

# 磁性量子元胞自动机拐角结构的理论模拟和实验\*

杨晓阔<sup>1)†</sup> 蔡理<sup>1)</sup> 康强<sup>2)</sup> 李政操<sup>1)</sup> 陈祥叶<sup>1)</sup> 赵晓辉<sup>1)</sup>

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (空军工程大学科研部, 西安 710051)

(2011 年 11 月 7 日收到; 2012 年 1 月 11 日收到修改稿)

磁性量子元胞自动机拐角结构是一种同时含有铁磁耦合和反铁磁耦合的电路. 理论模拟了外加时钟场作用下铸铁磁性材料拐角结构的信号传递. 采用微磁仿真给出了信号传递的磁化演化图, 结果证实了铸铁纳磁体能够实现含有两种冗长耦合结构的稳定转换. 实验制备了相应的拐角结构, 扫描电子显微图和磁力显微图结果显示了成功的电路图案和正确的两种耦合方式信号传递.

**关键词:** 磁性量子元胞自动机, 拐角, 磁化, 磁力显微图

**PACS:** 75.75.+a, 85.70.-w, 85.70.Ay

## 1 引言

规则和周期性排列的磁性纳米点可应用于诸如磁记录媒质<sup>[1-3]</sup>、磁性随机存取存储器<sup>[4]</sup>和磁性逻辑电路<sup>[5,6]</sup>等结构中. 其中, 磁性逻辑电路中的磁性纳米点也可称作磁性量子元胞自动机 (magnetic quantum-dot cellular automata, MQCA)<sup>[6]</sup>, 它由单畴纳磁体构成, 是为克服量子元胞自动机低温工作<sup>[7]</sup>而提出的一种新兴器件. 近来, MQCA 引起了集成电路研究人员浓厚的兴趣, 这是因为该器件具有非易失性、抗辐射和潜在的低功耗操作等优点<sup>[8]</sup>, 是一种代替电荷基 CMOS 器件的重要候选技术.

拐角结构是一种非常关键的 MQCA 电路, 它可实现不同逻辑门的互连、信号传递方向的变换和信号分发功能, 类似于 CMOS 技术中的弯曲铜导线. 然而, 不像传统技术中弯曲导线和直导线具有相同的信号传递机理, MQCA 拐角结构是一种同时含有铁磁耦合和反铁磁耦合两种耦合方式的功能结构, 而铁磁耦合和反铁磁耦合的机理不同. 此外, 拐角结构还是一种不对称的纳磁体阵列结构, 单方

向的纳磁体杂散场可能对其操作产生影响, 因而有必要对其进行深入研究. 文献 [9] 实验展示了少量纳磁体通过两种耦合方式实现的扇出结构, 但该结构具有高度对称性, 不能体现两种耦合实现非对称电路结构的特征. 文献 [10] 理论研究了拐角结构的构建和模拟, 但其含有的纳磁体很少 (3 个纳磁体构成的两种耦合), 且目前还未见有对非对称 MQCA 拐角功能结构的实验报道. 本文研究了一种含有冗长纳磁体阵列铁磁耦合和反铁磁耦合构成的拐角结构, 运用磁学计算软件进行了磁化动态的模拟并制备了该功能结构, 结果显示了正确的功能. 这些理论和实验研究结果丰富了 MQCA 基本逻辑结构库, 同时也有助于大规模纳磁体混合耦合的不对称电路结构实现.

## 2 MQCA 器件和拐角结构

MQCA 器件或电路采用纳磁体的磁化来表征二元信息并进行逻辑操作, 可用多个纳磁体阵列的 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程<sup>[11]</sup>对电路动态进行物理描述和计算. 在  $x$ - $y$  平面上, 对于长轴

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61172043), 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (批准号: 2011JZ015) 和空军工程大学研究生科技创新计划项目资助的课题.

† E-mail: yangxk0123@163.com

沿着  $y$  方向的纳磁体而言, 其磁化方向朝上或朝下分别用于编码二元 ‘1’ 或 ‘0’, 而沿短轴朝右的磁化则为空态. 纳磁体之间的偶极子作用产生了垂直线方向的铁磁耦合排序和水平线方向的反铁磁耦合排序. 为了研究多个纳磁体构成的铁磁耦合和反铁磁耦合拐角结构的信号传递是否可靠, 我们设计了图 1 所示的 MQCA 拐角互连结构.

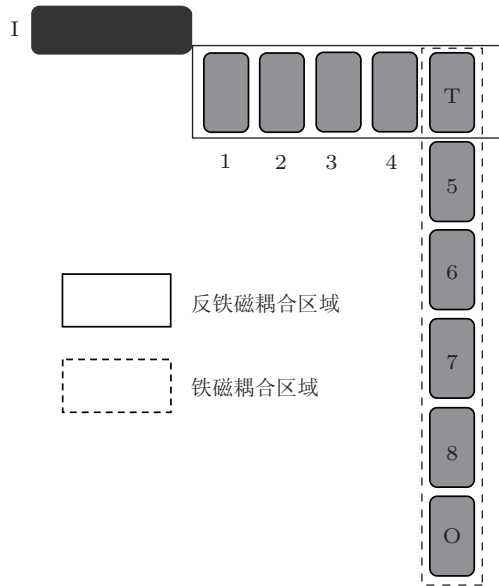


图 1 MQCA 拐角电路结构

该电路结构包含有两条信息传输路径, 即水平方向 5 个纳磁体构成的反铁磁耦合区域 (实线方框所示) 和垂直方向 6 个纳磁体构成的铁磁耦合区域 (虚线方框所示). 这个结构的目的是完成将纳磁体 I (或纳磁体 1) 包含的信息传递到纳磁体 O 的任务, 从而实现信息转移和传递方向的变换. 图 1 中, 拐角结构的最左端含有一水平放置的偏置纳磁体 I, 该器件的作用是用于设定输入纳磁体 1 的初态; O 为输出纳磁体; 两条传输路径共用转角纳磁体 T. 设计的这个拐角结构具有下面两个特点: 一是两条耦合路径中都含有 3 个以上的纳磁体; 二是两种耦合方式的结合处 (纳磁体 T) 是非对称点, 因为该结构上部没有铁磁耦合区域.

### 3 MQCA 拐角结构磁化动态模拟

为了研究这种拐角结构的信号传递动态, 运用 OOMMF(object oriented micromagnetic framework) 软件<sup>[12]</sup> 对设计的结构进行了磁化模拟.

选用铸铁磁性材料<sup>[13]</sup> 来构成纳磁体器件, 该材料的参数为: 饱和磁化  $M_s = 17 \times 10^5 \text{ A/m}$ , 交换作用常数  $A = 21 \times 10^{12} \text{ J/m}$ ; 选取各向异性参数  $K_1 = 2.8 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ , 阻尼系数  $\alpha = 0.5$ . 纳磁体 I 的平面尺寸为  $350 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ , 其他的为  $100 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ . 理论模拟中, 对拐角结构运用一向右的时钟场, 则所有纳磁体的指向均朝右; 此时偏置纳磁体 I 将会磁化纳磁体 1 到逻辑 ‘0’ 态, 接下来观察信号在拐角中的传递情况.

图 2 给出了 Fe 纳磁体拐角结构的 OOMMF 磁化状态演化图. 图 2(a) 所示为向右时钟场作用后的初态. 图 2(b) 中, 偏置纳磁体预置输入. 图 2(c) 中, 逻辑 ‘0’ 态通过反铁磁耦合作用到纳磁体 2, 纳磁体 2 呈现出逻辑 ‘1’ 态. 图 2(d)—(f) 中, 信号通过三次反铁磁耦合成功传递到了转角纳磁体 T. 转角纳磁体 T 是一个拐点, 由于纳磁体 4 的对角效应影响, T 通常很难反转纳磁体 5. 但这里选用了铸铁磁性材料来实现纳磁体器件, 其极大的交换常数确保了 T 的强驱动作用. 因而从图 2(g) 中观察到了成功的第一级铁磁耦合信号传递. 接下来, 拐角结构将通过四次铁磁耦合作用, 最后我们在纳磁体 O 中成功得到了输入逻辑 ‘0’ 态. 从图 2 可见, Fe 纳磁体拐角结构的磁化演化图清晰地表明没有任一个纳磁体在其前端的驱动纳磁体被转换之前发生翻转, 信号得到了顺序的传递. 进一步地, 我们萃取了两个特殊位置纳磁体的磁化率随时间变化的曲线如图 3 所示, 纵轴为归一化磁化. 从图 3 可见, 输出纳磁体 O 确实后于转角纳磁体 T 的转换, 大约延时  $1.75 \text{ ns}$ , 但信号展示了正确的前向传递.

### 4 MQCA 拐角结构实验结果

本文采用电子束平板印刷术 (electron beam lithography, EBL), 镀膜和剥离 (lift-off) 工艺来制备 MQCA 拐角功能结构. 将一定浓度的 ZEP520A 正性光刻胶溶解在氯苯中, 获得配比为 1.7 的电子束胶. 然后利用旋涂法在单晶硅片上得到  $200 \text{ nm}$  厚的胶膜, 紧接着将旋涂 ZEP520A 胶膜的硅片在  $180^\circ \text{C}$  的热板上烘烤  $3 \text{ min}$ . 烘烤后, 将硅片在 CABL-9000C 电子束光刻机上进行 MQCA 拐角结构的图形曝光. 曝光场尺寸为  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ ,

曝光加速电压为 30 kV. 曝光后, 将硅片在显影液中进行常温显影 60 s 并清洗, 用高纯氮气枪对样品进行干燥. 以上所有的实验过程均在 1000 级以上超净间中完成. 然后对显影后的硅片在 ZHD-400 高

性能蒸发镀膜设备中进行镍铁合金磁性材料的镀膜实验. 这里选用镍铁合金 ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) 进行实验是因为该材料的磁导率更高, 相比铸铁磁性材料更容易得到清晰的功能测试图像.

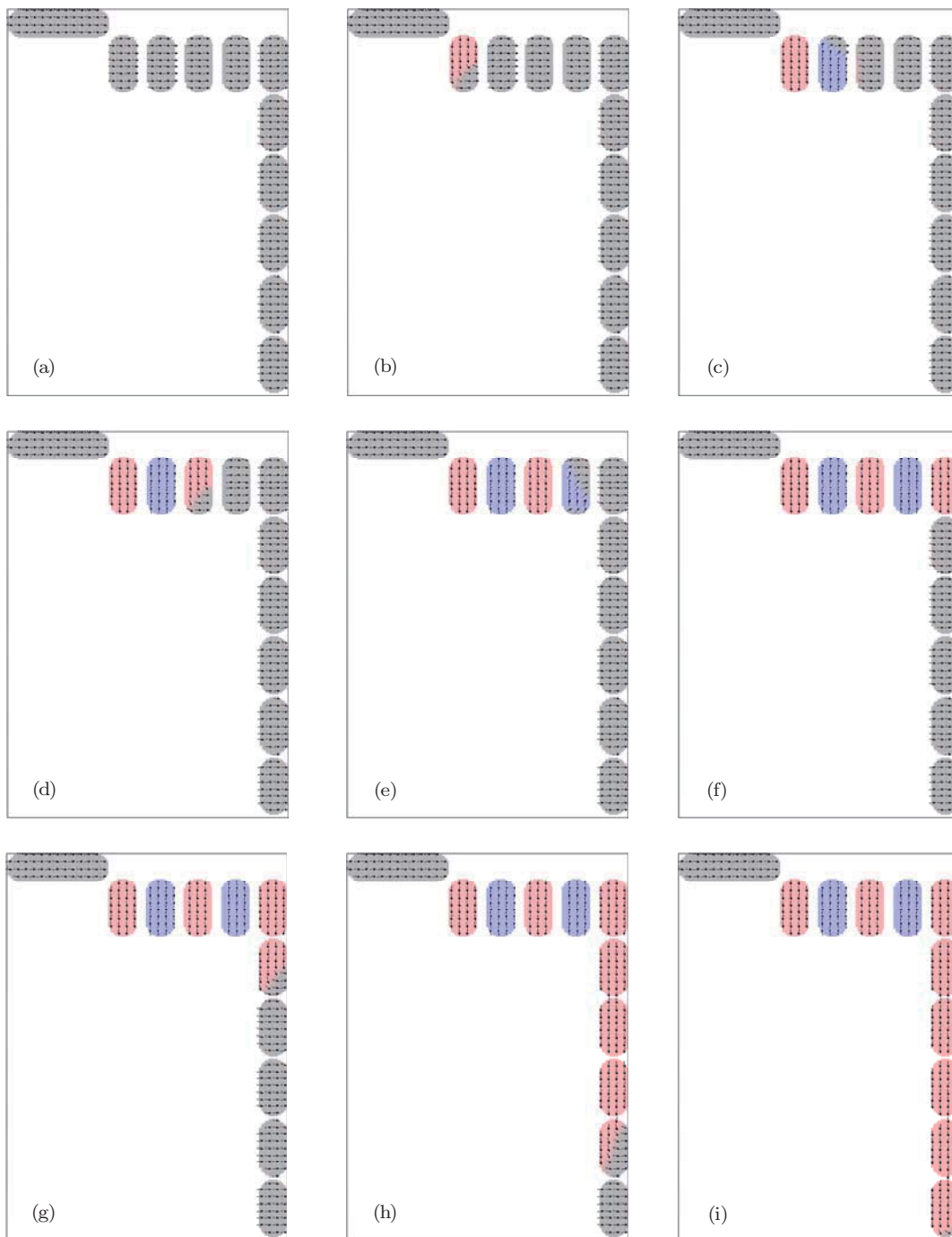


图2 铸铁磁性材料拐角结构的磁化演化图

镍铁合金膜的制备过程分为两步: 抽真空和镀膜. 抽真空阶段的详细过程为: 放入硅样片, 开启 ZHD-400 镀膜设备的机械泵和前级阀, 抽取分

子泵腔室的真空到 0.5 Pa 时停止; 关闭前级阀, 开启旁路阀, 用机械泵抽取主腔室的真空到 5 Pa 时停止; 关闭旁路阀, 开启前级阀, 并一次开启主

阀和打开分子泵电源, 用分子泵抽取主腔室真空到  $3 \times 10^{-5}$  Pa 时方可开始镀膜. 镀膜阶段的详细过程为: 开启基片台旋转, 打开膜厚仪开关, 观察频率计示数. 然后开启电阻蒸发按键, 缓慢调节旋钮, 电流升至 180 A 时 (熔化镍铁合金的电流) 将挡板打开, 材料开始蒸镀, 观察频率计的跳变. 当示数降低 200 后 (示数跳变 200 控制镍铁合金膜厚为 25 nm) 先关闭挡板, 然后降低电流调节旋钮至初始值, 关闭蒸发按键, 关闭基片台旋转. 蒸镀结束后, 关闭分子泵, 关闭主阀, 关闭机械泵和前级阀, 通氮气, 开腔室取出硅样片. 注意我们在蒸镀磁性材料前预先在硅片上镀上了一层约 8 nm 厚的钛以增加硅片黏附度. 最后在氯苯有机溶剂中对硅片进行剥离工艺过程, 时间约为 4—5 min.

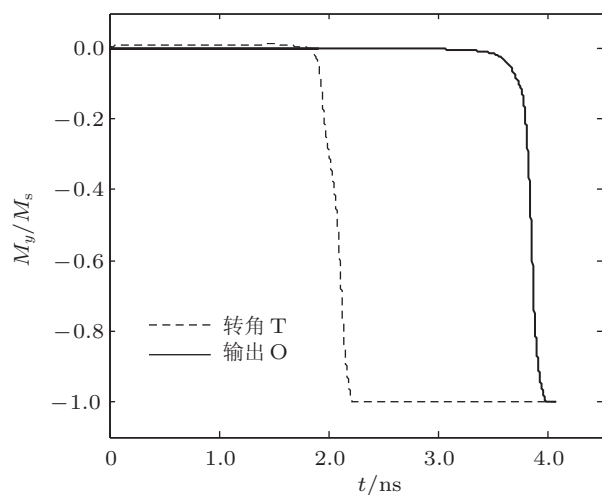


图3 MQCA 拐角结构转角和输出纳磁体的磁化曲线

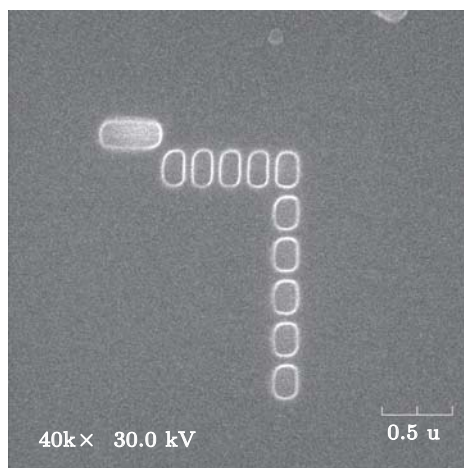


图4 EBL 后的拐角 SEM 图像

运用优化的剂量参数, 即 100 pA 电子束束流

和  $0.38 \mu\text{s}$  曝光时间<sup>[14]</sup>来制备拐角结构, 所有转移纳磁体的平面尺寸为  $100 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ . 图 4 所示为多次实验得到的电子束光刻后的拐角扫描电子显微 (SEM) 图像. 图 5 所示为对硅片镀膜并进行剥离工艺后的拐角结构 SEM 图像. 从图中可见, 两步工艺图像均清晰地展示了拐角功能结构, 水平反铁磁耦合排列纳磁体和垂直铁磁耦合排列纳磁体的结构比较完整, 未出现制备缺陷, 可以进行有效的电路测试.

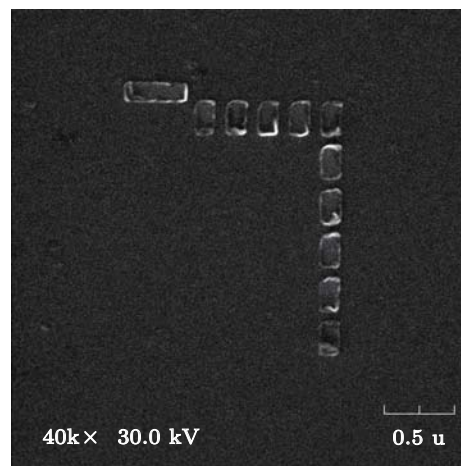


图5 镀膜并剥离后的拐角 SEM 图像

使用磁力显微镜对制备的 MQCA 非对称拐角功能结构进行测试. 为了完成这个过程, 需要应用时钟场将拐角结构中所有纳磁体预置到空态, 这样来自电路最左端水平偏置纳磁体的输入信号才会在电路中得到有效传递. 采用 HL-6 型霍尔效应仪来完成上述工作. 实验过程为: 将硅样片置于霍尔效应仪产生的 100 mT 恒定场 (494 mA 励磁电流) 中, 然后逐渐减小励磁电流到 0. 由于恒定场磁化所有 MQCA 器件到空态 (I 除外), 因而当外加时钟减小时, 它们将被偶极子耦合作用顺序翻转到基态. 采用磁力显微镜对硅样片进行测试, 观察到的磁力显微图像 (MFM) 如图 6 所示. 为了清晰起见, 我们标出了拐角结构中每个纳磁体器件的磁化指向, 见图 6 中箭头所示. 从图 6 中可观察到两个结果: 1) 该结构需要传递的逻辑状态是逻辑 ‘0’ (纳磁体 1), 而测试结果表明最后的输出纳磁体 O 呈现出和纳磁体 1 相同的磁化指向 (如箭头所示), 即逻辑值 ‘0’ 从纳磁体 1 传递到了输出纳磁体 O; 2) 该结构有效展示出了垂直方向铁磁耦合和水平方向反铁磁耦合两种机能现象. 因而, 制备的 MQCA 拐角结构成

功实现了信号传递方向的变换并展示了正确的拐角结构功能.

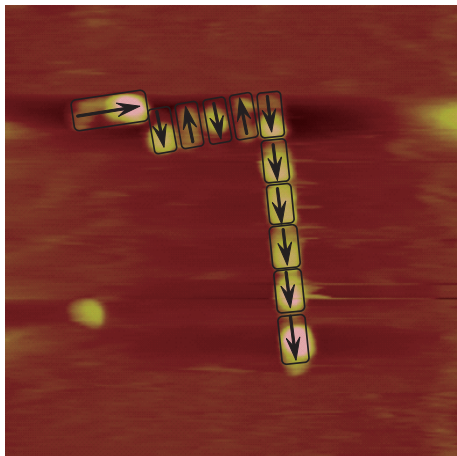


图6 拐角结构的 MFM 图像

## 5 结 论

通过微磁模拟软件 OOMMF 对设计的冗长路径耦合拐角结构进行了理论模拟, 发现铸铁磁性材料拐角结构可以顺序的传递逻辑信号, 磁化演化图和磁化曲线图证实了其稳定的转换. 运用优化的实验参数经过多次实验得到了无缺陷的拐角结构图像, 对该结构进行的扫描电子显微图和磁力显微图测试结果表明设计的拐角功能正确, 实现了同一结构中两种耦合方式信号的有效传递. 总的来说, 设计和制备的拐角结构为大规模 MQCA 电路的构建提供了重要的理论基础. 而大规模 MQCA 电路的片上时钟场驱动将是下一步的研究方向.

感谢西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室王久洪讲师和张亮亮实验员的友情协助.

- 
- [1] Xiao Q J, Yang T Y, Ursache A, Tuominen M T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07C521
  - [2] Wood R, Williams M, Kavcic A, Miles J 2009 *IEEE Trans. Magn.* **45** 917
  - [3] Zhang S Q, Chen Z D 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1436
  - [4] Nahas J J, Andre T W, Garni B, Subramanian C, Lin H, Alam S M, Papworth K, Martino W L 2008 *IEEE J. Solid-State Circuits* **43** 1826
  - [5] Cowburn R P, Welland M E 2000 *Science* **287** 1466
  - [6] Imre A, Csaba G, Ji L L, Bernstein G H, Porod W 2006 *Science* **311** 205
  - [7] Mitic M, Cassidy M, Petersson K, Starrett R, Gauja E, Brenner R, Clark R, Dzurak A, Yang C, Jamieson D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 013503
  - [8] Orlov A O, Imre A, Csaba G, Ji L L, Porod W, Bernstein G H 2008 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **3** 1
  - [9] Varga E, Orlov A O, Niemier M T, Hu X S, Bernstein G H, Porod W 2010 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **9** 668
  - [10] Niemier M, Dingler A, Sharon H X 2008 *Proceedings of 26th IEEE International Conference on Computer Design* 506
  - [11] Yang X K, Cai L, Kang Q, Bai P, Zhao X H, Feng C W, Zhang L S 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 098503 (in Chinese) [杨晓阔, 蔡理, 康强, 柏鹏, 赵晓辉, 冯朝文, 张立森 2011 物理学报 **60** 098503]
  - [12] Donahue M J, Porter D G 1999 OOMMF user's Guide, <http://math.nist.gov/oommf>.
  - [13] Dao N, Homer S R, Whittenburg S L 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3262
  - [14] Yang X K, Cai L, Wang J H, Huang H T, Zhao X H, Li Z C, Liu B J 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 047502 (in Chinese) [杨晓阔, 蔡理, 王久洪, 黄宏图, 赵晓辉, 李政操, 刘保军 2012 物理学报 **61** 047502]

# Theoretical study and experimentation of magnetic quantum-dot cellular automata corner structure\*

Yang Xiao-Kuo<sup>1)†</sup> Cai Li<sup>1)</sup> Kang Qiang<sup>2)</sup> Li Zheng-Cao<sup>1)</sup>  
Chen Xiang-Ye<sup>1)</sup> Zhao Xiao-Hui<sup>1)</sup>

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

2) ( Department of Science Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China )

( Received 7 November 2011; revised manuscript received 11 January 2012 )

## Abstract

Magnetic quantum-dot cellular automata (MQCA) corner structure consists of both ferromagnetic coupling and anti-ferromagnetic coupling. Signal propagation of corner structure for magnetic material Fe is theoretically investigated by applying an external clocking field method. Magnetization evolution image on signal propagation of the corner is presented by micromagnetic simulation; it is shown that Fe nanomagnets can ensure stable switching of corner including two kinds of lengthy coupling. The proposed corner structure is then fabricated by electron beam lithography, thermal evaporation and lift-off technologies. Scanning electron microscopy and magnetic force microscopy measurement results demonstrate perfect pattern and correct signal propagation of two types of coupling.

**Keywords:** magnetic quantum-dot cellular automata, corner, magnetization, magnetic force microscopy

**PACS:** 75.75.+a, 85.70.—w, 85.70.Ay

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172043), the Key Program of Shaanxi Provincial Natural Science for Basic Research (Grant No. 2011JZ015), and the Science and Technology Innovation Program for Graduates of Air Force Engineering University.

† E-mail: yangxk0123@163.com