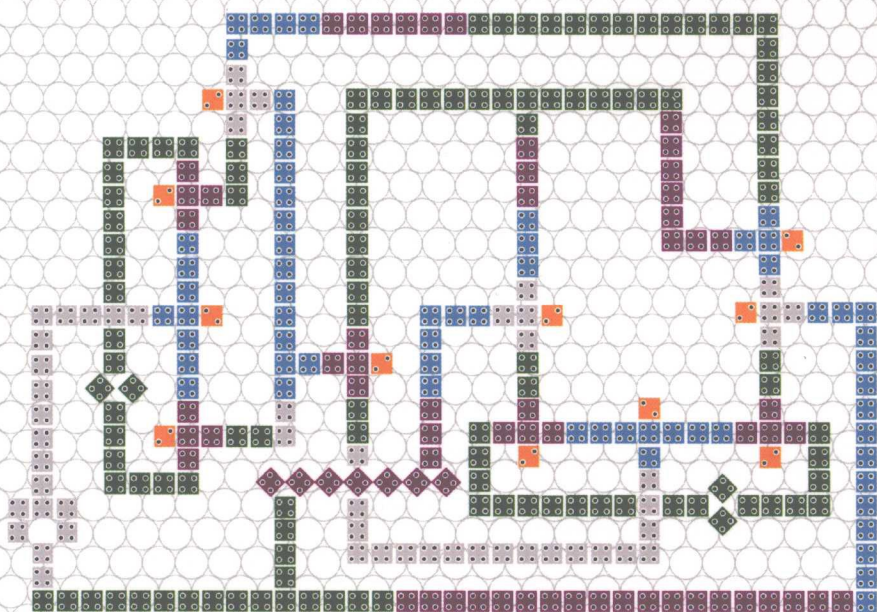




普通高等教育“十二五”规划教材

量子元胞自动机

蔡理 杨晓阔 刘保军 著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

量子元胞自动机

蔡理 杨晓阔 刘保军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以作者所在的微纳电子器件研究团队多年的研究成果为基础,用专业的视角和通俗的语言系统阐述了量子元胞自动机这一新器件的原理,以及由该器件构成电路的应用和可靠性问题。全书共8章,内容主要包括:量子元胞自动机的发展、应用和基础理论、量子元胞自动机电路结构及其缺陷、量子元胞自动机可编程阵列、量子元胞自动机电路的可靠性、量子元胞自动机数据读出接口和时钟电路、量子元胞自动机实验制备等。

本书特点是内容简明扼要、研究论述条理清楚,既系统叙述了量子元胞自动机场耦合计算器件的基础知识,又深入涵盖了这些器件和电路的实际应用,是一本非电荷基纳电子器件方面实用性较强的读物。

本书可作为从事纳电子学、纳电子器件和相关领域的科研人员、工程师及高校教师的参考书,也可作为高等院校电子科学与技术、微电子学、应用物理、电子工程等有关专业的各层次研究生系统学习场耦合计算器件的基础教材,以及本科高年级学生相关专业选修教材,还可作为刚刚步入这一领域的研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子元胞自动机/蔡理,杨晓阔,刘保军著. —北京:科学出版社, 2015.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-045825-4

I. ①量… II. ①蔡… ②杨… ③刘… III. ①自动机—高等学校—教材 IV. ①TP23

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第229116号

责任编辑:潘斯斯 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第一版 开本:720×1 000 B5

2015年10月第一次印刷 印张:13 1/2 彩插:16

字数:270 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

量子元胞自动机是一种新兴非电荷基的场耦合计算器件，由于这种器件是以场耦合计算为机理的，所以具有无引线集成的特征，因此使其在过去的 20 多年中得到了巨大的发展。纳电子学已经成为 21 世纪前沿纳米科学的重要领域之一，其对电子工业和集成电路产业发展所产生的潜在影响，已经成为全球关注的焦点。在纳电子学的发展过程中，出现了一些结构独特、性能优越的纳电子器件，量子元胞自动机就是其中之一。

量子元胞自动机的概念自从 1993 年由美国科学家 Lent 等提出后，经历了快速的发展。量子元胞自动机受到广泛关注的一个重要原因是其独特的工作机理，它不再通过电压或电流，而是通过相邻器件的场耦合作用来处理信息，即量子元胞自动机器件通过无线连接方式进行工作，工作时消耗的能量极低。这对于解决现代 CMOS 集成电路面临的互连及功耗问题是一个巨大的福音，故量子元胞自动机被认为是实现下一代集成电路强有力的候选器件。量子元胞自动机主要分为两类，即电场耦合型和磁场耦合型，本书均有详细讨论。

作者所在的微纳电子器件研究课题组在国家自然科学基金和“863”计划等国家级项目的资助下，长期从事量子元胞自动机的理论及应用研究工作，积累了大量的研究数据。作者以这些数据和成果为基础，结合国内外关于量子元胞自动机研究的最新进展，完成了本书。与其他许多关于新兴纳电子器件方面的书籍不同，本书重在从电路实现及器件可靠性角度来探究量子元胞自动机这种独特工作机理的电子器件，在为集成电路科技人员勾画出一幅器件应用蓝图的同时，也向读者提供了一些应用该器件设计电路时的参考准则和结论。

全书共 8 章，第 1 章对量子元胞自动机的发展和应用进行了总体介绍；第 2 章介绍了量子元胞自动机的工作机理、仿真及制备方法等；第 3 章介绍了量子元胞自动机电路结构；第 4 章研究了量子元胞自动机电路的缺陷；第 5 章讨论了量子元胞自动机可编程阵列结构；第 6 章介绍了量子元胞自动机电路的可靠性研究成果；第 7 章介绍了量子元胞自动机的数据读出接口和时钟电路；第 8 章探讨了量子元胞自动机实验制备。

参与本书部分编写工作的还有崔焕卿和张明亮博士生、汪志春硕士。感谢黄宏图博士生、陈祥叶和李政操硕士的研究工作对本书出版所作出的贡献。感谢康强副教授对本书的润色和审校所做的工作。

在本书出版之际，作者要衷心感谢国家自然科学基金项目（No.61172043，

61302022, 11405270) 和陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (No.2011JZ105) 多年来对本课题组的资助, 使我们能够毫无顾忌、心无旁骛地在纳电子学这一前沿领域自由地遨游和探索。还要感谢科学出版社高教工科分社的匡敏社长、潘斯斯、张丽花编辑, 从本书的选题策划到出版都付出了大量的时间和精力。

为了能够系统、准确地反映量子元胞自动机的研究现状, 本书在编写过程中引用了大量国内外同行的文献、著作和研究成果, 在此一并表示最诚挚的感谢!

纳电子学的发展日新月异, 量子元胞自动机也不例外。虽然作者尽了最大努力, 但限于水平和时间, 书中难免存在不妥之处, 恳请各位读者批评指正。

作 者

2015 年 4 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 量子元胞自动机	2
1.2.1 发展历程	2
1.2.2 研究现状	3
1.3 量子元胞自动机的应用	5
1.3.1 无线集成电路	5
1.3.2 细胞神经网络	5
1.3.3 量子计算机	6
参考文献	7
第 2 章 量子元胞自动机基础	11
2.1 器件结构和时钟	11
2.1.1 四点电性 QCA 器件	11
2.1.2 两点电性 QCA 器件	15
2.1.3 磁性 QCA 器件	16
2.2 基本 QCA 电路	18
2.3 量子元胞自动机仿真	22
2.3.1 QCADesigner	22
2.3.2 OOMMF 软件	24
2.4 器件制备工艺	25
2.4.1 电子束光刻方法	25
2.4.2 聚焦离子束方法	26
2.4.3 纳米蜡纸印刷术方法	26
参考文献	26
第 3 章 量子元胞自动机电路的结构	29
3.1 QCA 组合逻辑电路	29
3.1.1 电性 QCA 奇偶校验系统	29

3.1.2	电性 QCA 不恢复余数除法器	35
3.1.3	电性 QCA 3-8 译码器	42
3.1.4	两点电性 QCA 全加器电路	48
3.1.5	磁性 QCA 全加器电路	50
3.2	QCA 时序逻辑电路	55
3.2.1	电性 QCA 模可变计数器	55
3.2.2	电性 QCA JK 触发器和计数器	61
3.2.3	电性 QCA 双边沿触发器	67
3.2.4	磁性 QCA 环形振荡器	69
	参考文献	74
第 4 章	量子元胞自动机电路的缺陷	77
4.1	电性 QCA 元胞旋转缺陷	77
4.1.1	含旋转元胞缺陷的阵列建模	77
4.1.2	电性 QCA 互连结构的旋转缺陷	80
4.1.3	电性 QCA 逻辑结构的旋转缺陷	85
4.1.4	旋转缺陷结果分析和信号恢复	87
4.2	磁性 QCA 时钟误放效应	92
4.2.1	时钟误放缺陷定义	92
4.2.2	时钟误放缺陷建模	92
4.2.3	时钟误放缺陷定量刻画	95
4.3	电性 QCA 漂移电荷和串扰	100
4.3.1	漂移电荷效应	100
4.3.2	串扰效应	102
	参考文献	104
第 5 章	量子元胞自动机可编程阵列	106
5.1	QCA 可编程单元	106
5.2	QCA 可编程阵列	108
5.3	QCA PLA 的单元胞缺陷	110
5.3.1	元胞缺失对 PLA 单元的影响	111
5.3.2	元胞移位缺陷对 PLA 单元的影响	113
5.3.3	元胞未对准对 PLA 单元的影响	113
5.4	QCA PLA 故障分析与检测	117
5.4.1	PLA 故障分析	117
5.4.2	PLA 故障检测	118

5.4.3	PLA 故障仿真举例	120
	参考文献	121
第 6 章	量子元胞自动机电路的可靠性	123
6.1	概率转移矩阵	123
6.2	组合电路的概率可靠性	124
6.2.1	QCA 数值比较器可靠性	124
6.2.2	QCA 加法器可靠性	131
6.3	时序电路的概率可靠性	136
6.3.1	QCA RS 触发器	137
6.3.2	QCA D 触发器	139
6.3.3	QCA JK 触发器	142
6.4	QCA 容错电路实现	144
6.4.1	块结构容错概念	145
6.4.2	容错反相器的设计	146
6.4.3	容错全加器的设计	147
6.5	QCA 电路背景电荷效应影响	150
6.5.1	四点 QCA 电路背景电荷效应	150
6.5.2	两点 QCA 电路背景电荷效应	156
	参考文献	164
第 7 章	量子元胞自动机的数据读出接口和时钟电路	167
7.1	纳磁体逻辑数据读出原理	167
7.2	磁性隧道结	168
7.2.1	数据读出接口电路的结构	171
7.2.2	片上时钟电路	172
7.2.3	电信号输出电路	173
7.2.4	纳磁体读出接口电路性能分析	174
7.3	数据读出接口电路在单粒子效应下的可靠性研究	180
7.3.1	SEE 敏感结点分析	180
7.3.2	数据读出接口电路的 SEE 临界电荷	181
7.3.3	入射时间和技术结点对 SEE 的影响	182
7.3.4	抗辐射加固设计	183
7.4	纳磁体逻辑片上时钟电路	186
7.4.1	片上时钟电路结构	186
7.4.2	时钟电路功能验证	190

参考文献	191
第 8 章 量子元胞自动机实验制备	195
8.1 实验仪器和技术	195
8.2 直线互连结构制备	197
8.2.1 实验参数的影响	197
8.2.2 测试结果	199
8.3 拐角互连结构制备	201
8.3.1 拐角互连模拟	201
8.3.2 实验制备和测试	204
参考文献	206
附录	207
典型图片展示	

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

微电子技术的发展遵循著名“摩尔定律”已 50 年，随着 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 器件特征尺寸的缩小以及工艺技术的进步，微电子集成电路的发展已经进入纳米级时代。然而，纳米 CMOS 却面临着尺寸缩小带来的功耗、量子效应和散热等严重问题^[1]，而这些问题不能够通过提高传统的 CMOS 工艺简单地加以解决。因此，下一代小尺寸和低功耗的新机理纳电子器件应运而生，它们包括量子点器件、单电子器件、碳纳米管器件、自旋器件和分子器件等^[2,3]。

在这些新兴纳电子器件中，量子点器件中的量子元胞自动机 (Quantum-dot Cellular Automata, QCA)^[4] 由于其独特的设计和实现理念得到了研究者广泛的关注。QCA 与 CMOS 及其他新兴器件不同，它不再是通过电压或电流而是通过邻近器件的磁场或库仑耦合作用来传递和处理信息。QCA 器件有着独特的工作机理，它以非晶体管和无线互连方式进行工作，是实现下一代集成电路强有力的候选器件。同时，它还可以进行量子计算^[4,5]。这些诱人的应用前景使得 QCA 的研究具有重要的科学意义。同时，QCA 的研究也具有重要的军事应用价值，如以下几个方面。

(1) QCA 可用于实现军事通信自治传感器无线网络。目前国内外正在试验用一种多铁性材料作为量子元胞自动机与磁性金属层的电介质^[6]。在这种工作方式下，仅加一个极其微弱的电压到该材料的压电层，量子元胞自动机电路就会开关 (实现信息处理和传递)，没有电流。因功耗极低，约 18meV 就可完成一位操作。关键场所的军用自治传感器无线网络 (用于情报侦察和声音检测) 包括上千个结点，每一个结点都带有若干传感器和双向通信能力。由于磁耦合量子元胞自动机器件的极低功耗和微弱电压驱动特性，保证了 QCA 军事通信自治传感器无线网络的任一信息感知结点只需电池就可维持相当长的时间，便于携带和维护。

(2) QCA 可用作制造临近空间抗辐射片上系统 (System-on-Chip, SoC)。临近空间存在大量的高能粒子 (如中子) 辐射，传统的 CMOS 器件由于采用电子电荷来编码信息，飞行器中的 CMOS 结构在遭受到大量空间高能粒子辐射后发生瞬间电荷收集，诱发了严重的单粒子效应，导致电路发生逻辑错误甚至烧毁，严重影响空间信息处理和数据传递。因此，可靠的临近空间信息处理迫切需要抗辐射的电子器件和电路

等硬件，而磁耦合的量子元胞自动机器件为实现这样的抗辐射系统提供了一种重要的途径。该器件采用自旋量而非电子电荷来编码和处理逻辑信息，避免了空间高能粒子辐射在传统 CMOS 器件上引发的电荷收集和逻辑误翻转效应^[7]。同时，它还拥有极宽的工作温度范围和天然非易失性等优点。

总之，未来战争仍将以电子信息战为主，而纳电子技术无疑是电子信息战的制高点。应用了纳米技术的各种微型飞行器可携带各种探测设备，具有小型 GPS 接收导航和通信能力^[8]。QCA 在武器系统上的应用将使武器装备的体积、重量和功耗成千倍地减小，同时使其信息传输和处理能力以及智能化水平大大提高。

本书将对 QCA 基本电路的缺陷和转换可靠性，以及其耦合功能结构(本书中的耦合功能结构是指由 QCA 器件通过场作用耦合排列在一起形成的功能模块、存储单元和计算处理电路等)的实现进行深入的探讨，意在为相关领域学者提供一个深入交流、发展的平台，同时书中所获结果也可为不久后 QCA 器件在军事信息处理电路中的广泛应用奠定坚实的理论基础。

1.2 量子元胞自动机

1.2.1 发展历程

1993 年，美国圣母玛利亚大学 (University of Notre Dame) 的科学家 Lent 等首次提出了用四个铝量子点和隧道结实现 QCA 器件的概念^[9]。1997 年，该研究小组通过在氧化硅片上采用电子束平板印刷术 (Electron Beam Lithography, EBL) 和阴影蒸发技术 (Shadow Evaporation Technique, SET) 形成 Al-AlO_x-Al 隧道结，在实验室成功实现了第一个功能性 QCA 元胞^[10]。随着隧道结 QCA 器件的不断研究和发展，最近几年又出现了不同类型的 QCA 器件。

总体来说，取决于局部物理耦合场的不同，QCA 主要分为两类：电性量子元胞自动机 (Electronic QCA, EQCA) 和磁性量子元胞自动机 (Magnetic QCA, MQCA)。需要指明的是，EQCA 是 QCA 这种无电流和场作用器件的原型，而 MQCA 是近几年才发展起来的 QCA 的一种不同实现方式。在 2011 年的《国际半导体技术路线图》(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) 报告中，MQCA 这个术语被称为纳米磁性逻辑 (Nano-Magnet Logic, NML)，即磁性元胞自动机或纳磁体实现的逻辑结构。本书为了统一，仍采用 MQCA 这个概念。两种 QCA 器件的计算原理均可简单形象地表述为：改变某一阵列中输入元胞的逻辑状态，则后续元胞由于场相互作用就要依次转换 (转换是一个非常复杂的过程) 自己的状态以使整个系统能量最低或实现取向一致，从而输入元胞的信息可通过 QCA 阵列传递到输出元胞^[11,12]。

为了实现能够在室温下有效工作的 QCA 器件, 研究人员不断探索 QCA 新的实现方案和途径, 并取得两大突破。

第一个突破: 近来不同研究小组提出的室温 EQCA。其中分子 EQCA 以分子量子点^[13,14]为基本组成单元, 通过材料结构的变化, 实现了对 EQCA 室温开关操作和时钟控制。分子 EQCA 尺寸极小, 易于自组装方式实现。

2009 年, 加拿大的 Wolkow 领导的研究小组首次通过实验观察到原子级零维实体的隧穿耦合^[15]: 硅晶格表面的硅原子摇摆键。由于极强的电荷局域化特征, 这些摇摆键可用作量子点实现 EQCA 元胞, 如图 1.1 所示。摇摆键内的电荷和隧穿耦合行为在室温下可被控制, 从而为室温半导体 QCA 的实现提供了更有效的途径。2011 年, Wang 等提出了石墨烯量子点 EQCA 的概念^[16], 并建立了理论模型。注意尽管分子 EQCA 的室温操作取得了明显进展, 但大部分实验是针对元胞级操作, 如何有效制备出含有大量室温分子 EQCA 元胞的电路还需工艺方面的进步。

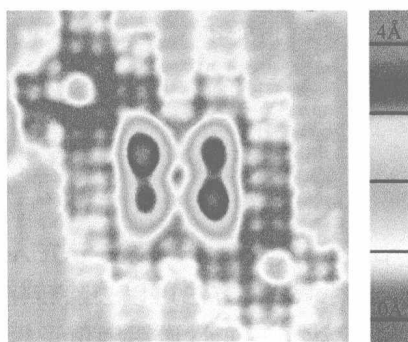


图 1.1 硅原子摇摆键 EQCA 元胞^[13]

第二个突破: 近来 MQCA 的实验实现。英国剑桥大学纳米科学实验室的 Cowburn^[17,18]和圣母玛利亚大学的 Porod^[19]等提出的单畴纳磁体铁磁和反铁磁耦合器件。这种基于磁偶极子耦合的结构具有转换方便和易于在二元信息处理中应用的特点, 这是因为拉长的单畴纳磁体形状各向异性可呈现出双稳态。MQCA 器件可提供非易失性特征和更高的集成密度。

1.2.2 研究现状

1. QCA 电路研究

由于 QCA 取得的两大突破, 国际学者广泛研究了 QCA 器件的开关转换以及进行新的电路结构设计和信息处理应用。QCA 具有两个独特特征: 器件本身也是互连线和时钟场的驱动操作。因而对于 QCA 其电路结构设计和传统的 CMOS 完全不同,

这方面的研究以对 EQCA 组合电路结构和电平触发时序电路结构的设计为代表。详细来说, Gladshstein 等研究了 EQCA 十进制加法器的设计^[20]; Mardiris 等设计了 EQCA 通用元胞自动机单元和数据选择器^[21]; 文献[22]报道了 EQCA 计算结构的设计, 利用传统四相位时钟和多层交叉结构设计了小区域和低延迟前瞻进位加法器、进位延迟乘法器和串并乘法器电路。时序电路结构方面, 韩国 LG 电子 Choi 等研究了 EQCA RS 锁存器^[23]的设计; Walus 等设计了 EQCA 并行闭环存储单元^[24]。

近来工作也报道了利用 MQCA 来实现逻辑结构的工作, 如 Nikonov 和 Carlton 等研究了全局时钟 MQCA 与非门和或非门等逻辑结构的构建^[25,26]; Graziano 等研究了 MQCA 基准电路 NCL TH22 的设计并给出了一种设计 MQCA 结构的四步法(自下向上, 底层到顶层)^[27]。文献[28,29]为对 MQCA 扇出以及共面线交叉结构的实验实现进行的基本探索。需要指明的是, MQCA 具有诸如极低功耗、室温可操作性、天然非易失性和辐射不敏感等优点, 因而它是将来的一个重要研究方向。更多相关工作的综述可参考文献[12]。

国内对于 QCA 的研究较晚, 但也取得了阶段性的成果。中国科学院半导体所汪艳贞制造出了镜像电荷效应 EQCA 器件^[30]; 南京大学的 Wang 等首次提出了双笼氟化的富勒烯($e^-@C_{20}F_{18}(XH)_2C_{20}F_{18}(X=N,B)$)分子 EQCA 器件^[31], 该分子能够将一个额外的电子限制在单个笼子中, 实现了 EQCA 的功能; 宁波大学夏银水等设计了不同位长 EQCA 数值比较器, 模拟结果表明所设计的电路具有正确的逻辑功能^[32]; 中国科学院 Kong 等研究了任意三变量布尔函数的 EQCA 择多逻辑综合优化, 提出了一种布尔网络的有效分解方案^[33], 该方法可以去除转化分解整个网络到择多网络单元时形成的冗余; 文献[34]设计了三变量通用阈值逻辑门电路。本书课题组提出了多种 EQCA 电路, 如下降边沿 JK 触发器、双边沿 D 触发器、计数器以及存储电路^[11,35]。

2. QCA 缺陷研究

Momenzadeh 等最早研究了元胞平行移位缺陷对 EQCA 择多逻辑门的影响^[36]; Dai 等定量研究了 EQCA 逻辑门中元胞平行移位缺陷对电路可靠性的影响^[37]; Crocker 等研究了 EQCA 元胞平行移位效应并采用映射图方法分析了一个可编程逻辑阵列单元中的缺陷^[38]; Dysart 等采用 N 模冗余结构研究了如何提高 EQCA 电路结构的可靠性^[39]。Carlton 等采用辅助纳磁体模块和二轴各向异性研究了 MQCA 与非门逻辑电路的可靠转换^[26]; Bandyopadhyay 等综述指出 MQCA 器件和阵列中存在磁场时钟误放或偏移等缺陷^[40]。Niemier 等通过理论和实验研究了 MQCA 制造过程中出现的纳磁体形状不规则、边缘不平整和边缘凸出等缺陷^[41]。目前, MQCA 可靠性以及功能结构实现的研究还处于起步阶段。更多相关工作的综述可参考文献[11,12]。

1.3 量子元胞自动机的应用

1.3.1 无线集成电路

QCA 最振奋人心的一个应用就是可以构建无引线集成的逻辑电路及空间抗辐射功能组件,这在当前电子器件特征尺寸不断缩小的前提下显得非常重要。图 1.2 所示为采用磁性 QCA 构建的无线片上集成电路^[42]。从图中可见,通过纳磁体间的有序排列,实现了具有特定功能的电路组件,然而这些纳磁体间并没有导线连接。从而大大节约了该电路组件的版图面积,同时也降低了功耗。这也是基于磁偶极子耦合作用的 QCA 器件的重要优势。

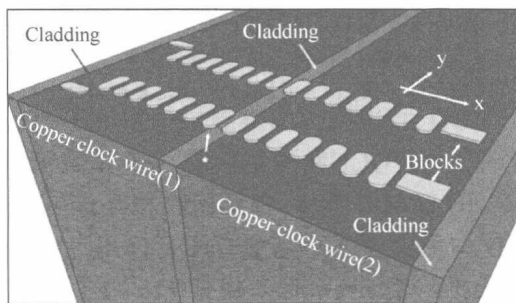


图 1.2 QCA 无线片上集成电路的示意图^[42]

1.3.2 细胞神经网络

无论是电性还是磁性 QCA 器件,都可以按一定规则耦合成细胞神经网络结构,称为量子细胞神经网络(Quantum Cellular Neural Network, QCNN)^[43,44]或磁性元胞非线性网络(Magnetic Cellular Nonlinear Network, MCNN)^[45]。QCA 细胞神经网络的结构同传统 CNN 的结构相类似,元胞只与其邻近元胞相连接,但这种连接不再是传统 CNN 中通过导线相连接而是通过场相互作用来连接。图 1.3 给出了一个二维 5×5 的(电性) QCNN 的结构示意图。

图 1.3 中,方块表示电性 QCA 元胞,每个电性 QCA 元胞与周围元胞通过场相互作用。由于电性 QCA 元胞通过库仑作用不仅能与它直接相邻的元胞进行连接,还能与更远范围的元胞进行连接。因此通过元胞与周围元胞的作用范围可定义 QCNN 的邻域。若 r 表示 QCNN 中电性 QCA 元胞的作用范围,对于一个 M 行 N 列的 QCNN 阵列,第 i 行第 j 列的元胞 $C(i, j)$ 的邻域(即所有与元胞 $C(i, j)$ 有相互作用的元胞)可定义为

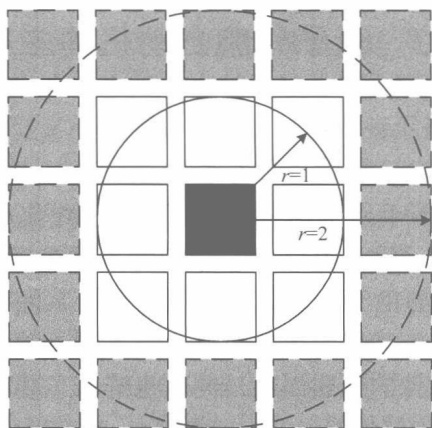


图 1.3 二维大邻域 QCNN 结构示意图

$$N_r(i, j) = \left\{ C(k, l) \mid \max(|i-k|, |j-l|) \leq r, 1 \leq k \leq M; 1 \leq l \leq N; r \geq 1 \right\} \quad (1.1)$$

图 1.3 给出了大邻域 ($r > 1$) QCNN 的结构图, $r = 1$ 表示单邻域的 QCNN, 即中心元胞 (图中黑色方块表示) 仅与周围 8 个元胞有相互作用。 $r = 2$ 表示两倍领域的 QCNN, 即中心元胞不仅与周围的 8 个元胞有相互作用, 还与图中所示为灰色的 16 个元胞相互作用。依次类推, 当 $r = n$ 时, 共有 $[(2n+1)^2 - 1]$ 个元胞与中心元胞相互作用 (不考虑边界条件的情况)。

1.3.3 量子计算机

过去的 20 多年, 量子计算的研究引起了学者浓厚的兴趣, 这是因为基于量子力学原理的计算机在许多方面 (如大数分解、搜索等) 拥有比经典数字计算机更好的性能, QCA 就是量子计算机的一种可能物理实现方式。

与经典计算应用中的 QCA 元胞大都被完全极化不同, 量子计算中的 QCA 元胞未被完全极化^[5]。它们是基本态 $P = +1$ 和 $P = -1$ 的重叠。同样地, 量子计算中的元胞线也是多量子位乘积态的重叠。量子计算的另一个特征是其从概念上需要相干 (coherence) 进行正确的操作 (在真实的系统中, 去相干一直存在, 因而其影响必须通过纠错进行规避)。含有 N 个量子位的量子寄存器如图 1.4 所示。

图 1.4 中, 隧穿能 γ_j 由外部电极设定, 用于降低或升高第 j 个元胞的内部点势垒。每个元胞通过库仑作用耦合到其左边或右边的邻接元胞以及偏置电极。 $P_{\text{bias}, j}$ 也由外部设定, 因而这些 $P_{\text{bias}, j}$ 和 γ_j 均成为量子寄存器的输入。

在量子寄存器中执行一个程序/任务分为三步: 写入初态, 运行算法, 读出终态。

初态可通过设定偏置为 $|P_{\text{bias},j}| \gg 1$ 装进寄存器, 然后等待其迁入基态。如果 $|P_{\text{bias},j}| \gg 1$ ($|P_{\text{bias},j}| \ll -1$), 则元胞被强制转为 $P = +1$ ($P = -1$)。算法的执行是通过对元胞电极应用一系列脉冲实现的。最后的状态可通过对检测有无电子足够敏感的静电计读出(如单电子器件)。更多关于量子计算的知识可参考文献[5]。

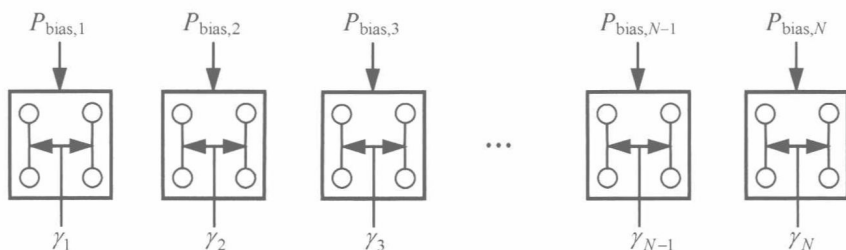


图 1.4 含有 N 个量子位的量子寄存器
每个元胞有 $P_{\text{bias},j}$ 和 γ_j 两个输入

需要指出的是, 与核子和电子自旋相比, 用电性 QCA 器件来实现量子计算机的重要不足是其去相干时间较短。

参 考 文 献

- [1] Bernstein K, Cavin R K, Porod W, et al. Device and architecture outlook for beyond CMOS switches [J]. Proc. IEEE, 2010, 98 (12): 2169-2184.
- [2] 王阳元. 21 世纪硅微电子技术发展的主要趋势和方向[J]. 中国集成电路, 2003, 47: 84-90.
- [3] 蔡理. 纳电子器件及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [4] Lent C S, Tougaw P D. A device architecture for computing with quantum dots[J]. Proc. IEEE, 1997, 85 (4): 541-557.
- [5] Tóth G, Lent C S. Quantum computing with quantum-dot cellular automata[J]. Physical Review A, 2001, 63 (2): 052315-1~9.
- [6] Roy K, Bandyopadhyay S, Atulasimha J. Hybrid spintronics and straintronics: a magnetic technology for ultra low energy computing and signal processing[J]. Appl. Phys. Lett., 2011, 99 (6): 063108-1~3.
- [7] International Technology Roadmap for Semiconductors 2013[R]. <http://www.itrs.net>.
- [8] 杜晋军, 李俊, 洪海丽, 等. 纳米电子器件的研究进展与军事应用前景[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15 (4): 86-89.
- [9] Lent C S, Tougaw P D, Porod W, et al. Quantum cellular automata[J]. Nanotechnology, 1993, 4 (1): 49-57.

- [10] Orlov A O, Amlani I, Bernstein G H, et al. Realization of a functional cell for quantum-dot cellular automata [J]. *Science*, 1997, 277(5328): 928-930.
- [11] 杨晓阔. 量子元胞自动机可靠性和耦合功能结构实现研究[D]. 西安: 空军工程大学博士学位论文, 2012. 06.
- [12] 杨晓阔, 蔡理, 李政操, 等. 量子元胞自动机器件和电路的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2011, 48(12): 754-760.
- [13] Lent C S. Molecular electronics-bypassing the transistor paradigm[J]. *Science*, 2000, 288(5523): 1597-1599.
- [14] Jiao J, Long G, Grandjean F, et al. Building blocks for the molecular expression of quantum cellular automata. Isolation and characterization of a covalently bonded square array of two ferrocenium and two ferrocene complexes[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, 125(8): 1522-1523.
- [15] Haider M B, Pitters J L, DiLabio G A, et al. Controlled coupling and occupation of silicon atomic quantum dots at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102(4): 046805-1~4.
- [16] Wang Z F, Liu F. Nanopatterned graphene quantum dots as building blocks for quantum cellular automata [J]. *Nanoscale*, 2011, 3(10): 4201-4205.
- [17] Cowburn R P. Probing antiferromagnetic coupling between nanomagnets[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, 65(9): 092409-1~4.
- [18] Cowburn R P. Spintronics: change of direction[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(4): 255-256.
- [19] Imre A, Csaba G, Ji L L, et al. Majority logic gate for magnetic quantum-dot cellular automata[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 205-208.
- [20] Gladshstein M. Quantum-dot cellular automata serial decimal adder[J]. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2011, 10(6): 1377-1382.
- [21] Mardiris V A, Karafyllidis I G. Universal cellular automaton cell using quantum cellular automata[J]. *Electron. Lett.*, 2009, 45(12): 803-804.
- [22] Cho H, Swartzlander E E. Adder designs and analyses for quantum-dot cellular automata[J]. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2007, 6(3): 374-383.
- [23] Choi M, Patitz Z, Jin B, et al. Designing layout-timing independent quantum-dot cellular automata (QCA) circuits by global asynchrony [J]. *J. Syst. Archit.*, 2007, 53(3): 551-567.
- [24] Walus K, Jullien G A. Design tools for an emerging SoC technology: quantum-dot cellular automata [J]. *Proc. IEEE*, 2006, 94(6): 1225-1244.
- [25] Nikonov D E, Bourianoff G I, Gargini P A. Suitability for digital logic and scaling of atomistic magnetic QCA[A]. *Proceedings of International Conference on Device Research[C]*, 2008: 163-164.
- [26] Carlton D B, Emley N C, Tuchfeld E, et al. Simulation studies of nanomagnet-based logic architecture[J]. *Nano Lett.*, 2008, 8(12): 4173-4178.