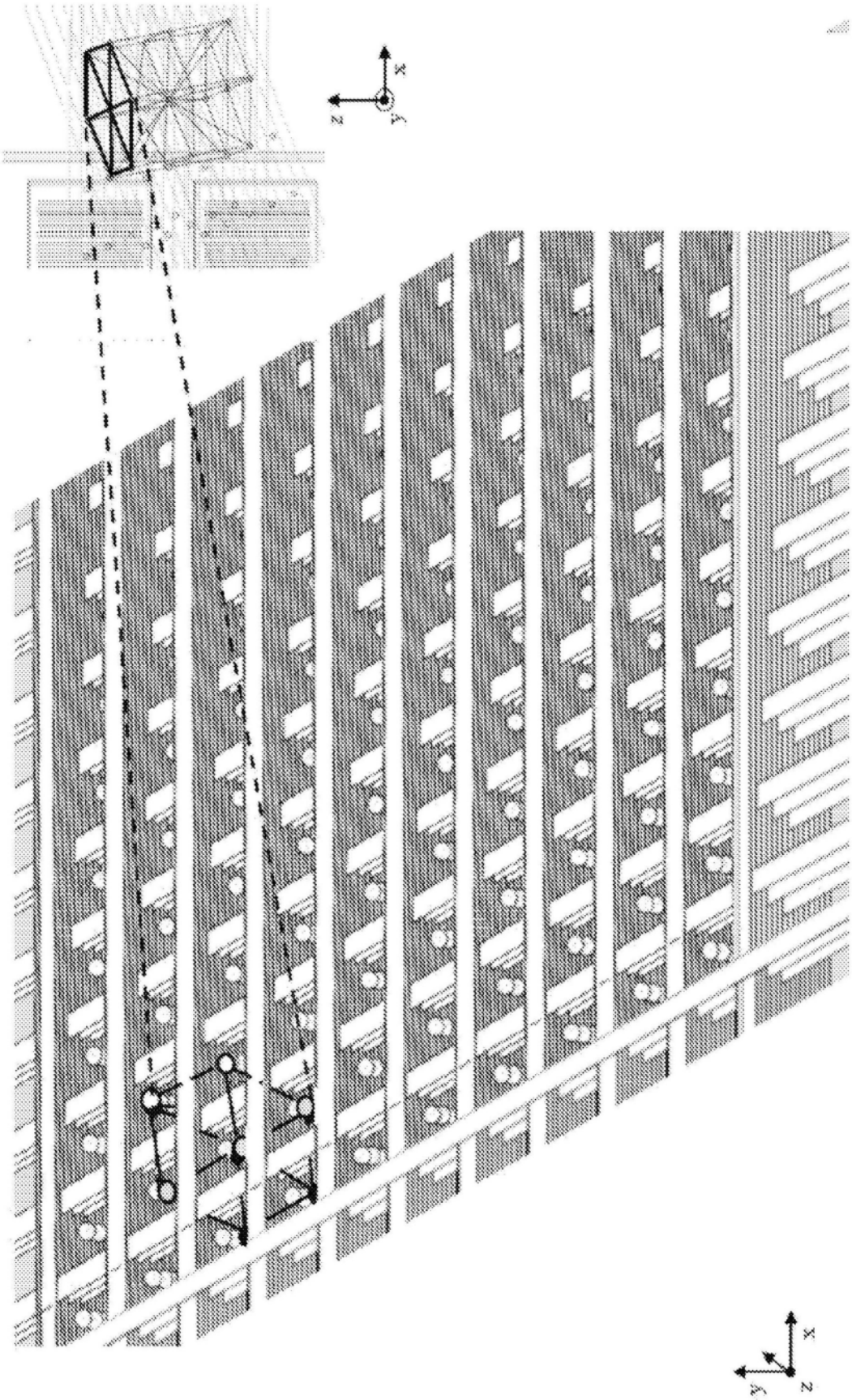


图8E

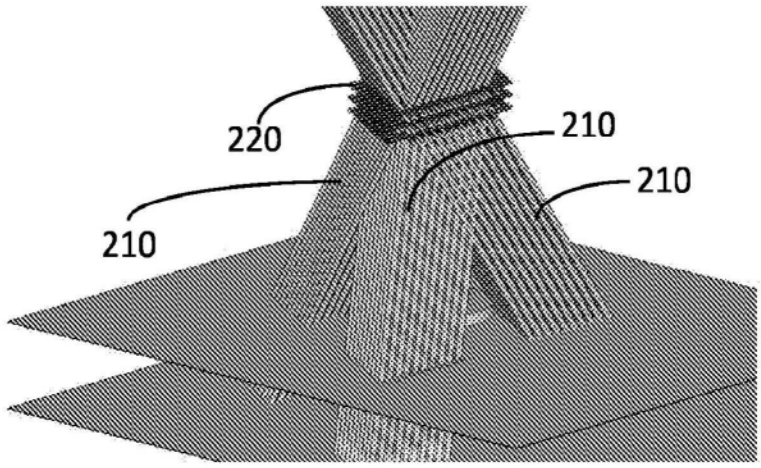


图9A

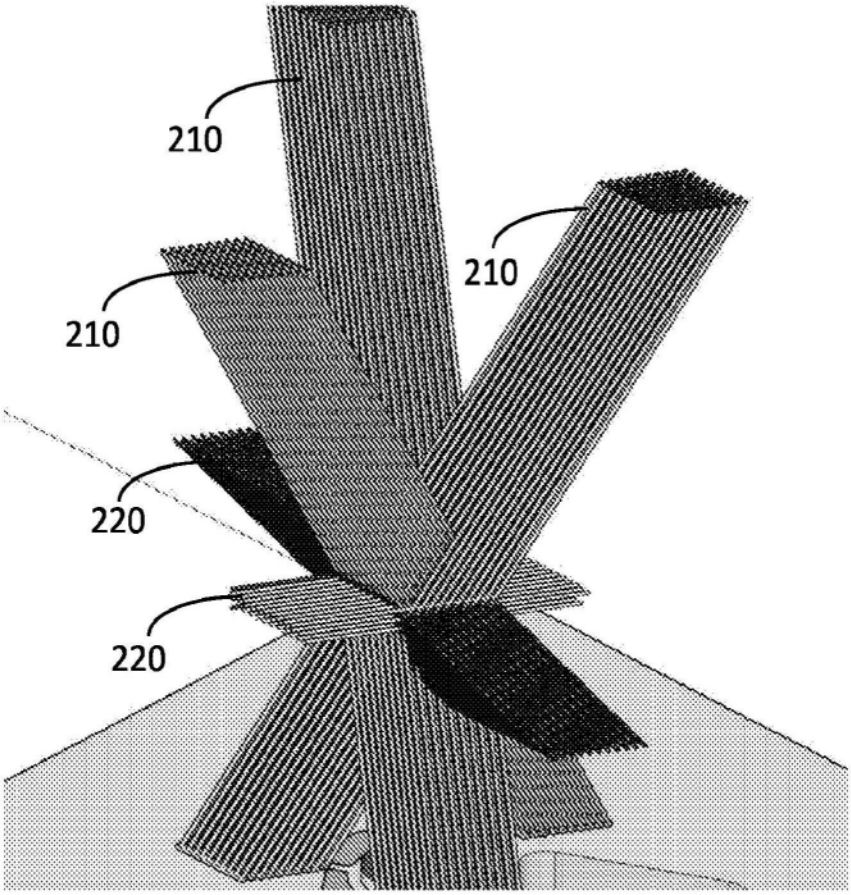


图9B

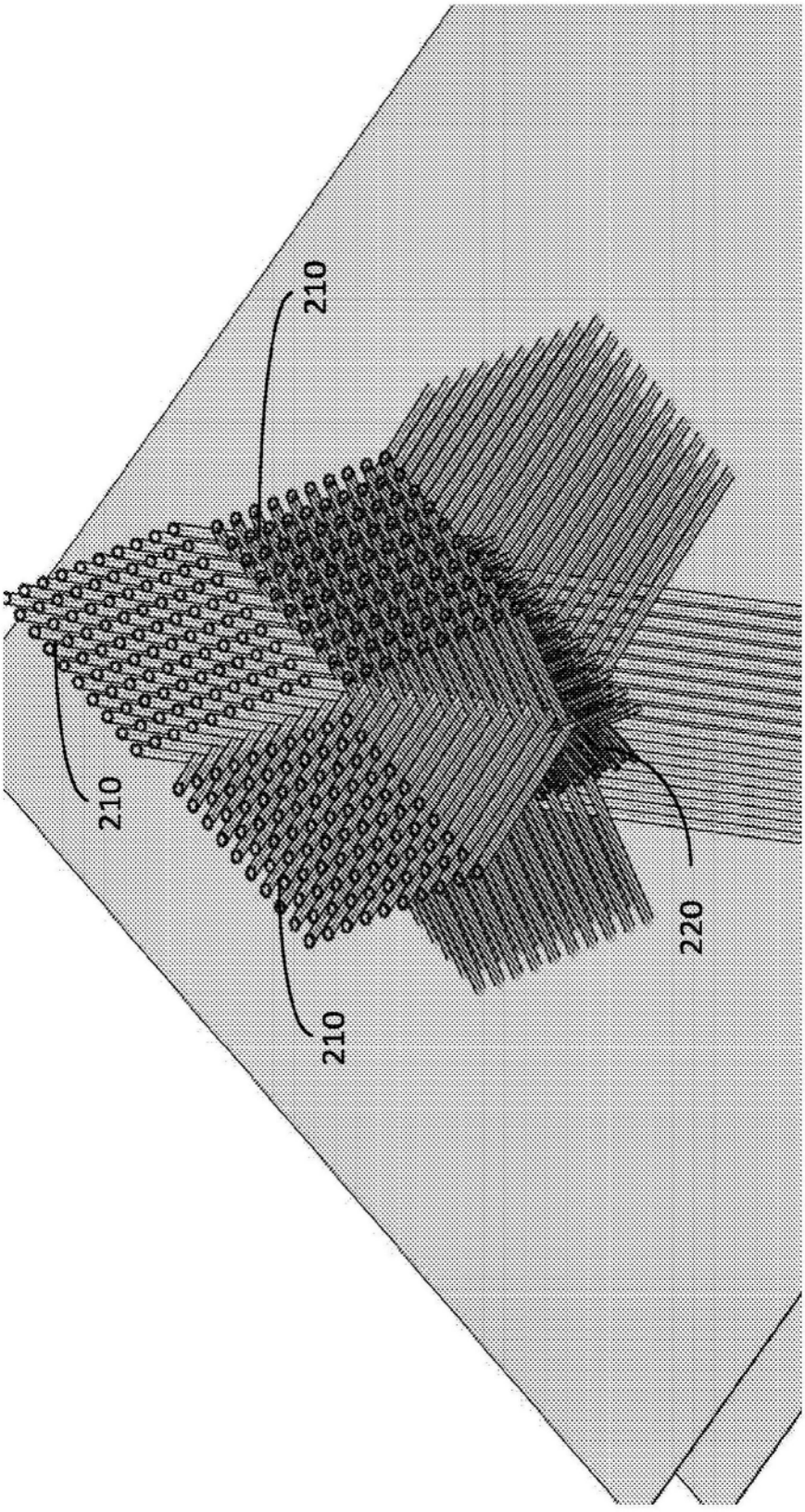


图9C

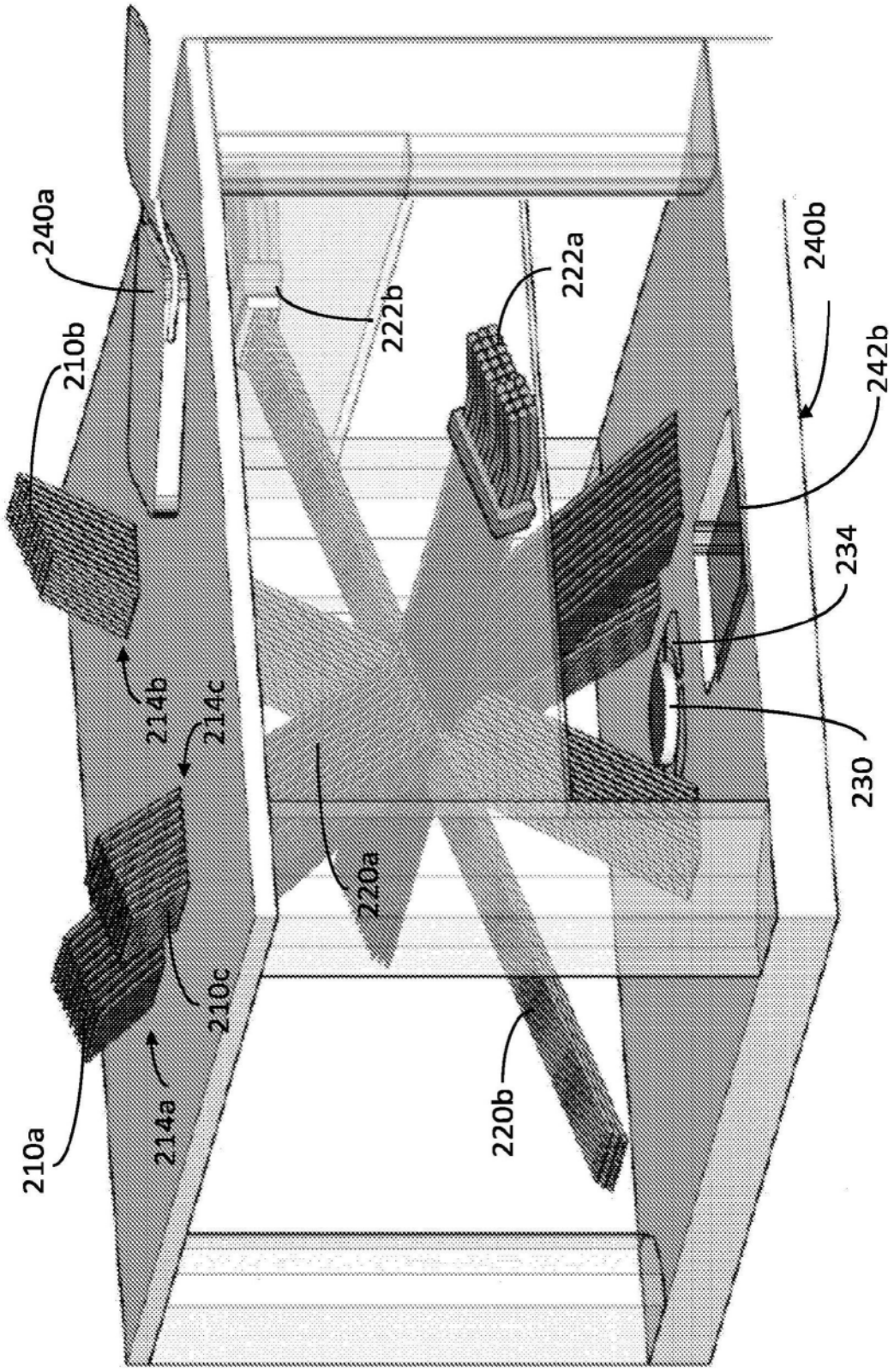

240a
210b
222b
222a
240b
242b
234
214b
214c
230
220a
210c
214a
210a
220b

图10A

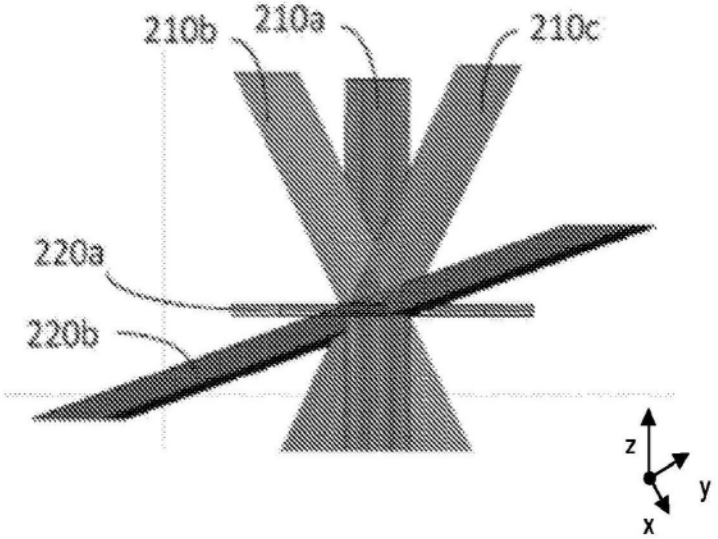


图10B

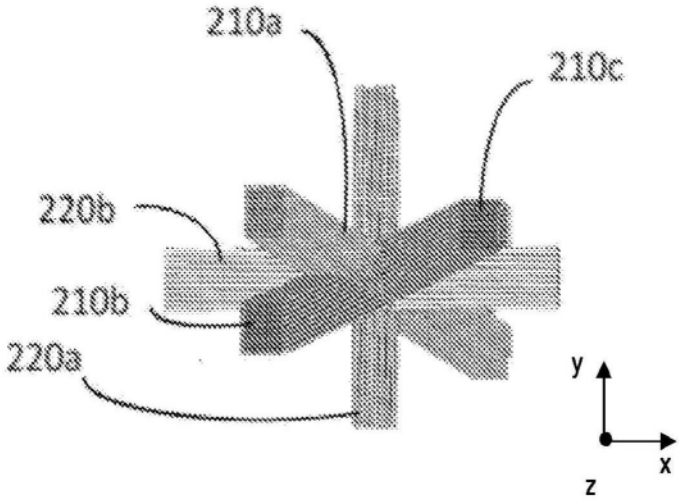


图10C

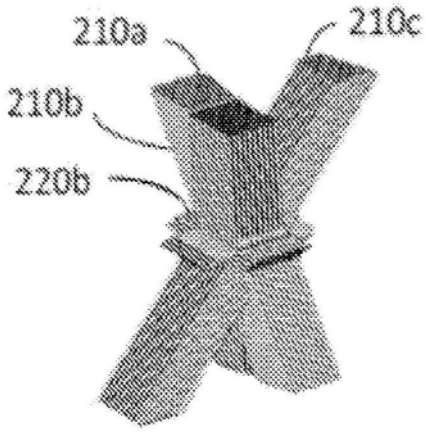


图10D

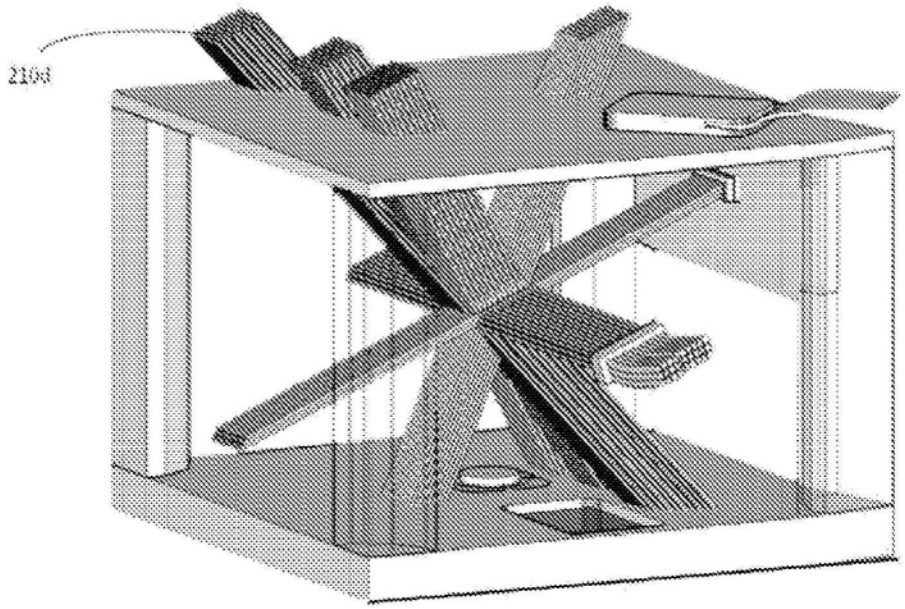


图10E

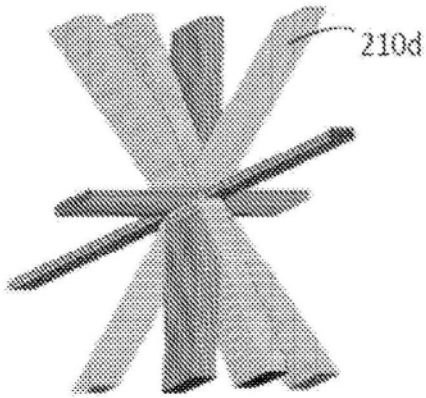


图10F

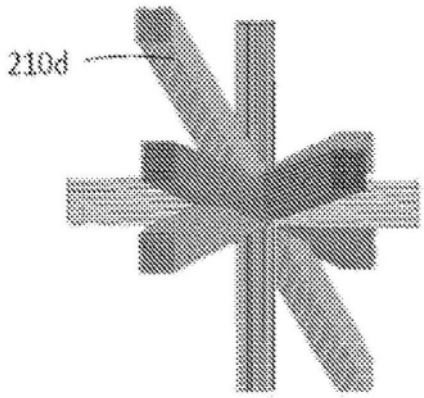


图10G

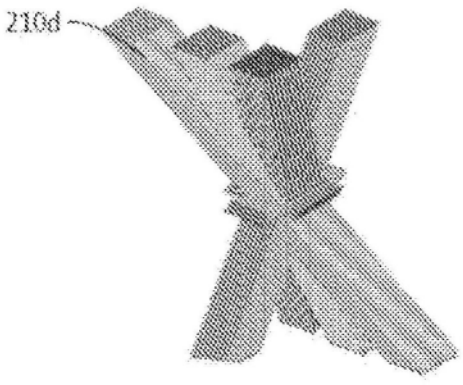


图10H

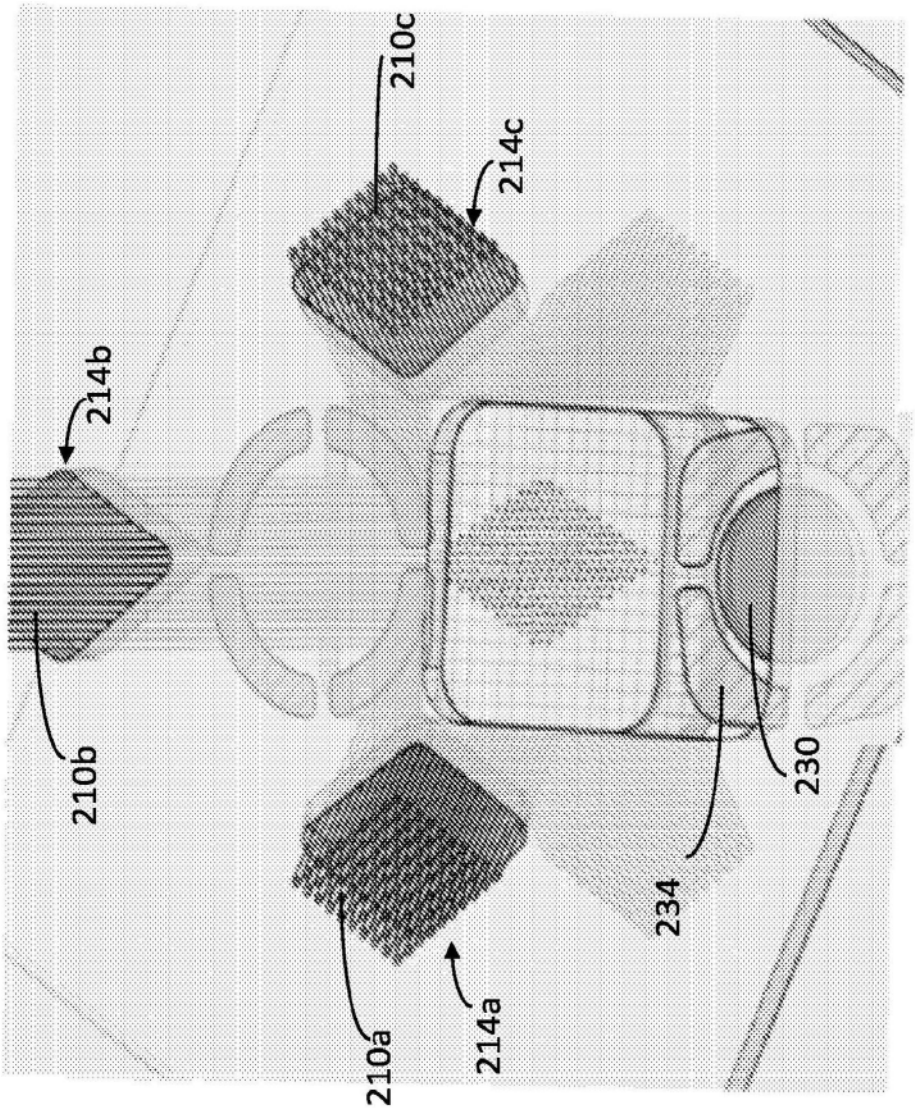


图11A

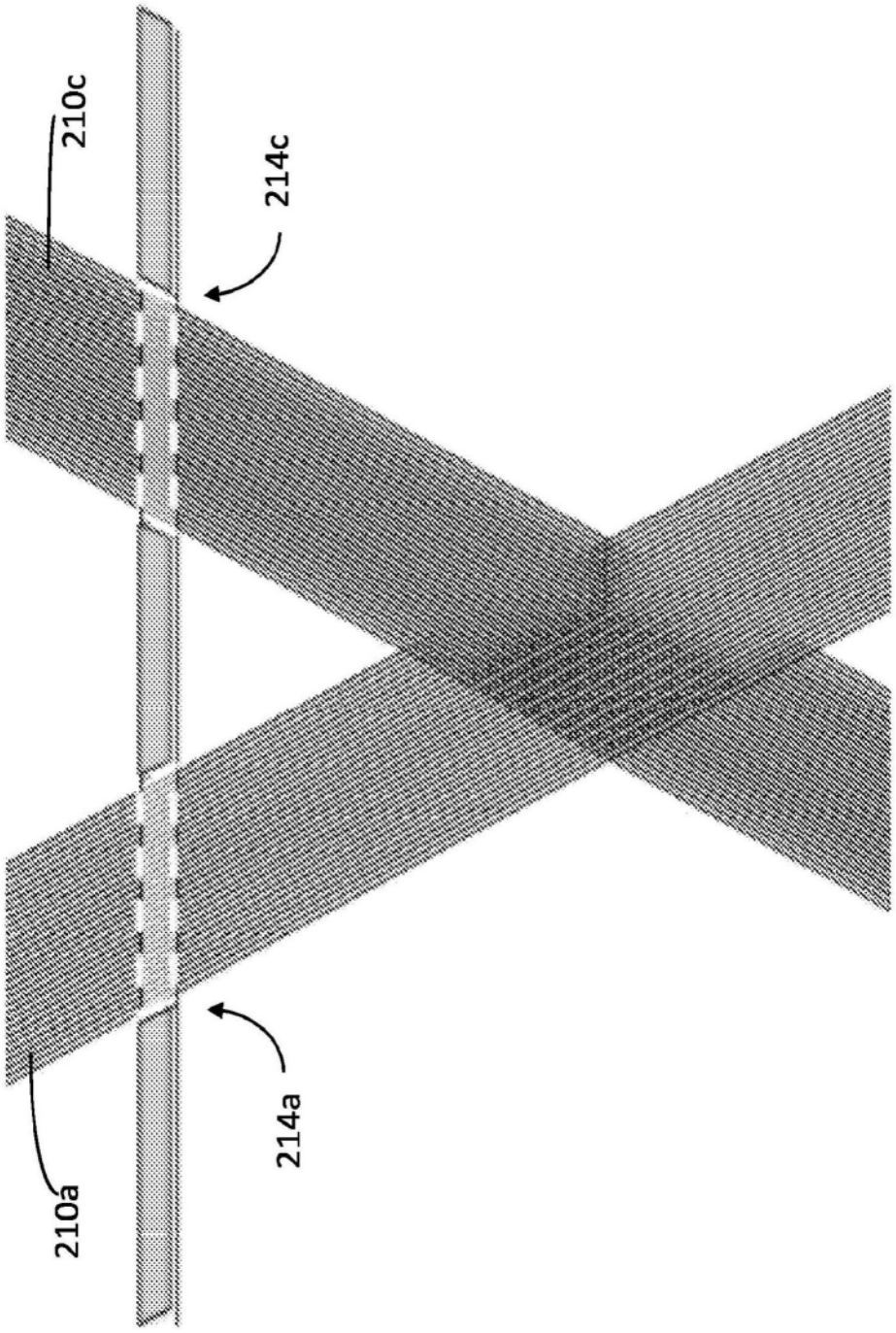


图11B

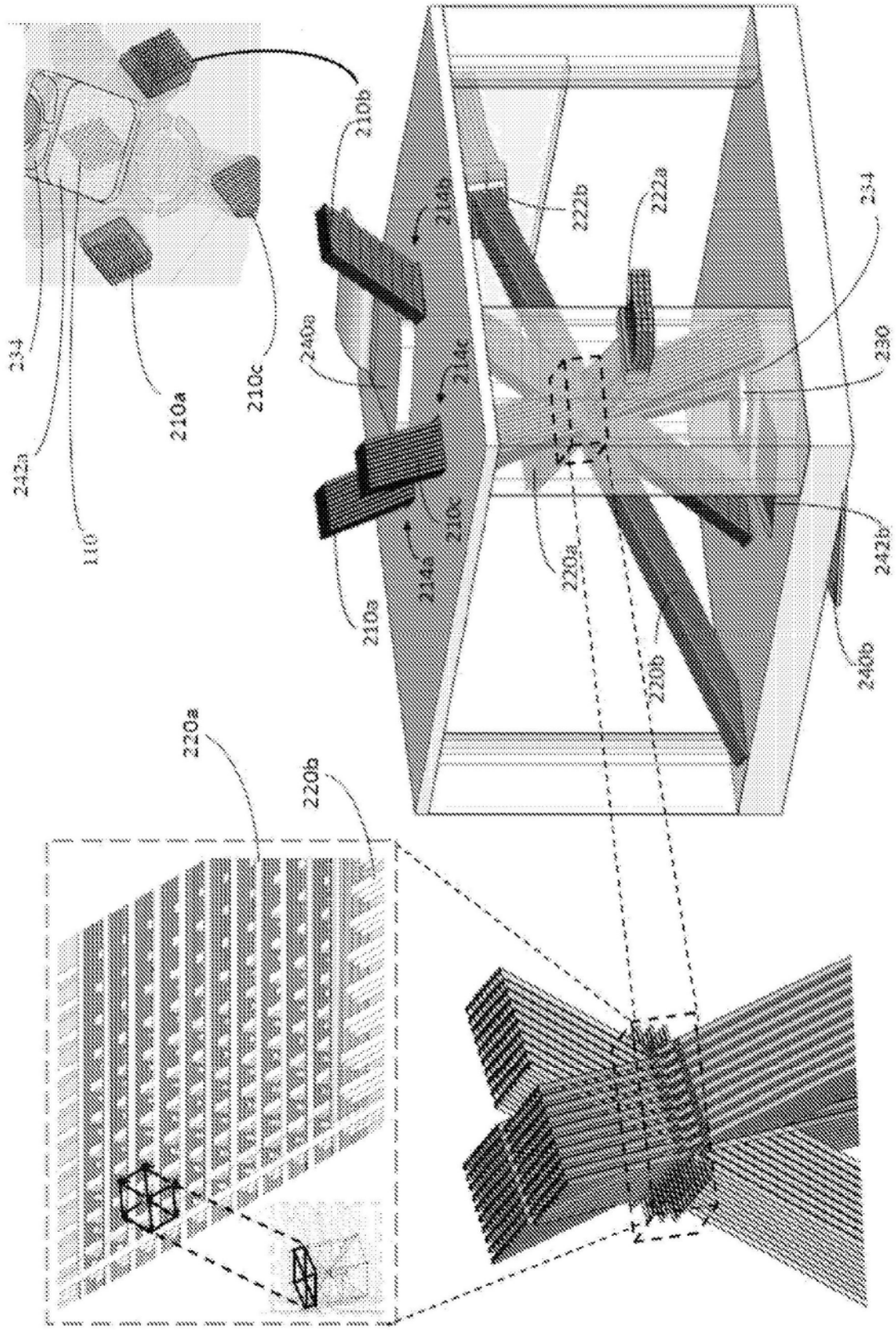

234
242a
110
210a
210c
210b
214b
222b
222a
234
240a
214c
230
210c
214a
210a
220a
242b
220b
240b
220a
220b

图12

	2D正方形网格				
	以在距离(d)处的量子比特	总 "C" 量子比特(n)	以微米(μ)计的最近邻量子比特d	以μ计的到次最近邻量子比特的最大 d	来自图的CnNOT/扇出的保真度估计
	4	4	8.0		≥0.999
	4	8	11.3		≥0.997
	4	12		16.0	≥0.992
$C^{8}NOT$	8	20		17.9	≥0.990
$C^{20}NOT$	4	24		< 22.6	≤0.988

	3D 烧绿石晶格，3层				
	以在距离(d)处的量子比特	总 "C" 量子比特(n)	以微米(μ)计的最近邻量子比特d	以μ计的到次最近邻量子比特的最大 d	来自图的CnNOT/扇出的保真度估计
	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
$C^{8}NOT$	12	56		17.9	≥0.990
	12	68		≤ 21.2	≤0.988
$C^{20}NOT$	24	92		≤ 22.7	≤0.988

	3D 烧绿石晶格，5层				
	以在距离(d)处的量子比特	总 "C" 量子比特(n)	以微米(μ)计的最近邻量子比特d	以μ计的到次最近邻量子比特的最大 d	来自图的CnNOT/扇出的保真度估计
	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
$C^{8}NOT$	24	70		17.9	≥0.990
	24	94		≤ 21.2	≤0.988
$C^{20}NOT$	36	130		≤ 22.7	≤0.988

图13