

两点量子元胞自动机全加器电路设计

汪志春, 蔡理, 杨晓阔, 王森

(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 针对两点量子元胞自动机在信号沿垂直方向进行取反操作时元胞容易发生翻转的问题, 提出了一种将信号沿垂直方向的取反操作转移到水平方向的方法, 并将此方法运用到两点量子元胞自动机的异或门结构以及基于此异或门结构的全加器电路的设计。利用遗传模拟退火算法对电路功能进行了仿真, 仿真结果验证了该方法的可行性和正确性。与利用传统四点量子元胞自动机设计的全加器电路相比, 文中设计的全加器电路所需的电子数和量子点数均减少了25%, 电路集成度提高了6.2%。

关键词 两点量子元胞自动机; 逻辑门; 反相器; 全加器; 半经典模型; 遗传模拟退火法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.019

中图分类号 O471.1; TN4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0084-04

Design of Full Adder Circuit Based on 2-dot Quantum-dot Cellular Automata

WANG Zhichun, CAI Li, YANG Xiaokuo, WANG Sen

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aiming at the problem that Cellulars of 2-dot Quantum-dot Cellular Automata were easy to switch when signal was inverted in the vertical direction. A method to transfer the signal inverting operation from vertical to horizontal was proposed. A XOR gate of 2-dot QCA and a full adder based on the XOR gate structure were designed with this method. The simulation to the function of the circuit was given through the Genetic Simulated Annealing Algorithm based on the semiclassical model of QCA. The simulation results validated the feasibility and the validity of this method. Compared to the traditional 4-dot QCA, the 2-dot QCA takes advances of fewer amounts of the electrons and the quantum dots required by 25%, higher integration by 6.2%.

Key words: 2-dot quantum-dot cellular automata; logic gate; inverter; full adder; semiclassical model; genetic simulated annealing algorithm

量子元胞自动机^[1-2] (Quantum-dot Cellular Automata, QCA) 是一种新兴的纳米器件, 它利用电子在元胞间的不同分布来代表二元逻辑“1”和“0”,

并根据元胞的不同组合阵列来完成二元逻辑功能。QCA 具有超高集成度、极低功耗以及无引线集成等优点。传统四点 QCA 由 4 个量子点以及 2 个额外

收稿日期: 2014-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172043); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助重点项目(2011JZ015); 陕西省自然科学基金资助项目(2013JQ8010)

作者简介: 汪志春(1988—), 男, 江西九江人, 硕士生, 主要从事纳电子器件(量子元胞自动机)电路设计研究。E-mail: wzc0117@126.com

引用格式: 汪志春, 蔡理, 杨晓阔, 等. 两点量子元胞自动机全加器电路设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(5): 84-87. WANG Zhichun, CAI Li, YANG Xiaokuo, WANG Sen. Design of full adder circuit based on 2-dot quantum-dot cellular automata[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 84-87.

的电子组成,相邻的量子点被隧道结隔离,电子可在元胞内量子点间隧穿^[1]。这种量子效应是电子学革命新阶段的关键,结构或器件尺寸越小,它越能有效地发挥功能^[3]。

目前,国内外对于 QCA 的研究大多以传统四量子点结构的元胞为单元,已经设计出了 QCA 的逻辑电路,如传输线^[4]、扇出线^[4]、反相器^[4]、择多逻辑门^[4]、全加器^[5]等。而对两量子点结构元胞的研究相对较少。两点 QCA 元胞相比于传统四点 QCA 元胞具有更高集成度、更低功耗以及易于制备等优点^[6],值得深入探讨。

文献[7]对由 3 个 QCA 耦合而成的量子细胞神经网络所呈现的丰富的混沌动力学行为进行了理论分析和计算机仿真研究。Yuliang Wang 等人分析了两点 QCA 传输线及择多逻辑门的热力学行为^[8]。Rahimi 等人设计了两点 QCA 的少数门结构,并提出了利用少数门设计全加器的思想^[9]。L. Hook 等人在文献[10]中利用两点 QCA 采用水平和垂直的二维布局方式实现了基本逻辑器件的设计。当信号沿垂直方向需要进行取反操作时,文献[10]采用的是在需发生取反操作的两垂直排列元胞间放置一水平元胞,这种结构在不同的输入情况下元胞容易发生翻转,会降低系统的正确概率。本文设计的两点 QCA 异或门结构和基于异或门结构的全加器电路通过将垂直方向的取反操作转移到水平方向,有效解决了元胞容易发生翻转的问题。

1 两点 QCA 基本原理

两点 QCA 元胞类似半个传统四点 QCA 元胞^[10],它由 2 个逻辑上相互作用的量子点和一个中心时钟量子点以及一个额外电子组成,见图 1,中心量子点仅用于控制时钟,量子点通过隧道结相连,电子可通过隧道结在元胞内量子点间隧穿。电荷密度的分布决定了元胞的极化率,元胞极化率为“+1”和“-1”时分别代表逻辑值“1”和“0”^[2]。如图 2 所示,电子处于上方量子点时代表逻辑值“1”,电子处于下方量子点时代表逻辑值“0”。

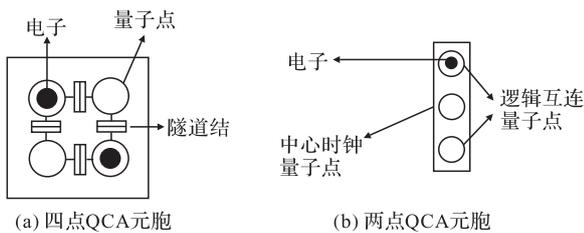


图 1 2 种结构 QCA 元胞
Fig.1 QCA cells of 2 kinds of structure

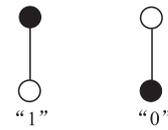


图 2 两点 QCA 元胞的逻辑表示
Fig.2 The denotation of logics of 2-dot QCA

两点 QCA 元胞通过四相位时钟信号来控制信息的流动,即转换、保持、释放和松弛,相邻时钟之间有 90°相位延迟^[10]。图 3 中(图中 H 为势垒高度, t 为时钟周期),在转换相位阶段开始时,元胞状态为空状态,随着势垒逐渐升高,邻近元胞促使本时钟区域内的元胞逐一被极化;在保持相位阶段,势垒高度保持不变,元胞极性不发生改变;在释放相位阶段,势垒高度逐渐降低,电子隧穿概率增加,元胞逐渐失去极化;在松弛相位阶段,势垒高度降至最低,不足以将电子束缚于量子点内,元胞处于非极化态。

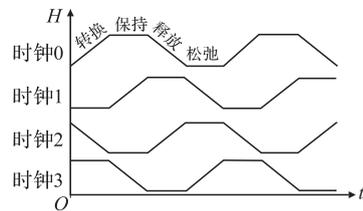


图 3 两点 QCA 的时钟信号
Fig.3 The clocking signals of 2-dot QCA

2 两点 QCA 逻辑设计

通过元胞间的相互作用可实现信息在 QCA 系统的传递。图 4(a)、(b)分别为信号沿水平方向传递时两点 QCA 的传输线和反相器 1 结构。

表 1 三输入逻辑门真值表

Tab1. Truth table of 3-input logic gate

B	A	C	D	A(C)	B	C(A)	D		
0	0	0	1	A+C	0	0	0	B+C(A)	
0	0	1	0		0	1	0		
0	1	0	0		0	1	0		1
0	1	1	0		0	1	1		1
1	0	0	1	AC	1	0	0	B C(A)	
1	0	1	1		1	0	1		0
1	1	0	1		1	1	0		1
1	1	1	0		1	1	1		0

图 4(c)为两点 QCA 的逻辑门结构,其中, A 、 B 、 C 为逻辑门的 3 个输入, D 为逻辑门的输出。固定逻辑门的输入 B 为逻辑“1”或“0”可分别实现两输入与非门和或非门。另外,通过固定 $A(C)$ 为“1”或“0”,也可实现其他逻辑功能,真值表见表 1。文献[10]中设计的信号沿垂直方向传递时两点 QCA 反相器 2 结构见图 4(d), P 为输入元胞, Q 为对 P

进行取反后的元胞,水平放置的元胞 R 的作用是用来实现取反操作。通过对元胞 P 2 种输入情况下的电路进行仿真,结果显示电路会以较大概率处于图 5 所示状态,即元胞容易发生翻转,不能稳定输出理想结果。

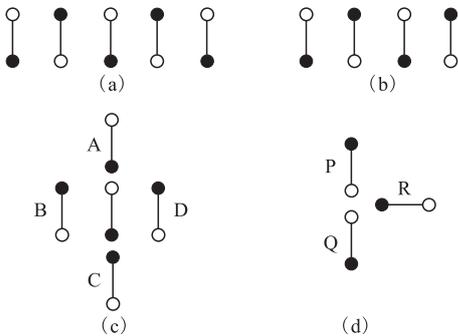


图 4 两点 QCA 的基本逻辑器件
Fig.4 Basic devices of 2-dot QCAA

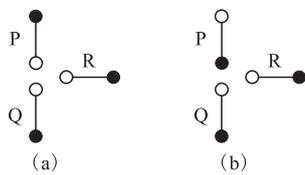


图 5 反相器 2 的 2 种状态
Fig.5 Two states of inverter 2

将沿垂直方向的取反操作转移到水平方向,设计出反相器 3,其结构见图 6。元胞 P 通过元胞 R 完成水平方向取反,在元胞 T 和元胞 Q 之间放置一元胞 O,来保证取反后的元胞 Q 和输入元胞 P 在同一竖直方向上传递。将反相器 3 运用到两点 QCA 的异或门和全加器电路,如图 6 所示,椭圆形内部即为反相器 3。图中虚线矩形框内的元胞 A、B、C_i 为输入元胞,C、C_o、S 为输出元胞,实线矩形框内的元胞为逻辑门的一个输入,通过固定它们的极化率,完成特定的逻辑功能。

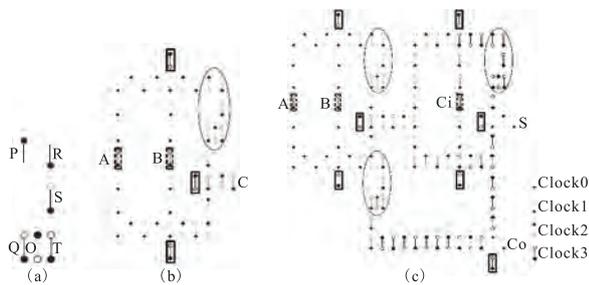


图 6 两点 QCA 电路
Fig.6 Circuits of 2-dot QCA

为了确保电路功能的正确性,将电路分成几个不同的时钟区,不同时钟区内的元胞由不同的 QCA 时钟控制。

3 仿真分析

对于两点 QCA 电路,当系统总的静电能达到最小值时电路处于稳定状态^[10]。采用具有有效搜索全局极值功能的遗传模拟退火法^[11]分别对反相器 3、异或门以及全加器电路进行仿真,结果见图 7。

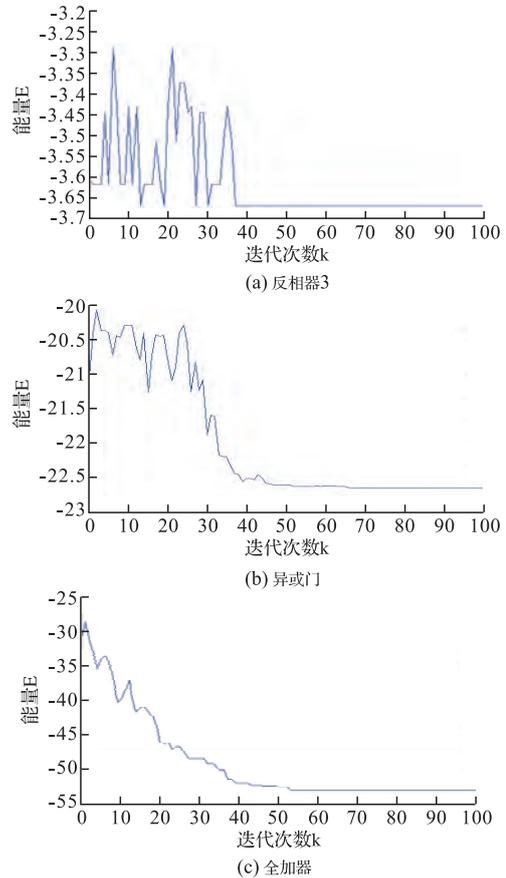


图 7 两点 QCA 电路仿真结果
Fig.7 Simulation results of the circuits of 2-dot QCA

图 7 中,能量 E 是不考虑介电常数的相对值。图 7(a)、(b)、(c)分别为反相器 3、异或门以及全加器的仿真结果。从图 7 可以看出,经过多次的迭代计算,QCA 系统均从初始时刻随机给定的状态进化到了最终的稳定状态。

文献[5]利用传统四点 QCA 设计的全加器电路没能将和数部分和进位部分设计到同一个电路,而是分开设计的,并且电路面积较大。以文献[10]中的元胞尺寸为例,相邻元胞在水平和垂直方向上的间距分别为 2 nm、4 nm。与传统四点 QCA 设计的电路相比,两点 QCA 所需电子数和量子点数均减少了 25%,电路集成度提高了 6.2%。两种结构 QCA 设计的全加器电路性能比较如表 2 所示。

表2 全加器性能比较

Tab.2 The comparison of performance of the full adder

	量子点数/个	电子点数/个	面积/nm ²
传统的四点 QCA	272	136	2 132
提出的两点 QCA	204	102	2 000

4 结语

本文设计了两点 QCA 信号沿垂直方向传递时的反相器结构,并将该结构运用到两点 QCA 的异或门和全加器电路当中。采用遗传模拟退火法对电路进行了仿真,结果表明该结构能够有效实现反相器功能,避免了元胞翻转的问题。另外,与传统四点 QCA 设计的全加器电路相比,两点 QCA 设计的全加器电路结构更加合理,电子数和量子点数均减少了 25%,电路集成度提高了 6.2%,并且避免了文献[5]中全加器电路和数部分和进位部分分开设计的不足。

参考文献(References):

- [1] Lent C S, Tougaw P D, Porod W, et al. Quantum cellular automata[J]. Nanotechnology, 1993, 4(1): 49-57.
- [2] Tougaw P D, Lent C S, Wolfgang P. Bistable saturation in coupled quantum-dot cellulars[J]. J appl phys, 1993, 74(5): 3558-3566.
- [3] 蔡理,马西奎. 单电子晶体管(SET)及其应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2002, 3(6): 60-63. CAI Li, MA Xikui. Single-electro transistor(SET) and its application[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2002, 3(6): 60-63. (in Chinese)
- [4] Lent C S, Tougaw P D. Logical devices implemented using quantum cellular automata [J]. J appl phys, 1994, 75(3): 1818-1825.
- [5] 王森,蔡理,刘河潮. 基于量子细胞自动机的全加器实

现[J]. 固体电子学研究进展, 2005, 25(2): 148-151. WANG Sen, CAI Li, LIU Hechao. A novel full adder implementation using quantum cellular automata [J]. Research & progress of solid state electronics, 2005, 25(2): 148-151. (in Chinese)

- [6] 汪志春,蔡理,张明亮,等. 两点量子元胞自动机逻辑电路设计与仿真[J]. 微纳电子技术, 2014, 51(3): 141-145. WANG Zhichun, CAI Li, ZHANG Mingliang, et al. Design and simulation of the 2-dot quantum-dot cellular automata logic circuit [J]. Micronanoelectronic technology, 2014, 51(3): 141-145. (in Chinese)
- [7] 王森,蔡理,刘河潮. 量子细胞神经网络中的分岔与混沌[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2005, 6(3): 85-87. WANG Sen, CAI Li, LIU Hechao. Bifurcation and chaos in a quantum cellular neural networks[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2005, 6(3): 85-87. (in Chinese)
- [8] Wang Y, Lieberman M. Thermodynamic behavior of molecular - scale quantum - dot cellular automata (QCA) wires and logic devices[J]. IEEE trans nanotechnol, 2004, 3(3): 368-376.
- [9] Rahimi E, Mohammad Nejad S. Scalable minority gate: a new device in two-dot molecular quantum-dot cellular automata [J]. Micro&nano letters, 2012, 7(8): 802-805.
- [10] Hook L R, Lee S C. Design and simulation of 2-D 2-dot quantum-dot cellular automata logic [J]. IEEE trans nanotechnology, 2001, 10(5): 996-1003.
- [11] 王森,蔡理,刘河潮. 基于遗传模拟退火法的量子细胞自动机电路仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11): 2027-2029. WANG Sen, CAI Li, LIU Hechao. Simulation of quantum cellular automaton circuits based on genetic simulated annealing algorithm [J]. Journal of system simulation, 2005, 17(11): 2027-2029. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)