

磁耦合元胞自动机逻辑器件的形状可重配置结构

杨晓阔^{1,2}, 蔡理¹, 肖明清², 王曙钊¹, 张斌¹, 王森¹

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038)

摘要: 磁耦合元胞自动机逻辑器件(即纳磁体逻辑器件)是后 CMOS 时代的一种极具潜力的新技术, 具有无引线集成、极低功耗和天然非易失性等优点. 纳磁体逻辑器件由纳米级单畴磁体构成, 而磁体的形状是其一个重要的器件特征参数. 本文研究了不同特殊形状纳磁体的转换特性, 获得了改变特殊形状器件状态的时钟场值. 提出了基于不同尺寸特殊形状纳磁体的可重配置择多逻辑门, 采用 OOMMF 软件验证了形状择多逻辑门的输入可重配置性, 得到了顺序配置不同输入组合所需的时钟场. 该可重配置门结构的提出为磁性可编程逻辑计算电路的实现奠定了重要的理论基础.

关键词: 纳磁体逻辑器件; 特殊形状; 择多逻辑门; 可重配置性

中图分类号: O471.1; TN4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)02-0225-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.02.003

Shape-Dependent Reconfigurable Gate Structure in Magnetically Coupled Cellular Automata Logic Device

YANG Xiao-kuo^{1,2}, CAI Li¹, XIAO Ming-qing², WANG Shu-zhao¹, ZHANG Bin¹, WANG Sen¹

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China;

2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: As one of promising emerging technologies beyond CMOS, magnetically coupled cellular automata logic device (namely nanomagnet logic device) has the advantages of non-down-lead integration, nonvolatility and ultra low power dissipation. Nanomagnet logic device is comprised of single domain magnets, in which shape of the nanomagnet behaves as an important device characteristic parameter. In this paper, switching behavior of different nanomagnets of peculiar shape is deeply investigated, and the required clocking field to flip the logic states of each nanomagnet of peculiar shape is achieved. According to this finding, a reconfigurable majority logic gate based on nanomagnets of peculiar shape of different sizes is proposed. The OOMMF tool is employed to verify inputs reconfigurability of proposed shape-based gate, and the clocking fields required to sequentially reconfigure different input combinations are obtained. The proposed reconfigurable gate structure lays a solid theoretical foundation for designing programmable magnetic logic computation circuits.

Key words: nanomagnet logic device; peculiar shape; majority logic gate; reconfigurability

1 引言

元胞自动机型逻辑器件是一种利用相同元胞间的局部耦合场作用进行逻辑处理和信息传递的新兴纳电子器件^[1]. 取决于物理耦合场的不同, 元胞自动机型逻辑器件主要分为磁耦合^[2](磁偶极子作用)和量子点电耦合^[3](库仑作用)两种. 其中, 磁耦合的元胞自动机型逻辑器件, 也称为纳磁体逻辑器件(Nano-Magnet Logic Device, NMLD), 是替代硅基 CMOS 器件的一种重要候选技术. NMLD 具有极低功耗、天然非易失性和抗辐射等

优点^[4,5], 这些优势使其在航空、航天电子和自治传感器电路等领域具有广阔的应用前景.

通常情况下, 纳磁体逻辑器件的基本构成单元为纳米级的拉长单畴磁体(即拉长的规则形状纳磁体), 这是因为拉长的纳磁体具有明显的形状各向异性^[2,6], 易于实现双稳态逻辑('0'和'1'). 由于磁体本身具有不同的形状, 因而 NMLD 也具有与生俱来的形状特征, 即规则纳磁体的变化形状是 NMLD 的一个关键器件参数. 因此, 本文主要研究 NMLD 的形状特性及其电路结构. 然而, 与先前文献考虑规则形状的 NMLD 不同, 这里特意

考虑 NMLD 的特殊(也称奇异)形状,即纳磁体形状出现角缺失或倾斜边缘的情况.实际上,NMLD 的特殊形状特性已经得到了电路研究人员的初步关注.文献[7]通过理论和实验方法观察了倾斜边缘纳磁体的特征,发现该类器件表现出首选的磁化逻辑态.文献[8]理论模拟了短直线互连中出现单个倾斜边缘纳磁体器件时的信号传递,发现短直线互连的输出表现出正常、反相和中断等三种特征.尽管如此,目前对于特殊形状纳磁体构成的 NMLD 研究还很少,尤其缺乏如何利用特殊形状纳磁体来进行特殊电路应用的研究.实际上,运用 NMLD 的形状工程来构建特殊的功能结构是一项非常有意义的工作,因为它能有效减少版图面积和电路延时.

本文从纳磁体逻辑器件的特殊形状工程出发,提出了基于不同尺寸特殊形状纳磁体的可重配置择多逻辑门,采用 OOMMF^[9](Object Oriented Micro-Magnetic Framework)软件验证了形状择多逻辑门的输入可重配置性.该可重配置门结构的提出对磁性可编程逻辑计算电路的实现具有重要的指导意义.

2 纳磁体逻辑器件

图 1(a)所示为单畴纳磁体逻辑器件(单畴是指纳磁体内磁化是均匀的,可等效为一个巨大的经典旋转),纳磁体的大小可表示为宽×高×厚($w \times h \times th$). $x-y$ 平面上,NMLD 的长轴通常被视为易磁化轴,即图 1(a)中的 y 方向;NMLD 的短轴则为难磁化轴,即图 1(a)中的 x 方向; z 轴表示厚度.通常情况下,磁化方向朝上或朝下分别用于编码逻辑‘1’或‘0’,而沿难磁化轴朝右或朝左的磁化则为空态‘null’^[1].此外,对于易磁化轴在一条直线上的耦合称为铁磁耦合 FC(Ferromagnetically Coupling),而难磁化轴在一条直线上的耦合称为反铁磁耦合 AFC(Anti-ferromagnetically Coupling).图 1(b)所示为规则形状的圆角长方形纳磁体.图 1(c)所示为角缺失的特殊形状纳磁体(即倾斜边缘纳磁体).

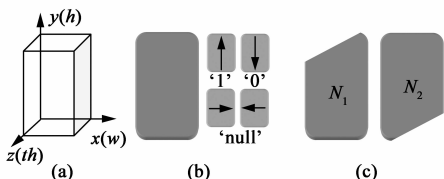


图1 NMLD 的形状特征及倾斜边缘纳磁体

纳磁体逻辑器件的有效转换需要难磁化轴方向的时钟,这个极其微弱时钟(场)的作用是将目标纳磁体预置到空态,这样来自输入端纳磁体的偶极子场作用将会翻转目标纳磁体到期望的逻辑态.NMLD 的时钟可用载流子线产生磁场^[10]和电压产生旋转扭矩^[11]等方法来实现,时钟线路位于纳磁体的下部.

法来实现,时钟线路位于纳磁体的下部.

3 基于特殊形状纳磁体的可重配置择多逻辑门

3.1 基本的磁性择多逻辑门

众所周知,反相器是 CMOS 中的基本电路.而 NMLD 则不同,择多逻辑门才是该器件技术中最基本的电路结构,这是因为大多数逻辑功能函数都可以仅使用择多逻辑门就能实现,如一位全加器电路^[12].磁性择多逻辑门的结构如图 2(a)所示,它由十字形放置的五个规则形状纳磁体器件构成^[13].图 2(a)中, I_1 、 I_2 和 I_3 为输入纳磁体, M 为抉择纳磁体, F 为输出纳磁体(实现的功能是输出 $I_1 \cdot \bar{I}_2$ 和 I_3 中出现次数较多的逻辑态).就中央纳磁体与周围纳磁体的耦合而言,在垂直方向(y 轴)的耦合为 FC;在水平方向(x 轴)的耦合为 AFC;输出纳磁体与抉择纳磁体的耦合也为 AFC.该磁性择多逻辑门的逻辑表达式为

$$F = I_1 \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_2 \cdot I_3 + I_1 \cdot I_3 \quad (1)$$

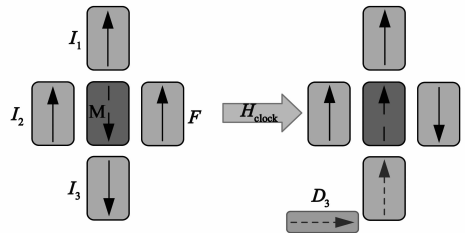


图2 纳磁体器件构成的基本择多逻辑门

为了设定并配置择多逻辑门的八个输入集(如输入集 $I_1 I_2 I_3 = 111$),需要给每一个输入纳磁体配对一个额外的驱动纳磁体^[2,4],并同时应用一时钟信号.图 2(b)给出了一个驱动纳磁体设置输入器件逻辑状态的例子,即 D_3 在右向时钟 H_{clock} 作用下设定了 I_3 为逻辑‘1’.实际上,采用这样的思想来设置输入逻辑并进行择多逻辑门八个输入集的重配置效率较低.一是同一种结构只能配置两个输入集(左向和右向时钟)^[2],而八个输入集需要四种不同结构,这不利于实际应用中的电路制备;二是尽管文献[4]中采用了三个不同的规则形状驱动纳磁体改进了择多逻辑门的输入重设置方法,但额外的水平放置驱动器件需要更大的版图面积,导致门延时增加.因此,需要考虑采用其它更有效的方法来实现可重配置的磁性逻辑结构.

下面将研究如何利用 NMLD 的特殊形状特性来构建可重配置的择多逻辑门结构.研究表明角缺失的倾斜边缘纳磁体具有首选磁化逻辑态^[7,14],而究竟首选磁化翻转到哪一个逻辑态取决于时钟场方向和角缺失的位置.以图 1(c)中的 N_1 为例,当应用适当大小的右向

时钟时,其首选磁化态为逻辑‘1’(磁化指向朝上);当应用适当大小的左向时钟时,其首选磁化态为逻辑‘0’(磁化指向朝下).对于 N_2 也具有相同的结论.从这个结论出发,我们可以考虑用三个特殊形状的倾斜边缘纳磁体作为择多逻辑门的输入来构建可重配置的电路.然而,为了实现这个目标,需要解决如下两个问题:(1)如何实现在同一版图图中一次仅改变一个纳磁体的状态,而其它输入器件的状态不受影响;(2)三个倾斜边缘纳磁体究竟该如何放置.

3.2 不同尺寸的孤立特殊形状器件转换场

这里首先研究不同尺寸倾斜边缘纳磁体从相反逻辑态翻转到首选逻辑态(右向时钟)所需要的时钟大小.为了简单起见,本文仅考虑给定尺寸的倾斜边缘纳磁体.三个倾斜边缘纳磁体的 $x-y$ 平面尺寸如图 3 所示,其高度均为 100nm、厚度均为 20nm.采用 OOMMF 软件编写代码模拟得到的不同尺寸器件逻辑态翻转需要的时钟场如图 3 所示.

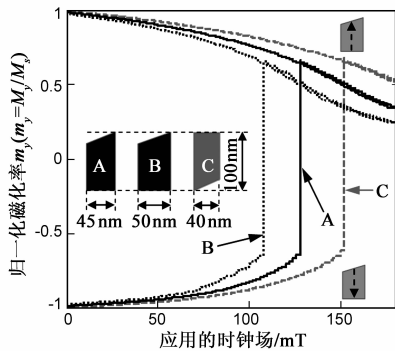


图3 不同尺寸的特殊形状纳磁体的转换时钟

图 3 中,归一化磁化率的变化表示逻辑态 ($m_y = -1$ 表示逻辑‘0’, $m_y = 1$ 表示逻辑‘1’)的翻转过程.从图 3 可见,对于任一尺寸的器件,随着应用时钟场的增加,器件慢慢翻转到了相反的逻辑态.总的来说,不同尺寸的特殊形状纳磁体具有不同的状态转换时钟,如纳磁体 B 从 $m_y = -1$ 转换到 $m_y = 1$ 的过程中,其逻辑状态突变点为应用 110mT 的时钟场(垂直线)时,因此我们可以得到特殊形状纳磁体 B 的转换时钟为 110mT.同样可以观察到特殊形状纳磁体 C 的转换时钟为 152mT,特殊形状纳磁体 A 的转换时钟为 128mT.定义纳磁体纵横比为 $AR = \text{宽}/\text{高}$,从上面的结果可以发现随着特殊形状纳磁体纵横比的增加,器件逻辑态翻转所需的时钟场减小.器件 C ($AR = 0.4$)需要最大的转换场,而器件 B ($AR = 0.5$)需要最小的转换场.由于三个不同尺寸特殊形状纳磁体的转换场各不相同,这样如果每次仅应用特定大小的时钟,那只有该尺寸的特殊形状器件才会转换.因此,从这个结论可以得到如下启发:

如果我们采用变化尺寸的特殊形状纳磁体来构建逻辑门,则可以实现在同一版图图中一次特定时钟的应用仅翻转对应纳磁体的逻辑态.

3.3 不同类型形状器件间的邻接耦合效应

下面将重点考虑不同类型(规则形状纳磁体和特殊形状纳磁体)器件间的耦合效应,其目的是为了确定三个特殊形状输入纳磁体的准确放置位置.规则形状纳磁体的尺寸为 $50\text{nm} \times 100\text{nm} \times 20\text{nm}$,特殊形状纳磁体的尺寸同上.不同类型器件间的邻接耦合效应(以 A 水平线方向放置为例)仿真结果如图 4 所示.

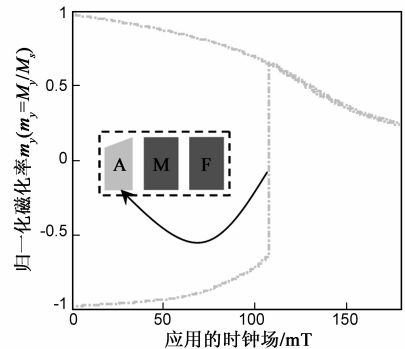


图4 不同类型形状器件间的邻接耦合效应(以A为例)

从图 4 可以清晰地观察到器件间的邻接耦合效应.孤立的特殊形状纳磁体 A 的时钟为 128mT,但当它被放置到水平线方向上,并和规则形状纳磁体一起构成择多逻辑门时,其需要的转换时钟场值大大下降(降到约 109mT),几乎和孤立的特殊形状纳磁体 B 的转换时钟相当;对于特殊形状纳磁体 C 也具有相同的结论.其原因在于水平线方向时钟同时转换 A、M 和 F 到空态,当 M 和 F 被磁化一定角度后(如从正南方向磁化到东南方向),其 x -分量(即邻接耦合效应)叠加到了 A 的转换过程中,从而降低了特殊形状纳磁体 A 所需要的时钟场.这个结果使我们认识到在实现可重配置的逻辑门结构时,特殊形状纳磁体器件不能随意放置.具体来说,这里不能将 A 或 C 放在最左边作为输入,因为这样邻接耦合效应可能导致 A 或 C 与 B 具有相同的转换时钟,从而无法实现在同一版图图中应用一次时钟仅进行一位编程的情形.

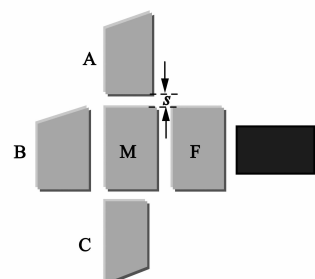


图5 形状可重配置择多逻辑门

根据上述两点结论,我们选取了三个特殊形状纳磁体和两个规则形状纳磁体,并将需要最小转换时钟场的特殊形状纳磁体 B 作为左输入,随机地放置其它两个特殊形状输入器件的位置,设计出的可重配置择多逻辑门如图 5 所示.其中 s 表示不同器件间的间距.注意择多逻辑门末端的较小规则形状纳磁体为稳定器件,用于阻止输出纳磁体 F 的自发翻转,以实现有效的择多计算.

4 形状可重配置择多逻辑门的仿真

运用 OOMMF 软件对设计的可重配置择多逻辑门进行了计算机模拟.参数设置如下:所有超坡莫合金材料构成的倾斜边缘特殊形状纳磁体的三维尺寸同上,其饱和磁化为 $M_s = 8 \times 10^5 \text{ A/m}$,交换耦合常数为 $A = 10.5 \times 10^{-12} \text{ J/m}$,阻尼系数为 0.5,网格离散化为 $5 \times 5 \times 20 \text{ nm}^3$,水平方向和垂直方向纳磁体间的间距(s)均为 40nm.图 6 给出了择多逻辑门输入集可编程的仿真结果.从图 6 可见,通过应用不同的时钟场,特殊形状纳磁体构成的择多逻辑门自动地释放到了不同输入集,并

进行了择多计算.这里虽然只给出了四个输入集的仿真结果,但设计的择多逻辑门确实能够对全部的八个输入组合进行配置或编程.仿真中,首先应用向右的最大时钟场 $H_{\text{clock}(C)}$ (器件 C 对应的时钟),然后慢慢移除该时钟,所有特殊形状纳磁体均发生了翻转,因而择多逻辑门配置到了输入集 111($A = 1, B = 1, C = 1$),如图 6(a)所示;紧接着应用向左的最小时钟场 $H_{\text{clock}(B)}$,择多逻辑门配置到了输入集 101($A = 1, B = 0, C = 1$),如图 6(b)所示,可以发现只有器件 B 的状态发生了翻转;进一步应用向左的时钟场 $H_{\text{clock}(A)}$,择多逻辑门配置到了输入集 001($A = 0, B = 0, C = 1$),如图 6(c)所示,此时特殊形状纳磁体 A 被转换;最后应用向右的最小时钟场 $H_{\text{clock}(B)}$,发现特殊形状器件 B 的状态再次发生了变化,择多逻辑门配置到了输入集 011($A = 0, B = 1, C = 1$),如图 6(d)所示.通过这个模拟结果,可以发现设计的可重配置择多逻辑门具有正确的功能,每次时钟的应用不但成功配置了择多逻辑门的输入集,还实现了特定位置器件逻辑态的变化(即实现了门电路的单位编程).

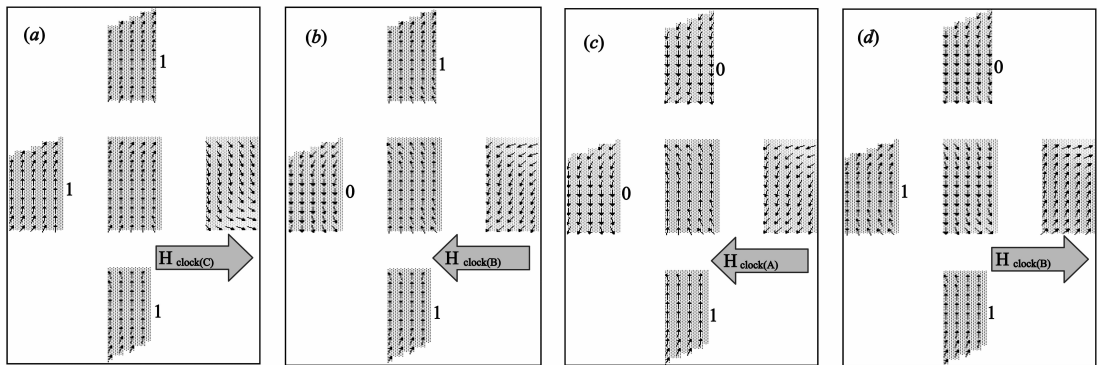


图6 形状可重配置择多逻辑门的OOMMF仿真结果

表 1 总结了时序地配置全部八个输入集所需要的时钟场大小.从表 1 可见,不同的输入集确实需要不同的时钟场,且准确的配置时序为 111→101→001→011→000→010→110→100→111.通过应用这些时钟,提出的择多逻辑门展示出了良好的可重配置性.经过一个时钟循环,择多逻辑门回到了起始的状态 111.总的来说,提出的可编程择多逻辑门具有两个显著的特点:1)该择多门不需要额外的输入驱动器件(版图面积小、无延时),仅用一个版图就能设置全部八组输入集,因而结构简单、高效;2)采用此种设计思想和门结构能够实现小规模的磁性可编程功能结构.

表 1 不同输入集的重配置时钟

输入集(ABC)	111	101	001	011	000	010	110	100	111
时钟方向	朝右	朝左	朝左	朝右	朝左	朝右	朝右	朝左	朝右
时钟幅度(mT)	158	110	138	110	158	110	138	110	158

最后,需要说明的是,尽管提出的特殊形状纳磁体可编程择多逻辑门具有两个明显的优点,但也应注意到,要制备并准确放置三种特殊形状输入纳磁体对实验工艺的要求比规则形状纳磁体择多逻辑门对实验工艺的要求高.

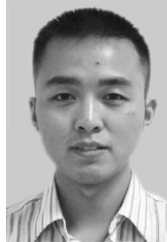
5 结束语

纳磁体逻辑器件具有许多诱人的优点,是一种极具潜力的新兴器件技术.本文研究了角缺失特殊形状纳磁体逻辑器件的转换特性,提出了基于不同尺寸特殊形状纳磁体的可重配置择多逻辑门,采用 OOMMF 软件验证了输入重配置的有效性,得到了顺序配置不同输入组合所需的时钟场.该可重配置门结构简单、高效,其出现不仅加速了纳磁体逻辑器件形状工程的应用化进程,而且为小规模磁性可编程逻辑计算电路的实现开辟了重要的技术途径.

参考文献

- [1] Orlov A O, Imre A, Csaba G, Ji L L, Porod W, Bernstein G H. Magnetic quantum-dot cellular automata: Recent developments and prospects[J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, 3(1): 55 – 68.
- [2] Imre A, Csaba G, Ji L L, Bernstein G H, Porod W. Majority logic gate for magnetic quantum-dot cellular automata[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 205 – 208.
- [3] Haider M B, Pitters J L, DiLabio G A, Livadaru L, Mutus J Y, Wolkow R A. Controlled coupling and occupation of silicon atomic quantum dots at room temperature[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 046805 – 1 ~ 046805 – 4.
- [4] Varga E, Niemier M T, Bernstein G H, Porod W, Hu X S. Programmable nanomagnet-logic majority gate[A]. *Proceedings of Device Research Conference*[C]. New York: IEEE, 2010. 85 – 86.
- [5] Liu S L, Hu X S, Nahas J J, Niemier M T, Porod W, Bernstein G H. Magnetic-electrical interface for nanomagnet logic[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, 10(4): 757 – 763.
- [6] Carlton D B, Emley N C, Tuchfeld E, Bokor J. Simulation studies of nanomagnet-based logic architecture[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(12): 4173 – 4178.
- [7] Niemier M T, Varga E, Bernstein G H, Porod W, Alam M T, Dinger A, Orlov A O, Hu X S. Shape engineering for controlled switching with nanomagnet logic[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2012, 11(2): 220 – 230.
- [8] 李政操, 蔡理, 杨晓阔, 庞天亮, 刘保军, 张明亮, 陈祥叶. 倾斜边缘纳磁体对磁性量子元胞自动机互连线信号传递的影响[J]. *固体电子学研究与进展*, 2013, 33(1): 22 – 27. Li Zheng-cao, Cai Li, Yang Xiao-kuo, Pang Tian-liang, Liu Bao-jun, Zhang Ming-liang, Chen Xiang-ye. Effects of nanomagnets with slanted edge on signal propagation of MQCA interconnect wire[J]. *Research & Progress of SSE*, 2013, 33(1): 22 – 27. (in Chinese)
- [9] Donahue M J, Porter D G. OOMMF user's Guide[CP/OL]. Version 1.0, Interagency Report NISTIR 6376. <http://math.nist.gov/oommf>, 2009.
- [10] Alam M T, Siddiq M J, Bernstein G H, Niemier M T, Porod W, Hu X S. On-chip clocking for nanomagnet logic devices[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2010, 9(3): 348 – 351.
- [11] Atulasimha J, Bandyopadhyay S. Bennett clocking of nanomagnetic logic using multiferroic single-domain nanomagnets[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 173105 – 1 ~ 173105 – 3.
- [12] Pudi V, Sridharan K. Efficient design of a hybrid adder in quantum-dot cellular automata[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2011, 19(9): 1535 – 1548.
- [13] 杨晓阔, 蔡理, 张明亮, 段小虎, 王卓. 基于形状工程的可靠磁性逻辑器件和触发器实现[J]. *电子学报*, 2013, 41(8): 1609 – 1614. Yang Xiao-kuo, Cai Li, Zhang Ming-liang, Duan Xiao-hu, Wang Zhuo. Reliable magnetic logic device and flip-flop by shape engineering of nanomagnet[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(8): 1609 – 1614. (in Chinese)
- [14] Yang X K, Cai L, Li Z C, Zhang M L, Zhao X H. Signal feedback and performance of ring oscillators in magnetic quantum cellular automata[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2012, 9(12): 2260 – 2263.

作者简介



杨晓阔 男, 1984 年生于四川渠县. 空军工程大学博士后, 讲师. 研究方向为纳电子器件(元胞自动机型逻辑器件)及电路的实现、容错设计和可靠性.

E-mail: yangxk0123@163.com



蔡理 女, 1959 年生于福建永春. 空军工程大学教授, 博士生导师. 研究方向为纳电子器件的理论及其应用、电路与系统、非线性电路.