

基于多铁逻辑的铁磁耦合互连线磁化动态模拟

杨晓阔 张斌 崔焕卿 李伟伟 王森

Magnetization dynamics in ferromagnetic coupling interconnect wire using multiferroic logic scheme

Yang Xiao-Kuo Zhang Bin Cui Huan-Qing Li Wei-Wei Wang Sen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 237502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.237502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.237502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

反铁磁耦合硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的不可逆交换弹性反磁化过程

Irreversible exchange-spring processes of antiferromagnetically exchange coupled hard-soft-hard trilayer structures

物理学报.2011, 60(10): 107503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.107503>

考虑自热效应的互连线功耗优化模型

A novel interconnect-optimal power model considering self-heating effect

物理学报.2013, 62(1): 016601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.016601>

一种基于多目标约束的互连线宽和线间距优化模型

An optimization model of wire size for multi-objective constraint

物理学报.2010, 59(7): 4837-4842 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.4837>

基于多铁逻辑的铁磁耦合互连线磁化动态模拟*

杨晓阔[†] 张斌 崔焕卿 李伟伟 王森

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2016年7月21日收到; 2016年8月31日收到修改稿)

建立了多铁纳磁体逻辑器件的铁磁耦合作用模型, 通过施加应变时钟对铁磁耦合互连线的磁化动态进行了理论模拟. 结果表明: 合适的应力 (19.7—20.1 MPa) 能够实现近 180° 磁化翻转, 完成逻辑态在铁磁耦合互连线中的正确传递; 多铁纳磁体间的强耦合阻碍器件的有效磁化翻转, 这可能源于小间距增强了纳磁体的面外磁化, 从而阻碍了面内翻转. 研究结论可为多铁逻辑电路的设计提供重要指导.

关键词: 多铁逻辑, 铁磁耦合, 互连线, 磁化动态

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

DOI: 10.7498/aps.65.237502

1 引言

磁性材料沉积成规则排列的多个长条形或椭圆形纳米薄膜点可以构成纳磁逻辑 (nano-magnet logic, NML) [1,2] 电路. 这些磁性薄膜点也称作纳磁体, 一般由磁性单质金属 (如铁、镍、钴) 或磁性合金 (如坡莫合金) 材料制成. NML 器件依靠纳磁体的磁化方向表征二元信息, 即沿着纳磁体长轴 (易磁化轴) 方向的磁化表示二元逻辑 “0” 或 “1”, 而沿着短轴 (难磁化轴) 方向的磁化则表示空态 (null) [3], 如图 1(a) 所示. NML 电路中的逻辑计算或信息传递则是依靠磁体间的偶极子耦合作用完成. NML 器件具有天然非易失性、抗辐射和低功耗等优点, 这些特征使其在临近空间电子系统中具有广阔的应用前景.

要使 NML 电路完成可靠的计算或逻辑态传递, 必须施加一外部时钟信号将纳磁体预置到空态, 这样来自输入端纳磁体的偶极子场才能将目标纳磁体翻转到新的逻辑态, 成功完成一次逻辑计算. 这个外部时钟信号通常采用通电导线产生的微小磁场 [4] 来实现. 然而, 由于单个纳磁体尺寸很小, 导致时钟磁场很难局域化, 必须对多个纳磁体区域

采用同一磁场驱动, 这大大限制了 NML 电路的工作频率 [5]. 为了解决这个问题, 文献 [6] 提出了基于逆磁电效应的多铁纳磁体逻辑器件. 多铁 NML 是一种双层复合材料结构, 包含一压电层 (PZT) 和一磁致伸缩层 (magnetostrictive), 如图 1(b) 所示. 对压电层施加一微弱电压, 产生的应力通过磁弹耦合传递到磁致伸缩层, 可以改变其磁化方向. 如果用磁致伸缩层的磁化方向代表二元逻辑, 则通过压电层电压的变化就可以调控器件的逻辑态, 从而实现信息处理. 由于多铁逻辑施加的外部时钟信号是电压, 可以进行单个纳磁体控制, 从而避免了磁场局域化难题, 具有更好的实用性. 因而其转换特性得到了研究人员的广泛关注.

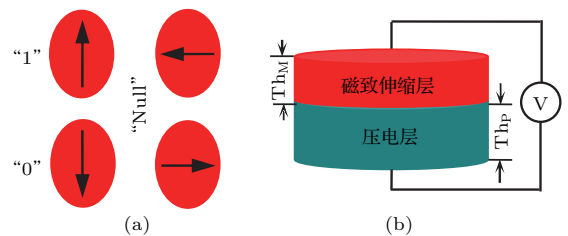


图 1 纳磁体逻辑器件 (a) 逻辑态; (b) 多铁纳磁体
Fig. 1. Nanomagnet logic device: (a) Logic states; (b) multiferroic nanomagnet.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61302022) 和空军工程大学理学院博士后科研启动基金 (批准号: 2015BSKYQD03) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yangxk0123@163.com

互连线是设计任何逻辑电路必不可少的关键元件. 在NML技术中, 互连线是由纳磁体构成的. 因而, 纳磁逻辑互连的信号传递就和磁体/器件的转换特性密切相关, 有必要对互连线的工作机理进行深入研究. Roy等^[7]对不同材料制备的单个多铁NML器件工作特性进行了深入的理论模拟. 基于单个器件的一些结论, 文献^[8, 9]研究了反铁磁耦合互连线的工作机制和特性. 但到目前为止, 铁磁耦合互连线的转换还未得到有效关注. 由于铁磁耦合互连线和反铁磁耦合互连线的机理不同, 需要建立其耦合作用模型; 同时, 其完全翻转所需的电压/应力大小如何以及器件间耦合强度对互连线信号传递有何影响都需要深入认识. 本文着眼于多铁逻辑铁磁耦合互连线的转换特性和磁化动态模拟, 研究结果不但可完整磁逻辑电路元件库, 同时对于纳磁逻辑电路的构建也具有重要的促进作用.

2 多铁逻辑铁磁互连线

2.1 多铁逻辑互连线

纳磁逻辑互连线有两种不同的实现形式, 分别称之为反铁磁耦合互连线和铁磁耦合互连线, 多铁纳磁体也不例外. 反铁磁耦合互连线是指器件难磁化轴处于同一条直线上, 而铁磁耦合互连线是指器件易磁化轴处于同一条直线上, 分别如图2(a)和图2(b)所示. 具体来说, 反铁磁耦合互连线相邻磁体/器件间的状态是相反的, 铁磁耦合互连线相邻

磁体/器件间的状态是相同的. 例如, 对于同一个输入逻辑“0”而言, 纳磁体A(反铁磁线)的状态为逻辑“1”, 而纳磁体B(铁磁线)的状态仍为逻辑“0”. 然而, 由于铁磁耦合的偶极子场比反铁磁耦合的偶极子场弱, 要想可靠翻转铁磁耦合互连线中器件状态并不容易. 为此, 本文研究铁磁耦合互连线的磁化动态问题, 通过模拟多铁逻辑互连线的翻转过程, 以期找出其与施加电压/应力大小之间的关系, 同时探索多铁逻辑互连线信号传递的影响因素.

2.2 铁磁耦合磁化动态建模

多铁纳磁体逻辑器件的磁化特性可用LLG方程^[10]描述如下(阻尼系数 $\alpha \leq 1$):

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

其中 $\mathbf{M}(t)$ 是多铁纳磁体的三维磁矩向量, 即 $\mathbf{M}(t) = [M_x(t), M_y(t), M_z(t)]$, M_s 为饱和磁矩, γ 为回磁比. 纳磁体器件的有效总磁场 \mathbf{H}_{eff} ^[10]为

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

其中 μ_0 为真空磁导率, V 是纳磁体的体积. 任一多铁纳磁体逻辑器件的总能量 E 为

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

假设 α 和 β 分别是磁矩向量 \mathbf{M} 的极角(面外磁化)和方位角(面内磁化). 在 x - y 平面内, y 方向代表多铁纳磁体的长轴, x 方向代表短轴, 如图2(c)所示. z 方向代表平面外磁矩, 多铁逻辑器件的形状各向异性能表达式为

$$E_{\text{shape-anisotropy}} = \frac{\mu_0}{2} [M_s^2 V] [N_{d_{xx}} (\sin \alpha_i \cos \beta_i)^2 + N_{d_{yy}} (\sin \alpha_i \sin \beta_i)^2 + N_{d_{zz}} (\cos \alpha_i)^2], \quad (4)$$

其中 $N_{d_{xx}}$, $N_{d_{yy}}$ 和 $N_{d_{zz}}$ 为椭圆形多铁纳磁体的退磁因子, 计算公式详见文献^[11]. 多铁纳磁体在应力/电压作用下产生的应力各向异性能^[5]为

$$E_{\text{stress-anisotropy}} = -\left[\left(\frac{3}{2}\lambda_s\right)\sigma V\right] \sin^2 \alpha_i \sin^2 \beta_i, \quad (5)$$

其中 $3\lambda_s/2$ 为饱和磁致伸缩, σ 为施加的应力值.

除了形状各向异性能和应力各向异性能外, 多铁逻辑铁磁耦合互连线中任一器件包含的关键能量形式还有相邻纳磁体间的偶极子耦合作用能(逻

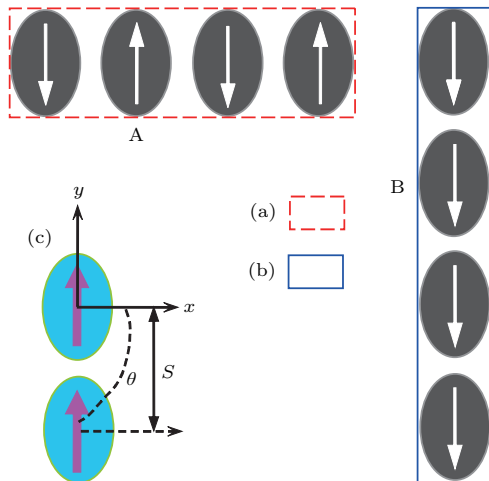


图2 (网刊彩色) 纳磁逻辑互连线 (a) 反铁磁耦合; (b) 铁磁耦合; (c) 铁磁耦合模型示意图

Fig. 2. (color online) Nanomagnetic logic interconnect: (a) Antiferromagnetic coupling; (b) ferromagnetic coupling; (c) schematics of ferromagnetic coupling model.

辑态得以传递的最重要因素), 由于纳磁体间是铁磁耦合, 即图 2(c) 中标示的 $\theta = 90^\circ$. 由于和第 j 个邻近纳磁体存在偶极子相互作用, 第 i 个纳磁体所具有的铁磁耦合偶极子作用能为

$$E_{\text{dipole}}^{i-j} = \frac{\mu_0 M_s^2 V^2}{4\pi S^3} \sum_{i-1; j \neq i}^{i+1} [(\sin \alpha_i(t) \cos \beta_i(t)) \times (\sin \alpha_j(t) \cos \beta_j(t)) + (-2)(\sin \alpha_i(t) \sin \beta_i(t)) \times (\sin \alpha_j(t) \sin \beta_j(t)) + \cos \alpha_i(t) \times \cos \alpha_j(t)], \quad (6)$$

其中 S 代表邻近多铁纳磁体中心点之间的距离.

将三维磁矩向量归一化 (如 $m_x = M_x/M_s$), 利用 (2) 式可得铁磁耦合线中任一纳磁体受到的三维有效场向量分别为:

$$H_{\text{eff-x}}^i(t) = -\frac{1}{\mu_0 M_s V} \frac{\partial E(m_x, m_y, m_z)}{\partial m_x} = -\frac{1}{\mu_0 M_s V} \left(\frac{\partial E}{\partial m_x} \Big|_{m_y, m_z = \text{const}} \right) = -\frac{M_s V}{4\pi S^3} \sum_{i-1; j \neq i}^{i+1} [\sin \alpha_j(t) \cos \beta_j(t)] - M_s (N_{d-xx}) \sin \alpha_i(t) \cos \beta_i(t), \quad (7a)$$

$$H_{\text{eff-y}}^i(t) = \frac{M_s V}{4\pi S^3} \sum_{i-1; j \neq i}^{i+1} [2 \sin \alpha_j(t) \cos \beta_j(t)] - M_s (N_{d-yy}) \sin \alpha_i(t) \sin \beta_i(t) + \frac{3\lambda_s}{\mu_0 M_s} \sigma_i(t) \sin \alpha_i(t) \sin \beta_i(t), \quad (7b)$$

$$H_{\text{eff-z}}^i(t) = -\frac{M_s V}{4\pi S^3} \sum_{i-1; j \neq i}^{i+1} [\cos \alpha_j(t)] - M_s (N_{d-zz}) \cos \alpha_i(t). \quad (7c)$$

将 (7) 式代入 (1) 式即可求解铁磁耦合互连线中任一纳磁体的磁化动态, 通过改变相关参数, 可以观察这些参数对互连线特性的影响.

3 多铁纳磁体铁磁互连线的磁化动态模拟

3.1 逻辑态翻转所需应力/电压仿真

我们通过数值方法解三维 LLG 方程 (1) 获得了铁磁互连线中任一多铁纳磁体的磁化动态, 特

别地, 我们关注每一纳磁体面内磁化角度随时间变化的情况, 因为面内磁化方向是逻辑态表征的惟一有效参量. 椭圆形多铁纳磁体的长轴和短轴分别为 105 和 95 nm [6], 此时纳磁体的形状各向异性在两个稳态 0 和 1 之间能够产生 $32k_B T$ ($T = 300$ K) 或 0.8 eV 的能量势垒, 这一能量势垒足以抵抗外界的随机热涨落. 所有器件均由 PMN-PT 铌镁酸铅钛酸铅 (压电层, $Th_P = 40$ nm) 和 Terfenol-D (磁致伸缩层, $M_s = 4.84 \times 10^5$ A/m, $Th_M = 10$ nm, $3\lambda_s/2 = -3 \times 10^5$) 双层材料制成. 其他使用到的参数为: $S = 200$ nm, $\alpha = 0.05$.

仿真中, 铁磁互连线采用流水线应力时钟信号驱动, 其初始状态如图 2(b) 所示, 均为逻辑状态 0. 为了观察铁磁互连线的工作机理和特征, 首先给互连线输入纳磁体 (最上端纳磁体) 写入新的逻辑值 1, 接着给第二个纳磁体施加 20 MPa 应力时钟, 当时间持续到 $t = 0.02$ s 时, 对第三个纳磁体施加同样大小的应力, 当时间持续到 $t = 0.38$ s 时撤去时钟信号, 观察铁磁互连线中逻辑值 1 的传递情况, 所有纳磁体的面内磁化角度 β 如图 3 所示.

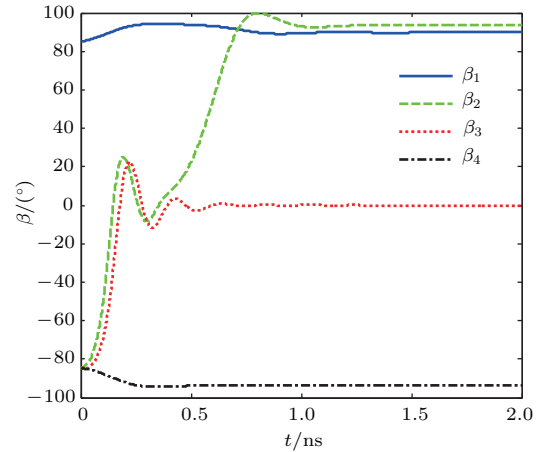


图 3 (网刊彩色) 多铁逻辑铁磁互连线磁化动态仿真结果
Fig. 3. (color online) Simulation result of magnetization dynamics of ferromagnetic interconnect in multi-ferroic logic.

从图 3 可见, 当撤去时钟信号后, 第二个纳磁体翻转到了正确的逻辑 1 态 ($\beta \approx 92^\circ$), 第三个纳磁体保持为空态, 第四个纳磁体维持原先的逻辑态 0 ($\beta \approx -93^\circ$), 这表明施加合适的应力时钟后, 铁磁互连线表现出了可靠的信号传递特征. 具体来说, 当施加 20 MPa 的应力时钟后, 第二个纳磁体立即翻转到了空态 ($\beta = 0^\circ$), 而后出现约 20° 的面内磁化指向, 但持续的应力时钟又将其拉回到了空态. 当应力撤消后, 第二个纳磁体受到输入纳磁体的铁

磁耦合作用, 这个“偶极子作用能”迅速将其翻转到了逻辑1态. 为了观察相应的三维磁矩向量变化情况, 图4给出了第二个纳磁体翻转时对应的三维磁化图像, 该曲线详细描述了纳磁体的复杂磁化动态. 从这个仿真可以看出, 20 MPa的应力(根据文献[6], 相当于图1中施加100 mV电压)实现了逻辑态从0到1的转变, 完成了180°的磁化翻转. 因此, 对于铁磁互连线来说, 尽管偶极子耦合相对较弱, 但只要应力时钟信号适当, 信号传递是可靠的. 文中只展示了第二个纳磁体的动态情况, 其他纳磁体的情况可以类比仿真.

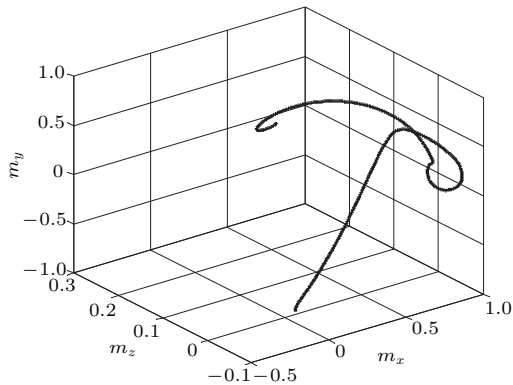


图4 多铁逻辑铁磁互连线中第二个纳磁体的三维磁化图像
Fig. 4. Three-dimensional plot of magnetization components of the second nanomagnet of ferromagnetic interconnect in multiferroic logic.

为了证实应力/电压大小对于铁磁耦合逻辑传递的重要性, 文中多次仿真获得了该尺寸下合适的应力大小为19.7—20.1 MPa, 这些数值均能保证铁磁耦合互连线的可靠翻转. 相反, 如果施加的应力在这个范围之外, 互连线的磁化翻转将会发生本质变化. 特别地, 图5给出了施加19 MPa应力时互连线中各个纳磁体的磁化情况. 从图5(a)可见, 第二个纳磁体并没有发生铁磁耦合翻转, 而是处于空态逻辑. 仔细观察, 可以发现该纳磁体在某一瞬间获得了约90°面内磁化, 但又立即回到了空态. 究其原因是由于应力不在临界值范围内, 形状各向异性和应力各向异性相互竞争产生的结果. 应力太小, 形状各向异性占优, 翻转错误; 应力太大, 容易引发面外磁化, 这个瞬间的面外磁化会使纳磁体放弃铁磁耦合磁化从而回到空态, 图5(b)清晰地展示了面外磁化角度 α 的变化情况.

3.2 多铁纳磁体间距的影响仿真

理论上, 如果纳磁体逻辑电路中磁体间间距越近, 耦合作用更强, 越有利于磁化翻转, 这在之前的

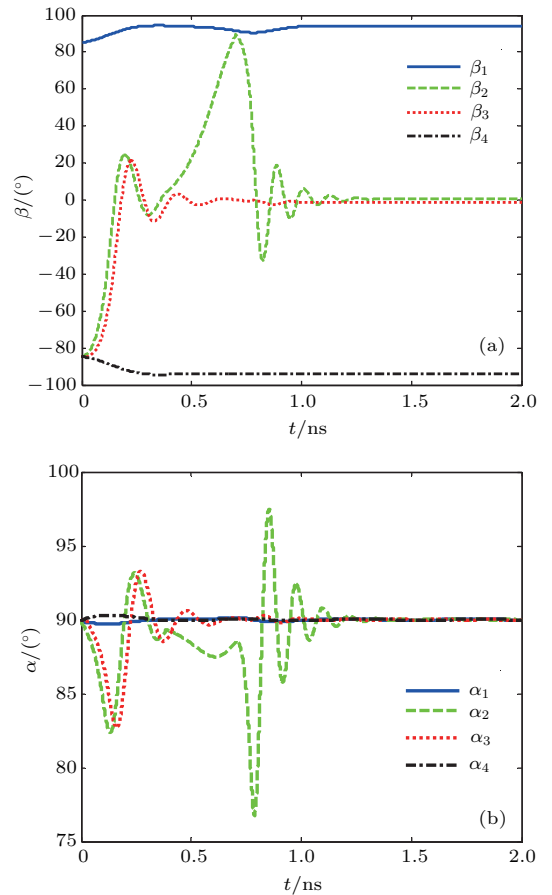


图5 (网刊彩色) 多铁纳磁体铁磁互连线的错误磁化动态 (19 MPa 应力) (a) 面内磁化; (b) 面外磁化
Fig. 5. (color online) Incorrect magnetization dynamics of ferromagnetic interconnect in multiferroic logic when applying a stress of 19 MPa: (a) In-plane magnetization; (b) out-of-plane magnetization.

磁场驱动型纳磁逻辑电路中^[12]已有结论, 但该结论对于多铁纳磁体铁磁互连线是否仍然正确呢? 为了论证这个问题, 采用和上一节相同的仿真方法及参数, 施加20 MPa的应力, 惟一不同的是间距从200 nm减小为150 nm, 观察铁磁互连线中多铁纳磁体的磁化及信号传递情况, 仿真结果如图6所示.

从图6可见, 当多铁纳磁体间的间距变为150 nm时, 即纳磁体间的距离减小时, 互连线出现了错误的信号传递, 这个结论完全颠覆了之前在非多铁纳磁体逻辑电路中得到的结论. 仔细观察可以发现, 互连线中间的两个纳磁体最后都翻转到了空态, 没有发生铁磁耦合传递作用, 其中第二个纳磁体在错误翻转中经历了明显的振动过程. 这是因为当把纳磁体间的距离减小时, 输入纳磁体和第二个纳磁体的铁磁耦合虽然增强了, 但该铁磁耦合产生的磁化并不完全处于面内. 实际上, 多铁纳磁体逻辑器件的磁化翻转是一个复杂的过程, 在整个翻

转过程中器件的面内和面外磁化同时存在, 增大间距产生了更强的 z 方向磁矩, 也即诱发了更强的面外磁矩, 因此纳磁体最终没有稳定在铁磁耦合态.

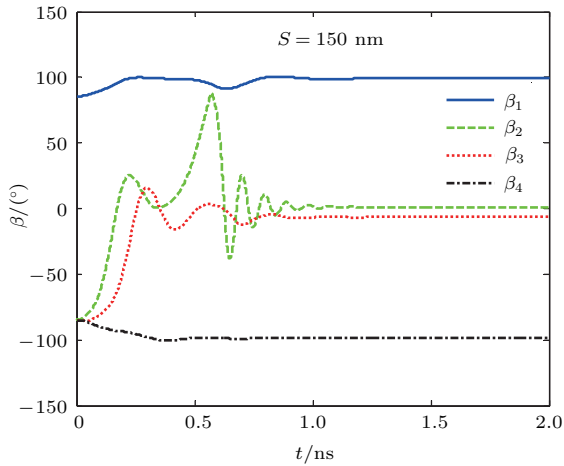


图6 (网刊彩色) 间距对多铁逻辑铁磁互连线信号传递的影响

Fig. 6. (color online) Effect of nanomagnet spacing on signal propagation of ferromagnetic interconnect wire in multiferroic logic.

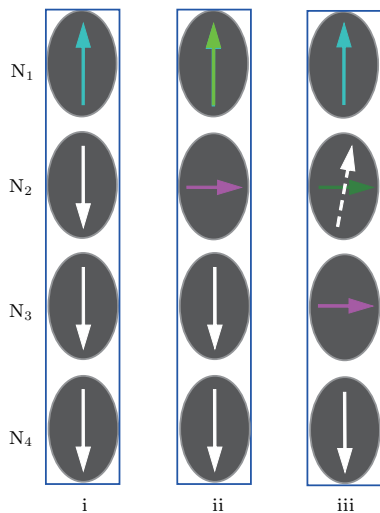


图7 (网刊彩色) 多铁逻辑铁磁互连线的磁化图像

Fig. 7. (color online) Magnetization image of ferromagnetic interconnect in multiferroic logic.

为了进一步认识多铁纳磁体构成的铁磁耦合互连线在间距变小时为什么出现信号传递错误, 这里将其与先前的磁场驱动型铁磁互连线进行了对比. 由于磁场驱动型互连线所采用的纳磁体器件是由单层磁性材料构成, 不含压电层, 且施加的时钟信号(即磁场, 而非应力或电压)方向一直和纳磁体平面/表面平行, 器件在磁化翻转过程中几乎没有

面外磁化, 只会出现面内翻转. 此时减小的纳磁体间距(150 nm)意味着更强的铁磁耦合, 信号传递更加可靠, 这也是为什么间距减小时磁场驱动型互连线不易发生错误转换的原因.

图7给出了间距为150 nm时多铁逻辑互连线翻转后的磁化图像, 该图清晰地展示了第二个纳磁体经历空态、合成磁化方向指向 y 轴直至最后失败(再次回到空态)的过程.

4 结 论

本文通过理论建模和数值仿真方法深入研究了多铁纳磁体铁磁耦合互连线的磁化动态. 仿真中不断改变施加应力的大小及纳磁体间间距等参数, 结果发现: 合适的应力(19.7—20.1 MPa)才能实现互连线铁磁耦合态的正确传递, 过大或过小的应力都会诱发错误翻转; 多铁纳磁体间的强耦合阻碍器件的有效磁化翻转, 这可能源于小间距增强了纳磁体的面外磁化, 从而阻碍了面内翻转. 研究结论可为多铁逻辑纳磁电路的设计提供重要指导.

参考文献

- [1] Imre A, Csaba G, Ji L L, Bernstein G H, Porod W 2006 *Science* **311** 205
- [2] Souza N D, Fashami M S, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2016 *Nano Lett.* **16** 1609
- [3] Orlov A O, Imre A, Csaba G, Ji L L, Porod W, Bernstein G H 2008 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **3** 55
- [4] 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
- [5] Fashami M S, Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2012 *Nanotechnology* **23** 105201
- [6] Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173105
- [7] Roy K, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2011 *Phys. Rev. B* **83** 224412
- [8] Yilmaz Y, Mazumder P 2013 *IEEE Trans. VLSI Syst.* **21** 1181
- [9] Roy K 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 013103
- [10] Fidler J, Schrefl T 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** R135
- [11] Fashami M S, Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2011 *Nanotechnology* **22** 155201
- [12] Shah F A, Csaba G, Butler K, Bernstein G H 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 17B904

Magnetization dynamics in ferromagnetic coupling interconnect wire using multiferroic logic scheme*

Yang Xiao-Kuo[†] Zhang Bin Cui Huan-Qing Li Wei-Wei Wang Sen

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

(Received 21 July 2016; revised manuscript received 31 August 2016)

Abstract

Nowadays, the intense research effort is focused on exploring alternative emerging device to perform binary logical function. A promising device technology is multiferroic nanomagnet logic. The main reason for the interest in this nanomagnetic switch is its nonvolatility and comparatively low power consumption in combination with the ability to perform logic and storage in one single element. The basic element of multiferroic nanomagnet logic is a sub-100 nm size single domain magnet. Usually, the x - y direction defines the in-plane dimension, while the z axis direction depicts the thickness of nanomagnet. The in-plane magnetizations along easy axis are used to encode binary logic states '1' and '0', respectively; while along the hard axis they denote 'null' logic. The logic operation and data transmission in magnetic logic are realized by the dipole-coupled magnetostatic interactions. In multiferroic nanomagnet logic, the interconnect wire is a very important component since it forms data transmission channel of any nanomagnetic logic circuit. There are two kinds of interconnected wires in this technology, namely antiferromagnetic coupling interconnected wire and ferromagnetic coupling interconnected wire. In this paper, the switching dynamics of a multiferroically and nanomagnetically interconnected wire employing ferromagnetic coupling is simulated by solving the Landau-Lifshitz-Gilbert equation with neglecting the thermal fluctuation effects. The wires are implemented with dipole-coupled two-phase (magnetostrictive/piezoelectric) multiferroic elements that are clocked with electrostatic potentials of 100 mV applied to the piezoelectric layer generating 20 MPa stress in the magnetostrictive layers for switching. Specifically, the ferromagnetic coupling effect model for multiferroic nanomagnet interconnected wire is established, and its magnetization dynamics is simulated by using different stress clocking. It is found that moderate strain (19.7–20.1 MPa) can ensure $\sim 180^\circ$ magnetization reversal, and the logic state is successfully transferred in the ferromagnetic coupling interconnected wire. It is also found that the strong ferromagnetic coupling between multiferroic nanomagnets blocks effective magnetization reversal. This may arise from small spacing-induced out-of-plane magnetization, which does not favor the in-plane magnetization. These findings can provide some guidance for multiferroic logic circuit design.

Keywords: multiferroic logic, ferromagnetic coupling, interconnect wire, magnetization dynamics

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

DOI: 10.7498/aps.65.237502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61302022) and the Scientific Research Foundation for Postdoctor of Air Force Engineering University (Grant No. 2015BSKYQD03).

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