

一种基于异质多铁结构全局应变时钟的 纳磁体择多逻辑门*

豆树清¹⁾ 杨晓阔^{1)†} 夏永顺¹⁾ 袁佳卉¹⁾
崔焕卿¹⁾ 危波¹⁾ 白馨²⁾ 冯朝文¹⁾

1) (空军工程大学基础部, 西安 710051)

2) (重庆工商大学人工智能学院, 重庆 400067)

(2023年5月26日收到; 2023年7月3日收到修改稿)

利用正、负磁致伸缩系数材料 (Terfenol-D, Ni) 对相同应变的响应差异, 提出了一种基于异质多铁结构全局应变时钟的纳磁体择多逻辑门, 设计了“高应力启动-低应力计算”的两步择多计算模式, 使用 MuMax3 微磁学仿真软件建立了该器件的微磁学模型, 并研究了其能量演化情况和周期能耗. 仿真结果表明: 异质多铁结构全局应变时钟纳磁体择多逻辑门能够成功地对任意的 3 端输入组合连续执行择多计算; 应用两步择多计算模式, 该器件计算正确率可达 100%, 其执行连续计算的周期为 2.75 ns, 周期能耗约 64 aJ. 研究发现: 应力各向异性性能和偶极子耦合能变化引起的能量势阱变化是决定该器件磁化动力学行为的主要原因. 本文研究结果可为纳米磁逻辑电路的设计提供重要指导.

关键词: 择多逻辑门, 多铁纳磁体, 纳米磁逻辑, 异质多铁结构

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230866

1 引言

在纳米尺度上, 互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 电路的缩放变得极其困难, 因此科研人员一直在寻求其替代方案^[1]. 纳米磁逻辑电路 (nanomagnet logic circuit, NMLC) 以其非易失性、抗辐射性和超低功耗, 在众多替代方案中潜力巨大^[2,3]. NMLC 能够执行所有算术/逻辑运算, 在功能上可完全代替布尔数字电路^[4], 其通常由多个单轴的单畴纳磁体组成^[5]. 单轴纳磁体常见的形状有长方体、椭圆柱体等. 它们都有一个长轴和一个短轴, 沿短轴方向为其能量势垒方向, 长轴为能量势阱方向, 因此

纳磁体磁矩倾向于沿长轴方向排列, 在此方向上具有双稳态特性^[6]. 如图 1 所示, 若磁矩朝上编码布尔逻辑“1”, 朝下则为“0”; 沿其短轴方向定义为空态, 即待写入状态^[7]. 单畴是指纳磁体内部所有磁化方向大致相同, 可等效为一个经典的旋转磁矩^[5], 如图 2 和图 3 中: 黑色箭头代表纳磁体的磁矩方向.

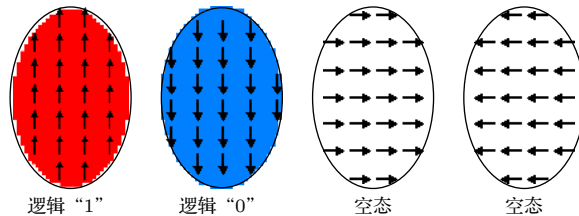


图 1 椭圆柱体纳磁体布尔逻辑编码方式

Fig. 1. Cylindrical elliptical nanomagnet logic coding for Booleans.

* 国家自然科学基金 (批准号: 62274183) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2022JQ-073) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangxk0123@163.com

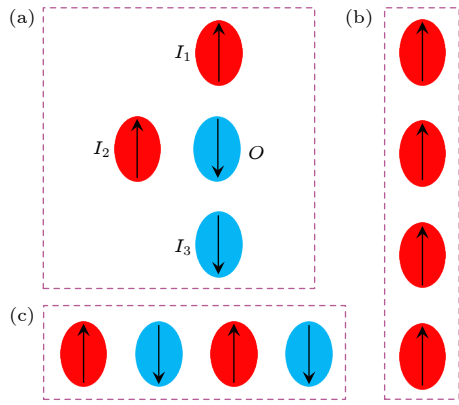


图 2 NMLC 组件 (a) 择多逻辑门 (b) 铁磁耦合互连线; (c) 反铁磁耦合互连线
 Fig. 2. NMLC Components: (a) Majority gate; (b) ferro-magnetic coupling interconnect wire; (c) anti-ferromagnetic coupling interconnect wire.

NMLC 依靠纳磁体间的偶极子耦合作用实现逻辑信息的传递 [8–10]. 目标纳磁体写入信息之前, 一般先预置到空态, 然后在邻近纳磁体的耦合作用下, 切换到目标逻辑. 预置纳磁体到空态的控制信号被称为时钟 [11,12], 常见的时钟方案有: 磁场时钟、自旋转移矩时钟、自旋轨道矩时钟、应变时钟等, 其中, 应变时钟因为能耗超低, 受到了科研人员的高度关注 [13–21]. 应变时钟的调控对象主要为多铁纳磁体, 它是由纳磁体 (铁磁材料) 和压电材料 (铁电材料) 耦合而成的多铁性异质结, 可通过逆压电效应和逆磁致伸缩效应的结合, 实现电场对磁性的调控 [22].

择多逻辑门是 NMLC 的核心, 相当于 CMOS 电路中的反相器, 复杂的 NMLC 通常由几个择多逻辑门级联而成 [3]. 如图 2(a) 所示, NML 择多逻辑

门一般由 4 个纳磁体组成, I_1, I_2, I_3 分别为 3 个输入端, O 为输出端, 其择多功能通过 I_1, I_2, I_3 对 O 的偶极子耦合作用实现. 由于该逻辑门中存在铁磁耦合及反铁磁耦合两种耦合方式, 因而与传统择多逻辑门不同, NML 择多逻辑门的逻辑表达式为 [23]

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

即输出 I_1, \bar{I}_2, I_3 中占多数的逻辑值, 其中 \bar{I}_2 为 I_2 的逻辑值取反.

择多逻辑门之间的级联一般通过纳米磁逻辑互连线实现, 其有铁磁耦合互连线和反铁磁耦合互连线两种形式, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示.

2006 年, Imre 等 [5] 首次提出了 NML 择多逻辑门, 其由磁场时钟驱动并被实验成功验证, 该成果为磁性择多逻辑门的研究奠定了基础. 此后, 各类时钟方案相继被应用于 NML 择多逻辑门, 其中应变时钟多铁纳磁体择多逻辑门的研究主要有以下进展: 2013 年, Yilmaz 和 Mazumder [24] 提出了一种由相同尺寸的多铁纳磁体构成的择多逻辑门, 但其模型未考虑热噪声的影响, 不能反映器件现实工作情况. 2016 年, D'Souza 等 [25] 实验制备了应变时钟驱动的多铁纳磁体互连线, 结果表明, 在室温下, 逻辑信息可以在器件中流水线式传输, 该结果同样为多铁纳磁体择多逻辑门提供了实验支撑, 因为 NML 择多逻辑门本质上是铁磁互连线和反铁磁互连线相交叉的传输结构. 2018 年, 危波等 [23] 引入热噪声和面外磁化分量, 建立了多铁纳磁体择多逻辑门的三维磁化动态模型. 与 Yilmaz 和 Mazumder 的二维动态模型相比, 该模型更符合器件的实际工作情况. 2020 年, 陈亚博等 [26] 利用纳

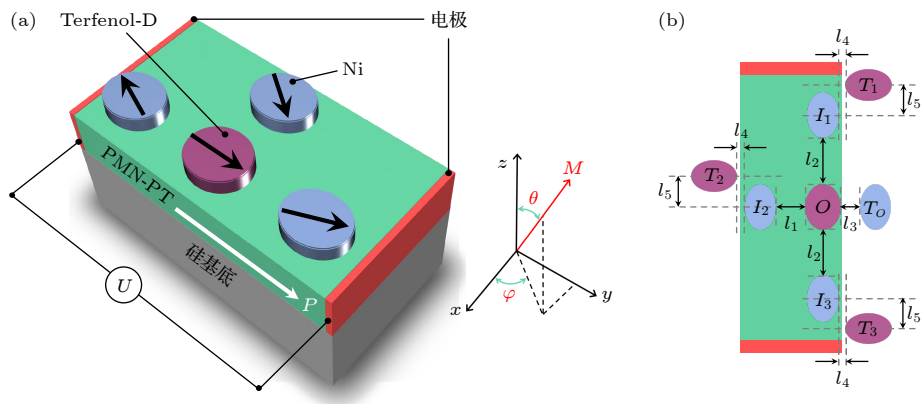


图 3 异质多铁结构全局应变时钟纳磁体择多逻辑门 (a) 立体结构; (b) 俯视图

Fig. 3. Nanomagnets majority gate based on global strain clock of heterogeneous multiferoic structure: (a) Stereo structure; (b) top view.

磁体的形状工程设计了阶梯型全局应变时钟驱动的择多逻辑门, 不仅简化了时钟结构, 而且可以把整个逻辑门视为单个纳磁体进行调控从而减少了版图面积, 但不足的是, 该逻辑门对电压幅值精度要求较高.

虽然多铁纳磁体择多逻辑门具备诸多优势, 但计算正确率不高的问题一直未得到解决. 此外, 文献 [23, 26] 的模型虽然引入了热波动, 但是数值模型并不能很好地反映器件真实的工作情况. 为此, 本文从纳磁体材料体系入手, 利用正、负磁致伸缩系数材料 (Terfenol-D, Ni) 对相同应变的响应差异, 提出了一种基于异质多铁结构全局应变时钟的纳磁体择多逻辑门, 并设计了“高应力启动-低应力计算”的两步计算模式, 在提高逻辑门器件计算正确率的同时, 继承了全局应变时钟结构更简单、版图面积更小的优点.

为了更好地模拟异质多铁结构全局应变时钟纳磁体择多逻辑门的真实工作状态, 本文使用微磁学模拟软件 MuMax3 进行仿真实验, 该软件可直接引入热波动, 使用有限差分法对器件进行性能模拟.

2 器件结构和磁化动态建模

异质多铁结构全局应变时钟纳磁体择多逻辑门 (以下简称异质多铁择多门) 最重要的创新之处在于将 I_1, I_2, I_3 设计为了负磁致伸缩系数的金属 Ni, 而 O 则选取磁致伸缩系数为正的 Terfenol-D, 故而只需一个全局应变时钟即可调控 4 个纳磁体实现快速择多功能, 其结构如图 3(a) 所示. 异质多铁择多门自下而上主要由硅衬底、压电层 (包含一对电极板) 和 4 个圆柱体的纳磁体组成, 并且该压电层为独立压电层, 仅作为 4 个逻辑门纳磁体的应变源. 目前, 以 Terfenol-D 和 Ni 作为铁磁材料的多铁异质结在实验研究方面都已经取得诸多成果, 为本文研究提供了实验支撑 [27–30]. 沿纳磁体长轴方向为 y 轴, 短轴方向为 x 轴, 建立右手直角坐标系. M 为纳磁体的磁矩, θ 为其极角, φ 为方位角. 红色电极板加在压电层 y 方向两个端面上, 压电层材料为 PMN-PT [31], 其纵向压电系数 $d_{33} = 2000$ pC/N.

图 3(b) 为异质多铁择多门的俯视图, T_1, T_2, T_3 为输入互连线中与逻辑门相邻的纳磁体, 负责

将逻辑信息输入异质多铁择多门, T_O 为输出互连线中与逻辑门相邻的纳磁体, 负责将计算结果从异质多铁择多门输出. T_1, T_2, T_3 材料设为 Terfenol-D, T_O 为 Ni, 它们的时钟在应用中主要满足互连线传输需求, 而本文主要研究择多逻辑门, 故对其时钟不作具体设计, 只假定 T_O 受应变时钟控制进行仿真实验. 表 1 为异质多铁择多门中各个组件尺寸及其布局参数.

表 1 器件尺寸及布局参数
Table 1. Parameters of the device size and layout.

名称	尺寸/nm	名称	尺寸/nm
所有纳磁体长轴 a	120	I_2 与 O 间距 l_1	80
所有纳磁体厚度 h	10	I_1, I_3 与 O 间距 l_2	120
O 的短轴 b_1	90	T_O 与 O 间距 l_3	50
其余纳磁体短轴 b_2	80	T_1, T_2, T_3 分别与 I_2, I_2, I_3 水平间距 l_4	20
压电层长度 l_y	700	T_1, T_2, T_3 分别与 I_2, I_2, I_3 垂直中心距 l_5	80
压电层宽度 l_x	265	压电层厚度 l_z	100

异质多铁择多门的工作机制为: 在电极板通电产生的匀强电场作用下, 压电层会产生沿 y 轴的纵向应变 ϵ , 该应变可传递至纳磁体, 进而调控纳磁体磁化状态. 对产生应变的电压而言, 若应变方向与压电层内部极化方向 P 一致, 则该电压为正电压, 若与 P 相反, 则为负电压. 应变对纳磁体磁性的影响可用应力各向异性常数 K_σ 来描述 [32]:

$$K_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_S Y \epsilon. \quad (2)$$

纳磁体受到的应力 σ 则为

$$\sigma = Y \epsilon, \quad (3)$$

其中 Y 为纳磁体的杨氏模量; λ_S 为其磁致伸缩系数, 纳磁体具体的材料参数见表 2 [33]. 下文中, 统一使用应力来度量纳磁体的应变.

表 2 纳磁体材料参数
Table 2. Material parameters of nanomagnets.

	Terfenol-D	Ni
杨氏模量 $Y/10^{10}$ Pa	8	21.4
磁致伸缩系数 $\lambda_S/10^{-4}$	+6	-0.2
吉尔伯特阻尼系数 α	0.1	0.045
饱和磁化强度 $M_S/(10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1})$	8	4.85
交换作用常数 $A/(10^{-11} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1})$	0.9	1.05

对孤立纳磁体而言, $K_\sigma > 0$ 时, 其能量势阱沿长轴方向; 而当 $K_\sigma < 0$, 且所施加应力大于临界应力时, 纳磁体能量势阱沿短轴方向^[34]. 该临界翻转应力可由下式得出^[35]:

$$\sigma_{\min} = -\frac{\mu_0 M_S^2}{3\lambda_S} |N_{dy} - N_{dx}|, \quad (4)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率; M_S 为饱和磁化强度; N_{dx} , N_{dy} 是退磁因子, 对于椭圆柱体的纳磁体, 其退磁因子可表达为^[36]

$$\begin{aligned} N_{dx} &= \frac{\pi}{4} \left(\frac{h}{a} \right) \left[1 + \frac{5}{4} \left(\frac{a-b}{a} \right) + \frac{21}{16} \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 \right], \\ N_{dy} &= \frac{\pi}{4} \left(\frac{h}{a} \right) \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{a-b}{a} \right) - \frac{3}{16} \left(\frac{a-b}{a} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

当施加正电压, 即纳磁体受拉应力作用时, $K_{\sigma_Ni} < 0$, I_1, I_2, I_3 的磁矩偏离长轴方向, 接收 T_1, T_2, T_3 中信息的输入; 而 $K_{\sigma_Terfenol-D} > 0$, O 的磁矩沿长轴方向, 此时 O 中的信息可由 T_O 从异质多铁择多门输出. 而当施加负电压, 即纳磁体受压应力作用时, $K_{\sigma_Ni} > 0$, I_1, I_2, I_3 的磁矩沿其长轴方向, 而 $K_{\sigma_Terfenol-D} < 0$, O 的磁矩偏离长轴方向, 进行择多计算. 使用方波电压展开研究, 电极电压 U 与纳磁体所受应力 σ 的关系为^[37]

$$\sigma = UYd_{33}/l_y. \quad (6)$$

本文使用微磁学模拟软件 MuMax3 进行性能模拟, 异质多铁择多门的磁化动力学行为通过求解 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程得到^[38]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\alpha\gamma}{M_S} [\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}})], \quad (7)$$

式中, $\gamma = 2.21 \times 10^5 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$ 为旋磁比, \mathbf{M} 为纳磁体的磁矩矢量, 其归一化磁矩 m 在 y 轴的分量 m_y 可以较为直观地反映纳磁体的磁化状态, 因此下文各类绘图中直接使用 m_y 表征纳磁体磁矩状态. \mathbf{H}_{eff} 是由多种能量产生的有效场, 该有效场满足^[38]:

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\mu_0 V} \frac{dE}{d\mathbf{M}}. \quad (8)$$

其中, V 为纳磁体的体积, E 为纳磁体的能量. 对于异质多铁择多门中的任一纳磁体, 其总能量 E_{total} 为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{stress}} + E_{\text{shape}} + E_{\text{dipole}} + E_{\text{exch}} + E_{\text{stray}}, \quad (9)$$

式中, E_{stress} 为应力各向异性性能; E_{shape} 为纳磁体的形状各向异性性能; E_{dipole} 为纳磁体间的偶极子耦合

作用能, E_{exch} 为交换能; E_{stray} 表示杂散场产生的能量, 其来源于非对称的纳磁体版图结构以及温度波动引起的微小热耦合场.

3 异质多铁择多门磁化动态模拟

3.1 异质多铁择多门功能实现

在微磁模拟中, 器件工作温度设为 300 K, 时间迭代步长设为 1×10^{-13} s, 空间离散为 2.5 nm 网格, 该尺寸小于 Ni 和 Terfenol-D 的交换长度. 仿真中各器件的驱动时钟如图 4 所示, 红色方波为异质多铁择多门连续工作时全局应变时钟信号作用示意图, 该时钟的周期即为异质多铁择多门的工作周期 T , 如图 4 中蓝色双向箭头所示; 绿色方波为 T_O 的控制时钟波形, 它们的参数取值见表 3. 仿真实验中, 通过假定 T_1, T_2, T_3 的逻辑值, 来实现互连线中信号输入异质多铁择多门的情形模拟. 此外, 该微磁学模型包括图 3(b) 中所有的纳磁体.

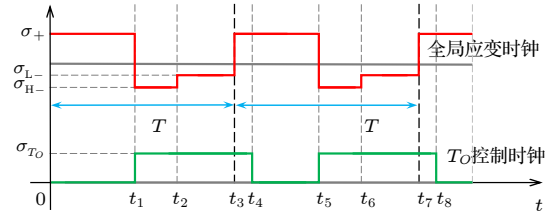


图 4 应变时钟作用示意图

Fig. 4. Schematic diagram of strain clock.

表 3 应变时钟参数

Table 3. Strain clock parameters.

时钟参数	数值/MPa	时钟参数	数值/ns
σ_+	250	t_1	1.25
σ_H	-30	t_2	1.75
σ_L	-15	t_3	2.75
σ_{T_O}	300	t_4	3

I_1, I_2, I_3, O 的初始状态为“0000”, 异质多铁择多门连续对“101”, “000”, “111”和“001”4 种输入组合 (I_1, I_2, I_3) 进行择多计算, 图 5(a) 展示了其磁化动态曲线. 以图 5(a) 所示计算过程中的第 3 个周期 (5.5—8.25 ns) 为例, 对异质多铁择多门一个周期内的工作情况进行说明. 该周期初始态为“0000”, 输入组合为“111”, 图 5(b) 为其详细的磁化动态曲线. 图 5(c)—(n) 则展示了该过程中, 异质多铁择多门纳磁体及 T_O 的磁矩情况.

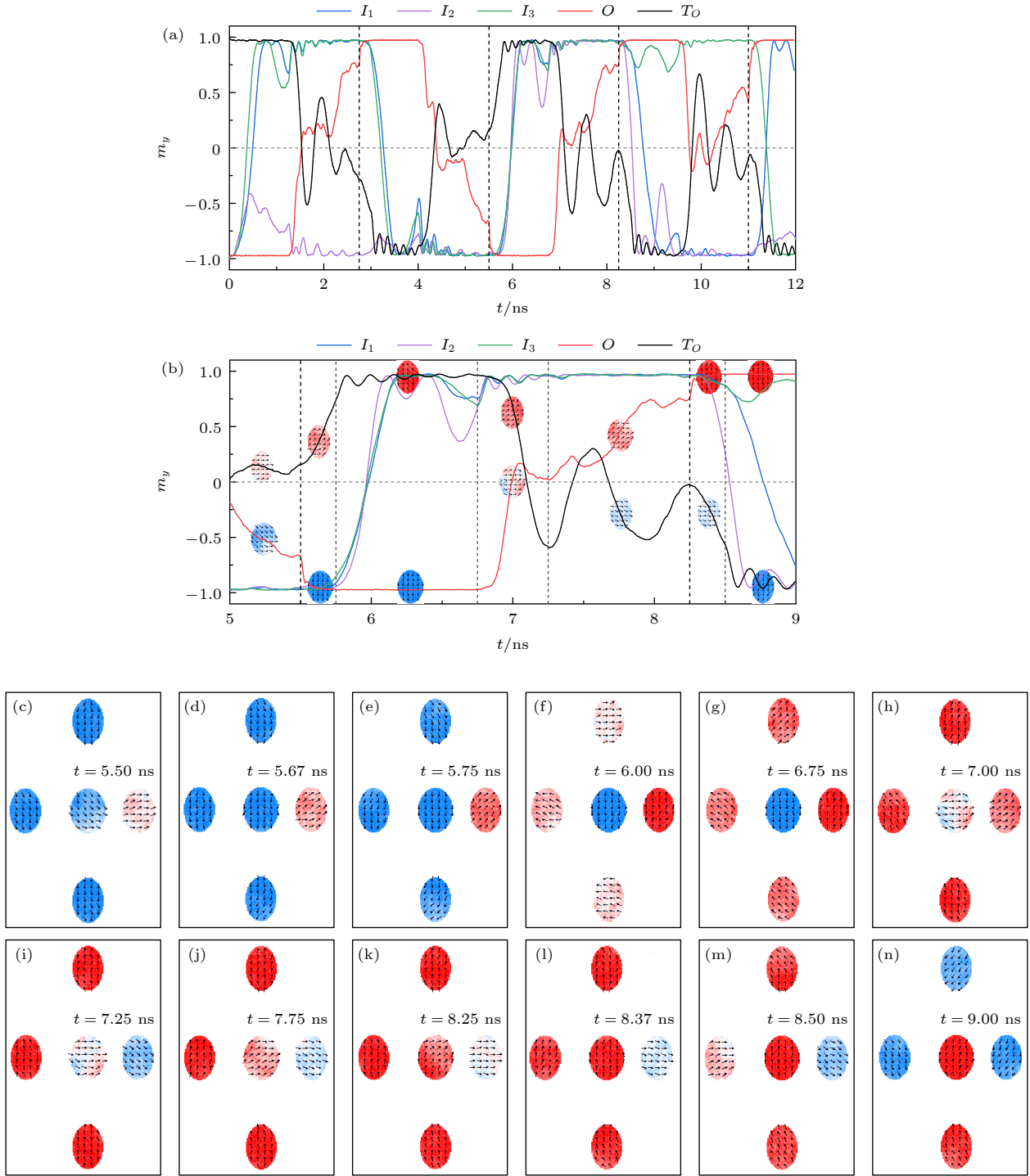


图 5 异质多铁择多门连续工作磁化动态过程 (a) 初始态 000, 输入依次为“101”, “000”, “111”和“001”时的磁化动态曲线; (b) 第 3 周期, 即“0000”条件下输入“111”择多计算详细磁化动态过程; (c)–(n) 异质多铁择多门中纳磁体磁化状态

Fig. 5. Magnetization dynamic process of the majority gate continuously work: (a) The dynamics of the magnetization curve when the initial state is “000” and the input is “101”, “000”, “111”, “001” in sequence; (b) the detailed magnetization dynamic process calculated at the third cycle, i.e., at input “111” under “0000” conditions; (c)–(n) magnetization states of nanomagnets in the majority gate.

全局应变时钟在 1 个周期内可分为 3 个阶段。第 1 阶段为输入、输出阶段 (5.5—6.75 ns, 时长 1.25 ns), 受 250 MPa 应力作用, O 的磁矩约 0.05 ns

后稳定在长轴方向, 输出前一个周期的计算结果“0”, 该结果可通过 T_O 从异质多铁择多门输出; 而 I_1, I_2, I_3 的磁矩偏离各自长轴, 经历约 0.8 ns,

分别在 T_1, T_2, T_3 的耦合作用下动态稳定在各自表征“1”的一侧长轴附近, 实现逻辑信息的输入. 第 2 阶段为启动阶段 (6.75—7.25 ns, 时长 0.5 ns), 受 -30 MPa 应力作用, O 经历约 0.3 ns 偏转至空态, 而 I_1, I_2, I_3 稳定在各自长轴方向, 逻辑信息写入完成; 第 3 阶段为计算阶段 (7.25—8.25 ns, 时长 1 ns), 应力降低至 -15 MPa, O 在 I_1, I_3 的铁磁耦合和 I_2 的反铁磁耦合作用下, 向表征“1”一侧的长轴偏转, 并在下个周期的第 1 阶段输出计算结果“1”(第 8.25 ns 以后).

图 4 中, 绿色方波为 T_O 的控制时钟波形, 其驱动应力 (300 MPa) 与控制异质多铁择多门的负应力同时作用: 如 t_1 时刻. T_O 控制时钟在全局应变时钟由负应力切换为正应力后, 继续作用 0.25 ns 撤去: 如 t_3 时刻全局应变时钟转换, t_4 时刻 T_O 控制时钟撤去. 同样以图 5 所示计算过程中的第 3 个周期为例对 T_O 的进动情形进行说明: 第 6.75 ns, T_O 与 O 同时开始偏转, 在 O 的计算阶段, T_O 一直处于空态附近, 不会影响异质多铁择多门计算. 第 8.25 ns 后, O 在 0.05 ns 内输出计算结果, 受 O 的耦合作用影响, T_O 偏离空态, 向与 O 成反铁磁耦合的方向偏转. 8.5 ns 时刻撤去应力, T_O 稳定在长轴方向, 完成异质多铁择多门输出信息的接收, 并在该稳态持续至第 9.5 ns. 在此稳态下, T_O 可将信息传递至互连线中下一级纳磁体.

异质多铁择多门共有 2^4 种初始态, 输入组合共 2^3 种, 因此共 128 种可能计算情形, 经微磁仿真验证, 所有情形均可以正确执行连续的择多计算, 其动态磁化过程与图 5(a) 中所展示的 4 种情形相似. 证明了异质多铁择多门的可行性.

3.2 异质多铁择多门的“两步计算模式”

纳磁体中磁化分布总是倾向于沿能量势阱方向. 纳磁体受时钟驱动, 达到动态平衡后, 在杂散场的影响下, 其磁矩会在能量势阱方向附近随机波动. 若纳磁体磁矩如图 6(a) 所示, 其波动范围严格处于纳磁体短轴的单侧 (上侧或者下侧), 则纳磁体在时钟撤去后, 能够准确偏转到目标逻辑. 若其波动范围如图 6(b) 所示, 横跨短轴两侧, 则其在时钟撤去后, 有一定概率错误偏转. 这是因为在时钟撤去后, 纳磁体能量分布主要由形状各向异性决定, 其势垒方向大致沿短轴方向, 单侧波动的磁矩无法越过能量势垒, 只能就近偏转至能量势阱方向, 如图 6(c) 所示. 本文给出的单侧波动条件是纳磁体实现准确逻辑切换的充分非必要条件.

为了保证异质多铁择多门高度正确执行择多计算, 采用了“高应力启动-低应力计算”的两步计算模式 (第 2 和 3 阶段). 第 1 步: 施加 -30 MPa 的应力, 作用时长 0.5 ns, 使 O 偏转至空态附近. 在此条件下, O 的能量分布主要由应力各向异性决定, 其磁矩为图 6(b) 所示双侧波动. 第 2 步: -30 MPa 应力降低至 -15 MPa. 在孤立状态下, O 的临界翻转应力约为 -14 MPa, 施加 -15 MPa 的应力, 可以克服其形状各向异性势垒. 此条件下, O 的能量分布主要由 I_1, I_2, I_3 的耦合能决定, 在其影响下, O 的能量势垒方向偏离短轴并满足单侧波动条件, 以此确保异质多铁择多门实现高度正确的计算. 微磁模拟验证了“两步计算模式”的可靠性: 在输入完成的情况下, 异质多铁择多门共有 2^4 种择多计算情形, 图 7 展示了这 16 种计算情形下 O 的磁化动态曲线.

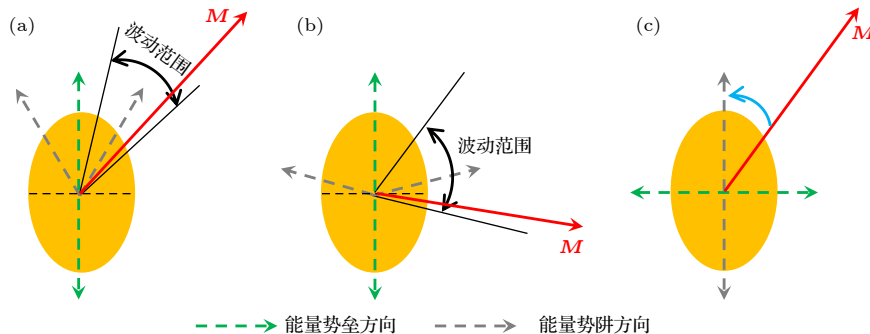


图 6 纳磁体能量势垒方向及其能量势阱方向 (a) 能量势阱附近的单侧波动; (b) 跨越短轴的双侧波动; (c) 施加极性相反的电压时或者撤去电压后, 磁矩进动的方向

Fig. 6. Nanomagnet's energy potential well direction and its energy barrier direction: (a) Unilateral fluctuations near the energy potential well; (b) bilateral fluctuations across the short axis; (c) the direction of the magnetic moment progresses when a voltage of opposite polarity is applied or when the voltage is removed.

对图 7 所示计算情形, 若在第 1.5 ns 施加 250 MPa 应力 (模拟异质多铁择多门连续工作), 每

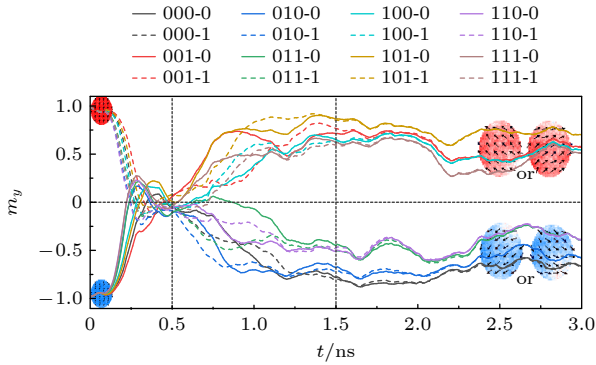


图 7 异质多铁择多门所有择多计算情形下, O 的磁矩的动态变化. 0—0.5 ns, 施加 -30 MPa 应力; 0.5—3 ns, 施加 -15 MPa 应力. “000-0”代表初始状态为: $I_1 I_2 I_3 = 000$, $O = 0$ 时 O 的磁矩的动态变化曲线

Fig. 7. Dynamic variation of the magnetic moment of O for all calculation cases of the logic gate. 0—0.5 ns, -30 MPa stress applied; 0.5—3 ns, -15 MPa stress applied. “000-0” represents the dynamic variation of the magnetic moment of O when the initial state is: $I_1 I_2 I_3 = 000$ and $O = 0$.

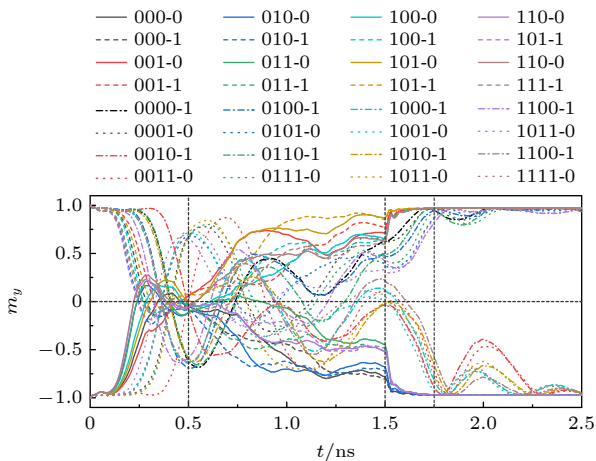


图 8 信息传出逻辑门的所有情形下, O 和 T_O 的磁矩的动态变化. 全局应变时钟: 0—0.5 ns, 施加 -30 MPa 应力; 0.5—1.5 ns, 施加 -15 MPa 应力; 1.5—2.5 ns, 施加 250 MPa 应力. T_O 控制时钟: 0—2.5 ns, 施加 300 MPa 应力. “000-0”代表初始状态为: $I_1 I_2 I_3 = 000$ 且 $O = 0$ 时, O 的磁矩的动态曲线; “0000-0”代表初始状态为: $I_1 I_2 I_3 O = 0000$ 且 $T_O = 0$ 时, T_O 的磁矩的动态曲线

Fig. 8. Dynamic variation of the magnetic moments of O and T_O for all cases of information passing out of the logic gate. Global strain clock: 0—0.5 ns, -30 MPa stress applied; 0.5—1.5 ns, -15 MPa stress applied; 1.5—2.5 ns, 250 MPa stress applied. T_O control clock: 0—2.5 ns, 300 MPa stress applied. “000-0” represents the dynamic curve of the magnetic moment of O when the initial state is: $I_1 I_2 I_3 = 000$ and $O = 0$; “0000-0” represents the dynamic curve of the magnetic moment of T_O when the initial state is: $I_1 I_2 I_3 O = 0000$ and $T_O = 0$.

种情形重复 1000 次仿真验证, 结果发现: 对于所有的 (16 种) 计算情形, O 均可以 100% 切换到目标逻辑, 证明“两步计算模式”的计算正确率超高. 图 8 展示了执行该计算过程时, 16 种可能计算情形下的 O 以及 T_O 的磁化动态曲线. 从图 8 也可以清晰观察到: O 在 1.5 ns 以后, 正确地输出计算结果, 而 T_O 在 1.75 ns 时, 已经呈现严格的单侧波动情形, 说明异质多铁择多门将计算结果传输至输出互连线的正确率同样极高.

3.3 结果与讨论

3.3.1 能量演化机制研究

异质多铁择多门动态磁化过程遵循 LLG 方程和能量最小原则^[34]. 图 9 为 0 K 条件下, 逻辑门进行图 5(a) 所示连续计算的前 2 个周期的能量演化情况. 沿纳磁体长轴方向, 纳磁体退磁能达到最小值, 应力各向异性能达到最大值, 而沿短轴方向, 纳磁体退磁能达到最大值, 应力各向异性能达到最小值且该最小值只由应力决定. MuMax3 不能解耦偶极子耦合能, 但其对于纳磁体的作用可通过总能量和退磁能反映出来.

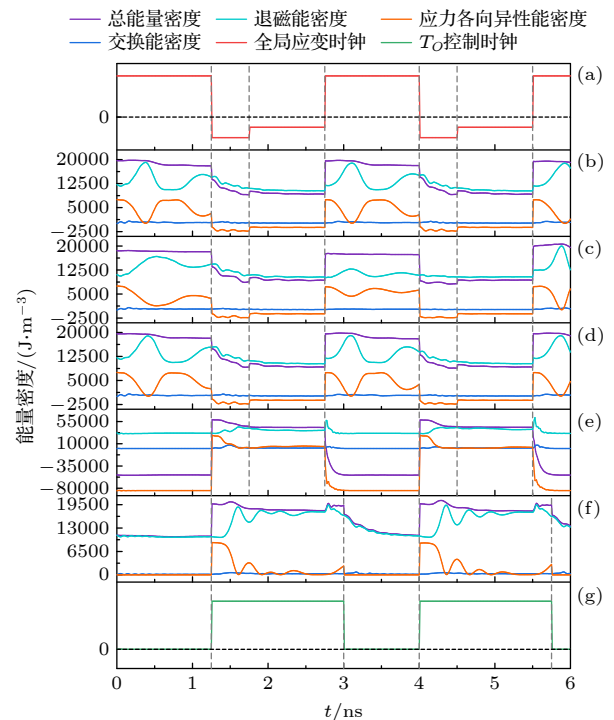


图 9 异质多铁择多门连续计算时的能量演化 (a) 全局应变时钟; (b)—(f) I_1 , I_2 , I_3 , O 及 T_O 的能量密度; (g) T_O 控制时钟

Fig. 9. Energy evolution during continuous computation of the logic gate: (a) Global strain clock; (b)—(f) energy density of I_1 , I_2 , I_3 , O and T_O ; (g) control the clock of T_O .

异质多铁择多门每个周期的第 1 阶段: 受 250 MPa 应力作用时, I_1, I_2, I_3 各自的总能量上升, 能量势阱方向变化, 磁矩向新的能量势阱方向偏转. 当 I_1, I_2, I_3 各自的输入值与初始值一致时, 其总能量降低幅度较小, 且应力各向异性性能未经历最小值, 表明纳磁体磁矩不会越过空态; 而当其输入与初始值相反时, 应力各向异性性能只会经历 1 次最小值, 表明纳磁体磁矩仅越过空态 1 次, 此后只在短轴的单侧偏转, 而且在磁矩越过空态后, 总能量明显降低, 表明此阶段应力各向异性性能和偶极子耦合能都起到了关键作用. O 在此阶段, 能量势阱方向仍为长轴方向, 而且受应力各向异性性能影响, 总能量变得更低.

第 2 阶段, 受 -30 MPa 应力作用, I_1, I_2, I_3 的应力各向异性性能为负, 其磁矩就近偏转并稳定至长轴方向. 而 O 的总能量上升, 随着磁矩的偏转逐渐降低, 其应力各向异性性能几乎保持在最小值, 表明 O 的磁矩在空态附近波动, 此阶段应力各向异性性能起主要作用. 此外, O 的总能量除了受应力各向异性性能和退磁能之间影响外, 交换能也起到了重要作用, 从图 9(e) 可以明显看到 O 的交换能在此阶段发生明显波动. 这是因为在偏转过程中, 由于 O 的耦合情况复杂以及 Terfenol-D 的交换作用常数较小, O 出现了非一致偏转的“C”形态, 如图 10

所示.

需要说明的是, “C”形态并不会对计算结果造成影响, 这是因为在择多计算过程中, 由于 T_O 的磁矩偏离长轴方向, 其对 O 的耦合作用会避免 O 长时间处于“C”形态 (仿真发现“C”形态存在时间不超过 0.3 ns), 且 O 的偏转方向一定与 T_O 一致. 此外, 相比于 0 K, 在 300 K 条件下, 纳磁体交换能较大, 交换作用更充分, 必然会减少“C”形态存在时间, 甚至可以避免其出现. “C”形态的合理规避也是异质多铁择多门能够快速可靠计算的一个重要原因. 因为研究发现: 纳磁体磁矩以“C”形态偏转, 偏转速度较慢, 可能在规定时间内无法达到预定状态, 要想进行可靠计算, 势必延长周期, 降低器件工作效率. 数值模型是无法反映该工作情形的.

第 3 阶段, 受 -15 MPa 应力作用, I_1, I_2, I_3 的应力各向异性性能变大, 但仍然为负, 其磁矩稳定在长轴方向. 而 O 的总能量降低, 应力各向异性性能增大并一直大于最小值, 表明磁矩偏离短轴并在其单侧波动, 这是因为此时 I_1, I_2, I_3 的偶极子耦合能起主导作用, 导致能量势阱偏离短轴.

T_O 的分析与其他纳磁体类似, 不同之处在于 T_O 的能量势阱方向一直在变化, 这是因为 O 的磁矩未稳定, 因而 T_O 的总能量变化也比较大. 图 9(f)

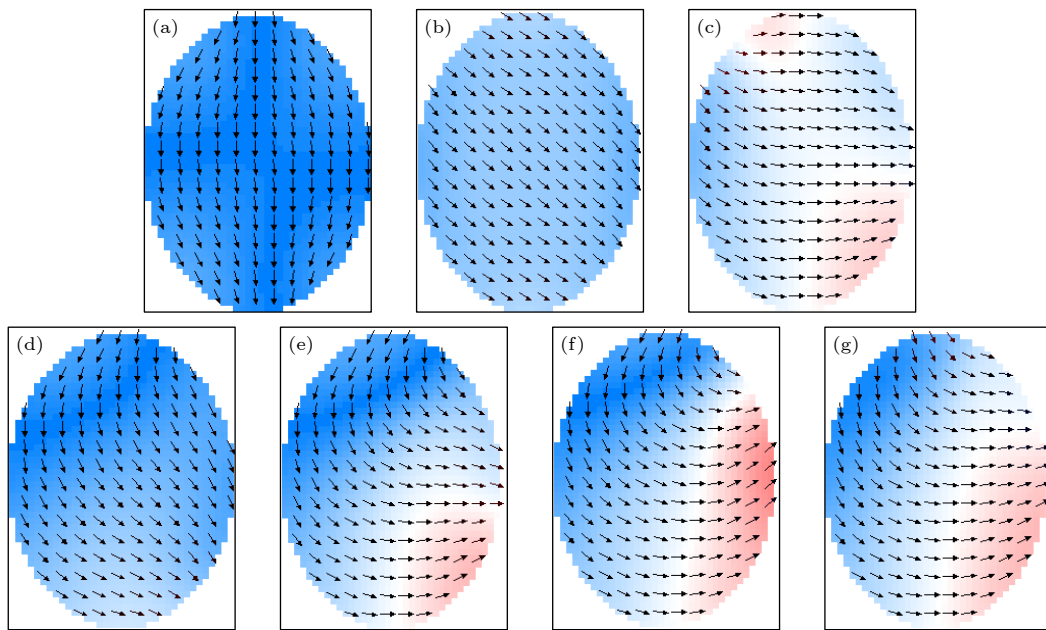


图 10 纳磁体磁矩偏转 90° (a)–(c) 一致的单畴态偏转; (a), (d)–(g), (c) 非一致的“C”形态偏转

Fig. 10. Nanomagnet magnetic moment switching 90° : (a)–(c) Uniform single-domain Switching; (a), (d)–(g), (c) non-uniform “C” form Switching.

中, T_O 多次经历应力各向异性性能最小值, 说明 T_O 在进动中会多次越过短轴, 这与 T_O 在短轴附近振荡现象一致. 当 O 输出计算结果后, T_O 能量势阱方向确定, 其总能量密度快速变大, 应力各向异性性能密度明显增大并明显大于最小值, 表明 T_O 磁矩同样偏离短轴并进行单侧波动, 由此说明 T_O 接收异质多铁择多门中输出信息的正确率同样非常高.

通过对异质多铁择多门和 T_O 各个阶段能量变化分析, 可以发现: 纳磁体磁化动态行为主要受应力各向异性性能、退磁能和纳磁体之间的偶极子耦合能共同影响, 应力各向异性性能和偶极子耦合能变化引起的能量势阱变化是决定纳磁体磁化动力学行为的主要原因.

3.3.2 能耗评估

异质多铁择多门的能耗主要为应变时钟能耗 E_{strain} , 其主要由压电层的寄生电容引起, 可将电极板和压电层整体视为一个平行板电容器, 则压电层为插入两个电容板之间的绝缘介质, PMN-PT 的相对介电常数 $\epsilon_r = 1000$, 因此压电层的寄生电容 $C_{\text{PMN-PT}}$ 为^[37]

$$C_{\text{PMN-PT}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{l_y}, \quad (10)$$

其中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 为真空介电常数, $S = l_x \times l_z$ 为电容板的正对面积. 电压作用和撤去时电容板需要充电、放电各进行一次, 其耗能 E 可用下式计算^[37,39]:

$$E = C_{\text{PMN-PT}} U^2. \quad (11)$$

因此, 该逻辑门器件能耗可通过 (10) 式和 (11) 式得到:

$$E_{\text{strain}} = C_{\text{PMN-PT}} U_+^2 + C_{\text{PMN-PT}} U_{\text{H-}}^2, \quad (12)$$

其中 U_+ 为产生 σ_+ 的电压; $U_{\text{H-}}$ 为产生 $\sigma_{\text{H-}}$ 的电压, 可由 (6) 式计算得到. 经评估, 该器件一个周期耗能约 64 aJ.

4 结 论

本文提出了一种基于异质多铁结构全局应变时钟的纳磁体择多逻辑门器件, 建立了其微磁学模型, 并使用 MuMax3 软件对其性能进行了模拟. 该器件可以实现输出、输入同步进行, 采用了“高应力启动-低应力计算”的两步计算模式, 计算正确率

可达 100%, 连续计算周期 2.75 ns, 周期能耗约 64 aJ. 此外, 从能量演化的角度对异质多铁择多门的磁化动态行为进行了分析, 发现应力各向异性性能和偶极子耦合能起主导作用. 该研究成果对于推动纳米磁逻辑电路的实际应用具有重要意义, 可为多铁逻辑纳磁电路的设计提供重要指导.

参考文献

- [1] DeBenedictis, P E 2017 *Computer* **50** 72
- [2] Liu S L, Hu X S, Nahas J J, Niemier M T, Porod W, Bernstein G H 2011 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **10** 757
- [3] Gypens P, Leliaert J, Van Waeyenberge B 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 034004
- [4] Gonelli M, Fin S, Carlotti G, Dey H, Csaba G, Porod W, Bernstein G H, Bisero D 2018 *J. Magn. Magn. Mater.* **460** 432
- [5] Imre A, Csaba G, Ji L, Orlov A, Bernstein G, Porod W 2006 *Science* **311** 205
- [6] Orlov A, Imre A, Csaba G, Ji L, Porod W, Bernstein G 2008 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **3** 55
- [7] Liu J H, Yang X K, Wei B, Li C, Zhang M L, Li C, Dong D N 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 017501 (in Chinese) [刘嘉豪, 杨晓阔, 危波, 李成, 张明亮, 李闯, 董丹娜 2019 *物理学报* **68** 017501]
- [8] Carlton D B, Lambson B, Scholl A, Young A T, Dhuey S D, Ashby P D, Tuchfeld E, Bokor J 2011 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **10** 1401
- [9] Gu Z, Nowakowski M E, Carlton D B, Storz R, Im M Y, Hong J, Chao W, Lambson B, Bennett P, Alam M T, Marcus M A, Doran A, Young A, Scholl A, Fischer P, Bokor J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6466
- [10] 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]
- [11] Atulasimha J, Bandyopadhyay S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173105
- [12] Zhang N, Zhang B, Yang M Y, Cai K M, Sheng Y, Li Y C, Deng Y C, Wang K Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 027501 (in Chinese) [张楠, 张保, 杨美音, 蔡凯明, 盛宇, 李子才, 邓永城, 王开友 2017 *物理学报* **66** 027501]
- [13] Alam M T, Kurtz S J, Siddiq M A J, Niemier M T, Bernstein G H, Hu X S, Porod W 2011 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11** 273
- [14] Zhang M L, Cai L, Yang X K, Qin T, Liu X Q, Feng C W, Wang S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 227503 (in Chinese) [张明亮, 蔡理, 杨晓阔, 秦涛, 刘小强, 冯朝文, 王森 2014 *物理学报* **63** 227503]
- [15] Bhowmik D, You L, Salahuddin S 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 59
- [16] Suh D I, Bae G Y, Oh H S, Park W 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 17D714
- [17] Sengupta A, Choday S H, Kim Y, Roy K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 143701
- [18] Ostwal V, Debashis P, Faria R, Chen Z H, Appenzeller J 2018 *Sci. Rep.* **8** 16689
- [19] Liu M, Zou Q, Ma C R, Collins G, Mi S B, Jia C L, Guo H M, Gao H J, Chen C L 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 8526
- [20] 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
- [21] Yuan J H, Yang X K, Wei B, Chen Y B, Cui H Q, Liu J H, Dou S Q, Song M X, Fei L 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 014003
- [22] Bandyopadhyay S, Atulasimha J, Barman A 2021 *Appl. Phys. Rev.* **8** 041323
- [23] Wei B, Cai L, Yang X K, Li C 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 217501 (in Chinese) [危波, 蔡理, 杨晓阔, 李成 2017 物理学报 **66** 217501]
- [24] Yilmaz Y, Mazumder P 2013 *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.* **21** 1181
- [25] D' Souza N, Salehi Fashami M, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2016 *Nano Lett.* **16** 1069
- [26] Chen Y B, Yang X K, Wei B, Cui H Q, Song M X 2020 *IEEE Access* **8** 77802
- [27] Zhang J, Lee W K, Tu R, Rhee D, Zhao R, Wang X, Liu X, Hu X, Zhang X, Odom T, Yan M 2021 *Nano Lett.* **21** 5430
- [28] Chen A T, Piao H G, Zhang C H, Ma X P, Algaidi H, Ma Y C, Li Y, Zheng D X, Qiu Z D, Zhang X X 2023 *Mater. Horiz.* DOI: 10.1039/d3mh00378
- [29] Khojah R, Xiao Z, Panduranga M K, Bogumil M, Wang Y, Goiriena-Goikoetxea M, Chopdekar R V, Bokor J, Carman G P, Candler R N, Di Carlo D 2021 *Adv. Mater.* **33** 2006651
- [30] Huang B, Zhu W, Hua L, Wang J, Guo Y 2022 *Curr. Appl. Phys.* **41** 139
- [31] 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
- [32] Pathak P, Mallick D 2022 *IEEE Trans. Magn.* **58** 3401406
- [33] Roy K, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2011 *Phys. Rev. B* **83** 224412
- [34] Bhattacharya D, Al-Rashid M M, D'Souza N, Bandyopadhyay S, Atulasimha J 2017 *Nanotechnology* **28** 015202
- [35] Chen Y B, Wei B, Yang X K, Liu J H, Li J, Cui H Q, Li C, Song M X 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **514** 167216
- [36] Beleggia M, Graef M D, Millev Y T, Goode D A, Rowlands G 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 3333
- [37] Vacca M, Graziano M, Crescenzo L D, Chiolerio A, Lamberti A, Balma D, Canavese G, Celegato F, Enrico E, Tiberto P, Boarino L, Zamboni M 2014 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **13** 963
- [38] Fidler J, Schrefl T 2000 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **33** R135
- [39] Boechler G P, Whitney J M, Lent C S, Orlov A O, Snider G L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 103502

A nanomagnets majority logic gate based on heterogeneous multiferroic structure global strain clock*

Dou Shu-Qing¹⁾ Yang Xiao-Kuo^{1)†} Xia Yong-Shun¹⁾ Yuan Jia-Hui¹⁾

Cui Huan-Qing¹⁾ Wei Bo¹⁾ Bai Xin²⁾ Feng Chao-Wen¹⁾

1) (*Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*College of Artificial Intelligence, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China*)

(Received 26 May 2023; revised manuscript received 3 July 2023)

Abstract

In the post-Moore era, nanomagnetic logic circuits have shown great potential to replace complementary metal oxide semiconductor (CMOS) circuits. A majority logic gate, as the core of a nanomagnetic logic circuit, is equivalent to the inverter in the CMOS circuit. A nanomagnetic logic majority gate generally has four nanomagnets arranged in a “T” shape. The nanomagnets in the three corners of the “T” (I_1 , I_2 , I_3) are the three inputs, and the middle nanomagnet is the output (O).

This paper proposes a nanomagnet majority logic gate based on the global strain clock of heterogeneous multiferroic structure, by utilizing the difference in response to the same strain between positive magnetostrictive coefficient material (Terfenol-D) and negative magnetostrictive coefficient material (Ni). From bottom to top, the device is mainly composed of a silicon substrate, a piezoelectric layer, and four elliptical cylindrical nanomagnets. PMN-PT is used as the piezoelectric layer's material, and three Ni-based nanomagnets (I_1 , I_2 , and I_3) are utilized as input, while Terfenol-D is used as the material for the output nanomagnet (O).

Besides, a two-step calculation mode of “high-stress start-low-stress calculation” is designed, that is, the O is first switched to the “Null” with a stress of -30 MPa, and then the stress decreases to -15 MPa, so that the O can realize majority calculation under the coupling of I_1 , I_2 , and I_3 . The micromagnetic simulation software MuMax3 is adopted to simulate the performance of the device. The results reveal that the device can successfully perform continuous majority calculation through any three-terminal input combination. By using the two-step calculation mode, the calculation accuracy of the device can reach 100%, its cycle of continuous calculation is 2.75 ns, and the cycle energy consumption is about 64 aJ. It is found that the change of energy potential well, caused by the change of stress anisotropy energy and dipole coupling energy, is the main reason that determines the magnetization dynamic behavior of the device. Therefore, the results of this paper can provide important guidance for designing nanomagnetic logic circuits.

Keywords: majority logic gate, multiferroic nanomagnets, nanomagnet logic, heterogeneous multiferroic structure

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230866

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62274183) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (Grant No. 2022JQ-073).

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



一种基于异质多铁结构全局应变时钟的纳磁体择多逻辑门

豆树清 杨晓阔 夏永顺 袁佳卉 崔焕卿 危波 白馨 冯朝文

A nanomagnets majority logic gate based on heterogeneous multiferroic structure global strain clock

Dou Shu-Qing Yang Xiao-Kuo Xia Yong-Shun Yuan Jia-Hui Cui Huan-Qing Wei Bo Bai Xin
Feng Chao-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 157501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230866

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230866>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于倾斜纳磁体翻转倾向性的与(或)逻辑门应力模型

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

物理学报. 2019, 68(1): 017501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181621>

微纳尺度多铁异质结中电驱动磁反转

Electric field driven magnetic switching in nanoscale multiferroic heterostructures

物理学报. 2018, 67(15): 157512 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181219>

离子阱中以声子为媒介的多体量子纠缠与逻辑门

Phonon-mediated many-body quantum entanglement and logic gates in ion traps

物理学报. 2022, 71(8): 080301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220360>

多铁异质结构中逆磁电耦合效应的研究进展

Progress of converse magnetoelectric coupling effect in multiferroic heterostructures

物理学报. 2018, 67(15): 157513 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181272>

多铁性磁电器件研究进展

Recent progress of multiferroic magnetoelectric devices

物理学报. 2018, 67(15): 157507 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180857>

非对称条形纳磁体的铁磁共振频率和自旋波模式

Ferromagnetic resonance frequency and spin wave mode of asymmetric strip nanomagnet

物理学报. 2020, 69(5): 057501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191622>