

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 12 月 1 日 (01.12.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/246715 A1

(51) 国际专利分类号:
G06E 3/00 (2006.01) **G09B 23/22** (2006.01)
G06N 10/00 (2022.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/096200

(22) 国际申请日: 2021 年 5 月 27 日 (27.05.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 中国科学技术大学 (UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) [CN/CN]; 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。

(72) 发明人: 陆朝阳 (LU, Chaoyang); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。王辉 (WANG, Hui); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。王云飞 (WANG, Yunfei); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号,

Anhui 230026 (CN)。何玉明 (HE, Yuming); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。潘建伟 (PAN, Jianwei); 中国安徽省合肥市包河区金寨路 96 号, Anhui 230026 (CN)。

(74) 代理人: 中科专利商标代理有限责任公司 (CHINA SCIENCE PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.); 中国北京市海淀区西三环北路 87 号 4-312 室, Beijing 100089 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): 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, IR, IS, IT, 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,

(54) **Title:** OPTICAL QUANTUM COMPUTING CHIP INTEGRATED WITH LIGHT SOURCE AND CONTROLLED NOT GATE, AND TEACHING SYSTEM USING SAME

(54) 发明名称: 集成光源和控制非门光子量子计算芯片及采用其的教学系统

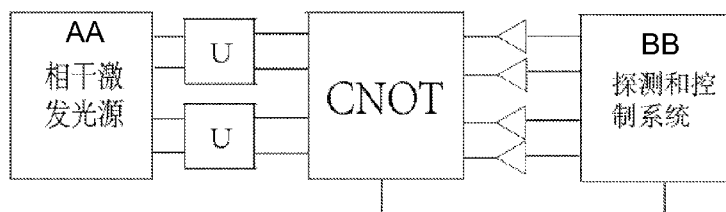


图 1

AA Coherent exciting light source

BB Detection and control system

(57) **Abstract:** An optical quantum computing chip integrated with a light source and a controlled NOT gate (CNOT). The chip comprises a coherent exciting light source, a single-bit gate, a controlled NOT gate (CNOT) circuit and a detection module. The coherent exciting light source emits two photons, and prepares photons of any single-bit state by means of two single-bit gates. The photons are input to the controlled NOT gate (CNOT) circuit, pass through the controlled NOT gate (CNOT) circuit and are detected by the detection module. By means of on-chip integration of the light source and the controlled NOT gate (CNOT), complex four-wave mixing frequency degeneracy may be avoided, and at the same time, the on-chip integration approach has the advantages of high degrees of integration, stable working conditions and low costs.

(57) **摘要:** 一种集成光源和控制非门 (CNOT) 的光量子计算芯片, 芯片包括相干激发光源、单比特门、控制非门 (CNOT) 线路和探测模块; 其中, 相干激发光源发射两个光子, 通过两个单比特门制备任意单比特态光子, 输入到控制非门 (CNOT) 线路中, 经过控制非门 (CNOT) 线路后由探测模块进行探测。通过片上集成光源和控制非门 (CNOT) 可以避免进行复杂的四波混频频率简并, 同时, 片上集成的途径具有集成度高, 工作条件稳定, 低成本等优势。

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

集成光源和控制非门光量子计算芯片及采用其的教学系统 技术领域

本公开涉及量子计算与量子光学技术领域，涉及多种光量子计算控制非门芯片设计，特别涉及一种集成光源和控制非门（CNOT）的光量子计算芯片及采用其的教学系统，适用于光量子计算、教学实验等应用领域。

背景技术

光子具有操作速度快、单比特操纵简单精确、抗噪声能力强等优势，并可为远程的原子和固态量子系统之间提供量子接口。大型光量子计算和模拟的实现，将解决若干经典计算机无法胜任的计算问题，对人类社会产生深刻影响。近年来，许多大型高科技公司强势介入量子计算，对该领域的发展起到极大的促进作用。因此，对该方向的人才培养也需要在大学阶段尽早训练。但由于该方向融合了众多学科，研究设备昂贵，技术人员短缺等原因，目前各个高校对量子计算方面的实验缺少专业的设备。因此，设计若干量子计算教学系统是非常必要且急需研制的。

在实现本公开构思的过程中，发明人发现相关技术中至少存在如下问题：

（1）光学量子逻辑门早已在多种方案下获得实现，如依靠全线性光学器件、单光子源和光子探测器可以实现非确定性的控制相位门，并可以通过量子隐形传态提高成功率，但需要消耗大量器件资源并且需要非常高的器件精度；

（2）基于四波混频的光源要做到频率简并非常复杂，要实现四波混频频率简并，必须通过两个波长不同的激光同时激发非线性材料，同时满足相位匹配条件。这一方面会增加成本，另一方面技术难度较大，且存在布拉格散射、单边激发等问题，降低光子全同性。

因此，亟需一种降低器件资源消耗并可以解决四波混频的光源需要进行频率简并的问题的光量子计算芯片。

发明内容

针对上述技术问题，本公开提供了一种集成光源和控制非门的光量子计算芯片及采用其的教学系统，以期至少部分地解决上述技术问题。

为了实现上述目的，作为本公开的一方面，提供了一种集成光源和控制非门的光量子计算芯片，所述芯片包括相干激发光源、单比特门、控制非门线路和探测模块；其中，

所述相干激发光源发射两个光子，通过两个所述单比特门制备任意单比特态光子，输入到所述控制非门线路中，经过所述控制非门线路后由所述探测模块进行探测。

其中，所述芯片将相干激发光源、单比特门和控制非门线路部分进行集成，或将相干激发光源、单比特门、控制非门线路和探测模块全部集成在半导体芯片上。

其中，所述相干激发光源采用硅波导结构、氮化硅微腔结构或周期性极化铌酸锂波导结构。

其中，周期性极化铌酸锂材料吸收两个频率为 ω_1 的光子，发射频率分别为 ω_2 和 ω_3 的信号光和闲频光；采用两个光源进而产生 2 对光子，每对光子中的一个光子会直接送入探测模块，作为预报单光子；而频率相同的两个光子会被送入线路实现控制非门的操作。

其中，所述单比特门和所述控制非门线路共同形成光量子逻辑门。

其中，所述控制非门线路包括分束器和移相器，分束器的分束比和移相器的相位需要任意可调，以用于实现么正变换。

其中，所述移相器的位移的改变是通过局部改变波导中的移相器温度控制波导折射率来实现的；所述分束器的分束比是通过马赫曾德干涉仪来改变的。

其中，所述探测模块包括集成的超导纳米线单光子探测器或通过光栅耦合器连接光纤到片外的光子数探测器。

作为本公开的另一方面，提供了一种教学系统，其中，包括如上所述的光量子计算芯片。

其中，所述教学系统还包括教学控制系统，所述教学控制系统用于

控制所述控制非门线路中移相器的相移。

附图说明

图 1 示意了根据本公开实施例的相干激发光源、控制非门线路、单光子探测模块和控制系统耦合示意图；

图 2 示意了四波混频过程原理和根据本公开实施例的基于硅的预报单光子源示意图；

图 3 示意了路径编码的单光子比特门和根据本公开实施例的通过分束器和移相器实现的单比特门线路示意图；

图 4 示意了根据本公开实施例的马赫曾德干涉仪线路示意图；

图 5 示意了控制非门原理图和根据本公开实施例的控制非门线路示意图；

图 6 示意了根据本公开实施例的集成超导纳米线单光子探测器和外接单光子探测器示意图；

图 7 示意了根据本公开实施例的基于硅波导预报单光子源的控制非门芯片教学系统；

图 8 示意了根据本公开实施例的基于氮化硅微腔预报单光子源的控制非门芯片教学系统；

图 9 示意了自发参量下转换过程和周期性极化铌酸锂波导示意图；

图 10 示意了根据本公开实施例的基于周期性极化铌酸锂波导预报单光子源的控制非门芯片教学系统。

具体实施方式

为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本公开作进一步的详细说明。

本设计的控制非门芯片教学系统整体结构示意图如图 1 所示，相干激发光源发射两个制备到路径编码 $|0\rangle$ 的光子，通过两个单比特门可以制备控制非门输入端口的任意单比特态输入。经过控制非门后由单光子探测模块进行探测，控制非门线路中移相器的相移可以通过控制系统控制。其中光源部分可通过图 2 所示的四波混频或者参量下转换过程实现。

通过任意单比特门和控制非门(C-NOT)可以实现普适量子逻辑门。如图 3, 光子比特编码在两路径上, 为实现任意么正变换需要分束器的分束比和移相器的相位可以任意调节。通过局部改变波导中的移相器温度控制波导折射率, 从而实现相位的改变。分束器的分束比则是通过一个马赫曾德干涉仪(Mach Zehnder Interferometer, MZI)来改变。如图 4 所示, 干涉仪包括两个 50:50 分束器, 其中一条干涉臂上加有 Au/Ti 的加热电极, 在通过电流后, 干涉仪两条路径之间的相位会改变, 从而改变输出口的出光强度, 达到分束比可调的目的。忽略全局相位, 移相器相当于 R_z 单比特门, 马赫曾德干涉仪相当于 R_y 单比特门, 因此图 3(ii) 的结构可以实现对单个光子比特的任意单比特门操作。

图 5(i)为实现控制非门(CNOT)的集成光路连接, 图 5 (ii)为实现控制非门的光路原理图, 其中三个分束器的反射分束比为 $1/3$, 两个分束器的反射分束比为 $1/2$ 。为了实现光路的可编程和准确调控, 同样使用马赫曾德干涉仪来实现分束比可调的分束器, 实际光路如图 5 (iii)所示。

通过单比特么正变换可以实现对于 CNOT 线路输入态的控制。CNOT 线路 c、t 两路输出可以通过集成的超导纳米线单光子探测器探测, 也可以通过光栅耦合器连接光纤到片外的光子数探测器。当 CNOT 线路 c 路输出和 t 路输出各探测到一个光子时 CNOT 操作成功, 成功概率为 $1/9$, 探测器外接电子控制器件, 可以显示 CNOT 操作是否成功并且进行后续的输出和计数。

本公开提供了基于传统 CMOS 工艺的硅基、 Si_3N_4 以及激光直写的铌酸锂集成 CNOT 芯片。该芯片将光源、线路部分进行集成, 或将光源、线路和探测部分全部集成在半导体芯片上。其中光源部分可以通过多种材料实现。本专利提供了利用 Si 或 Si_3N_4 的微腔或波导中通过四波混频的过程提供单光子。如图 2(i)所示, 材料吸收两个频率为 ω_0 的光子, 发射频率分别为 ω_1 和 ω_2 的信号光和闲频光。由于采用了两个光源, 因此光源可以产生 2 对光子。实验时, 每对光子中的一个光子会直接送入探测器, 当做预报单光子; 而频率相同的两个光子会被送入线路实现 CNOT

操作。这种设计的好处在于不用产生频率简并的光子对，极大的降低了对光源的要求。

图 2(ii)所示为基于波导的光源部分，光源的输入输出由光栅耦合，此光源设计适合基于硅的波导。然而，一种更好的设计是基于硅或者氮化硅微环腔的四波混频光源。该设计可以天然的达到相位匹配条件，且光子相干长度可达毫米甚至厘米级别。泵浦光输入由 50:50 的分束器耦合到两个模式的波导中，通过在低阶模式一路加适当的相位延迟可以提高出射光子纯度；环形结构是为了节省空间，同时增加出射光子纯度和转换效率，并且出射光子会直接耦合到波导中。相干激发多个这样的结构的光源可以保持很高的光子不可分辨性。冗余的激发光由方向耦合器和波导出芯片，避免影响整个芯片的稳定性。

由于产生的下转换光子直接耦合到波导中，自身的效率极高。为了得到高的预报效率，我们一种方法是将产生的光子通过波导耦合到单模光纤（或多模光纤）中，预报效率可高达 80%以上。另一种方法是直接在芯片上生长超导纳米线单光子探测器，整个芯片在~2 K 温度下运行，预计预报效率能达到 95%以上。

周期性极化铌酸锂材料可以发生准相位匹配的二阶自发参量下转换非线性过程，由于二阶非线性系数通常比三阶非线性系数高很多，此过程比三阶的自发四波混频过程更容易发生，相同泵浦激光功率下可以得到压缩系数远远高于硅基、氮化硅等材料的压缩真空态。通过二阶自发参量下转换过程，周期性极化铌酸锂波导可以制成高预报效率、高纯度、高不可分辨性的单光子源。如图 9(i)，频率为 ω_0 的光子通过自发参量下转换过程转化为 ω_1 和 ω_2 的信号光和闲频光。铌酸锂是铁电晶体，每一个晶胞单元的电偶极矩取向取决于该单元中铌和锂离子的位置。通过强电场可以反转晶体结构，从而可以制成周期性排列的极化铌酸锂晶体。如图 9(ii)所示周期性铌酸锂波导。

本设计通过周期性极化铌酸锂波导的自发参量下转换实现高效率的预报单光子源。基于周期性铌酸锂波导预报单光子源的集成量子线路如图 10 所示。

实施例 1

在本公开的实施例 1 中，提供了一种基于硅光源的集成小型化光量子控制非门芯片教学系统，该集成光量子控制非门芯片集成了相干激发的预报单光子源、集成控制非门线路、单光子探测器模块和教学控制系统，可应用于光量子控制非门演示教学，Bell 态制备和检验教学演示。

在本实施例中，如图 1 所示，包括两个相干激发的预报单光子源，两个用于制备 CNOT 门输入的单比特门线路，CNOT 门线路和单光子探测和控制系统。

在本实施例中，如图 2 所示，泵浦脉冲激光通过分束器分束相干激发两个硅波导预报单光子源，通过硅波导中三阶非线性的四波混频过程，产生信号光和闲频光子对作为 CNOT 线路输入和预报光子。冗余的背景激发光会由波导导出芯片以避免引起噪声影响。图 2(i)为四波混频过程，图 2(ii)为硅波导预报单光子源。

在本实施例中，光源输出的光子态为 $|0\rangle$ 态，为实现任意比特的 CNOT 门端口输入，需要在光源和 CNOT 输入端口之间接入单比特控制门，如图 3(i)所示。可以证明，移相器可以对单光子路径编码比特施加一个 R_z 旋转操作，

$$U_p(\theta_1) = \begin{pmatrix} e^{i\theta_1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = R_z(-\theta_1)$$

其中， U_p 表示移相器对光子比特的么正变换， θ_1 表示移相器使光子上面一路相对下面一路的相移， $R_z(-\theta_1)$ 是量子比特旋转算符，使量子比特在 Bloch 球面上绕 Z 轴旋转 $-\theta_1$ 度。

马赫曾德干涉仪可以对单光子路径编码比特施加一个 R_y 旋转操作，

$$U_m(\theta_2) = e^{i\frac{\theta_2}{2}} \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta_2}{2} & -\sin\frac{\theta_2}{2} \\ \sin\frac{\theta_2}{2} & \cos\frac{\theta_2}{2} \end{pmatrix} = R_y(\theta_2)$$

其中， U_m 表示马赫曾德干涉仪对光子比特的么正变换， θ_2 表示马赫曾德干涉仪中移相器使光子上面一路相对下面一路的相移， $R_y(\theta_2)$ 是量子比特旋转算符，使量子比特在 Bloch 球面上绕 Y 轴旋转 θ_2 度。

经图 3(ii)所示线路可以将光子路径编码比特制备到任意的态上。马赫曾德干涉仪如图 4 所示。

在本实施例中，如图 5 所示，控制非门(CNOT 门)由三个分束比为 1/3 和两个分束比为 1/2 的分束器组成，当控制比特 (control bit) 输出端口 c 和目标比特 (target bit) 输出端口同时各接收到一个光子信号时，控制非门操作成功，计数控制系统记录此次计数，否则控制非门操作失败，丢弃此次计数。

在本实施例中，单光子探测器可以由直接集成到片上的超导纳米线单光子探测器组成，也可以通过光栅耦合器耦合到光纤中，连接到片外的单光子探测器中进行探测。图 6(i)为超导纳米线单光子探测器示意图，图 6(ii)为外接片外单光子探测器示意图。

在本实施例中，如图 7 所示，相干激发光源、CNOT 操作线路，单光子探测器如图示方式连接。调节控制非门线路中各分束器的分束比，并通过改变单比特门线路各移相器相移改变 CNOT 门线路输入态，观察输出端口的计数，进行 CNOT 门演示性操作教学实验。

实施例 2

在本实施例中，光源部分与实施例 1 相比改用氮化硅微腔结构，在微腔中发生四波混频过程产生信号光子和闲频光子对，作为 CNOT 门输入和预报光子。如图 8 所示，相干激发的氮化硅微腔光源、CNOT 门线路和单光子探测模块按如图方式连接。调节控制非门线路中各分束器的分束比，并通过改变单比特门线路各移相器相移改变 CNOT 门线路输入态，观察输出端口光子计数，进行 CNOT 门线路演示性教学实验。本实施例案例中，探测器也可分为片上集成型或者外接型两种。

实施例 3

在本实施例中，光源部分与实施例 1 相比改用周期性极化铌酸锂波导结构，在周期性极化铌酸锂波导中会发生准相位匹配的二阶非线性的自发参量下转换过程，如图 9(i)所示，频率为 ω_0 的光子通过自发参量下转换过程转化为 ω_1 和 ω_2 的信号光和闲频光，作为 CNOT 门线路的输入光子和预报光子。铌酸锂是铁电晶体，每一个晶胞单元电偶极矩取向取决于该单元中铌和锂离子的位置。通过强电场可以反转晶体结构，从而可以制成周期性排列的极化铌酸锂晶体。如图 9(ii)所示周期性铌酸锂波导。

在本实施例中，按照图 10 方式连接相干激发的周期性极化铌酸锂波导预报光源、CNOT 门线路和单光子探测模块。调节控制非门线路中个分束器的分束比，并通过改变单比特门线路各移相器相移改变 CNOT 门线路输入态，观察输出端口光子计数，进行 CNOT 门线路演示性教学实验。

需要说明的是，实施例和图 2 仅仅展示一种等效单比特量子逻辑门线路，马赫曾德干涉仪和移相器数目及连接方式不限于本实施例，即制备 CNOT 门线路输入态的单比特门线路不限于本实施例。

对所公开的实施例，本公开的多模式光量子逻辑门线路具有所有模式全连通的特点，即能实现所有模式间的干涉。

综上所述，与现有技术相比，本公开的集成光源和控制非门的光量子计算芯片及采用其的教学系统至少具有如下有益效果之一：

(1) 本公开通过片上集成光源和控制非门可以避免进行复杂的四波混频频率简并，同时，片上集成的途径具有集成度高，工作条件稳定，低成本等优势。

(2) 通过片上集成光源、低损耗集成光学元件和光学镀膜的方法，这种光量子芯片可以达到较低光学损耗；

(3) 满足从输入模式准直器到收光耦合器具有相等的光程，即每个收光耦合器能够具有接近相同的耦合收集效率；

(4) CNOT 门输出连接光子数探测器，结合输入端连接光源和单比特门，可以实现 CNOT 门演示性操作实验和纠缠态制备和检验实验；

(5) 具有任意可编程的单比特门和 CNOT 门，通过 CNOT 门输出端连接光子数非破坏性探测器，可以根据特定需要连接实现可编程普适量子计算芯片；

(6) CNOT 门操作可以通过调节分束器反射分束比为 1 取消，增加了刻蚀后芯片的可编程性。

以上所述的具体实施例，对本公开的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，应理解的是，以上所述仅为本公开的具体实施例而已，并不用于限制本公开，凡在本公开的精神和原则之内，所做的任

何修改、等同替换、改进等，均应包含在本公开的保护范围之内。

权利要求

1、一种集成光源和控制非门的光量子计算芯片，所述芯片包括相干激发光源、单比特门、控制非门线路和探测模块；其中，

所述相干激发光源发射两个光子，通过两个所述单比特门制备任意单比特态光子，输入到所述控制非门线路中，经过所述控制非门线路后由所述探测模块进行探测。

2、根据权利要求 1 所述的光量子计算芯片，所述芯片将相干激发光源、单比特门和控制非门线路部分进行集成，或将相干激发光源、单比特门、控制非门线路和探测模块全部集成在半导体芯片上。

3、根据权利要求 1 所述的光量子计算芯片，所述相干激发光源采用硅波导结构、氮化硅微腔结构或周期性极化铌酸锂波导结构。

4、根据权利要求 3 所述的光量子计算芯片，周期性极化铌酸锂材料吸收两个频率为 ω_0 的光子，发射频率分别为 ω_1 和 ω_2 的信号光和闲频光；采用两个光源进而产生 2 对光子，每对光子中的一个光子会直接送入探测模块，作为预报单光子；而频率相同的两个光子会被送入线路实现控制非门的操作。

5、根据权利要求 1 所述的光量子计算芯片，所述单比特门和所述控制非门线路共同形成光量子逻辑门。

6、根据权利要求 1 所述的光量子计算芯片，所述控制非门线路包括分束器和移相器，分束器的分束比和移相器的相位需要任意可调，以用于实现么正变换。

7、根据权利要求 6 所述的光量子计算芯片，所述移相器的位移的改变是通过局部改变波导中的移相器温度控制波导折射率来实现的；所述分束器的分束比是通过马赫曾德干涉仪来改变的。

8、根据权利要求 1 所述的光量子计算芯片，所述探测模块包括集成的超导纳米线单光子探测器或通过光栅耦合器连接光纤到片外的光子数探测器。

9、一种教学系统，包括如权利要求 1-8 任一项所述的光量子计算芯片。

10、根据权利要求 9 所述的教学系统，所述教学系统还包括教学控制系统，所述教学控制系统用于控制所述控制非门线路中移相器的相移。

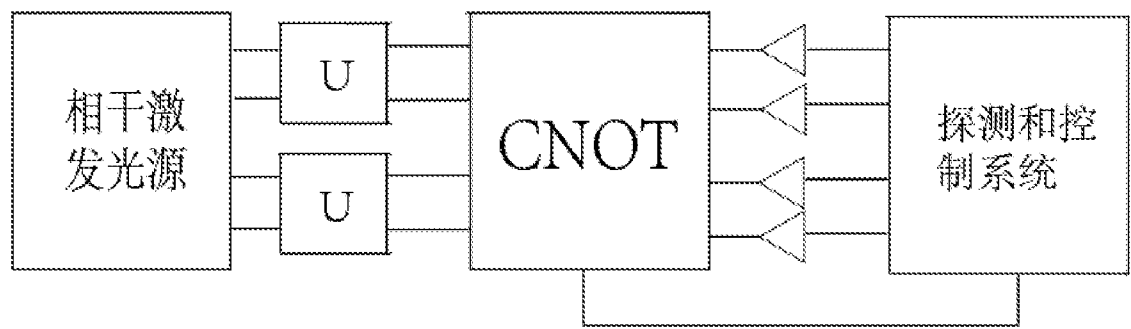


图 1

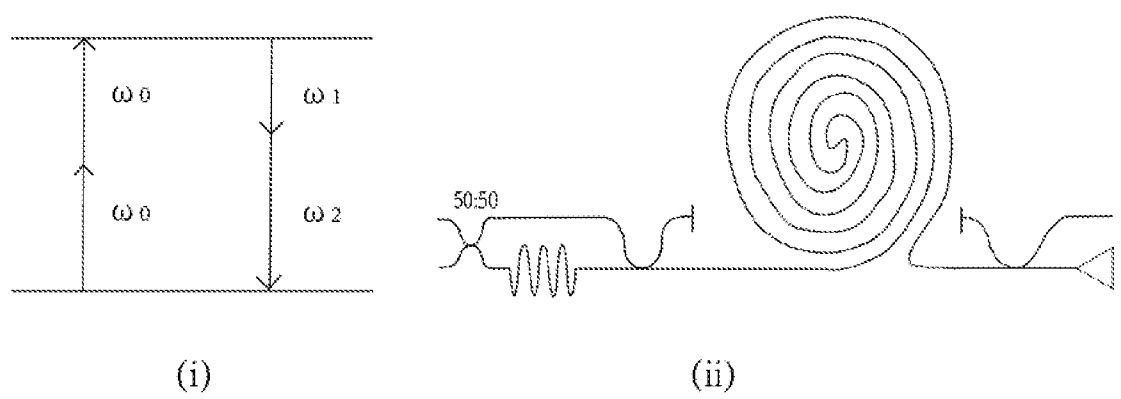


图 2

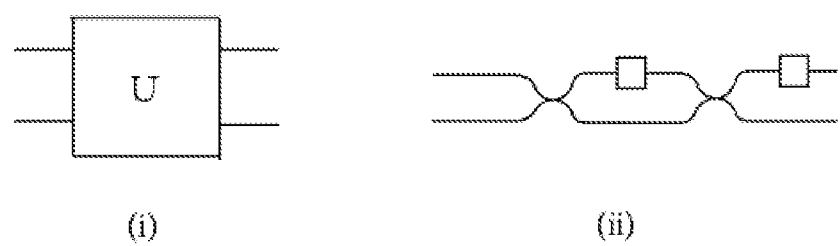


图 3

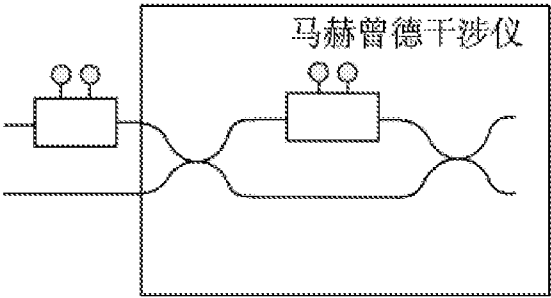


图 4

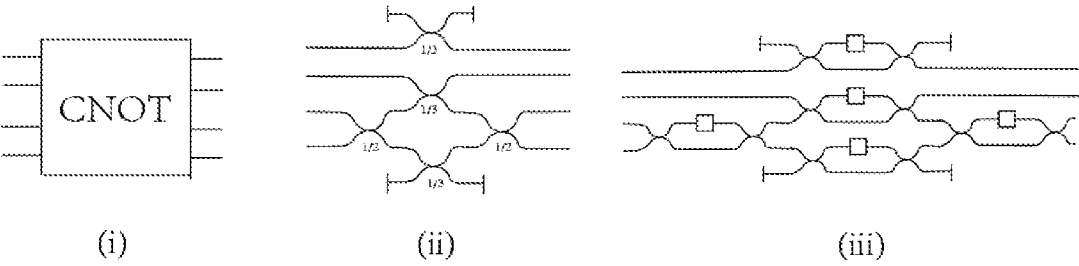


图 5

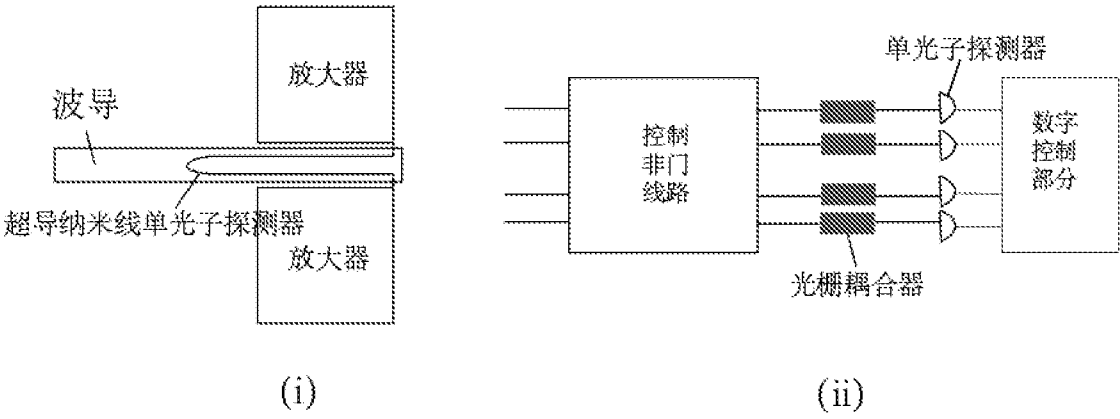


图 6

3/3

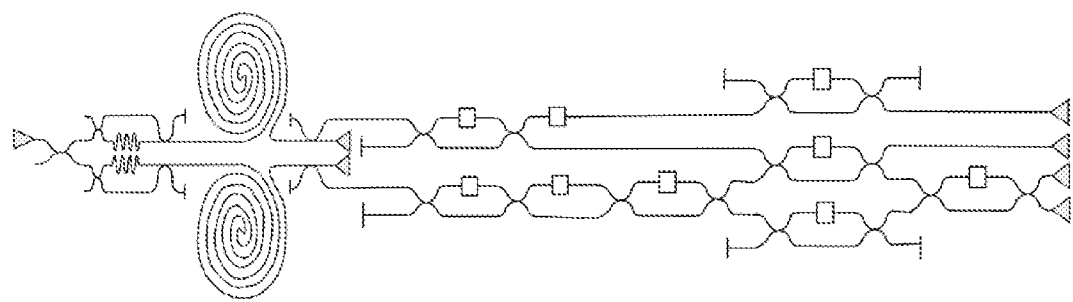


图 7

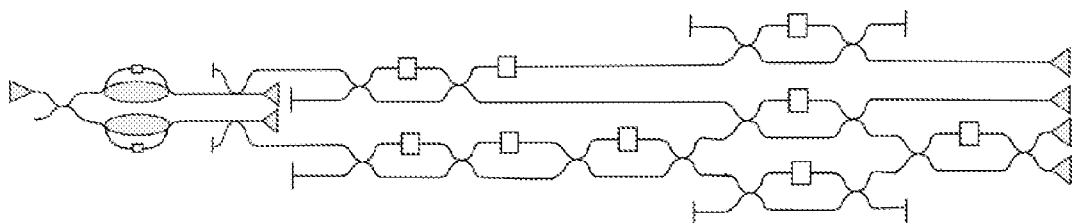


图 8

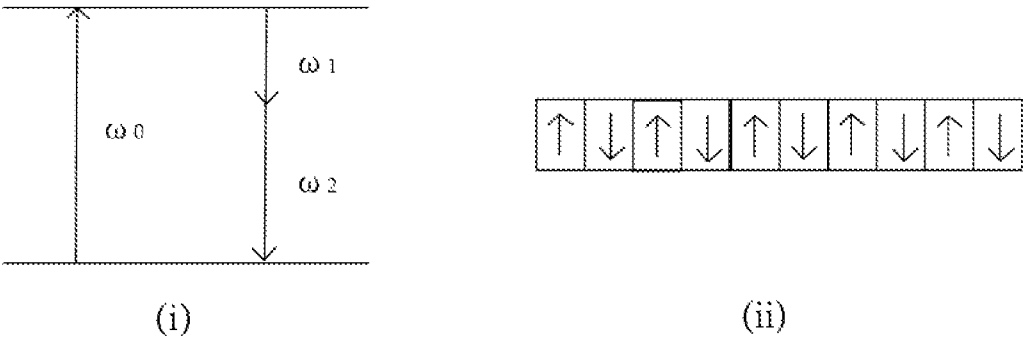


图 9

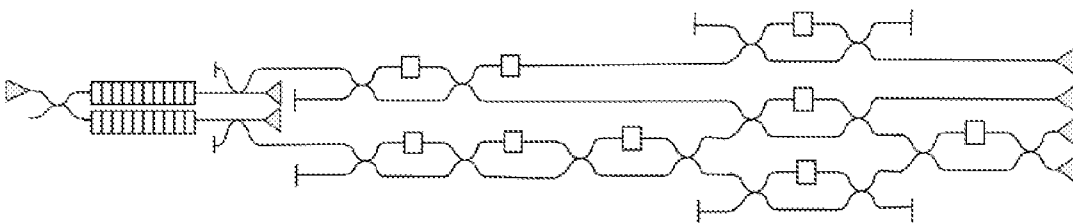


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/096200

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06E 3/00(2006.01)i; G06N 10/00(2022.01)i; G09B 23/22(2006.01)i

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)

G06E; G06N; G09B

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

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

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 光子, 逻辑门, 控制非门, CNOT, 集成, 芯片, 波导, 光子, 单光子, 光子对, 单比特, light + w quantum, logic w gate, controlled w NOT, integrat+, chip?, waveguide, photon, pair, single w photon, single w qubit

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	冯天兰 (FENG, Tianlan). "硅基集成量子光学芯片实验研究 (Experimental Study of Silicon-based Integrated Quantum Photonic Chip)" 中国优秀博士学位论文全文数据库 (博士) 基础科学辑 (Chinese Selected Doctoral Dissertations and Master's Theses Full-Text Databases (Doctoral), Basic Sciences), No. 08, 15 August 2019 (2019-08-15), p. 39, paragraph 2 to p. 45, last paragraph, and p. 71, last paragraph to p. 84, paragraph 1	1-10
A	CN 111830629 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 27 October 2020 (2020-10-27) entire document	1-10
A	CN 109376867 A (ORIGIN QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGY CO., LTD.) 22 February 2019 (2019-02-22) entire document	1-10
A	CN 112085204 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 15 December 2020 (2020-12-15) entire document	1-10
A	US 2017059964 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 02 March 2017 (2017-03-02) entire document	1-10



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

"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

26 January 2022

Date of mailing of the international search report

28 February 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/096200

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111830629	A	27 October 2020	CN	111830629	B	29 October 2021
CN	109376867	A	22 February 2019	CN	109376867	B	07 May 2021
CN	112085204	A	15 December 2020	None			
US	2017059964	A1	02 March 2017	JP	2017003814	A	05 January 2017
				JP	6495752	B2	03 April 2019
				US	10365538	B2	30 July 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/096200

A. 主题的分类 G06E 3/00(2006.01)i; G06N 10/00(2022.01)i; G09B 23/22(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G06E; G06N; G09B 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, CNKI, WPI, EP0DOC: 光量子, 逻辑门, 控制非门, CNOT, 集成, 芯片, 波导, 光子, 单光子, 光子对, 单比特, light+ w quantum, logic w gate, controlled w NOT, integrat+, chip?, waveguide, photon, pair, single w photon, single w qubit																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>冯天兰. “硅基集成量子光学芯片实验研究” 中国优秀硕士学位论文全文数据库(博士) 基础科学辑, 第08期, 2019年8月15日 (2019 - 08 - 15), 第39页第2段到第45页倒数第1段, 第71页倒数第1段到第84页第1段</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 111830629 A (上海交通大学) 2020年10月27日 (2020 - 10 - 27) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109376867 A (合肥本源量子计算科技有限责任公司) 2019年2月22日 (2019 - 02 - 22) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 112085204 A (东南大学) 2020年12月15日 (2020 - 12 - 15) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2017059964 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 2017年3月2日 (2017 - 03 - 02) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	冯天兰. “硅基集成量子光学芯片实验研究” 中国优秀硕士学位论文全文数据库(博士) 基础科学辑, 第08期, 2019年8月15日 (2019 - 08 - 15), 第39页第2段到第45页倒数第1段, 第71页倒数第1段到第84页第1段	1-10	A	CN 111830629 A (上海交通大学) 2020年10月27日 (2020 - 10 - 27) 全文	1-10	A	CN 109376867 A (合肥本源量子计算科技有限责任公司) 2019年2月22日 (2019 - 02 - 22) 全文	1-10	A	CN 112085204 A (东南大学) 2020年12月15日 (2020 - 12 - 15) 全文	1-10	A	US 2017059964 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 2017年3月2日 (2017 - 03 - 02) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
A	冯天兰. “硅基集成量子光学芯片实验研究” 中国优秀硕士学位论文全文数据库(博士) 基础科学辑, 第08期, 2019年8月15日 (2019 - 08 - 15), 第39页第2段到第45页倒数第1段, 第71页倒数第1段到第84页第1段	1-10																		
A	CN 111830629 A (上海交通大学) 2020年10月27日 (2020 - 10 - 27) 全文	1-10																		
A	CN 109376867 A (合肥本源量子计算科技有限责任公司) 2019年2月22日 (2019 - 02 - 22) 全文	1-10																		
A	CN 112085204 A (东南大学) 2020年12月15日 (2020 - 12 - 15) 全文	1-10																		
A	US 2017059964 A1 (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 2017年3月2日 (2017 - 03 - 02) 全文	1-10																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																		
2022年1月26日		2022年2月28日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																		
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		全宇军 电话号码 86-(10)-53962561																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/096200

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111830629	A	2020年10月27日	CN	111830629 B 2021年10月29日
CN	109376867	A	2019年2月22日	CN	109376867 B 2021年5月7日
CN	112085204	A	2020年12月15日	无	
US	2017059964	A1	2017年3月2日	JP	2017003814 A 2017年1月5日
				JP	6495752 B2 2019年4月3日
				US	10365538 B2 2019年7月30日