

基于倾斜纳磁体翻转倾向性的与(或)逻辑门应力模型

刘嘉豪 杨晓阔 危波 李成 张明亮 李闯 董丹娜

Modeling of stress-regulated AND (OR) logic gate based on flipping preference of tilted nanomagnet

Liu Jia-Hao Yang Xiao-Kuo Wei Bo Li Cheng Zhang Ming-Liang Li Chuang Dong Dan-Na

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 017501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181621

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.68.20181621>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2019/V68/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于多铁纳磁体的择多逻辑门三维磁化动态特性研究](#)

Three-dimensional magnetization dynamics in majority gate studied by using multiferroic nanomagnet

物理学报.2017, 66(21): 217501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.217501>

[基于多铁逻辑的铁磁耦合互连线磁化动态模拟](#)

Magnetization dynamics in ferromagnetic coupling interconnect wire using multiferroic logic scheme

物理学报.2016, 65(23): 237502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.237502>

[基于交换作用的纳磁逻辑电路片上时钟结构研究](#)

On-chip clocking for exchange-interaction-based nanomagnetic logic circuits

物理学报.2014, 63(22): 227503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227503>

[磁性量子元胞自动机功能阵列的实验研究](#)

Experimental study of magnetic quantum-dot cellular automata function arrays

物理学报.2012, 61(4): 047502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.047502>

基于倾斜纳磁体翻转倾向性的与(或)逻辑门 应力模型*

刘嘉豪¹⁾ 杨晓阔^{1)†} 危波¹⁾ 李成¹⁾ 张明亮²⁾ 李闯¹⁾ 董丹娜¹⁾

1) (空军工程大学基础部, 西安 710051)

2) (空军通信士官学校有线通信系, 大连 116100)

(2018年8月30日收到; 2018年11月26日收到修改稿)

纳米磁性逻辑器件具有高抗辐射性、低功率、天然非易失性等优势, 应用前景广阔. 倾斜放置的纳磁体具有翻转倾向性, 在控制时钟撤去后倾斜纳磁体倾向于翻转至长轴的一端. 利用倾斜纳磁体的翻转倾向性, 提出了一种应力调控的与(或)磁逻辑门, 并建立了其动态磁化的数学模型. 使用微磁学方法对逻辑门进行了仿真, 结果验证了预期逻辑门功能. 与现有的逻辑门相比, 基于倾斜纳磁体的与(或)门结构具有能耗更低、可靠性更高和制造工艺更简单等优点.

关键词: 纳磁体, 磁逻辑, 应力调控, 逻辑门

PACS: 75.78.-n, 85.70.Kh, 85.80.Jm

DOI: 10.7498/aps.68.20181621

1 引言

随着互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 技术的发展逐渐陷入物理瓶颈, 纳米磁性逻辑器件 (nano-magnet logic device, NMLD) 因其高抗辐射性、低功率和天然非易失性, 展现出取代基于 CMOS 晶体管技术的巨大潜力. 在 NMLD 体系结构中, 磁化方向可用于对二进制信息进行编码. NMLD 通常由多个单轴的纳磁体组成^[1]. 单轴纳磁体有一个长轴 (易磁化轴) 和一个短轴 (难磁化轴). 它的磁化沿着其短轴 (高能状态) 时不稳定, 而沿着其长轴 (低能状态) 时稳定在两个相反的方向上, 使其在低能状态具有双稳态特性. 因此, 这种双稳态磁化特性可以用来对二进制逻辑“1” (磁化向上) 和逻辑“0” (磁化向下) 进行编码. 而高能状态定义为“NULL”态 (磁化向左或向右)^[2]. 此外, 在 NML 中, 逻辑信息可以在纳磁体阵列中以铁磁 (沿长轴) 或反铁磁 (沿

短轴) 两种不同的方式传输^[3]. 然而, 传输过程中, NML 受到的热波动等干扰会影响信息的正确传输, 需要外加控制信号, 使纳磁体在不参与计算时处于亚稳态 (“NULL”态), 即需要时钟信号. 时钟信号对纳磁体起驱动作用, 能够帮助纳磁体克服亚稳态和稳态之间的能量势垒^[4]. 现有时钟方案包括电流产生的磁场、自旋电子、电流控制的畴壁运动、电流产生的自旋电子、应力调控多铁纳磁体等, 其中应力调控多铁纳磁体的方案因其耗能较低, 最具竞争力^[5-14].

逻辑门是 NML 的基础. Imre 等^[1] 使用五个单轴纳磁体构建了择多逻辑门, 使 NML 成为可能, 然而这种逻辑门需要多个时钟控制才能保证逻辑正确计算^[15]. Gypens 等^[16] 使用 19 个偶极子耦合的单轴纳磁体构成稳定系统, 建立了能够准确计算的与非 (或非) 逻辑门. 然而这个方案需要较多的纳磁体, 使 NML 面积增加. Roy^[17] 利用多铁材料, 提出了基于磁性隧道结的超低能耗的与非 (或非) 逻辑门. 然而这种逻辑门设计需要铸造多层材料, 增加

* 国家自然科学基金 (批准号: 61302022, 61804184) 和空军工程大学校长基金 (批准号: XZJK2018034) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangxk0123@163.com

了制造难度. 文献 [18] 提出了缺角导致的长轴倾斜纳磁体结构, 并利用缺角纳磁体设计了二元输入的与(或)逻辑门. 现在多数研究中长轴倾斜的纳磁体结构都是利用这种缺角的纳磁体实现的 [19-21]. 然而, 缺角纳磁体存在三个缺陷: 1) 这种形状的纳磁体需要更大的尺寸, 因此增加了 NML 空间, 并引入了在大尺寸纳磁体中容易发生的 C 形和涡流形的时钟错误 [22-24]; 2) 不规则形状使得制造工艺的精度要求较高; 3) 由于形状不规则, 只能对每个微元求解, 需要更复杂的计算 [25]. 据此, 需要提出一个更高效、更可靠的基础磁逻辑门. 设计应该解决两个关键问题: 1) 如何消除 C 形和涡流形的时钟误差, 提高可靠性; 2) 如何设置规则形状的纳磁体来实现逻辑门功能, 降低计算和制造工艺的复杂度. 本文通过将规则形状 (椭圆柱) 的多铁纳磁体直接倾斜放置的方式实现纳磁体长轴的倾斜 [26]. 基于倾斜纳磁体的翻转倾向性, 我们设计了应力调控的双输入与(或)逻辑门, 建立其数学模型, 并使用微磁学方法对模型进行了仿真验证.

2 倾斜纳磁体的翻转倾向性和与(或)逻辑门设计

倾斜纳磁体具有翻转倾向. 纳磁体在倾斜角度 β 后, 会与时钟方向构成较大角度 $(90^\circ + \beta)$ 和较小角度 $(90^\circ - \beta)$, 纳磁体会在时钟撤去后产生向较小角度偏转的倾向. 这是因为纳磁体在时钟方向的形状各向异性性能要比长轴方向的低, 会自发地向长轴形状各向异性性能势阱翻转, 但是在翻转至较大角度 $(90^\circ + \beta)$ 一端的过程中, 需要跨越难磁化轴的形状各向异性性能势垒, 因此在没有其他能量驱动下, 纳磁体会倾向于翻转至不需要跨越难磁化轴的较小角度 $(90^\circ - \beta)$ 一端.

应力调控纳磁体的机制是利用压电层和磁层间的磁致伸缩效应. 当磁电复合材料由层压的压电和磁致伸缩材料薄层组成, 磁化层位于磁层平面内时, 面内拉伸应变分量和正交面内压缩应变分量将驱动磁层的面内磁化旋转. 文献 [27, 28] 提出通过将磁层和电极对共同铸于压电层上来产生局部应力. 压电层厚度远大于磁致伸缩层厚度和面内长度, 可以近似地认为压电层产生的应变能够全部传递至磁致伸缩层. 这样对电极对施加较小的电压, 就可以在电极对轴的方向上产生较大的局部应力, 可以克服磁层的各向异性性能. 应力调控的多铁纳磁体结构如图 1 (a) 所示, 红色箭头表示磁化方向, 纳磁体磁化的极角 (面外) 为 θ , 方位角 (面内) 为 φ . 选择压电基底为 PMN-PT ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$), 因为其压电系数较高 [29,30]. 对于磁性材料, 选择了 Terfenol-D ($\text{Tb}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Fe}_2$), 因为磁晶体各向异性可以更小 [31]. 如图 1 (b) 所示, 将纳磁体顺时针旋转一个小角度 β , 其长轴和短轴分别由 x 轴和 y 轴旋转至 x' 轴和 y' 轴. 它的长轴和时钟方向 (x 轴) 不是完全垂直的, 夹角分别是 $(90^\circ + \beta)$ 和 $(90^\circ - \beta)$. 作者使纳磁体从空态 ($\varphi = 0$) 开始翻转, 由于纳磁体会向低能态翻转, 在没有其他外加能量的情况下, 纳磁体会顺时针翻转至逻辑“0” (红色路径) 或逆时针翻转至逻辑“1” (蓝色路径). 如果设置纳磁体的初始时钟向右, 即 $\varphi = 0$, 移除时钟后, 倾斜的纳磁体会逆时针翻转到磁化方向与长轴夹角较小的一边, 也就是 $+y'$ 轴. 这是因为, 纳磁体顺时针翻转到 $-y'$ 轴的过程中需要跨越向右的难磁化轴势垒 (x' 轴), 而逆时针翻转则不需要跨越难磁化轴势垒. 因此, 纳磁体倾向于逆时针翻转至 $+y'$ 轴, 显示逻辑“1”. 同理向左的时钟撤去后, 倾斜纳磁体更倾向于翻转至逻辑“0”.

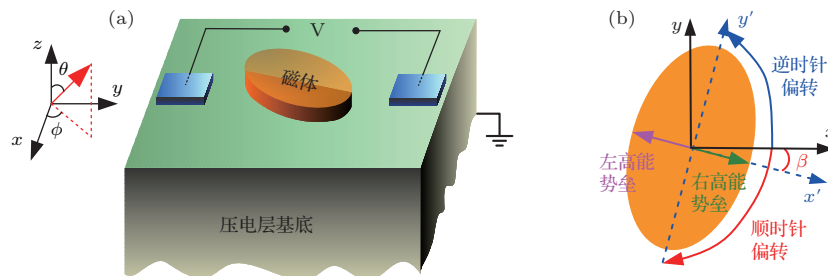


图 1 应力调控倾斜多铁纳磁体器件 (a) 压控应力结构; (b) 倾斜纳磁体 xy 面视图

Fig. 1. Stress-regulated multiferroic nanomagnet: (a) Voltage-controlled stress structure; (b) xy -plane view of the tilted nanomagnet.

利用倾斜纳磁体的翻转倾向性, 设计了双输入的与(或)逻辑门, 如图2所示.

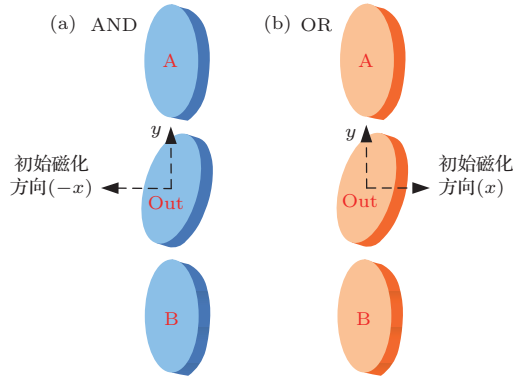


图2 基于倾斜放置纳磁体器件的基本逻辑门设计 (a) 与门; (b) 或门

Fig. 2. Design of basic logic gates based on tilted nano-magnet device: (a) AND logic gate; (b) OR logic gate.

表1 基础逻辑门磁化真值表

Table 1. The truth table of the magnetization of basic logic gates.

Input (A and B)	AND (Out)	OR (Out)
↓↓(00)	↓(0)	↓(0)
↓↑(01)	↓(0)	↑(1)
↑↑(11)	↑(1)	↑(1)
↑↓(10)	↓(0)	↑(1)

设置输入磁体 A, B 和输出的倾斜纳磁体 Out (顺时针倾斜 5°), 三个纳磁体通过铁磁耦合相互作用. 纳磁体 Out 的磁化方向受输入磁体 A, B 和它自身的翻转倾向的影响. 初始态向左时, 纳磁体 Out 倾向于翻转至逻辑“0”, 当 A 和 B 的输入是“00”, “01”或“10”时, 输出磁体逆时针翻转至逻辑“0”, 只有当 A 和 B 的输入都是“1”时, 输出磁体顺时针翻转至逻辑“1”, 从而实现了与逻辑. 而初始态向右时, 纳磁体 Out 倾向于翻转至逻辑“1”, 所以当输入磁体 A 和 B 是“01”, “11”或“10”时, 输出磁体逆时针旋转至逻辑“1”, 只有当输入 A 和 B 都是“0”, 输出磁体顺时针旋转至逻辑“0”, 实现或功能. 基础逻辑门磁化真值表如表1所列.

3 应力调控的与(或)门动态磁化模型

对设计的基础逻辑门, 建立了动态磁化数值模型.

单个椭圆纳磁体的动态磁化满足 Landau-Lifshitz-Gilbert 方程^[32]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\alpha\gamma}{M_s} [\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}})], \quad (1)$$

其中 α 是阻尼系数, γ 是回磁比, \mathbf{M} 是多铁纳磁体的磁矩矢量, M_s 是饱和磁化, \mathbf{H}_{eff} 是由多种能量产生的有效场(形状各向异性, 应力各向异性, 耦合能和热波动), 表示为^[32]

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\mu_0 V} \frac{dE}{d\mathbf{M}}, \quad (2)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 是真空磁导率, V 是纳磁体体积. 输出纳磁体 Out 的总能量 E 为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{shape-anisotropy}} + E_{\text{stress-anisotropy}} + E_{\text{dipole}}. \quad (3)$$

由于 Terfenal-D 的晶体各向异性性能很小, 在计算总能量时将其忽略. 纳磁体形状各向异性能为^[33]

$$E_{\text{shape-anisotropy}} = -(\mu_0/2)(M_s^2 V) [N_{dx} \cos^2 \theta \sin^2 \varphi + N_{dy} \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + N_{dz} \cos^2 \varphi], \quad (4)$$

其中 N_d 是退磁因子. 对于椭圆形状的纳磁体, 其长轴方向(易磁化轴)的退磁因子 N_{dx} , 短轴方向(难磁化轴)的退磁因子 N_{dy} 及垂直方向的退磁因子 N_{dz} 分别为^[33]:

$$N_{dx} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{th}{a} \right) \left[1 + \frac{5}{4} \left(\frac{a-b}{a} \right) + \frac{21}{16} \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 \right], \quad (5a)$$

$$N_{dy} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{th}{a} \right) \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{a-b}{a} \right) - \frac{3}{16} \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 \right], \quad (5b)$$

$$N_{dz} = 1 - N_{dx} - N_{dy}, \quad (5c)$$

其中 a 为长轴长度, b 为短轴长度, th 为纳磁体厚度. 纳磁体倾斜角度为 β 时, 其形状各向异性在各坐标轴上的场分量为^[26]:

$$h_{\text{shape-anisotropy}_{xx}} = -M_s (N_{dx} \cos(\varphi + \beta) \cos \beta + N_{dy} \sin(\varphi + \beta) \sin \beta) \sin \theta, \quad (6a)$$

$$h_{\text{shape-anisotropy}_{yy}}$$

$$= -M_s(-N_{dx} \cos(\varphi + \beta) \sin \beta + N_{dy} \sin(\varphi + \beta) \cos \beta) \sin \theta, \quad (6b)$$

$$h_{\text{shape-anisotropy}_{zz}} = -M_s N_{dz} \cos \theta. \quad (6c)$$

纳磁体应力各向异性能为^[34]

$$E_{\text{stress-anisotropy}} = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma V \sin^2 \theta \sin^2 \varphi, \quad (7)$$

其中 $3\lambda_s$ 为饱和磁致伸缩, σ 为施加的应力大小. 应力施加在 y 方向, 因此仅在 y 轴方向有场分量.

纳磁体 A 和纳磁体 B 对纳磁体 Out 产生的铁磁耦合能为^[31]

$$\begin{aligned} E_{\text{dipole}} &= \frac{\mu_0 M_s^2 V^2}{4\pi R^3} [(-2 \cos \varphi_A \sin \theta_A \cos \varphi \sin \theta \\ &+ \sin \varphi_A \sin \theta_A \sin \varphi \sin \theta + \cos \theta_A \cos \theta) \\ &+ (-2 \cos \varphi_B \sin \theta_B \cos \varphi \sin \theta \\ &+ \sin \varphi_B \sin \theta_B \sin \varphi \sin \theta + \cos \theta_B \cos \theta)], \quad (8) \end{aligned}$$

其中 R 为相邻纳磁体中心间距, 下标 A 和 B 对应纳磁体 A 和纳磁体 B 的磁化角度. 把热波动的影响考虑在内, 随机性热波动的影响可以通过一个随机热场 $h(t)$ 来描述, 可以写为^[35]

$$h(t) = \sqrt{\frac{2\alpha k T f}{\gamma \mu_0 M_s V}} G_{(0,1)}(t), \quad (9)$$

其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 是玻尔兹曼常数; $T = 300$ K 是室温; $f = 1$ GHz 是热噪声的振荡频率; $G_{(0,1)}(t)$ 表示均值为 0、方差为 1 的高斯分布函数.

4 结果与讨论

使用 MATLAB 软件计算第 3 节中基础逻辑门的动态磁化模型. 模型具体参数设置如表 2 所列. 其中纳磁体高纵横比 (2 : 1) 和较小倾斜角度 (5°) 的设置可以消除 C 形和涡流形的时钟误差, 提高逻辑门的可靠性.

由于形状对称性, 与逻辑门和或逻辑门得到的结果是相同的, 这里只讨论或逻辑门, 与逻辑门的机理相同. 为了得到或逻辑门, 需要设置向右的初始时钟, 然而应力无法控制时钟方向向左还是向右, 只能使磁化矢量倾向于与施加应力的方向垂直. 幸运的是, 对于顺时针倾斜 5° 的纳磁体, 时钟翻转方向可以通过纳磁体初始磁化方向来确定. 和

第 2 节的翻转倾向原理相同, 对初始态为逻辑“1” ($\varphi = 85^\circ$) 的纳磁体, 在 y 方向上施加应力时, 纳磁体会倾向于顺时针翻转 (不用跨越难磁化轴势垒). 值得一提的是, 如果不能确定倾斜纳磁体的初始态, 还可以通过施加一个向右的偏置磁场的方式获得向右的时钟 (应力 45 MPa, 偏置磁场 500 Oe)^[25]. 对图 2 (b) 的或逻辑门, 设置纳磁体 Out 的初始态为逻辑“1” ($\varphi = 85^\circ$), 对纳磁体 Out 施加 90 MPa 的应力, 3 ns 后撤去应力. PMN-PT 层介电常数为 1000, $d_{31} = -3000$ pm/V, $d_{32} = 1000$ pm/V. 对压电层厚度 $t_p = 0.4$ mm, 电压 $U = 138$ Vs 将产生 90 MPa 的应力 [$\sigma = Y d_{\text{eff}}(U/t_p)$]. 在 Terfenol-D 中, $d_{\text{eff}} = (d_{31} - d_{32})/(1 + \nu)$ ^[36].

表 2 材料模拟参数

Table 2. Material simulation parameters.

属性	数值
杨氏模量 Y	8×10^{10} Pa
饱和磁致伸缩 $3\lambda_s/2$	6×10^{-4}
阻尼系数 α	0.1
交换作用常数 A	9×10^{-12} J/m
磁晶各向异性常数 K	0
饱和磁化 M_s	8×10^5 A/m
长轴长度 a	100 nm
短轴长度 b	50 nm
相邻纳磁体中心间距 R	120 nm
磁层厚度 th	20 nm
压电层厚度 t_p	0.4 mm

如图 3 (a)—(d) 所示, 纳磁体在应力作用 1.8 ns 时翻转至“NULL”. 这里的“NULL”并不是准确的 $\varphi = 0$, 而是与 x 轴偏转了一定的角度 ($\varphi = 7^\circ$). 这是因为纳磁体 Out 在 $-y$ 方向受到的应力作用和形状各向异性能在 $+y$ 方向的分量在达到动态平衡, 使其磁化矢量稳定在偏离 x 轴的状态. 而 10° 以内的偏差产生的 $+y$ 方向形状各向异性分量小于输入纳磁体 A 和 B 的铁磁耦合作用, 因此不会影响逻辑门的运算结果. 在 2.9 ns 时分别读入输入“00”, “01”, “10”和“11”, 在撤去应力 0.9 ns 后 ($t = 3.9$ ns), 纳磁体 Out 翻转至稳定逻辑态. 输入为“01”, “10”和“11”时, 纳磁体 Out 输出逻辑“1” ($\varphi = 88^\circ$); 输入为“00”时, 磁体 Out 输出逻辑“0” ($\varphi = -92^\circ$), 成功完成或逻辑. 注意这里纳磁体 Out 没有翻转到长轴方向 ($\varphi = 85^\circ$ 或

$\varphi = -95^\circ$), 是因为输入纳磁体的铁磁耦合作用使纳磁体偏离长轴方向, 偏向输入纳磁体的磁化方向. 图 3(e)—(f) 给出当输入为“10”时, 极角 θ 的动态磁化和纳磁体 Out 的磁化轨迹. 输入纳磁体 A

和 B 受到铁磁作用, 在面内和面外都仅产生较小波动 ($<2^\circ$), 并最终回到原始逻辑态. 在图 3(f) 的纳磁体 Out 的磁化轨迹中可以看到明显的高能态和低能态轨迹核, 对应逻辑“1”和“NULL”.

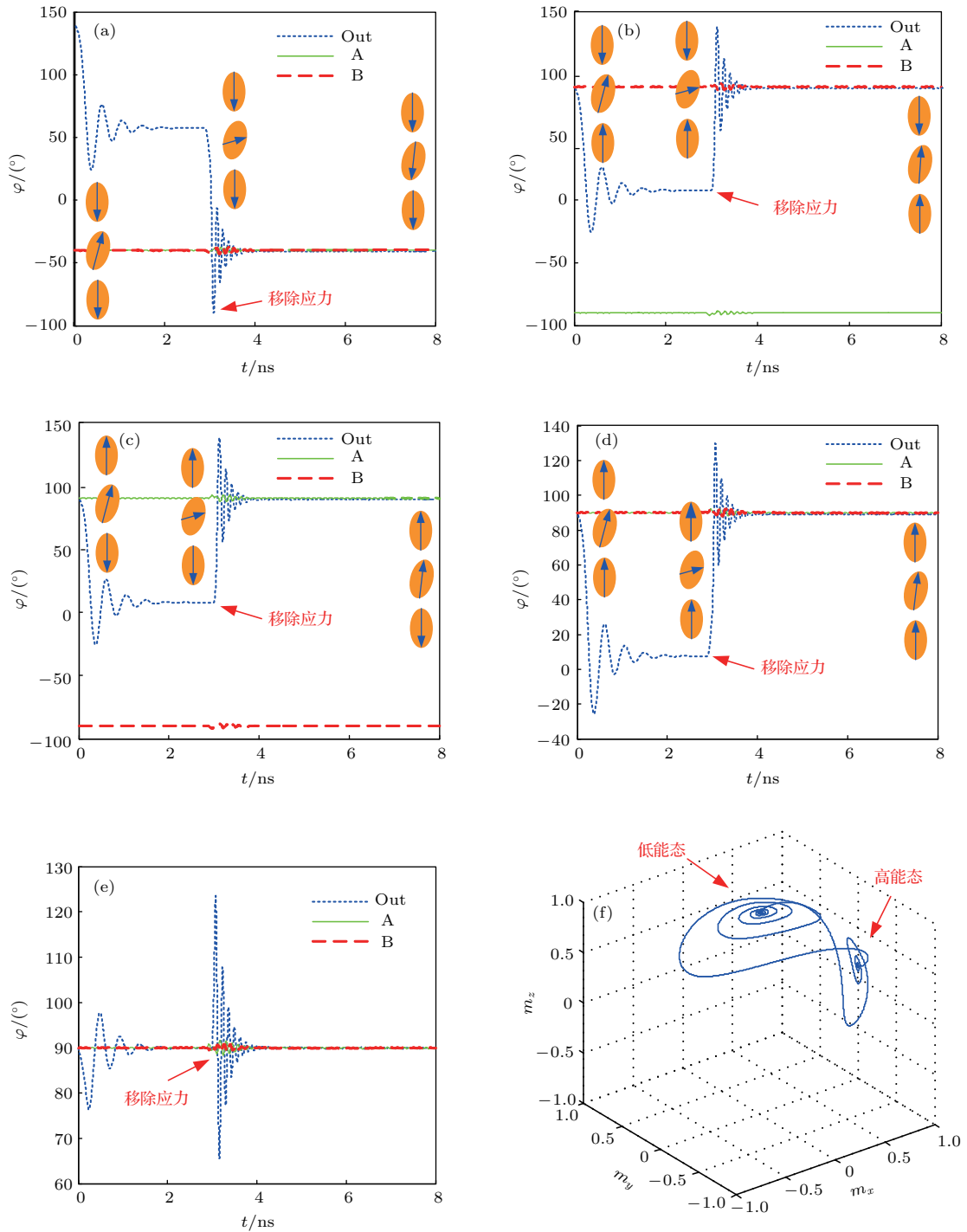


图 3 或门动态磁化, 施加 90 MPa 应力, 在 3 ns 后撤去应力 (a)—(d) 方位角 φ 的动态磁化: (a) 输入“00”, 输出“0”; (b) 输入“01”, 输出“0”; (c) 输入“10”, 输出“0”; (d) 输入“11”, 输出“1”; 输入为“10”时, (e) 极角 θ 的动态磁化, (f) 纳磁体 Out 的磁化轨迹

Fig. 3. Dynamic magnetization of OR logic gate. The authors apply a stress of 90 MPa and withdraw it after 3 ns. (a)–(d) Dynamic magnetization of the azimuth angle φ : (a) Input “00”, output “0”; (b) input “01”, output “0”; (c) input “10”, output “0”; (d) input “11”, output “1”. When the input is “10”, (e) dynamic magnetization of the polar angle θ ; (f) magnetization track of the nanomagnet Out.

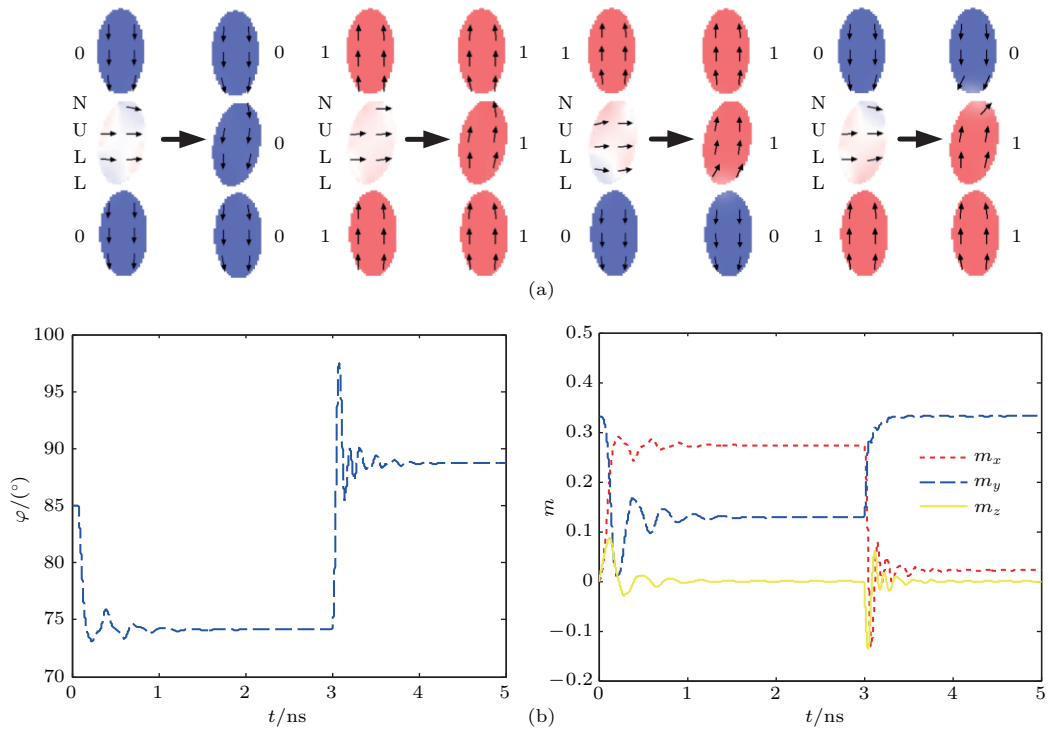


图4 或逻辑门OOMMF仿真结果 (a) 仿真磁化图; (b) 输入为“01”时的动态磁化

Fig. 4. Simulation results of OR logic gate by OOMMF: (a) Simulated magnetization diagram; (b) dynamic magnetization of input “01”.

图4为使用OOMMF (Object Oriented Micro-magnetic Framework) 软件^[37]对设计的或逻辑门进行的仿真. 参数设置如下: 纳磁体尺寸为 $50 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$, 网格大小为 $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$, 纳磁体中心间距为 120 nm , 阻尼系数 α 为 0.1 , 饱和磁化 $M_s = 800 \text{ kA/m}$, 交换系数 $A = 13 \times 10^{-12} \text{ J/m}^3$, 磁晶各向异性常数 $K = 0$, 输入分别为“10”, “01”, “00”和“11”. OOMMF没有应力各向异性性能设置项, 可以采用单轴各向异性性能等效^[12]. 如图4(a)所示, 只有当输入是“00”时, 输出才会变成“0”, 否则输出为“1”, 从而成功地实现或逻辑. 作者将输入为“01”时作为代表, 展示了纳磁体Out的磁化矢量分量 m_x, m_y, m_z 与面内角 φ 的动态变化仿真结果, 如图4(b)所示. 纳磁体Out在 1.76 ns 时翻转至“NULL”, 在应力撤去后 0.9 ns 翻转至 $\varphi = 88.7^\circ$ (逻辑“1”). 结果和作者的模型基本符合.

5 结 论

提出一种基于倾斜放置纳磁体的与(或)逻辑门设计方案, 建立其应力调控数学模型, 通过微磁

仿真软件OOMMF验证了设计的正确性. 与基于倾斜边缘的纳磁体的设计方案不同, 基于倾斜纳磁体的基础逻辑门具有四个优势: 1) 这种倾斜的磁体设计允许高纵横比(2:1)的纳米磁体用于逻辑功能, 因此产生较少的涡流误差, 可靠性更高; 2) 在制造工艺方面, 形状规则的倾斜纳磁体具有很大优势; 3) 倾斜纳磁体由于形状规则, 在数值计算方面只需做相应的角度变换; 4) 使用应力作为时钟, 使耗能大大降低, 仅为自旋电子时钟的十分之一. 该方案可为NML设计提供一种更加节能和可靠的基础逻辑单元. 在实验制备中, 倾斜放置纳磁体可能存在较大制备误差, 为此也可以改为将应力电极对倾斜, 使应力与纳磁体长轴形成角度.

参考文献

- [1] Imre A, Csaba G, Ji L L, Bernstein G H, Porod W 2006 *Science* **311** 205
- [2] Orlov A O, Imre A, Csaba G, Ji L L, Porod W, Bernstein G H 2008 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **3** 55
- [3] Yang X K, Zhang B, Cui H Q, Li W W, Wang S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 237502 (in Chinese) [杨晓阔, 张斌, 崔焕卿, 李伟伟, 王森 2016 物理学报 **65** 237502]

- [4] Wang S G, Ward R C C, Du G X, Han X F, Wang C, Kohn A 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 2562
- [5] Liu M, Zou Q, Ma C, Collins G, Mi S B, Jia C L, Guo H M, Gao H J, Chen C L 2014 *ACS Appl. Mater. Interf.* **6** 8526
- [6] Li D L, Ma Q L, Wang S G, Ward R C, Hesjedal T, Zhang X G, Kohn A, Amsellem E, Yang G, Liu J L, Jiang J, Wei H X, Han X F 2013 *Sci. Rep.* **4** 7277
- [7] Alam M T, Kurtz S J, Siddiq M A J, Niemier M T, Bernstein G H, Hu X S, Porod W 2012 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11** 273
- [8] Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173105
- [9] Bhowmik D, You L, Salahuddin S 2014 *Nature Nanotechnol.* **9** 59
- [10] Varga E, Csaba G, Bernstein G H, Porod W 2014 *IEEE Trans. Magn.* **49** 4452
- [11] Chavez A C, Sun W Y, Atulasimha J, Wang K L, Carman G P 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 224102
- [12] Cui H Q, Cai L, Yang X K, Wang S, Feng C W, Xu L, Zhang M L 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 285001
- [13] Li C, Cai L, Liu B J, Yang X K, Cui H Q, Wang S, Wei B 2018 *AIP Adv.* **8** 055314
- [14] Dong D N, Cai L, Li C, Liu B J, Li C, Liu J H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 228502 (in Chinese) [董丹娜, 蔡理, 李成, 刘保军, 李闯, 刘嘉豪 2018 物理学报 **67** 228502]
- [15] Wei B, Cai L, Yang X K, Li C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 217501 (in Chinese) [危波, 蔡理, 杨晓阔, 李成 2016 物理学报 **65** 217501]
- [16] Gypens P, Leliaert J, van Waeyenberge B 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 034004
- [17] Roy K 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 173110
- [18] Niemier M T, Varga E, Bernstein G H, Porod W, Alam M T, Dingler A, Orlov A, Hu X S 2012 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11** 220
- [19] Melo L, Soares T, Neto O V 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 1
- [20] Yang X K, Zhang B, Liu J H, Zhang M L, Li W W, Cui H Q, Wei B 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 057501
- [21] Haldar A, Adeyeye A O 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 022405
- [22] A I-Rashid M M, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2016 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **63** 3307
- [23] Yang X K, Cai L, Zhang B, Cui H Q, Zhang M L 2015 *J. Magn. Magn. Mater.* **394** 391
- [24] Turvani G, Riente F, Cairo F, Vacca M, Garlando U, Zamboni M, Graziano M 2017 *Int. J. Circ. Theor. Appl.* **45** 660
- [25] Melo L, Soares T, Vilela Neto O 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 1
- [26] Liu J H, Yang X K, Cui H Q, Wang S, Wei B, Li C, Li Chuang, Dong D N 2018 *J. Magn. Magn. Mater.* **474** 161
- [27] Cui J Z, Hockel J L, Nordeen P K, Pisani D M, Liang C Y, Carman G P, Lynch C S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 232905
- [28] Hu J M, Duan C G, Nan C W, Chen L Q 2017 *npj Comput. Math.* **3** 18
- [29] Biswas A K, Ahmad H, Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2016 *Nano Lett.* **17** 3478
- [30] Jin T L, Hao L, Cao J W, Liu M F, Dang H G, Wang Y, Wu D P, Bai J M, Wei F L 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 043002
- [31] Roy K, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2011 *Phys. Rev. B* **83** 224412
- [32] Fidler J, Schrefl T 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** R135
- [33] Chikazumi S, Charap S H E 1964 *Physics of Magnetism* (New York: Wiley) pp296–297
- [34] Fashami M S, Roy K, Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2011 *Nanotechnology* **22** 155201
- [35] Brown W F 1963 *Phys. Rev.* **130** 1677
- [36] Fashami M S, D'Souza N 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **438** 76
- [37] Donahue M J, Porter D G 1999 *OOMMF User's Guide, Version 1.0 Interagency Report NISTIR 6376*

Modeling of stress-regulated AND (OR) logic gate based on flipping preference of tilted nanomagnet*

Liu Jia-Hao¹⁾ Yang Xiao-Kuo^{1)†} Wei Bo¹⁾ Li Cheng¹⁾ Zhang Ming-Liang²⁾
Li Chuang¹⁾ Dong Dan-Na¹⁾

1) (*Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*Wired Communications Department, Air Force Communications NCO Academy, Dalian 116100, China*)

(Received 30 August 2018; revised manuscript received 26 November 2018)

Abstract

Nano-magnetic logic device (NMLD) is a novel nanoelectronic device that stores, processes, and transfers information by dipole-coupled magneto-static interactions between nanomagnets. In the NMLD, long axis tilted nanomagnet attracts the attention of researchers due to its flexibility in magnetic logic design. Edge-slanted nanomagnet is widely used, whose long axis is tilted due to its asymmetric shape. However, there are three defects in edge-slanted nanomagnets. 1) This type of nanomagnet requires a larger size, thus increasing the nano-magnetic logic (NML) space and introducing the C-shape and vortex clock errors that are often found in large-sized nanomagnets. 2) The irregular shape of nanomagnet increases the requirements for fabrication. 3) Complex calculations caused by the irregular shape are inevitable.

In this paper, the tilt of the long axis of the nanomagnet is realized by placing the regular-shaped (elliptical cylinder) nanomagnet ($50\text{ nm} \times 100\text{ nm} \times 20\text{ nm}$) obliquely. According to the flipping preference of tilted nanomagnet, the authors design a two-input AND (OR) logic gate clocked by stress. The authors choose PMN-PT ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$) as the piezoelectric layer material to use its high piezoelectric coefficient. For magnetic materials, the authors choose Terfenol-D ($\text{Tb}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Fe}_2$), whose magnetic crystal anisotropy is smaller. The material of the substrate is not discussed in this paper, which will be further studied in future experimental work. The mathematical model is established, and the dynamic magnetization of the gate is calculated. A stress of 90 MPa is applied to the output nanomagnet for 3 ns. The nanomagnet is flipped to "NULL" at 1.8 ns and is then flipped to the final stable state after the stress has been removed for 0.9 ns. The output will become logic "0" ("1") only if the input is logic "00" ("11"), otherwise the output will be logic "1" ("0"), thus successfully implementing OR (AND) logic. In addition, the gate is simulated by using the micromagnetic method. The results are basically consistent with our model. Unlike the designs based on edge-slanted nanomagnets, the basic logic gate based on tilted nanomagnets has three advantages. 1) This design allows high-aspect-ratio (2 : 1) nanomagnets to be used in logic functions. Therefore, less vortex and C-shaped error will be generated. 2) The regular shape can reduce the fabrication requirements and computational complexities. 3) Using stress as a clock, the energy consumption is greatly reduced, which can be only one-tenth of the general designs clocked by spin electronics.

This model provides a greater energy efficiency and reliable basic logic unit for NML design. In the experimental preparation, there may be a large preparation error tilting the nanomagnet. As a solution, the stress electrodes can be tilted instead. So the stress will also make an angle with respect to the long axis of the nanomagnet.

Keywords: nanomagnet, magnetic logic, stress regulation, logic gate

PACS: 75.78.-n, 85.70.Kh, 85.80.Jm

DOI: 10.7498/aps.68.20181621

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61302022, 61804184) and President Foundation of Air Force Engineering University (Grant No. XZJK2018034).

† Corresponding author. E-mail: yangxk0123@163.com