

磁性量子元胞自动机功能阵列的实验研究*

杨晓阔^{1)†} 蔡理¹⁾ 王久洪²⁾ 黄宏图¹⁾ 赵晓辉¹⁾ 李政操¹⁾ 刘保军¹⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054)

(2011 年 9 月 9 日收到; 2011 年 10 月 14 日收到修改稿)

采用电子束光刻、热蒸镀和剥离工艺在室温下制备了多组磁性量子元胞自动机器件功能阵列. 实验研究了曝光剂量和曝光时间对三个不同间距参数磁性量子元胞自动机阵列图案的影响, 发现 100 pA 电子束束流和 0.38 μ s 曝光时间可获得理想的阵列图案. 对制备的反相器阵列结构进行了磁力显微测试, 结果显示了正确的逻辑功能, 成功实现了不同间距参数功能阵列的实验制备. 此外, 实验还发现纳磁体阵列制备中容易出现缺陷, 模拟结果表明丢失纳磁体缺陷导致了信号传递反相.

关键词: 纳磁体, 电子束光刻, 磁力显微图, 间距

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

1 引言

近来, 采用单畴纳磁体代替传统 CMOS 晶体管实现数字逻辑结构引起了学者浓厚的兴趣. 这是因为随着特征尺寸的减小, 晶体管遇到了前所未有的能耗挑战, 而单畴纳磁体逻辑结构消耗的能量极少. 实际上, 单畴纳磁体也可称作磁性量子元胞自动机 (magnetic quantum-dot cellular automata, MQCA)^[1-3], 它是量子元胞自动机器件^[4,5]的一种不同物理实现结构. MQCA 器件拥有许多重要的特征和优势: 首先, MQCA 器件和电路的功耗特别低, 研究表明如果 10^{10} 个纳磁体每秒转换 10^8 次, 其功率消耗仅为 0.1 W^[6]. 其次, MQCA 器件具有天然非易失性, 即存储的数据在掉电后不丢失. 最后, MQCA 器件对空间高能粒子辐射不敏感^[7], 因为该器件采用自旋量而非电荷量来编码信息, 避免了空间辐射效应. MQCA 器件的这些优势使其在电子和军事领域有着广泛的应用前景.

目前, MQCA 器件的实验制备已取得了一定进展. Imre 等采用镍铁磁性材料实验展示了 MQCA 能够实现互连线和择多逻辑门结构^[1]. 文献 [8] 实

验制备了两种短长度互连线结构, 即水平互连线和垂直互连线. 文献 [9] 实验展示了片上时钟场下纳磁体逻辑器件的转换特性, 这些结果均大大推动了 MQCA 的发展. 然而, 文献 [10] 的计算研究表明 MQCA 功能阵列对纳磁体间距等参数极其敏感, 因此寻找不同间距下有效的实验制备参数以及研究制备中出现的缺陷就非常重要, 但是对于这方面的工艺参数影响报道却比较少. 本文采用电子束平板印刷术 (electron beam lithography, EBL)、热蒸镀 (thermal evaporation) 和剥离 (lift-off) 工艺制备了不同间距参数 MQCA 互连线和反相器阵列, 重点研究了曝光时间和剂量的影响, 并给出了测试结果. 此外, 针对实验中遇到的缺陷进行了仿真, 研究了其如何影响线阵列的功能. 所得实验参数和模拟结果可为 MQCA 功能阵列制备和缺陷的分析提供理论依据.

2 MQCA 器件结构

拉长的单畴纳磁体 (MQCA 器件) 显示出形状各向异性, 形状各向异性产生了不同的磁化指向,

* 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

因而 MQCA 器件可实现双稳态的操作^[1,11]. 基本的 MQCA 元胞和其结构如图 1 所示. 对于一个长方体形状的纳磁体, 它的双稳态源于其指向长轴的剩余磁化(磁场时钟为 0 值时的磁化). 长轴通常被视为易磁化轴 (easy axis), 而短轴则为难磁化轴 (hard axis), z 轴表示厚度. 在外部磁场作用下, 磁化方向朝上或朝下分别用于编码二元 ‘1’ 或 ‘0’, 而沿难磁化轴朝右的磁化则为空态 (null), 如图 1 所示. 纳磁体之间的偶极子耦合产生了垂直线方向的铁磁排序(同一指向)和水平线方向的反铁磁排序(‘1’ 和 ‘0’ 交替).

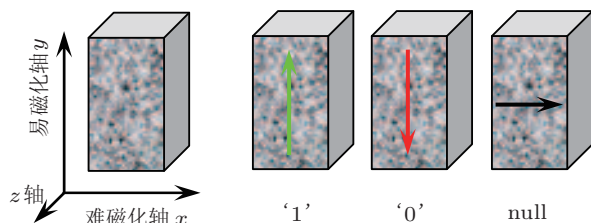


图 1 MQCA 器件以及二元逻辑 ‘1’ 和 ‘0’ 的定义

3 实验

采用电子束光刻曝光、镀膜和剥离工艺制备 MQCA 功能阵列. 首先, 将一定浓度的 ZEP520A 正性抗蚀剂溶解在氯苯中, 获得配比为 1.7 的电子束胶. 然后利用旋涂法 (一级转速 300 r/min, 二级转速 4000 r/min) 在单晶硅片上得到 200 nm 厚的胶膜. 为了去除 ZEP520A 胶膜中的残余溶剂、增加 ZEP520A 胶膜与衬底的黏附力以及平整 ZEP520A 胶膜的表面, 将旋涂 ZEP520A 胶膜的硅片在 180°C 的热板上烘烤 3 min. 烘烤后, 将硅片在 CABL-9000C 电子束光刻机上进行阵列图形曝光 (图形转移到硅片). 采用的曝光加速电压为 30 kV. 曝光场尺寸为 120 μm $\times$ 120 μm . 曝光后, 将硅片在显影液中进行常温显影 60 s. 显影后, 利用异丙醇 IPA (isopropyl alcohol) 对样品进行清洗以停止显影并去除曝光结构上的残余显影液. 清洗后, 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进行热蒸镀膜实验, 膜厚为 25 nm, 所用材料为镍铁合金软磁材料, 镀膜室的真空度为 1×10^{-4} Torr (1 Torr = 1.333 Pa). 注意为了增加镍铁合金薄膜在硅片上的黏附度, 我们在蒸镀磁材

料前预先在硅片上镀上了一层约 8 nm 厚的钛. 最后在氯苯有机溶剂中对硅片进行剥离操作, 时间约为 4—5 min.

4 实验结果分析

实验制备的 MQCA 功能阵列为 6 个纳磁体构成的反相器和 29 个纳磁体构成的互连线结构, 通过改变电子束束流和曝光时间等剂量参数来研究上述阵列的制备. 其中每个纳磁体器件的 x - y 平面尺寸为 100 nm $\times$ 200 nm, 采用的电子束束流强度分别为 75 pA 和 100 pA, 曝光剂量为 120 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 而曝光时间在 0.36 μs 和 0.41 μs 之间变化.

4.1 曝光时间和束流的影响

在同一硅片上制备了三种不同间距 (40 nm, 50 nm 和 60 nm) 的 MQCA 反相器和互连线功能阵列. 曝光过程为: 首先采用 75 pA 的电子束束流进行制备实验, 没有得到任何一组曝光图案. 然后将电子束束流加大到 100 pA 进行曝光实验, 在一定的曝光时间下得到了有效的阵列图案. 不同曝光时间下不同间距阵列制备的结果如表 1 所示. 其中图形未完全曝光或图形曝光后出现黏连, 我们认为阵列图案曝光 “失败”; 否则, 认为阵列曝光 “成功”.

表 1 100 pA 束流下不同曝光时间的图案转移结果

间距/nm	时间/ μs					
	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41
40	失败	失败	成功	失败	失败	失败
50	失败	失败	成功	成功	失败	失败
60	失败	失败	成功	成功	失败	失败

从表 1 可见, 当剂量为 100 pA 束流和 0.38 μs 曝光时间时, 我们成功制备出了三种不同间距的 MQCA 阵列. 这三种不同间距参数 MQCA 反相器和互连线阵列的扫描电子显微 (SEM) 图像如图 2—4 所示, 图中水平放置的纳磁体表示输入. 通过分析这些结果可以发现曝光时间严重影响 MQCA 阵列的图形转移效果, 小的和大的曝光时间均不能获得需要的图像. 这是因为曝光时间少导致图形未完全曝光, 不能获得显影图像; 而大的曝光时间虽有利于曝光图案的转移, 但其容易引起 MQCA 器件间发生黏连, 同样不能获得正确的结果.

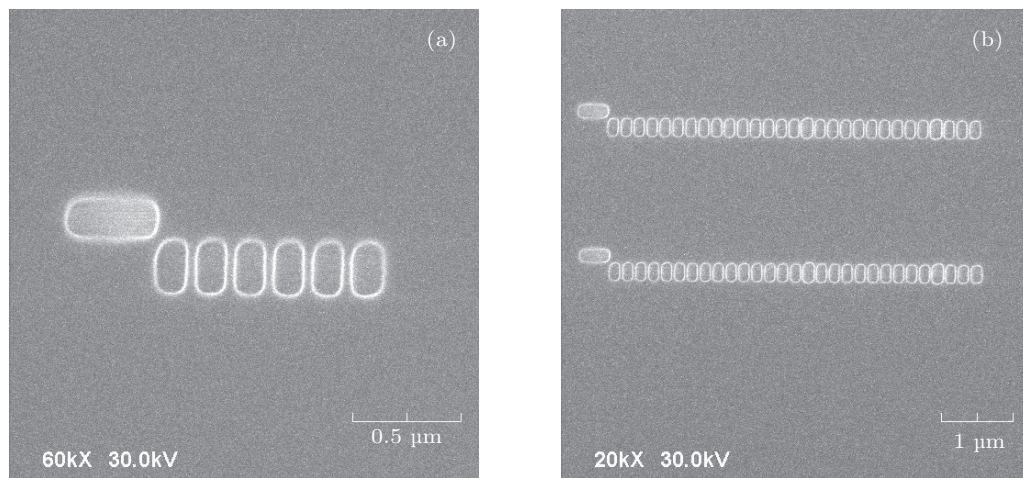


图2 间距为 40 nm 的不同功能阵列的 SEM 图像 (a) 反相器, (b) 互连线

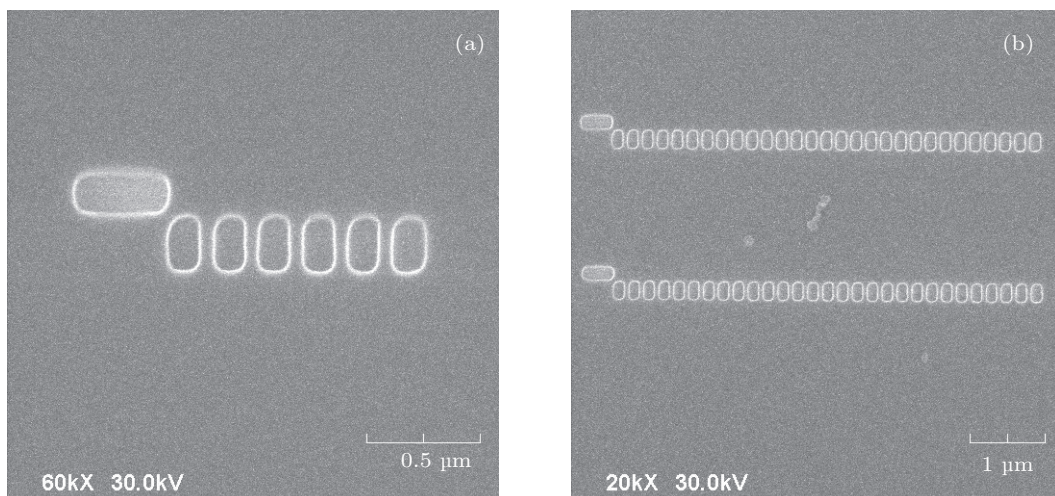


图3 间距为 50 nm 的不同功能阵列的 SEM 图像 (a) 反相器; (b) 互连线

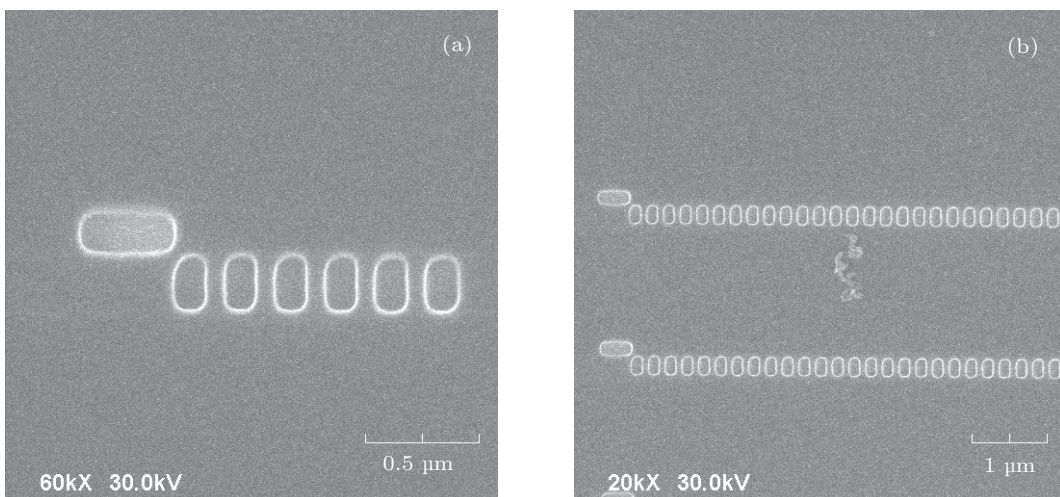


图4 间距为 60 nm 的不同功能阵列的 SEM 图像 (a) 反相器; (b) 互连线

4.2 剥离和测试结果

对形成的功能阵列图案进行镀膜和剥离工艺后的 SEM 图像如图 5 所示, 选取的图像为 60 nm 间距 (0.38 μs 曝光时间) 的反相器和互连线功能阵列. 从图 5 可见, 剥离工艺成功得到了反相器和互

连线这两种阵列结构. 同时, 图 6 给出了 0.41 μs 曝光时间下 MQCA 阵列剥离后 (60 nm 间距) 的 SEM 图像. 从图 6 可见, 尽管更长的曝光时间有助于图案的产生, 但纳磁体阵列却发生了黏连, 这也进一步证实了大剂量曝光不能产生正确图案的结论.

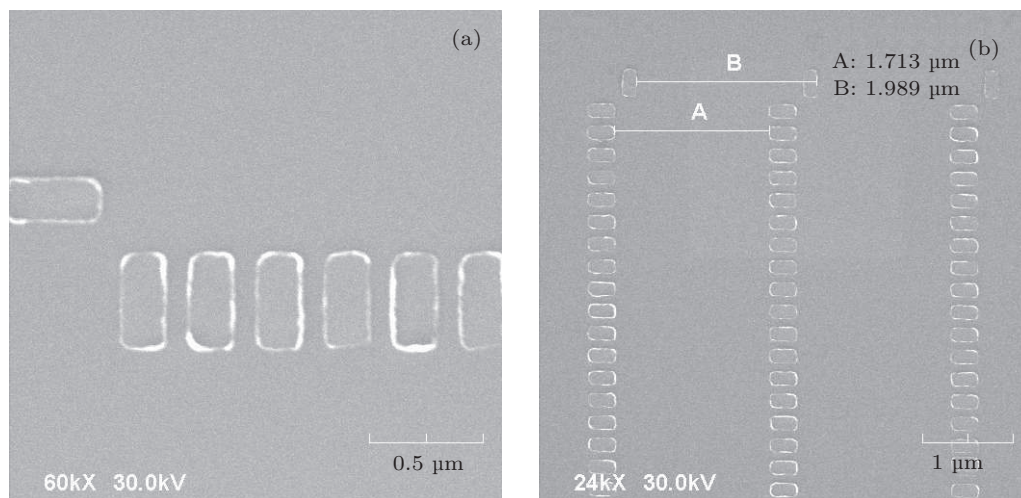


图 5 lift-off 后的 MQCA 功能阵列 SEM 图像 (a) 反相器; (b) 互连线

为了对制备的 MQCA 功能阵列进行磁力显微图 (MFM) 测试, 需要对硅样片外加磁场 (时钟) 使片上所有纳磁体偏置到空态, 这样来自阵列左端纳磁体的输入信号就会在阵列中得到有效传递. 文中采用 HL-6 型霍尔效应仪来完成外加时钟的操作. 实验过程为: 将硅样片放入霍尔效应仪产生的 100 mT 恒定磁场中, 然后逐渐减小励磁电流到 0 (磁场也逐步减小到 0). 由于恒定磁场使所有纳磁体被磁化到亚稳态, 因而当外加磁场减小时, 它们将被顺序磁化到基态. 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如图 7 所示. 特

别地, 我们标出了反相器的磁化指向如图 7(a) 所示 (图中箭头指向所示), 从图 7(a) 中观察到了反铁磁耦合现象, 因而制备的结构实现了反相器阵列的功能.

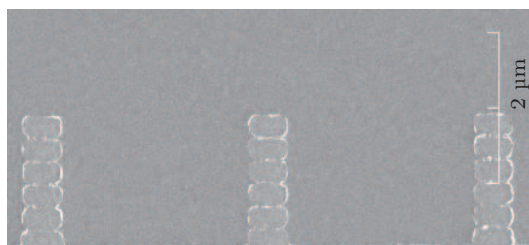


图 6 lift-off 后发生黏连的 MQCA 功能阵列 SEM 图像

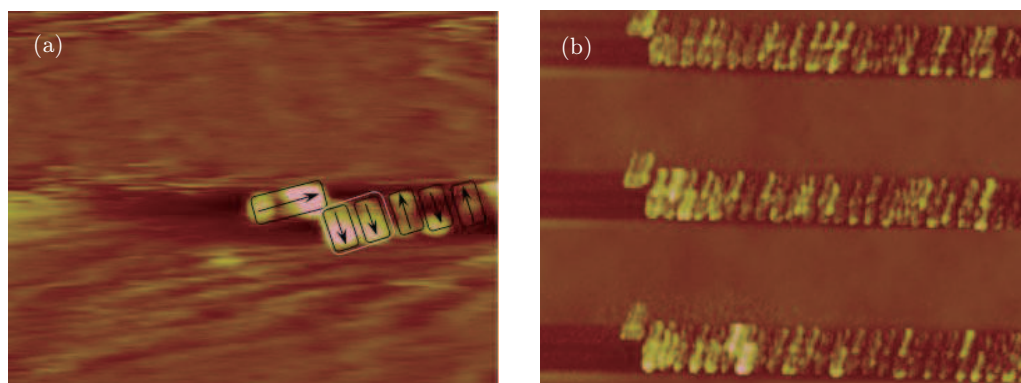


图 7 MQCA 功能阵列的 MFM 结果 (a) 反相器; (b) 互连线

5 缺陷模拟和分析

当 MQCA 器件尺寸很小时, 纳米制造方法中的制造缺陷可能成为决定纳磁体结构实际形状和操作功能的一个主要因素. 这些缺陷可能是内在的也可能是外在的, 缺陷一般发生图形转移阶段或镀

膜剥离阶段. 在进行剥离工艺时 (软磁材料沉积阶段), 我们观察到了如图 8 所示的制造缺陷. 从图 8 可见, 圆形区域的整个纳磁体材料出现了脱落, 表现出丢失纳磁体缺陷. 针对实验中遇到的这种缺陷, 本文采用 OOMMF 软件^[12]模拟了丢失纳磁体对互连线阵列信号传递的影响.

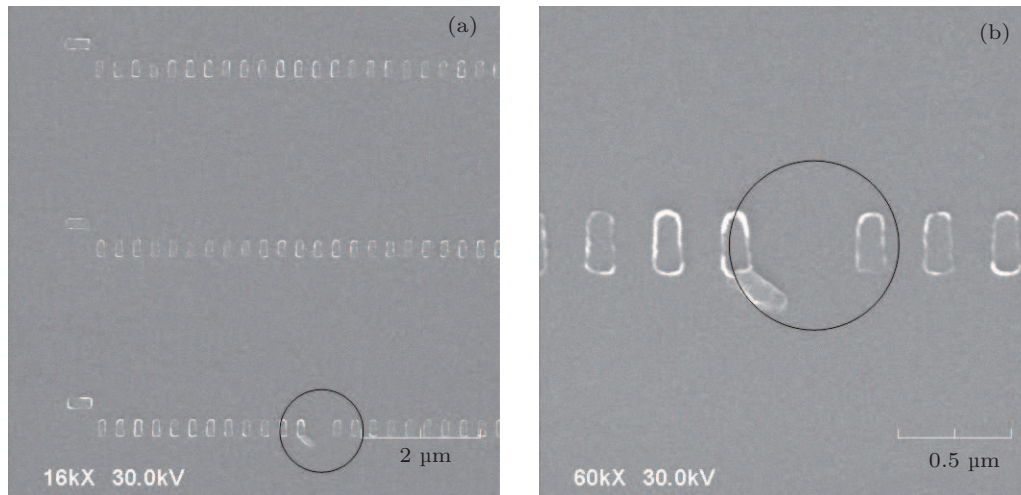


图 8 MQCA 阵列制造中出现的丢失纳磁体缺陷 (lift-off 后的 SEM 图像)

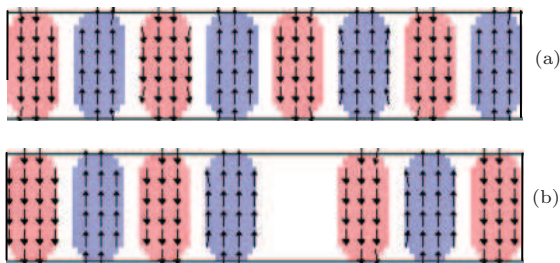


图 9 纳磁体互连线阵列的 OOMMF 模拟结果 (a) 正常情况; (b) 丢失纳磁体

图 9 为 MQCA 互连线的模拟结果 (仅截取含有偶数个纳磁体的部分图像). 从图 9(a) 可见, 互连线阵列在没有丢失纳磁体时, 逻辑 ‘0’ 和逻辑 ‘1’ 在阵列中交替出现, 因而在输出端获得了反相的输出逻辑 ‘1’. 但当发生丢失纳磁体缺陷时, 相同的结构却产生了不同的结果, 如图 9(b) 所示. 该互连线功能阵列本应出现和图 9(a) 相同的输出, 即产生反相的输出逻辑 ‘1’, 然而在输出端我们得到了错误的逻辑值 (逻辑 ‘0’). 对比两个仿真可得, 丢失纳磁体缺陷确实影响阵列的信号传递, 导致互连线阵

列的最终输出出现逻辑值的反相.

6 结 论

磁性量子元胞自动机器件是后 CMOS 时代的重要替代技术之一. 本文采用电子束光刻、镀膜和剥离工艺在室温下制备了三个不同间距磁性量子元胞自动机器件功能阵列. 实验研究发现 100 pA 电子束束流和 0.38 μ s 曝光时间可获得理想的阵列图案. 对制备的反相器阵列进行了磁力显微测试, 结果显示了正确的逻辑功能. 此外, 对实验中出现的丢失纳磁体缺陷进行了模拟, 结果表明丢失纳磁体缺陷导致了信号传递反相. 通过这些实验和结果, 我们获得了一些重要的 MQCA 制备参数和信号传递特征. 当然实验的结果还需进一步的细化, 此外, 含有更多纳磁体的电路制备以及测试也是下一步研究的方向.

感谢西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室张亮亮实验员的友情协助.

- [1] Imre A, Csaba G, Ji L, Bernstein G H, Porod W 2006 *Science* **311** 205
- [2] Niemier M, Dingler A, Sharon H X 2008 *Proceedings of 26th IEEE International Conference on Computer Design* 506
- [3] Carlton D B, Emley N C, Tuchfeld E, Bokor J 2008 *Nano Lett.* **8** 4173
- [4] Lent C S, Tougaw P D 1997 *Proc. IEEE* **85** 541
- [5] Amlani I, Orlov A, Toth G, Bernstein G H, Lent C S, Snider G L 1999 *Science* **284** 5412
- [6] Csaba G, Lugli P, Csurgay A, Porod W 2005 *J. Comput. Electron.* **4** 105
- [7] Bernstein G H, Imre A, Metlushko V, Orlov A, Zhou L, Ji L, Csaba G, Porod W 2005 *Microelectron. J.* **36** 619
- [8] Pulecio J F, Bhanja S 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 034308
- [9] Alam M T, Siddiq M J, Bernstein G H, Niemier M, Porod W, Sharon H X 2010 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **9** 348
- [10] 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]
- [11] Orlov A O, Imre A, Csaba G, Ji L L, Porod W Bernstein G H 2008 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **3** 1
- [12] Donahue M J, Porter D G 1999 OOMMF user's Guide, <http://math.nist.gov/oommf>.

Experimental study of magnetic quantum-dot cellular automata function arrays

Yang Xiao-Kuo^{1)†} Cai Li¹⁾ Wang Jiu-Hong²⁾ Huang Hong-Tu¹⁾ Zhao Xiao-Hui¹⁾
Li Zheng-Cao¹⁾ Liu Bao-Jun¹⁾

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

2) (State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

(Received 9 September 2011; revised manuscript received 14 October 2011)

Abstract

Magnetic quantum-dot cellular automata (MQCA) function arrays are fabricated by electron beam lithography, thermal evaporation and lift-off technologies at room temperature. The effects of exposure dose and exposure time on MQCA function array patterns with three various spacings are experimentally investigated. The results show that the ideal pattern can only be obtained with 100 pA electron beam current and 0.38 μ s exposure time. Magnetic force microscopy measurement on the fabricated inverter structure shows that the array demonstrates correct logic operation, which validates the feasibility of fabrication process for MQCA function arrays. Moreover, defect is observed in the experiments, simulations on the defective array show that missing nanomagnet defect in the array leads to signal inversion error.

Keywords: nanomagnet, electron beam lithography, magnetic force microscopy, spacing

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