[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G02B 6/35 (2006.01)

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200780000284.2

[45] 授权公告日 2010 年 2 月 17 日

[11] 授权公告号 CN 100590468C

[22] 申请日 2007.3.7
[21] 申请号 200780000284.2
[30] 优先权
[32] 2006.10.24 [33] KR [31] 10-2006-0103494
[86] 国际申请 PCT/KR2007/001130 2007.3.7
[87] 国际公布 WO2008/050938 英 2008.5.2
[85] 进入国家阶段日期 2007.10.19
[73] 专利权人 仁荷大学校产学协力团
地址 韩国仁川广域市
[72] 发明人 咸炳承
[56] 参考文献
CN1343012A 2002.4.3
US5005933A 1991.4.9
JP9-96845A 1997.4.8
US6298180B1 2001.10.2
US6628453B2 2003.9.30
JP2005-1658123A 2005.6.23
US2002/0015205A1 2002.2.7
审查员 曾 毅
[74] 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司
代理人 谢顺星

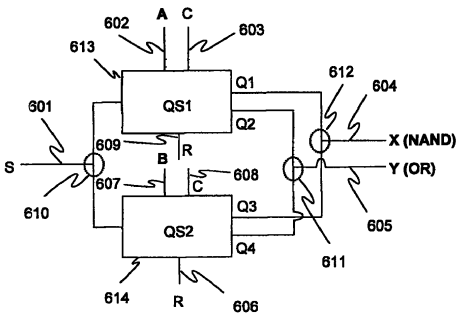
权利要求书 5 页 说明书 13 页 附图 4 页

[54] 发明名称

光子逻辑门

[57] 摘要

本发明涉及一个基于量子开关的光子逻辑门的系统、方法和装置，其中一个或多个量子开关用于暗态共振相互作用，即三色激光和一个四能级或五能级的非线性光学介质通过非简并四波混频过程相互作用，所述非线性光学介质作用由三个基态和一个或者两个激发态组成。 此光子逻辑机制是建立在将一个或多个暗态共振导致的双光子相干相结合的基础上，所述相干是通过在共同激发态光学跃迁而在三个相邻基态间进行交换的。 通过非简并四波混频过程，基态间的双光子相干可以被光学探测到。由于暗态共振或电磁感应光透明，产生的非简并四波混频被增强了。 本光子逻辑门方法的门时间和带宽只受相位弛豫时间限制，而不受布居数弛豫时间和载流子寿命的限制，一般来说，在固体或半导体中，相位弛豫时间比布居数弛豫时间和载流子寿命要短得多。



1、一种光子逻辑门的方法，其特征在于，所述光子逻辑门使用一个或多个量子开关。所述量子开关的非线性光学介质由三个空间相近的基态$|1\rangle$，$|2\rangle$，$|3\rangle$和激发态$|4\rangle$、$|5\rangle$组成。其中所述基态间的跃迁是偶极禁止的。通过所述激发态$|4\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|3\rangle$，所述基态$|2\rangle$和$|3\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$之间的双光子跃迁是允许的。所述方法包含以下步骤:

a）通过光波导或自由空间给所述非线性光学介质加第一道激光束作为输入光束 A，频率为ω_A，所述频率ω_A由所述基态$|1\rangle$和激发态$|4\rangle$之间的第一个跃迁决定;

b）通过光波导或自由空间以频率ω_C施加第二道激光束 C，所述频率ω_C由所述基态$|2\rangle$和激发态$|4\rangle$之间的第二个跃迁决定;

c）通过光波导或自由空间以给频率ω_C施加第三道激光束 S，所述频率ω_S由所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁决定;

d）通过光波导或自由空间以频率ω_C施加第四道激光束 R，所述频率ω_R由所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|5\rangle$之间的第三个跃迁决定;

e）调节所述第一道激光束 A、第二道激光束 C、第三道激光束 S 和第四道激光束 R 的强度，以产生频率为ω_{Q1}的非简并四波混频信号 Q1，或频率为ω_{Q2}的非简并四波混频信号 Q2，其分别对应于双光子相干强度$[\mathrm{Re}\,\rho_{23}]^2$或$[\mathrm{Re}\,\rho_{13}]^2$;

f）将所述的非简并四波混频信号 Q1 和 Q2 物理隔离地连接到光波导。

g）通过光波导或自由空间，将两个量子开关和所述 Q1 或 Q2 分别连接起来，并共享所述 S;

h）连接两个量子开关，使得从一个量子开关获得的非简并四波混频信号 Q1 和从另外一个量子开关获得的非简并四波混频信号 Q2 结合起来;

i）通过光波导或自由空间，连接第一个量子开关的所述 Q1 或 Q2 和第二个量子开关的所述 S;

j）通过光波导或自由空间，将第一个量子开关的所述 Q1 和 Q2 信号和第二、第三个量子开关的所述 S 分别连接起来。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述激发态$|4\rangle$的选择要使其能级高于所述基态$|1\rangle$、所述$|2\rangle$、所述$|3\rangle$的能级。

3、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述激发态$|5\rangle$的选择要使其与所述激发态$|4\rangle$的能级间隔为失谐△，其中△为 0 或者接近所述 R 或 A 的光学拉比频率。

4、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述第一道激光 A 的拉比频率Ω_A要大于所述第二道激光束 C 和所述第三道激光束 S 的拉比频率。

5、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述的第一道激光 A，所述第二道激光 C，所述第三道激光 S 和所述第四道激光 R 是同步的，并且满足所述激光 A、C 和 S 是彼此时间重叠的，如果△=0，所述第四道激光 R 有时间延迟τ，其中τ要短于所述$|1\rangle$、$|2\rangle$和$|3\rangle$三个基态间的相位驰豫时间T_2。

6、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，如果△≠0，所述第二道激光 C 和所述第四道激光 R 是一直开着的，所述第一道激光 A 和所述第三道激光 S 是时间同步的。

7、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，在量子开关的光路由器的应用中，所述能级$|4\rangle$和$|5\rangle$之间的能级间隔，即失谐△，要大于或者接近所述第一道激光 A 的拉比频率。

8、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，用一个量子开关实现布尔代数“非”，其中所述第一道激光控制所述第三道激光 S，并将其反转，使其转化为所述输出 Q1。

9、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，用两个串联的量子开关实现布尔代数“或非”，其中第一个所述非线性介质的输出 Q1 作为所述激光 S 输入到所述的第二个非线性介质中，所述第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q1 之间的关系满足布尔代数“或非”。

10、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，用两个串联的量

子开关实现布尔代数“与”，其中第一个非线性介质的输出 Q2 作为所述激光 S 输入到所述的第二个非线性介质中，所述第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q2 之间的关系满足布尔代数“与”。

11、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，用两个并联的量子开关实现布尔代数“与非”/“或”，其中所述激光 S 为两个所述非线性介质共享，每个所述的输出 Q1 和 Q2 分别组合起来，这样，两个分别应用于所述的各自的非线性介质的所述第一道激光 A 和所述组合输出 Q1、Q2 之间的关系满足布尔代数“与非”/“或”。

12、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于用三个相连的量子开关实现布尔代数“或非”/“异或”/“与”，其中所述的第一个量子开关的 Q1 和 Q2 作为所述 S 用于两个并联的量子开关，而且并联量子开关的所述输出 Q2 和 Q1 连接起来形成输出 Z，这样，应用于所述各自的非线性介质的三道激光束所述 A 和所述输出 Q1、Q2 和 Z 之间的关系分别满足布尔代数“或非”、“与”和“异或”。

13、一个光子逻辑门的装置，其特征在于，所述装置包括有一个或多个非线性光学介质，所述非线性光学介质包含有三个基态$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$和一个激发态$|4\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$、$|1\rangle$和$|3\rangle$、$|2\rangle$和$|3\rangle$之间的跃迁是偶极禁止的，通过所述激发态$|4\rangle$的所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$之间、$|1\rangle$和$|3\rangle$之间、$|2\rangle$和$|3\rangle$之间的双光子跃迁是允许的，所述装置包括：

a）应用于所述非线性光学介质的第一道激光源，即所述的第一道激光 A，频率为ω_A，ω_A对应于所述基态$|1\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第一个跃迁；

b）应用于所述非线性光学介质的第二道激光源，即所述的第二道激光 C，频率为ω_C，ω_C对应于所述基态$|2\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第二个跃迁；

c）应用于所述非线性光学介质的第三道激光源，即所述的第三道激光 S，频率为ω_S，ω_S对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁；

d）应用于所述非线性光学介质的第四道激光源，即所述的第四道激光 R，频率为ω_R，ω_R对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|5\rangle$之间的

第四个跃迁，所述激发态$|5\rangle$是实的或者是虚的；

e）将所述的第三道激光 S 分成两道或者多道光束，并作用于每个所述非线性光学介质的装置，其中所述第三道激光的频率为ω_S，ω_S对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁；

f）将从多个非线性光学介质得到的所述的非简并四波混频信号 Q1 和 Q2 组合起来并分别导入到相应的光学通道中的装置；

g）通过调节所述的第一道激光、第二道激光、第三道激光和第四道激光的强度和频率使所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$、所述$|1\rangle$和$|3\rangle$、所述$|2\rangle$和$|3\rangle$之间产生相干叠加态的装置；

h）使第一道激光 A、第三道激光 S 和第四道激光 R 之间相互同步或延迟的装置；

i）使第一道激光 A、第二道激光 C、第三道激光 S 和第四道激光 R 在非线性光学介质中空间重叠的装置。

14、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于所述的非线性光学介质是一种固体。

15、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于所述的非线性光学介质是多耦合的半导体。

16、根据权利要求 15 所述的装置，其特征在于，在所述多耦合的半导体中，所述基态$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$、$|5\rangle$的选择要在其导带中。

17、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述的激光束 A、C、S、R、Q1 和/或 Q2 通过光波导、自由空间或等离子体波导连接所述非线性光学介质。

18、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述第一道激光 A 作用于所述第三道激光 S，以产生实现布尔代数“非”的所述输出 Q1。

19、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述非线性介质这样相连：第一个非线性介质的输出 Q1 作为所述第三道激光 S 输入第二个非线性介质，并且两个作用于各自所述非线性介质的第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q1 之间的关系满足布尔代数

“或非”。

20、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述非线性介质这样相连：第一个非线性介质的输出 Q2 作为所述第三道激光 S 输入第二个非线性介质，并且两个作用于各自所述非线性介质的第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q2 之间的关系满足布尔代数“与”。

21、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述第三道激光 S 为两个非线性介质共享，并且将每个所述输出 Q1 和 Q2 组合起来，对于作用于各自非线性介质的两个所述第一道激光 A，结果分别满足布尔代数“与非”和“或”。

22、根据权利要求 13 所述的装置，其特征在于，所述三个非线性介质是相连的，并且一个所述非线性介质的两个输出 Q1 和 Q2 作为所述其余两个非线性介质的第三道激光 S，将所述输出 Q1 和 Q2 组合，三个输出分别满足布尔代数“或非”、“异或”和“与”。

光子逻辑门

技术领域

本发明涉及一种使用量子开关的光子逻辑门的方法和装置。

背景技术

逻辑门通常用作数据处理中的逻辑操作，即使用一个以上的逻辑输入产生一个信号输出。逻辑一般是指布尔逻辑，例如："非"，"或"，"或非"，"异或"，"同或"，"与"和"与非"。对于一个中央处理器（CPU）来说，逻辑门是执行计算操作的基本单元。由于对快速处理能力与日俱增的需求，CPU 的速度从 20 世纪 70 年代中期开始呈指数增长，根据摩尔定律，到 2006 年已经达到了 3.7GHz。然而，开关时间取决于门宽而电磁干扰限制了操作带宽从而使电子晶体管的应用受到了制约。为了克服这种本质上的局限性，在最近几十年中人们开始研究光逻辑门。与电子载流子相比，光信号不受电磁干扰的影响而且没有速度限制。此外，并行处理有着本质上的优点。最近研究表明，用于布尔逻辑运算"非"、"或"、"或非"、"与"、"异或"和"与非"的各种高速全光逻辑门可以用半导体光放大器（SOAs）和掺杂铒（erbium）光纤放大器（EDFAs）实现。然而一个运算器件必须满足一定的实用性要求，例如：低功耗，小尺寸和高速度。从 20 世纪 80 年代起一些以布尔代数为基础的光逻辑门已经被提出并实现了。使用线性光学如镜子和分光镜的大型光学逻辑门已经被应用了。显然，以线性光学为基础的光逻辑门由于大的尺寸而效率低。

近来，以非线性光学为基础的光逻辑门得到了广泛的研究。在这一领域，SOA 是组成光逻辑门的最有用的元件。将 SOA 用于光逻辑门可以极大的降低器件尺寸和功耗。以 SOA 为基础的光逻辑门的物理原理是通过电流改变折射率。在传统的光开关技术中，折射率变化所需时间完全制约了开关时间，而折射率的变化受到载流子重新分布时间的限制。因此传统光开关时间主要受限于载流子寿命，大约为亚

纳秒量级。尽管一个 SOA 能提供相对低的功率损耗，大约 100mW（Optics Letters, Vol.23, pp.1271-3(1997)），但是组成一个光 CPU 需要上百万个 SOA，估计总功率和总尺寸分别要达到 100kW 和几个平方米，所以根本不具有应用性。这里值得注意的是，最新达到 3.7GHz 时钟速度的电子 CPU 包含了近三亿个晶体管，功率消耗大约为 100W（www.intel.com/research /silicon/micron.htm）。

另一方面，光开关效应可以通过非线性量子效应—电磁感应光透明（EIT）获得。EIT 就是在有三个或三个以上能级的光学共振介质中，由于量子相干，利用双色电磁场获得折射率的快速变化（Harris, Physics Today, Vol.50, p.36(1995)）。光学共振介质的能级结构必须满足具有两个相邻很近的基态和一个激发态，或两个离得很近的激发态和一个基态，或一个任意分布的梯形系统。基于量子相干的折射率变化会引起两个临近态上强自旋相干激发和吸收相消。由于吸收谱的快速变化，在共振频率上陡峭的色散斜率导致了慢光现象（Turukhin 等 Physical Review Letters，Vol.88, p 023602(2002)）。

在 EIT 中，折射率变化所需时间不受载流子寿命或者布居数弛豫时间（population relaxation time）的限制，而是依赖于相位弛豫时间(phase decay time)。通常情况下，固体中的相位弛豫时间比布居数弛豫时间短很多。特别是在大多数离子掺杂的晶体中，如：掺杂 Pr^{3+}的 Y_2SiO_5，相位弛豫时间比载流子寿命要快几百倍，所以可以获得超高速的光处理——量子开关（Ham, Applied Physics Letters, Vol. 85, pp.893-5(2004)）。相邻基态间的双光子相干激发可以利用非简并四波混频过程进行光探测。非简并四波混频信号的强度可以比最初的输入信号要强（Hemmer 等，Optics Letters, Vol.20, pp.982-4 (1995)）。

当三个相邻态代替两个相邻基态时，利用三色光场共振到相同的激发态，就可以得到量子开关现象：Ham, Physical Review Letters, Vol.84, pp.4080-3 (2000)。量子开关的物理原理就是光控自旋相干交换，而且光开关时间比传统的基于折射率的光开关要快很多。这个在实验上已经用掺杂 Pr^{3+}的 Y_2SiO_5 实现了，比光开关时间减少了 100 倍:Ham, Applied Physics Letters, Vol.85, pp.893-5 (2004)。

发明内容

本发明的主要目的是提供一种基于量子开关现象的光子逻辑门的方法和装置。光子逻辑门应该克服传统光逻辑门在操作速度和尺寸上的局限性。光子逻辑门的一个主要特征是将 EIT 和量子开关的量子光学性用于多逻辑门功能。一个物理逻辑门由通过光波导或自由空间与非线性光学介质作用的三（四）色激光组成。如量子开关专利中所示（Ham, 美国专利 No.6628453），本光子逻辑门的可操作带宽不受布居数弛豫时间（population relation time）或者载流子寿命的限制。本发明的主要优点是不仅能用于全光数字处理，而且可以用于量子计算机组成的量子网络的量子接口中。简而言之，本发明中的光子逻辑门系统是由一个或多个相连接的量子开关组成，其中，量子开关由非线性光学介质和至少四个相干激光束组成。而量子开关中的非线性光学介质是由至少四个能级组成，其中三个能级必须是靠的很近的基态，最后一个是激发态。激光束 A、C 和 S 的频率分别与从非线性光学介质的三个基态$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$到激发态$|4\rangle$的跃迁共振：见图 1 和图 2。激光束 R 被用作非简并四波混频过程中产生输出 Q1 或 Q2 的探测光。非简并四波混频输出 Q1 和/或 Q2 可以用作第二/第三个非线性光学介质的输入来形成光子逻辑门。Q1 和 Q2 的输出方向是物理分离的，所以量子开关可以作为光学路由器：Ham, Applied Physics Letters Vol.85, pp.893-895(2004)。每束激光都可以用由异质结构量子阱，光子带隙晶体，绝缘硅或者表面胞质团（plasmon）等制成的光学波导来导入。光波导不属于本发明的部分。通过将两个量子开关串联或者并联，就能起到“非”，“与非”，“与”，“或”，“异或”和“或非”布尔逻辑的功能了。由于两个光子逻辑门间的传播时间是可以忽略的，利用一个光波导，光子逻辑门还能扩展到测量领域。

本发明的技术方案具体提供了一种光子逻辑门的方法，所述光子逻辑门使用一个或多个量子开关。所述量子开关的非线性光学介质由三个空间相近的基态$|1\rangle$，$|2\rangle$，$|3\rangle$和激发态$|4\rangle$、$|5\rangle$组成。其中所述基态间的跃迁是偶极禁止的。通过所述激发态$|4\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|3\rangle$，

所述基态$|2\rangle$和$|3\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$之间的双光子跃迁是允许的。所述方法包含以下步骤:

a）通过光波导或自由空间给所述非线性光学介质加第一道激光束作为输入光束 A，频率为ω_A，所述频率ω_A由所述基态$|1\rangle$和激发态$|4\rangle$之间的第一个跃迁决定;

b）通过光波导或自由空间以频率ω_C施加第二道激光束 C，所述频率ω_C由所述基态$|2\rangle$和激发态$|4\rangle$之间的第二个跃迁决定;

c）通过光波导或自由空间以给频率ω_C施加第三道激光束 S，所述频率ω_S由所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁决定;

d）通过光波导或自由空间以频率ω_C施加第四道激光束 R，所述频率ω_R由所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|5\rangle$之间的第三个跃迁决定;

e）调节所述第一道激光束 A、第二道激光束 C、第三道激光束 S 和第四道激光束 R 的强度，以产生频率为ω_{Q1}的非简并四波混频信号 Q1，或频率为ω_{Q2}的非简并四波混频信号 Q2，其分别对应于双光子相干强度$[\mathrm{Re}\,\rho_{23}]^2$或$[\mathrm{Re}\,\rho_{13}]^2$;

f）将所述的非简并四波混频信号 Q1 和 Q2 物理隔离地连接到光波导。

g）通过光波导或自由空间，将两个量子开关和所述 Q1 或 Q2 分别连接起来，并共享所述 S;

h）连接两个量子开关，使得从一个量子开关获得的非简并四波混频信号 Q1 和从另外一个量子开关获得的非简并四波混频信号 Q2 结合起来;

i）通过光波导或自由空间，连接第一个量子开关的所述 Q1 或 Q2 和第二个量子开关的所述 S;

j） 通过光波导或自由空间，将第一个量子开关的所述 Q1 和 Q2 信号和第二、第三个量子开关的所述 S 分别连接起来。

所述激发态$|4\rangle$的选择要使其能级高于所述基态$|1\rangle$、所述$|2\rangle$、所述$|3\rangle$的能级。

所述激发态$|5\rangle$的选择要使其与所述激发态$|4\rangle$的能级间隔为失谐 Δ，其中 Δ 为 0 或者接近所述 R 或 A 的光学拉比频率。

所述第一道激光A 的拉比频率Ω_A要大于所述第二道激光束C和所述第三道激光束S 的拉比频率。

所述的第一道激光A，所述第二道激光C，所述第三道激光S和所述第四道激光R是同步的，并且满足所述激光A、C和S 是彼此时间重叠的，如果△=0，所述第四道激光R有时间延迟τ，其中τ要短于所述$|1\rangle$、$|2\rangle$和$|3\rangle$三个基态间的相位驰豫时间T_2。

如果△≠0，所述第二道激光C和所述第四道激光R是一直开着的，所述第一道激光A和所述第三道激光S是时间同步的。

在量子开关的光路由器的应用中，所述能级$|4\rangle$和$|5\rangle$之间的能级间隔，即失谐△，要大于或者接近所述第一道激光A的拉比频率。

用一个量子开关实现布尔代数“非”，其中所述第一道激光控制所述第三道激光S，并将其反转，使其转化为所述输出Q1。

用两个串联的量子开关实现布尔代数“或非”，其中第一个所述非线性介质的输出Q1作为所述激光S输入到所述的第二个非线性介质中，所述第一道激光A和所述第二个非线性介质的输出Q1之间的关系满足布尔代数“或非”。

用两个串联的量子开关实现布尔代数“与”，其中第一个非线性介质的输出Q2作为所述激光S输入到所述的第二个非线性介质中，所述第一道激光A和所述第二个非线性介质的输出Q2之间的关系满足布尔代数“与”。

用两个并联的量子开关实现布尔代数“与非”/“或”，其中所述激光S为两个所述非线性介质共享，每个所述的输出Q1 和Q2分别组合起来，这样，两个分别应用于所述的各自的非线性介质的所述第一道激光A 和所述组合输出Q1、Q2之间的关系满足布尔代数“与非”/“或”。

用三个相连的量子开关实现布尔代数“或非”/“异或”/“与”，其中所述的第一个量子开关的Q1和Q2 作为所述S用于两个并联的量子开关，而且并联量子开关的所述输出Q2和Q1连接起来形成输出Z，这样，应用于所述各自的非线性介质的三道激光束所述A和所述输出Q1、Q2和Z之间的关系分别满足布尔代数“或非”、“与”和

“异或”。

本发明的技术方案还提供了一个光子逻辑门的装置，所述装置包括有一个或多个非线性光学介质，所述非线性光学介质包含有三个基态$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$和一个激发态$|4\rangle$，所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$、$|1\rangle$和$|3\rangle$、$|2\rangle$和$|3\rangle$之间的跃迁是偶极禁止的，通过所述激发态$|4\rangle$的所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$之间、$|1\rangle$和$|3\rangle$之间、$|2\rangle$和$|3\rangle$之间的双光子跃迁是允许的，所述装置还包括：

a）应用于所述非线性光学介质的第一道激光源，即所述的第一道激光 A，频率为ω_A，ω_A对应于所述基态$|1\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第一个跃迁；

b）应用于所述非线性光学介质的第二道激光源，即所述的第二道激光 C，频率为ω_C，ω_C对应于所述基态$|2\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第二个跃迁；

c）应用于所述非线性光学介质的第三道激光源，即所述的第三道激光 S，频率为ω_S，ω_S对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁；

d）应用于所述非线性光学介质的第四道激光源，即所述的第四道激光 R，频率为ω_R，ω_R对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|5\rangle$之间的第四个跃迁，所述激发态$|5\rangle$是实的或者是虚的；

e）将所述的第三道激光 S 分成两道或者多道光束，并作用于每个所述非线性光学介质的装置，其中所述第三道激光的频率为ω_S，ω_S对应于所述基态$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$之间的第三个跃迁；

f）将从多个非线性光学介质得到的所述的非简并四波混频信号 Q1 和 Q2 组合起来并分别导入到相应的光学通道中的装置；

g）通过调节所述的第一道激光、第二道激光、第三道激光和第四道激光的强度和频率使所述基态$|1\rangle$和$|2\rangle$、所述$|1\rangle$和$|3\rangle$、所述$|2\rangle$和$|3\rangle$之间产生相干叠加态的装置；

h）使第一道激光 A、第三道激光 S 和第四道激光 R 之间相互同步或延迟的装置；

i）使第一道激光 A、第二道激光 C、第三道激光 S 和第四道激

光 R 在非线性光学介质中空间重叠的装置。

所述的非线性光学介质是一种固体。

所述的非线性光学介质是多耦合（multiply coupled）的半导体。

在所述多耦合的半导体中，所述基态$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$和所述激发态$|4\rangle$、$|5\rangle$的选择要在其导带中。

所述的激光束 A、C、S、R、Q1 和/或 Q2 通过光波导、自由空间或等离子体波导连接所述非线性光学介质。

所述第一道激光 A 作用于所述第三道激光 S，以产生实现布尔代数“非”的所述输出 Q1。

所述非线性介质这样相连：第一个非线性介质的输出 Q1 作为所述第三道激光 S 输入第二个非线性介质，并且两个作用于各自所述非线性介质的第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q1 之间的关系满足布尔代数“或非”。

所述非线性介质这样相连：第一个非线性介质的输出 Q2 作为所述第三道激光 S 输入第二个非线性介质，并且两个作用于各自所述非线性介质的第一道激光 A 和所述第二个非线性介质的输出 Q2 之间的关系满足布尔代数“与”。

所述第三道激光 S 为两个非线性介质共享，并且将每个所述输出 Q1 和 Q2 组合起来，对于作用于各自非线性介质的两个所述第一道激光 A，结果分别满足布尔代数“与非”和“或”。

所述三个非线性介质是相连的，并且一个所述非线性介质的两个输出 Q1 和 Q2 作为所述其余两个非线性介质的第三道激光 S，将所述输出 Q1 和 Q2 组合，三个输出分别满足布尔代数“或非”、“异或”和“与”。

附图说明

图 1 是本发明实施例的一个光子逻辑门：“非”门的结构图。

图 2 是图 1 中非线性光学介质 107 的一个能级图。

图 3 是图 2 量子开关（路由）的实验（a,b）和理论（c,d）数据，输出光束 Q1 和 Q2 的空间方向由激光束相位匹配条件决定，方向或

者相同或者不同。

图 4 是本发明的一个光子逻辑门："或非"门的示意图。

图 5 是本发明的一个光子逻辑门："与"门的示意图。

图 6 是本发明的一个光子逻辑门："与非"/"或"门的示意图。

图 7 是本发明的一个光子逻辑门："或非"/"异或"/"与"门的示意图。

具体实施方式

为了更好的理解本发明，现在结合附图来描述本发明的实施例。附图用来具体说明本发明，和描述一起用来解释本发明的原理。附图只是为了更好的阐述本发明，但不能解释为对本发明的限制。其中，图 1 是本发明的一个光子逻辑门："非"门的结构图，图 1 与量子开关非常相似：美国专利 No:6628453；图 2 是图 1 中非线性光学介质 107 的一个能级图，其中基态间的频率差远小于基态与激发态间的跃迁频率，激发态能级$|5\rangle$可以是虚的、实的或者和能级$|4\rangle$相等，这取决于频率失谐Δ的值，字母 R、S、C、A、Q1 和 Q2 分别代表不同频率ω_R、ω_S、ω_C、ω_A、ω_{Q1}和ω_{Q2}的激光束；图 3 是图 2 量子开关（路由）的实验（a,b）和理论（c,d）数据，输出光束 Q1 和 Q2 的空间方向由激光束相位匹配条件决定，方向或者相同或者不同；图 4 是本发明的一个光子逻辑门："或非"门的示意图，字母 QS 表示非线性光学介质 107 组成的量子开关，该开关是通过光波导连接的，这与图 1 和图 2 中用于激光束 R、S、C、A、Q1（或 X）和 Q2（或 Y）的光波导是一样的；图 5 是本发明的一个光子逻辑门："与"门的示意图，字母 QS 表示非线性光学介质 107 组成的量子开关，该开关是通过光波导连接的，这与图 1 和图 2 中用于激光束 R、S、C、A、Q1（或 X）和 Q2（或 Y）的光波导是一样的；图 6 是本发明的一个光子逻辑门："与非"/"或"门的示意图，字母 QS 表示量子开关，它由非线性光学介质组成并通过用于激光束 R、S、C、A、B、Q1、Q2、Q3、Q4、X 和 Y 的光波导相连；图 7 是本发明的一个光子逻辑门："或非"/"异或"/"与"门的示意图，字母 QS 表示量子开关，它由非线性光

学介质组成并通过用于激光束R、S、C、A、B、Q1、Q2、X、Y和Z的光波导相连。图1描述了一个光子逻辑门:“非”门，这里使用了一个单独的量子开关。字母R、S、C、A、Q1和Q2分别表示不同频率ω_R、ω_S、ω_C、ω_A、ω_{Q1}和ω_{Q2}的激光束。数字从101到106代表激光束和激光束所用的光波导。数字107代表一个非线性光学介质。根据量子开关理论（Physical Review Letters，Vol.84, pp. 4080-4083(2000) 和 Applied Physics Letters, Vol. 78. pp.3382-3384(2001); Applied Physics Letters, Vol.85, pp.893-895(2004); 美国专利No.6628453(2003)），当逻辑输入光束A(102)是打开的，输出Q1(104)总是关的，反之亦然。这里值得注意的是：如果失谐Δ是非零的话（失谐Δ见图2所示）激光束C和R可以是连续的。如果失谐Δ等于零，激光束C(103)和R（106）就不能是连续的而必须是脉冲并与控制光束C（102）同步。表1显示了图1中布尔代数“非”的结果。

表1

S	A	Q1(NOT)	Q2
1	0	1	0
1	1	0	1

这里激发能级$|5\rangle$可虚可实。对于非零失谐Δ的实能级$|5\rangle$，脉冲的非简并四波混频过程已经被证明了：Ham, Optics Letters, Vol.24, pp.86-88(1999)。

图2是图1中非线性光学介质107的一个能级图。一般这种能级结构在掺稀土晶体如掺杂Y_2SiO_5（YSO）的Pr^{3+}中是典型的。这里，掺稀土晶体的超精细分裂产生三个低能级。图2的能级结构也可以通过人为的增加耦合半导体量子阱或者量子点获得。图1中非线性光学介质107可以有四个能态：$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$、$|4\rangle$或者五个能态：$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$、$|4\rangle$、$|5\rangle$。图2中能级$|4\rangle$的能量要比$|1\rangle$、$|2\rangle$、$|3\rangle$高。事实上，图1中非线性光学介质107可以有多于5个的能级，但是只有图2中提到的能级对本发明的光子逻辑机制起作用。图2中失谐Δ是激光束R

的频率ω_R与从能级$|3\rangle$到能级$|4\rangle$的共振频率的偏移，即$\Delta=\omega_{43}-\omega_R$，其中$\omega_{43}=\omega_4-\omega_3$。频率为$\omega_{Q1}$的输出激光束 Q1 是通过非简并四波混频过程产生的，其中频率分别为ω_C、ω_S、ω_R的三束激光 C、S、R 与非线性光学介质相互作用。类似地，频率为ω_{Q2}的输出激光束 Q2 是通过非简并四波混频过程产生的，该过程中频率分别为ω_A、ω_S、ω_R的三束激光 A、S、R 相互作用。图 2 中非简并四波混频信号 Q1 和 Q2 的传播方向 k_{Q1}和 k_{Q2}是由相位匹配条件决定的，分别是：$k_{Q2}=k_a-k_S+k_R$；$k_{Q1}=k_C-k_S+k_R$。这里由于暗态共振或者 EIT，非简并四波混频（nondegenerate four-wave mixing）可以被极大地增强。为了理解非简并四波混频过程的增强，下文会更详细的进行解释。

非简并四波混频增强是 Harris 在 1991 年的 Physical Review Letters(Vol.64,pp.1107-1110)中提出的，并由 Jain 等人于 1993 年在原子气体中 (Optics Letters, Vol.18, pp.98-101)，Ham 等人于 1997 年在离子掺杂的固体中（Optics Letters, Vol.22, pp.1128-1140）得到了实验论证。Hemmer 等人和 Jain 等人先后在 1995 年和 1996 年利用原子气体在实验上实现了非简并四波混频的信号放大和高转换效率（Hemmer, Optics Letters,Vol.20,pp.982-984(1995); Jain, Physics Reviews Letters, Vol.77,pp.4326-4329(1996)）。非简并四波混频的高转换效率也被 Ham 等人于 1999 年在离子掺杂的固体中实现了（Ham, Physical Review A, Vol.59, pp.R2583-2586(1999)）。非简并四波混频过程的增强就是分别通过量子相干的相消(destructive)和相长(constructive)，降低一阶线性极化，提高三阶非线性极化。

为了进一步说明激光输入和非简并四波混频输出信号之间的关系，首先应该理解相干交换(coherence swapping)。为了能理解图 2 中的相干激发，需要讨论密度矩阵 ρ。密度矩阵一直是表示系统宏观行为的一种非常有用的工具: Quantum optics, Cambridge University Press, New York, N.Y.(1997), Scully 和 Zubairy 著。在图 2 中，通过激发态$|4\rangle$，两激光束 C 和 S 可以在跃迁$|2\rangle$-$|3\rangle$上引起双光子相干ρ_{23}。类似的，通过激发态$|4\rangle$，两激光束 A 和 S 可以在基态跃迁$|1\rangle$-$|3\rangle$引起双光子相干ρ_{13}。特别的，如果伴随有暗态共振或者 EIT，则双光子相干被强烈

的提高。这里暗态共振或 EIT 是相同的物理现象，但是术语 EIT 来源于吸收相消，这样，一个共振的电磁场就可以没有被吸收地通过一个光学厚介质。

图 3 是基于图 2 的用 Pr^{3+}: YSO 做的量子开关（路由）的理论和实验数据，其中失谐△＝ 0：δ代表激光束 A 与跃迁$|1\rangle$-$|4\rangle$的共振频率的失谐。如图 3 所示，根据 A 的激光作用，双光子相干$\mathrm{Re}\,\rho_{13}$和$\mathrm{Re}\,\rho_{23}$的强度可以相互转换：双光子相干可以利用激光束 R 进行光学探测，并导致非简并四波混频信号 Q1 或 Q2 的产生。图 3a 和 3b 中的非简并四波混频信号的实验数据和由理论计算出来的双光子相干强度$[\mathrm{Re}\,\rho_{12}]^2$相匹配(Ham et al. in Physical Review A,Vol.59, R2583-R2586(1999), Physical Review Letters. Vol.84,pp.4080-4083(2000), 和 Applied Physics Letters, Vol.78, pp3382-3384(2001); Applied Physics Letters, Vol.85, pp893-895(2004); 美国专利 No.6628453(2003))。

图 4 描述的是光子逻辑门："或非"门，其中两个量子开关串联。这里左边的（第一个）量子开关 QS1（412）的输出 Q1（410）作为右面的（第二个）量子开关 QS2（413）的输入（见图 1 中的 S）。两个逻辑输入激光束的来自 QS1A（402）和来自 QS2 的 B（404）作为光学逻辑输入并在输出 X（406）实现布尔代数"或非"。如前所述，如果△≠ 0，应用于每个量子开关上的激光束 R（408，411）可以是连续波。如果△= 0，R 必须是脉冲的，并和输入逻辑激光 A（402）同步。输入激光束 A（402）和 B（404）也必须同步。表 2 显示了两个逻辑输入 A（402）和 B（404）的组合在输出 X（406）实现布尔代数"或非"。

表 2

S	A	B	Q1	Q2	X(NOR)	Y
1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0
1	1	0	0	1	0	0

图 5 为光子逻辑门:“与”门，此逻辑门由两个量子开关串联组成。这里，左边的量子开关 QS1（512）的输出 Q2（509）作为右面的量子开关 QS2（513）的输入 S（见图 1 中的 S）。两个逻辑输入束中的来自 QS1 中的 A（502）和来自 QS2 的 B（504）的组合，在输出 Y（507）实现了布尔代数“与”。如前所述，如果 $\Delta \neq 0$，应用于每个量子开关上的激光束 R（511，508）可以是连续波。然而，如果 $\Delta = 0$，R 必须是脉冲的，并和输入激光 A（502）同步。输入激光束 A（502）和 B（504）也必须同步。表 3 显示了根据两个逻辑输入 A（502）和 B（504）在输出 Y（507）实现布尔代数“与”。

表 3

S	A	B	Q1	Q2	X	Y(AND)
1	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	1	1	0
1	1	0	0	1	0	1

图 6 为光子逻辑门:“与非”/“或”门。此系统由两个并联的量子开关组成，其中激光源 S（601）是共享的。顶部的量子开关 QS1 的输出 Q1 和底部的量子开关 QS2 的输出 Q3 组合在一起，产生逻辑输出 X（604）。输出 Q2 和 Q4 组合起来产生逻辑输出 Y（605）。当失谐 Δ 不为 0 时，读激光束 R（609，606）是连续光，当失谐 Δ 等于 0 时，读激光束 R 是脉冲的，并与逻辑输入激光束 A（602）和 B（607）同步。源激光束 S（601）通过光分束器/组合器（610，611，612），如 Y 分支或分束镜分成两部分。在两个输入 A（602）和 B（607）的作用下，输出逻辑激光束 X（604）和 Y（605）分别实现布尔代数"与非"和“或”。见表 4 。

表 4

S	A	B	Q1	Q2	Q3	Q4	X(NAND)	Y(OR)
1	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	1	0	1	0	1	0	1

图 7 为光子逻辑门：“或非”/“异或”/“与”门。这个系统由三个量子开关组成，其中两个量子开关与另外一个量子开关相连。量子开关 QS1（716）的每个输出 Q1（712）和 Q2（710）分别用作量子开关 QS2（718）和 QS3（717）的输入。输出 P1（706）用作逻辑输出 X。输出 P2 和 P3 结合起来用作逻辑输出 Z（707）。输出 P4（708）用作逻辑输出 Y。系统包括两个逻辑输入 A（702）和 B（704，715）。其中 A 用于 QS1，B 用于 QS2 和 QS3。R（711，713，709）和 C（703，705，714）的功能和前面讨论的一样。从表 5 中可以看到，两个逻辑输入 A 和 B 同时在输出 X 实现布尔代数“或非”、在 Z 实现布尔代数“异或”，在 Y 实现布尔代数“与”。

表 5

S	A	B	Q1	Q2	P1	P2	P3	P4	X（NOR）	Y（AND）	Z（XOR）
1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0

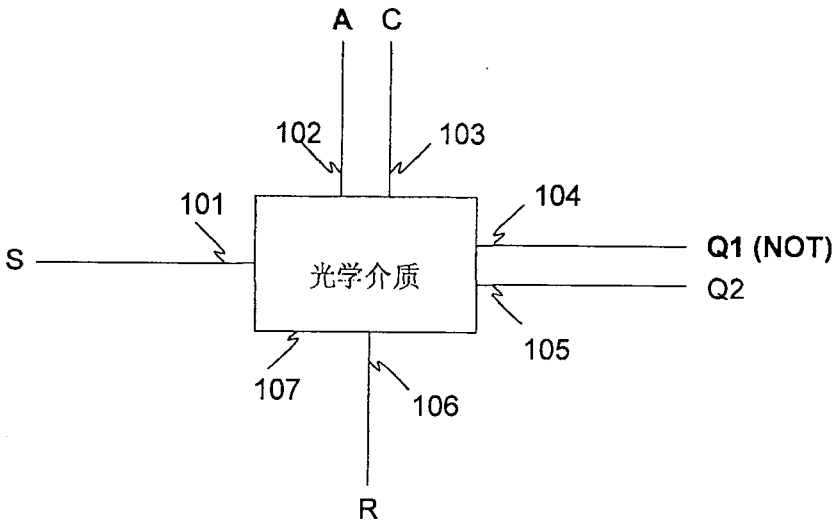

A
C
102
103
101
104
S
光学介质
Q1 (NOT)
Q2
105
107
106
R

图 1

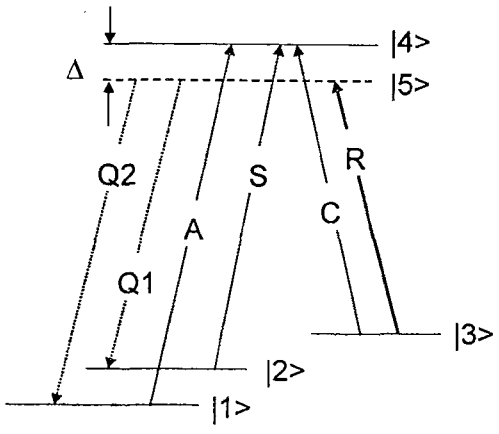

|4>
Δ
|5>
Q2
S
R
A
C
Q1
|3>
|2>
|1>

图 2

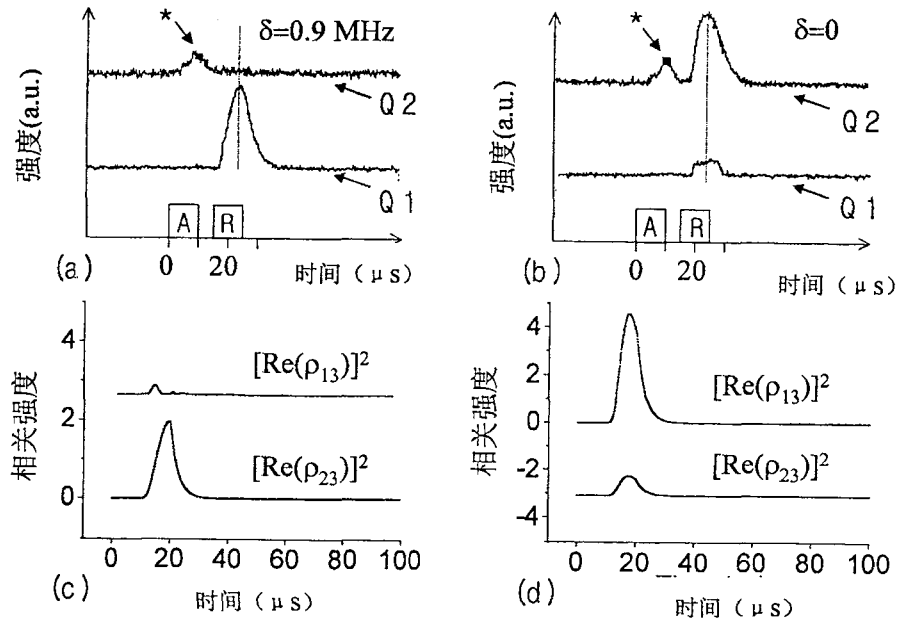

δ=0.9 MHz
δ=0
强度(a.u.)
Q 2
Q 1
A
R
(a)
(b)
0
20
时间（μs）
相关强度
[Re(ρ13)]2
[Re(ρ23)]2
(c)
(d)
4
2
0
-2
-4
0 20 40 60 80 100

图 3

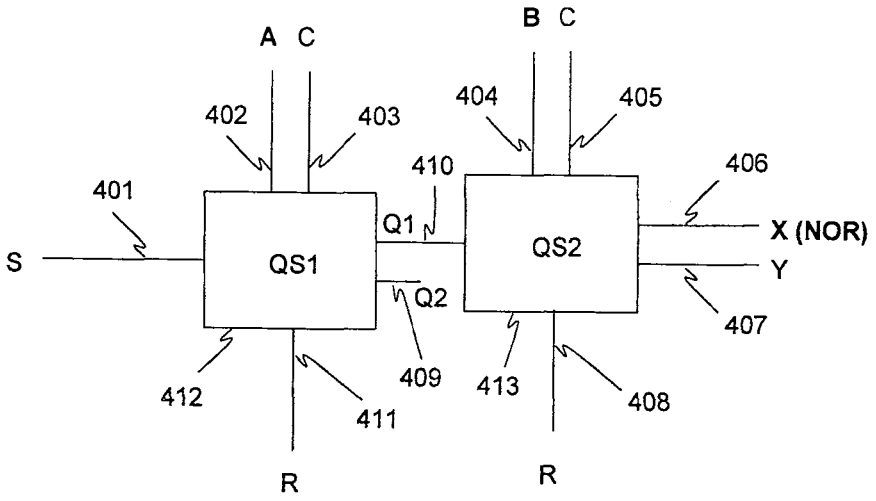

A C
B C
402
403
404
405
401
410
406
S
QS1
Q1
QS2
X (NOR)
Y
Q2
407
412
409
413
408
411
R
R

图 4

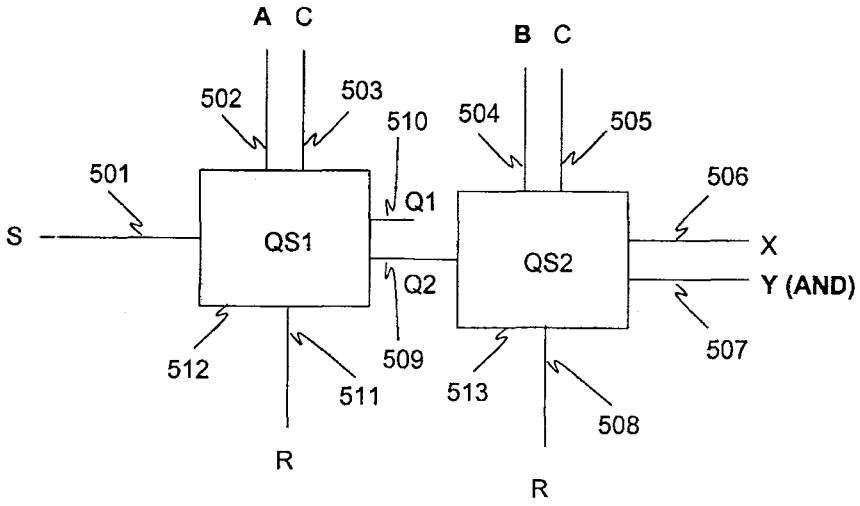

A C
B C
502
503
510
504
505
501
506
S
QS1
Q1
QS2
X
Y (AND)
Q2
512
509
513
507
511
508
R
R

图 5

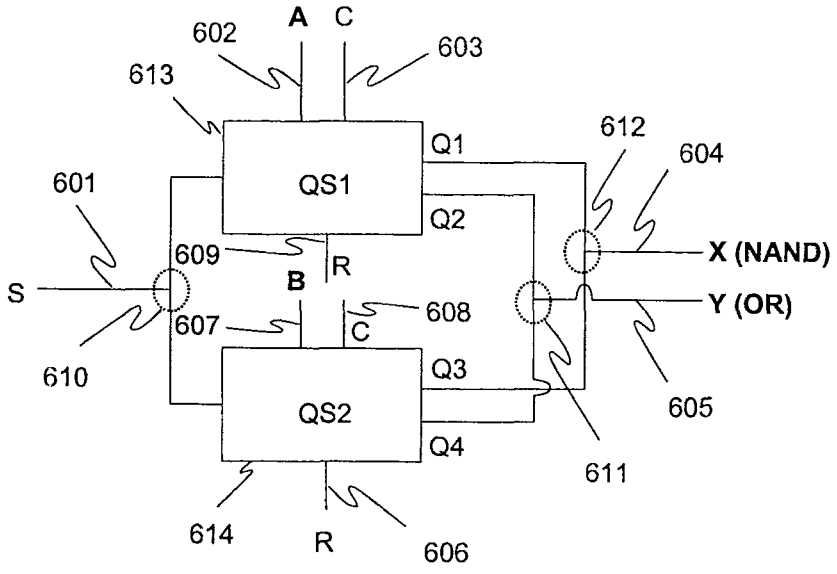

A C
602
603
613
612
Q1
604
601
QS1
Q2
609
R
X (NAND)
S
B
608
Y (OR)
607
C
610
Q3
605
QS2
Q4
611
614
R
606

图 6

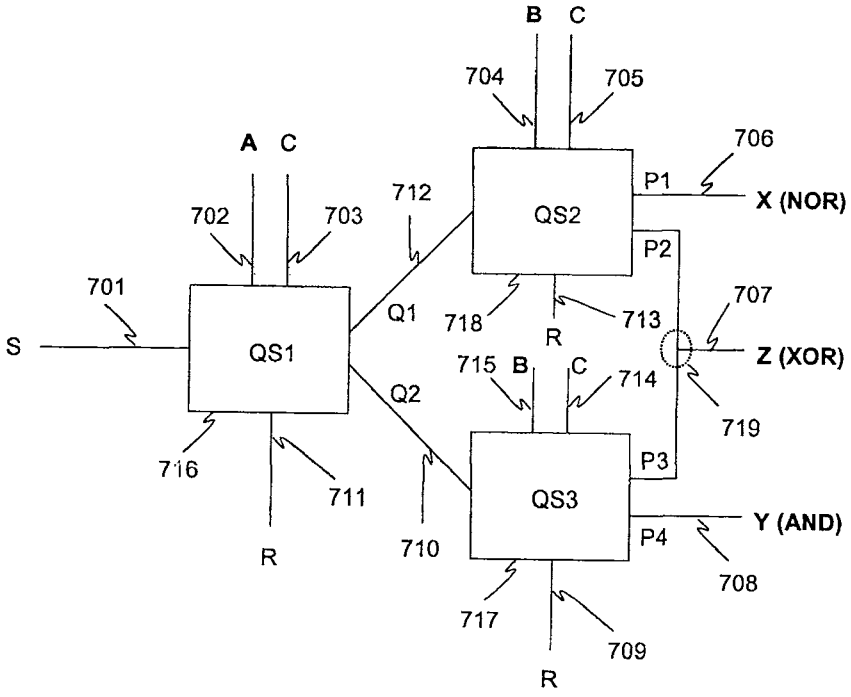

B
C
704
705
706
A
C
712
P1
X (NOR)
QS2
702
703
P2
701
707
Q1
718
713
R
S
QS1
Z (XOR)
715
B
C
714
Q2
719
716
P3
711
QS3
Y (AND)
R
710
P4
708
717
709
R

图 7