

基于反铁磁的无外场辅助自旋轨道矩 磁隧道结模型分析*

王可欣 栗傑† 童良乐

(首都师范大学信息工程学院, 北京 100048)

(2023年5月31日收到; 2023年8月7日收到修改稿)

自旋轨道矩 (spin-orbit torque, SOT) 为超低功耗自旋电子器件提供新的实现方法, 在反铁磁材料体系中面内交换偏置场可辅助 SOT 磁化翻转, 同时利用电压调控磁各向异性 (voltage-controlled magnetic anisotropy, VCMA) 能有效降低翻转势垒, 从而实现无外场辅助的磁隧道结. 本文通过求解修正 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程, 建立反铁磁/铁磁/氧化物构成的无外场辅助自旋轨道矩的磁隧道结模型, 并对其磁化动力学过程进行分析. 以 IrMn/CoFeB/MgO 材料体系为例, 揭示了影响磁化翻转的因素, 包括交换偏置 (exchange bias, EB) 效应对临界翻转电流 I_{SOT} 的影响, VCMA 效应和 SOT 类场转矩的影响机制; 分析了实际应用中磁隧道结制作工艺偏差的影响. 结果表明: EB 效应与 VCMA 效应共同作用能极大降低临界翻转电流 I_{SOT} , 从而实现完全无场开关切换; SOT 类场转矩对磁化翻转起主导作用, 且一定条件下可实现器件在 ps 量级的无场翻转; 以及当氧化层厚度偏差 $\gamma_{\text{if}} \leq 10\%$ 或自由层厚度偏差 $\gamma_{\text{tox}} \leq 13\%$ 时 MTJ 能实现有效切换. 基于反铁磁的无场辅助自旋轨道矩器件将为新一代超低功耗、超高速度和超高集成度器件和电路提供极具前景的解决方案.

关键词: 自旋轨道矩磁隧道结, 压控磁各向异性, 交换偏置, 工艺偏差**PACS:** 85.70.Ay, 75.70.Tj, 75.60.Jk**DOI:** 10.7498/aps.72.20230901

1 引言

在过去的二十年中, 由于隧穿磁阻效应得到了极大改善, 磁隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ) 在制造发展方面也取得巨大进展. 作为制作磁随机存储器^[1](magnetic random access memory, MRAM) 最具前景的器件之一, MTJ 正在经历不断迭代开发. MTJ 双端口器件主要以自旋转移矩效应^[2,3](spin transfer torque, STT) 为中心, 由 STT 效应设计制作的 STT-MRAM 能够在无外场作用下仅靠电流驱动磁矩翻转, 实现纯电流翻转方式. 随着集成密度不断升高, STT-MTJ 面临的

主要的瓶颈之一是其写入速度受内在潜伏期^[4,5]的限制. 此外, 严重的随机效应导致其写延迟分布广, 为了保证较高的写成功率需要很大的电流流入 MTJ, 可能引起严重的热扰动, 而且高功耗的写操作也会增大电击穿的概率.

近年来, 自旋轨道矩^[6] (spin-orbit torque, SOT) 在非易失性存储器和计算应用中展现出巨大潜力, 引起了电磁学和自旋电子学领域的广泛关注. 与 STT 相比, 围绕 SOT 为核心的三端口器件结构能够实现读写路径分离, 具有更低的功耗和更快的操作. 传统 SOT-MTJ 是在原有 MTJ 三层膜的自由层 (free layer, FL) 下方加一重金属层 (heavy metal, HM), 在重金属层中施加面内电流时, 电子

* 北京市自然科学基金 (批准号: 4194073)、北京市科技计划 (批准号: KM202110028010) 和北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目 (批准号: 2018000020124G124) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: li.su@cnu.edu.cn

自旋轨道耦合引起的自旋霍尔效应会引起 HM 表面顶部的自旋累积, 产生一垂直自旋电流, 并对 MTJ 的自由层磁化产生扭矩, 使自由层磁化方向发生翻转. 近年来, 反铁磁材料^[7](antiferromagnet, AFM) 被发现具备 THz 的共振频率, 自旋动力学响应时间可达 ps 量级, 推动其成为自旋电子学的研究热点之一. 实验表明, 使用 AFM 可以取代 HM 材料, 目前所使用的 AFM 材料体系众多, 如 FeRh, PtMn, FeMn 等, 其中 IrMn 体系^[8]为近年来研究的热点材料结构. Park 等^[9]曾在 2011 年利用 IrMn 构建了 MTJ 核心层并实现其自旋轴的旋转. AFM 不仅可以成功构建 MTJ 并产生 SOT 效应, 而且可以提供一平面内的交换偏置^[6,10,11]以及产生面外自旋极化电流提高 SOT 效率, 这些性质都为实现基于 AFM 的 MTJ 无场磁化开关提供可能^[12]. 目前, 在多种影响 MTJ 磁化翻转的因素中, AFM-MTJ 以及 EB 效应仍为当前研究热点, 例如目前已经观测到的 SOT 诱导 EB 场开关^[13]、EB 在面内磁各向异性场结构的切换^[14]等. 此外, 电压调控磁各向异性 (voltage-controlled magnetic anisotropy, VCMA) 效应^[15]的发现建立了新型开关机制, 由于能控制 MTJ 的能量势垒^[11,16,17]快速切换 FL 磁化翻转, 许多基于 STT 和 SOT 的 MTJ 模型与该物理机制相互作用, 也为 MTJ 在 MRAM 和逻辑应用^[18]提供了新思路. 这种基于 VCMA 效应的 AFM/FM/Oxide 结构的三端器件称作 VCSOT-MTJ^[19,20], 该器件结构能有效提高 SOT 开关转换效率, 实现超快和超低能量写入以及较为高可靠的完全无场 SOT 翻转^[21].

本文以 AFM/FM/Oxide 构成的三端器件 SOT-MTJ 为理论模型, 首先通过求解修正的 LLG 方程对 VCSOT-MTJ 工作原理和磁化动力学理论模型进行研究说明, 分析决定 MTJ 翻转的有效磁场构成; 在此基础上, 进一步考虑在应用过程中影

响磁化翻转模型状态和磁性能的因素, 包括 VCMA 效应对能量势垒和磁化翻转的影响, VCMA 效应、SOT 效应以及 EB 同时存在时对 MTJ 临界翻转电流的影响, 自旋轨道矩类场项对模型磁动力学的影响, 以及器件的生长工艺偏差^[22,23]和刻蚀偏差^[24]随 MTJ 尺寸不断缩小对垂直磁各向异性场的影响. 最后对 VCSOT-MTJ 模型及其磁化翻转影响因素进行分析, 这对器件优化设计和 MTJ 的现实应用及发展具有一定意义, 也为新一代基于 AFM 的器件设计提供了理论支撑和应用分析.

2 基于 AFM 的 VCSOT-MTJ 磁化动力学理论模型

图 1(a) 为 AFM/FM/Oxide 构成的典型三端器件结构, 主要由两个铁磁层 CoFeB 和一个起到分隔作用的氧化层 MgO 构成, 堆叠在反铁磁层 IrMn 上. 不同于双端器件构成的 VCMA-MTJ (MTJ), VCSOT-MTJ 包括垂直方向 T_1 与水平方向 T_2 和 T_3 三个接线端, 实现状态切换需要在 T_1 和 T_2 或 T_3 端施加电压 V_1 和 V_2 或 V_3 . 其中, V_1 用于调控 VCMA 效应, V_2 和 V_3 用于实现 SOT 效应, 如 T_2 端施加 V_2 时, T_3 端接地, 即取 $V_3 = 0$ V. 初始时刻未施加电压时, 自由层和参考层 (pinned layer, PL) 方向相同, 称为平行态 (P 态), MTJ 整体呈低电阻特性, 阻值为 R_P ; 当在 T_1 和 T_3 端施加电压 V_1 和 V_3 时, 自由层与参考层磁化方向相反, 称为反平行态 (AP 态), MTJ 整体呈高电阻特性, 阻值为 R_{AP} ; 当继续在 T_2 端施加相反方向电压脉冲 V_2 时, MTJ 再次返回 P 态. VCMA 势垒高度与外加电压关系如图 1(b) 所示, 势垒高度 E_b 随电压 V_1 增大而降低, 该过程能够降低 MTJ 的垂直各向异性场, 有助于自由层的磁化反转, 当势垒被完全消除时所对应的电压称为临界翻转电压 V_C .

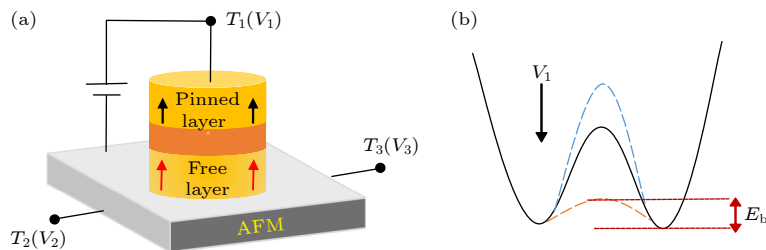


图 1 (a) VCSOT-MTJ 器件基本结构图; (b) 外加电压 (V_b) 对能量势垒 (E_b) 的影响

Fig. 1. (a) Basic schematic structure of VCSOT-MTJ device; (b) effect of applied voltage (V_b) on energy potential barrier (E_b).

从磁化动力学角度分析, 上述模型中不仅需要
考虑 VCMA 效应和 STT 效应, 还需要考虑 SOT
效应的影响, 其自由层磁化动力学可以用修正
LLG 的方程描述 [25,26]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{m}}{dt} = & -\gamma\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}}) + \alpha\mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} \\ & + \gamma H_{\text{STT}}^{\text{DL}} \mathbf{m} \mathbf{m}_p \times \mathbf{m} + H_{\text{STT}}^{\text{FL}} \mathbf{m} \times \mathbf{m}_p \\ & + H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} \mathbf{m} \times \mathbf{m}_\sigma + H_{\text{SOT}}^{\text{FL}} \mathbf{m} \times \mathbf{m}_\sigma, \end{aligned} \quad (1)$$

$$H_{\text{STT}}^{\text{DL}} = \frac{\hbar P J_{\text{STT}}}{2e\mu_0 M_s t_f}, \quad (2)$$

$$H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} = \frac{\hbar \theta_{\text{SH}} J_{\text{SOT}}}{2e\mu_0 M_s t_f}, \quad (3)$$

$$\xi_1 = \frac{H_{\text{STT}}^{\text{FL}}}{H_{\text{STT}}^{\text{DL}}}, \quad (4)$$

$$\xi_2 = \frac{H_{\text{SOT}}^{\text{FL}}}{H_{\text{SOT}}^{\text{DL}}}, \quad (5)$$

式中, J_{STT} 和 J_{SOT} 分别为 STT 和 SOT 的电流密度, γ 为磁旋比, α 为 Gilbert 阻尼系数, \hbar 为约化普朗克常数, μ_0 为真空磁导率, M_s 为饱和磁化强度, t_f 为自由层厚度, e 为电子电荷量, $H_{\text{STT}}^{\text{DL}}$ 和 $H_{\text{STT}}^{\text{FL}}$, $H_{\text{SOT}}^{\text{DL}}$ 和 $H_{\text{SOT}}^{\text{FL}}$ 分别为 STT 和 SOT 的类阻尼转矩和类场转矩的电流相关比例常数, ξ_1 和 ξ_2 分别为 STT 和 SOT 的类场项和类阻尼项的比值. (1) 式右侧各项依次为进动项、阻尼项、STT 项和 SOT 项. $\mathbf{m} = m_x \mathbf{e}_x + m_y \mathbf{e}_y + m_z \mathbf{e}_z$, m_x, m_y, m_z 分别为 \mathbf{m} 在 x, y, z 轴的分量, $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 分别为 x, y, z 轴的单位向量.

由于 MTJ 的翻转主要由磁场方向决定, 对于具有 AFM/FM/Oxide 结构且考虑 VCMA 效应的 SOT-MTJ 模型, 有效磁场 $\mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}})$ 可以表示为

$$\mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}}) = \mathbf{H}_D + \mathbf{H}_{\text{TH}} + \mathbf{H}_{\text{PMA}} + \mathbf{H}_{\text{VCMA}} + \mathbf{H}_{\text{EB}}, \quad (6)$$

其中, \mathbf{H}_D 为退磁场, \mathbf{H}_{TH} 为热噪声场 [27], \mathbf{H}_{PMA} 为垂直磁各向异性场 [27], \mathbf{H}_{VCMA} 为压控磁各向异性场 [28], \mathbf{H}_{EB} 为交换偏置场.

具体地, 退磁场 \mathbf{H}_D 采用对应圆形 MTJ 的公式如下:

$$\mathbf{H}_D = M_s(-N_Z \mathbf{m}_z - N_X \mathbf{m}_x - N_Y \mathbf{m}_y), \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_X = N_Y = \pi t_f / (4D), \\ N_Z = 1 - 2N_X, \end{cases} \quad (8)$$

式中 N_X, N_Y, N_Z 为退磁张量在 x, y, z 轴的分量, D 为 MTJ 的直径.

热噪声场 \mathbf{H}_{TH} 可研究温度 T 对该模型的影响, 可以表示为

$$\mathbf{H}_{\text{TH}} = \sigma \sqrt{\frac{2k_B T \alpha}{\mu_0 M_s \gamma V \Delta t}}, \quad (9)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常数, V 为自由层的体积, σ 为单位系数矢量, Δt 为磁化时间步长.

由上述可知, $\mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}})$ 沿各坐标轴分量为 $H_{\text{EFF}-X}, H_{\text{EFF}-Y}, H_{\text{EFF}-Z}$, 其中 $H_{\text{EFF}-X}, H_{\text{EFF}-Y}$ 分别由 $\mathbf{H}_D, \mathbf{H}_{\text{TH}}$ 和 \mathbf{H}_{EB} 在 x, y 轴分量相加构成. 垂直方向分量 $H_{\text{EFF}-Z}$ 除各有效场在 z 轴分量之和外, 还需计算 PMA 与 VCMA 效应产生的垂直各向异性场有效场 $\mathbf{H}_{\text{EFF}}^\perp$, 该场由 \mathbf{H}_{PMA} 与 \mathbf{H}_{VCMA} 组成, 具体表示为

$$\mathbf{H}_{\text{EFF}}^\perp = \mathbf{H}_{\text{PMA}} + \mathbf{H}_{\text{VCMA}} = \left(\frac{2K_i t_{\text{ox}} - 2\beta V_{\text{MTJ}}}{\mu_0 M_s t_f t_{\text{ox}}} \right) m_z \mathbf{e}_z, \quad (10)$$

其中, K_i 为垂直磁各向异性系数, t_{ox} 为氧化层厚度标准值, β 为 VCMA 系数, θ_{SH} 为自旋霍尔角. \mathbf{m} 在球面坐标下的 x, y, z 轴分量为

$$\mathbf{m} = \mathbf{e}_x \sin \theta \cos \varphi + \mathbf{e}_y \sin \theta \sin \varphi + \mathbf{e}_z \cos \theta. \quad (11)$$

由于 θ 为 \mathbf{m} 与 z 轴正半轴的夹角, φ 为 \mathbf{m} 为在 $x-y$ 平面上投影向量与 x 轴正半轴的夹角, 通过 $m_z = \cos \theta$ 即可确定 MTJ 的磁化状态. 将 (2) 式—(11) 式代入 (1) 式求解得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} [H_{\text{EFF}-X} (\alpha \cos \theta \cos \psi - \sin \psi) \\ & + H_{\text{EFF}-Y} (\alpha \cos \theta \sin \psi + \cos \psi) \\ & - \alpha H_{\text{EFF}-Z} \sin \theta] \\ & + \frac{\gamma \sin \theta}{1 + \alpha^2} (\alpha H_{\text{STT}}^{\text{FL}} - H_{\text{STT}}^{\text{DL}}) \\ & - \frac{\gamma H_{\text{SOT}}^{\text{DL}}}{1 + \alpha^2} (\alpha \sin \psi + \cos \theta \cos \psi) \\ & + \frac{\gamma H_{\text{SOT}}^{\text{FL}}}{1 + \alpha^2} (\alpha \cos \theta \cos \psi - \sin \psi). \end{aligned} \quad (12)$$

表 1 列出了 VCSOT-MTJ 模型所使用的部分参数. 将翻转过程细化至磁化动力学示意图中说明, 以 AP 态切换到 P 态为例, 在分析过程中不讨论影响磁化翻转因素情况下, 设 ξ_1 与 ξ_2 比值为 0, 器件外加电压脉冲 V_1 和 V_3 随时间变化在 ns 量级, 如图 2(a) 所示, 自由层磁化矢量 \mathbf{m} 随时间变化状态如图 2(b)—(d) 所示, 设 MTJ 初始状态为 AP 态, \mathbf{H}_{EFF} 为 z 轴负方向. 当 $t_0 < t < t_1$ 时, $V_1 =$

0 V, 磁矩围绕有效场进动并逐渐靠近 \mathbf{H}_{EFF} . 当 $t = t_1$ 时, 垂直方向开始施加电压, 此时 $V_1 > V_C$, VCMA 效应使 $\mathbf{H}_{\text{EFF}}^{\perp}$ 降低, \mathbf{H}_{EFF} 迅速偏转至 x - y 平面, z 轴正方向为 t_1 时刻 $\mathbf{H}'_{\text{VCMA}}$ 方向, A 点处为 t_1 时刻 \mathbf{m} 的位置, 如图 2(b) 所示. 当 $t_1 < t < t_2$

表 1 VCSOT-MTJ 模型部分参数

Table 1. Partial parameters of the VCSOT-MTJ model.

| 参数 | 符号 | 默认值 |
|--|--|---|
| 饱和磁化强度 | M_s | 0.625×10^6 A/m |
| 垂直磁各向异性系数 | K_i | 3.2×10^{-4} J/m ² |
| MTJ直径 | D | 50 nm |
| VCMA系数 | β | 60 fJ/(V·m) |
| 自旋极化率 | P | 0.58 |
| 温度 | T | 300 K |
| 氧化层厚度值 | t_{ox} | 1.4 nm |
| 自由层厚度值 | t_f | 1.1 nm |
| 自旋霍尔角 | θ_{SH} | 0.25 |
| $H_{\text{STT}}^{\text{FL}}$ 与 $H_{\text{STT}}^{\text{DL}}$ 比值 | ξ_1 | 0 |
| $H_{\text{SOT}}^{\text{FL}}$ 与 $H_{\text{SOT}}^{\text{DL}}$ 比值 | ξ_2 | 0 |
| AFM材料长, 宽, 高 | $L_{\text{AFM}}, W_{\text{AFM}}, T_{\text{AFM}}$ | 60 nm, 50 nm, 3 nm |
| AFM电阻率 | ρ_{AFM} | 2.78×10^{-6} $\Omega \cdot \text{m}$ |

时, T_1 方向施加电压 V_1 , T_3 横向施加电压 V_3 , 此时 \mathbf{H}_{VCMA} 为 z 轴正方向, 由于 $V_1 > V_C$, VCMA 效应使得 E_b 降低, \mathbf{H}_{EFF} 处于 x - y 面位置, 磁矩围绕有效场做进动并逐渐靠近 \mathbf{H}_{EFF} . 当 $t = t_2$ 时, 撤去水平方向电压, 垂直方向电压 $V_1 < 0$, 此时负 z 轴为 t_2 时刻 $\mathbf{H}'_{\text{VCMA}}$ 方向, B 点处为 t_2 时刻 \mathbf{m} 的位置, 如图 2(c) 所示. 当 $t_2 < t < t_3$ 时, T_3 端电压 $V_3 = 0$, 且 T_1 端施加反方向电压 $V_1 < 0$, 此时 \mathbf{H}_{VCMA} 为 z 轴负方向, 该操作通过升高 E_b 将磁化矢量稳定在翻转后的方向, 防止其由于抖动再次返回 P 态, 磁矩围绕 \mathbf{H}_{EFF} 进动并偏移至 x - y 平面上方. 当 $t = t_3$ 时, C 点处为 t_3 时刻 \mathbf{m} 的位置, 如图 2(d) 所示. 当 $t > t_3$ 时, $V_1 = 0$ V, \mathbf{m} 在 z 轴分量为正并稳定在新方向, MTJ 实现了 P 态到 AP 态的切换. MTJ 从 P 态切换至 AP 态与上述过程完全相反.

3 基于 AFM 的 VCSOT-MTJ 磁化翻转模型分析

在磁化翻转过程中, 许多因素会对 MTJ 状态切换和磁性能产生影响, 导致翻转情况发生改变, 由于 MTJ 翻转由磁场方向决定, 将对上文所提影

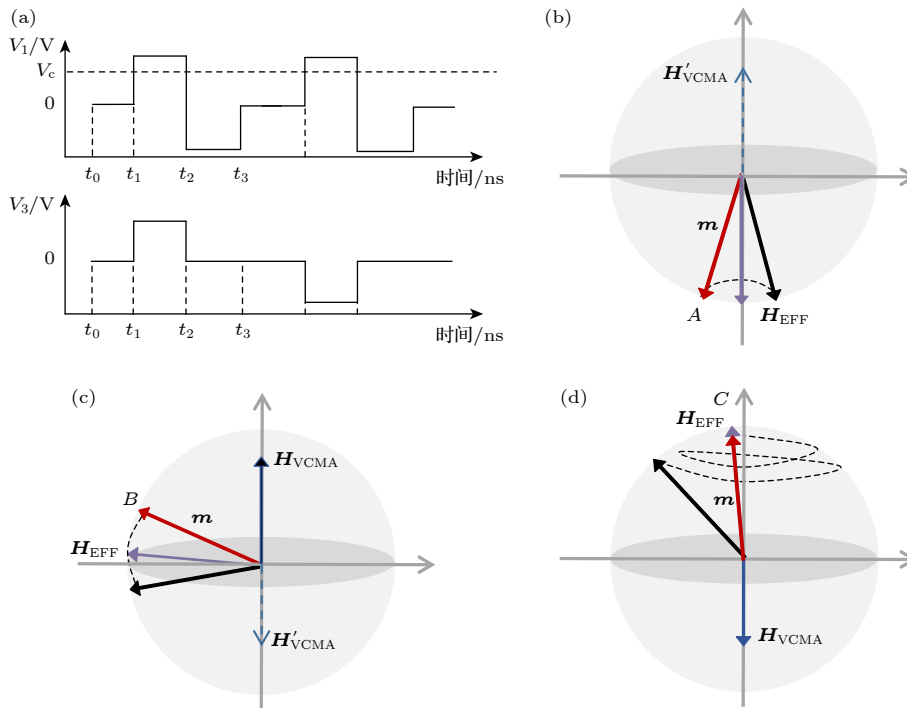


图 2 (a) AP 态切换到 P 态器件外加电压随时间的变化; (b) $t_0 < t \leq t_1$ 磁化翻转示意图; (c) $t_1 < t \leq t_2$ 磁化翻转示意图; (d) $t_2 < t \leq t_3$ 磁化翻转示意图

Fig. 2. (a) Change of the applied voltage of a device from AP state to P state with time; (b) schematic diagram of magnetization reversal during $t_0 < t \leq t_1$; (c) schematic diagram of magnetization reversal during $t_1 < t \leq t_2$; (d) schematic diagram of magnetization reversal during $t_2 < t \leq t_3$.

响模型有效磁场的因素进行分析说明. 此外, 考虑到实际应用, 对器件制备过程中工艺参数偏差对其性能的影响进行讨论. 由于模型能够实现较为可靠的完全无场 SOT 翻转, 故无需施加外磁场.

3.1 交换偏置场对临界翻转电流的影响

由于 AFM 能够取代 SOT 底部的重金属形成 AFM/FM/Oxide 结构, 该结构不仅能产生 SOT 效应, 而且能提供面内交换偏置, 该交换偏场的存在使 $\mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}})$ 中增加了 \mathbf{H}_{EB} 项, 由于下文中讨论了模型能够实现 SOT 效应无场切换, 因 VCSOT-MTJ 器件中产生的通过自由层的 STT 电流很微弱, 以 SOT 效应影响磁化翻转为主导, 对 (1) 式进行推导, 得到

$$\begin{aligned} & \frac{1 + \alpha^2}{\gamma} \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} \\ &= -\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}}) - \alpha \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{EFF}}(V_{\text{MTJ}})) \\ & \quad + H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} \mathbf{m} \times \mathbf{m}_\sigma \times \mathbf{m} + \alpha H_{\text{SOT}}^{\text{FL}} \mathbf{m} \times \mathbf{m}_\sigma \\ &= \mathbf{m} \times \mathbf{H}'_{\text{EFF}}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, \mathbf{H}'_{EFF} 为等效磁场, 在 3 个坐标轴中分量可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{H}'_{\text{EFF-X}} = -H_{\text{D-X}} + \alpha [(\mathbf{H}_{\text{EB}} + H_{\text{D-Y}})m_z \\ \quad - H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} - \mathbf{H}_{\text{EFF}}^\perp m_y], \\ \mathbf{H}'_{\text{EFF-Y}} = -H_{\text{D-Y}} - \mathbf{H}_{\text{EB}} + H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} m_z \\ \quad - \alpha (H_{\text{D-X}} m_z - \mathbf{H}_{\text{EFF}}^\perp m_y), \\ \mathbf{H}'_{\text{EFF-Z}} = -\mathbf{H}_{\text{EFF}}^\perp - H_{\text{SOT}}^{\text{DL}} m_y - \alpha \mathbf{H}_{\text{EB}} m_x. \end{cases} \quad (14)$$

以 MTJ 从 AP 态切换到 P 态为例, 不考虑 \mathbf{H}_{D} 在 x 和 y 方向分量情况下, 3 个分量的等效磁场在初始状态 $m_z = -1$ 时如图 3(a) 所示. 进一步地, 图 3(b) 为不同 \mathbf{H}_{EB} 下 MTJ 的临界翻转电流 I_{SOT} , 由于 I_{SOT} 与 J_{SOT} 成正比关系, (3) 式中 SOT 电流密度 J_{SOT} 可以表示为

$$J_{\text{SOT}} = \frac{2e\mu_0 M_s t_f}{\hbar \theta_{\text{SH}}} \left(\frac{\mathbf{H}_{\text{PMA}} - \beta V_{\text{MTJ}}/t_{\text{ox}}}{2} - \frac{\mathbf{H}_{\text{ext}}}{\sqrt{2}} \right). \quad (15)$$

由于 AFM 结构所产生的 \mathbf{H}_{EB} 能使模型实现无场翻转, 可以替代 (15) 中 \mathbf{H}_{ext} 项. 进一步, 通过 1 和 0 作为开关控制实验中各效应有无, 由图 4 对比可知, 在 $\text{STT} = 1$, $\text{VCMA} = 0$ 下给 V_1 端施加一个电压, 无论该端口设置为小电压或大电压, MTJ 无法始终无法完成状态切换; 打开 VCMA 效

应开关后, 小电压下 MTJ 即可实现磁化翻转. 此外, 当 $\text{STT} = 0$, $\text{VCMA} = 0$ 时, 仅施加 V_2 端电压 MTJ 依然能够实现状态的切换, 此时说明模型仅靠 STT 效应无法辅助器件完成翻转, 该效应在过程中比较微弱, 模型自身能够实现纯 SOT 效应翻转. 讨论 J_{SOT} 对磁化翻转产生的影响. 由 (15) 式可知, J_{SOT} 随 \mathbf{H}_{EB} 的增大而减小, 即 \mathbf{H}_{EB} 的存在能帮助降低临界 I_{SOT} , 影响 MTJ 状态切换. 然而, 由

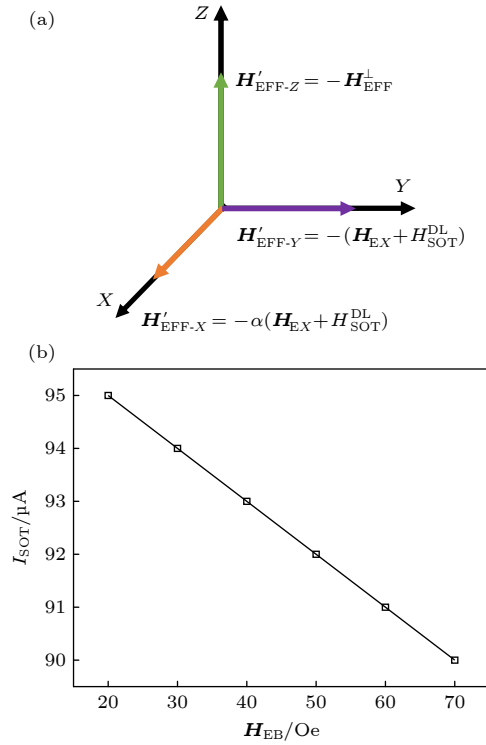


图 3 (a) AP 状态下 \mathbf{H}'_{EFF} 在坐标轴的分量; (b) 不同 \mathbf{H}_{EB} 下的临界 I_{SOT}

Fig. 3. (a) Component of \mathbf{H}'_{EFF} on the coordinate axis in AP state; (b) critical I_{SOT} under different \mathbf{H}_{EB} .

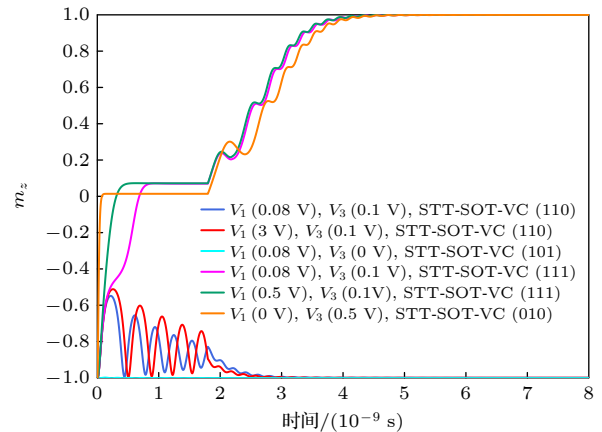


图 4 VCSOT-MTJ 磁化状态随时间的变化曲线
Fig. 4. Magnetization state over time of VCSOT-MTJ.

于实验中可实现的 H_{EB} 数值非常小, 无法实现 I_{SOT} 的无限降低, 为了成功完成切换, 降低后仍需一个较大的临界 I_{SOT} 对应一个大的 H_{SOT}^{DL} 克服垂直方向的有效磁场.

3.2 VCMA 效应对垂直各向异性场的影响

由上述内容可知, 该 SOT-MTJ 模型在足够大电压下能实现纯 SOT 翻转. 然而, 此翻转方式会导致较长切换时间以及较高能量耗散. 如图 4 所示, 只有 STT 效应时, MTJ 在 $V_1 = 0.08$ V 电压不能实现状态切换, 加入 VCMA 效应后则能够完成磁化翻转, 且翻转时间随 V_1 端电压增大而降低, 说明 VCMA 效应能够辅助 MTJ 磁化翻转过程, 并降低翻转时间.

VCMA 效应能有效解决上述不完全无场开关问题. 由于 H_{EB} 受到可实现性的限制, MTJ 完成无场 SOT 切换时仍需较大的 I_{SOT} , 导致高开关能量耗散. 图 5(a) 为 VCMA 效应、EB 效应与 SOT 效应同时存在时磁化翻转情况. 结果表明, 在无外场条件下, H_{EB} 能辅助 MTJ 进行磁化翻转, VCMA

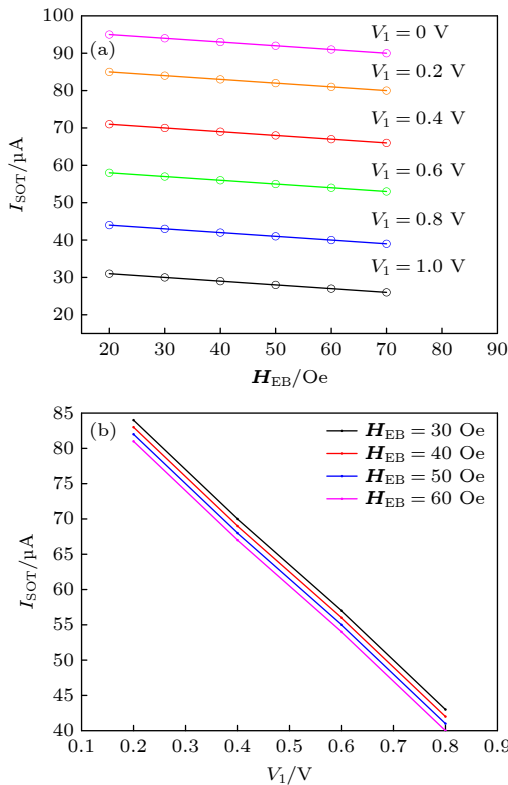


图 5 (a) VCSOT-MTJ 在不同 H_{EB} 下改变 V_1 的临界 I_{SOT} ; (b) 截取部分临界 I_{SOT} 下降趋势

Fig. 5. (a) Critical I_{SOT} of VCSOT-MTJ under different H_{EB} and V_1 ; (b) intercepted part of the critical I_{SOT} downward trend.

效应能有效降低器件的垂直磁各向异性场 H_{EFF}^{\perp} . 图 5(b) 展示了部分 H_{EB} 随 V_1 变化的临界翻转电流 I_{SOT} , 发现在 VCMA 效应帮助下临界 I_{SOT} 发生下降, 且该数值随电压增大显著降低, 与 60 Oe 无 VCMA 效应下 $I_{SOT} = 91 \mu A$ 相比, 在 $V_1 = 0.8$ V 时达到 $I_{SOT} = 40 \mu A$, 能够实现完全无场开关切换.

3.3 SOT 的类场项对磁化翻转的影响

由 (1) 式知, SOT 通常表现为 H_{SOT}^{DL} 项与 H_{SOT}^{FL} 项, 研究者在磁化动力学分析时普遍考虑 H_{SOT}^{DL} 而忽略 H_{SOT}^{FL} , 然而, 该工作^[29] 证明 SOT 类场项对 MTJ 磁化翻转过程具有很大影响. 不仅如此, Legrand 等^[30] 曾在考虑 SOT 类场项基础上实现了 ps 量级的无场翻转. 本文在研究过程中将 SOT 类场项加入模型, 结果与此前的研究工作结论相似. 如图 6(a) 所示, 在实际可实现的模型中调节参数的基础上, 控制 STT 类场项与类阻尼项比值 $\xi_1=1$ 不变, 在模型中加入 SOT 类场项, 并将其与

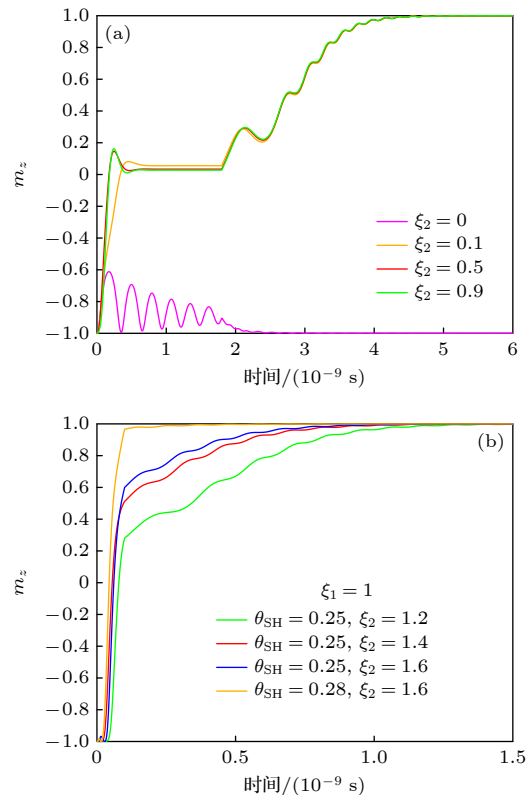


图 6 (a) SOT 类场转矩与类阻尼转矩不同比值下 m_z 随时间变化; (b) 考虑 SOT 类场转矩的 ps 级磁化翻转

Fig. 6. (a) Time evolutions of magnetization m_z with different damping-like torque and field-like torque; (b) consideration of SOT field-like torque for ps-level magnetization switching.

类阻尼项的比值 ξ_2 逐渐增大. 结果表明, 与类阻尼项相比, SOT 类场项在 MTJ 磁化翻转过程中起主导作用, 该项的加入能够辅助器件完成磁化翻转, 且翻转时间随 SOT 类场项与类阻尼项之比 ξ_2 的增大而减少, 而改变 STT 效应参数不会出现相同作用效果.

进一步建立新参数下的仿真环境, 第一阶段仿真时长修改为 0.1 ns, 仿真总时长 1.5 ns, 第一阶段 $V_1 = 0.5$ V, $V_3 = 0.26$ V, 剩余时间内 $V_1 = -1$ V, V_3 保持不变, T_2 端始终接地. 若不考虑模型的实际实现, 将参数中 θ_{SH} 或 ξ_2 进行理论性增大, 如图 6(b) 所示, 可得 SOT 类场项能够实现 MTJ 实现 ps 量级无场翻转, 且翻转速度随 θ_{SH} 或 ξ_2 的提高而加快.

3.4 工艺参数偏差对垂直各向异性场的影响

上述内容分析了磁动力学理论中影响 MTJ 状态切换的因素, 考虑工艺偏差 [31,32] 对 MTJ 性能影响以及应用的重要性, 如 MTJ 氧化层与自由层制备过程中采用的磁控溅射技术 [33], 该方式能使薄膜快速沉积, 且能多种材料混合溅射实现大批量生产. 然而在薄膜制备过程中, 二者厚度会不可避免地出现微小偏差, 最终影响器件磁化翻转. 垂直各向异性主要来源于自由层和氧化势垒层间相互作用, 所以该偏差会对 $H_{EFF}(V_{MTJ})$ 产生影响, 该课题组对 MTJ 制备过程中薄膜生长工艺偏差对 H_{VCMA} 与 H_{PMA} 的影响 [27] 进行相关研究, 采用 γ_{tf} 和 γ_{tox} 表示自由层和氧化层厚度偏差, 差值越大表示薄膜厚度与标准值差距越大. 可分别表示为

$$\gamma_{tf} = \frac{t_{fm} - t_f}{t_f}, \quad (16)$$

$$\gamma_{tox} = \frac{t_{oxm} - t_{ox}}{t_{ox}}, \quad (17)$$

其中 t_{oxm} 和 t_{fm} 分别为考虑薄膜厚度偏差时氧化势垒厚度以及自由层厚度的等效均值. 修正后的 H_{EFF}^\perp 可以表示为

$$\mathbf{H}_{EFF}^\perp = \left[\frac{2K_1 t_{ox}(1 + \gamma_{tox}) - 2\beta V_{MTJ}}{\mu_0 M_s t_f (1 + \gamma_{tf}) t_{ox} (1 + \gamma_{tox})} \right] m_z \mathbf{e}_z. \quad (18)$$

基于上述问题, 进一步研究 γ_{tf} 和 γ_{tox} 对于 VCSOT-MTJ 状态切换的影响, 以 AP 态切换至 P 态为例. 如图 7(a) 所示, 保持 $t_1 < t < t_2$ 脉冲作用时间为 1.8 ns, $t_2 < t < t_3$ 为 0.4 ns 不变, 研究输

入电压与 γ_{tf} 对 MTJ 翻转影响. 结果表明, VCMA 效应在一定阈值下辅助 MTJ 状态切换, 且具有方向性; 进一步地, 在保持 $V_1 = 0.08$ V, $V_3 = 0.1$ V 不变的条件下, 当 $\gamma_{tf} \leq 10\%$ 时, MTJ 能够实现从 AP 态到 P 态的切换; 当 $\gamma_{tf} \geq 11\%$ 时, MTJ 无法完成切换. 由 (18) 式可知, 这是由于随着 γ_{tf} 的增大, 垂直方向的有效磁场减小, 导致 H_{EFF}^\perp 偏向于 $x-y$ 平面从而不利于磁化方向的有效翻转. 图 7(b) 给出了不同 γ_{tox} 对 MTJ 磁化翻转的影响, 保持 $V_1 = 0.08$ V, $V_3 = 0.1$ V 不变, 当 $\gamma_{tox} \leq 13\%$ 时, 自由层磁化矢量能发生状态切换; 而当 $\gamma_{tox} \geq 14\%$ 时, MTJ 将无法实现磁化状态的切换.

在 MTJ 的制备过程中通常会运用到精度高、参数可控性好离子刻蚀技术 (IBE) [34], 然而在刻蚀过程中也会不可避免地产生具有磁性的非挥发性刻蚀产物, 导致其附着在侧壁上形成再沉积层, 由于该沉积层会干扰 H_{VCMA} , 故需要考虑其对有效的垂直磁各向异性场产生的影响, 此时 H_{EFF}^\perp 表示为

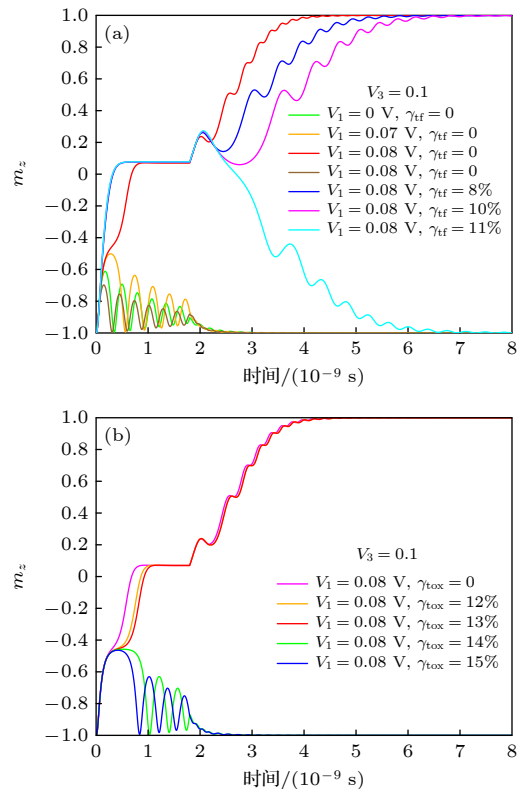


图 7 VCSOT-MTJ 状态切换的影响因素 (a) V_1 , V_3 和 γ_{tf} ; (b) V_1 , V_3 和 γ_{tox}

Fig. 7. Factors affecting on the state switching of VCSOT-MTJ: (a) V_1 , V_3 and γ_{tf} ; (b) V_1 , V_3 and γ_{tox} .

$$\mathbf{H}_{\text{EFF}}^{\perp} = \left(\alpha^c \frac{2K_i}{\mu_0 M_s t_f} - \frac{2\beta V_{\text{MTJ}}}{\mu_0 M_s t_f t_{\text{ox}}} \right) m_z \mathbf{e}_z, \quad (19)$$

式中, α 为刻蚀工艺因子 ($0 \leq \alpha \leq 1$), 由刻蚀时间、温度等因素决定; c 为常数项。

不同 α 下的 MTJ 翻转状态如图 8 所示, 当 $0.8 \leq \alpha \leq 1$ 时, MTJ 能够实现磁化状态切换; 当 $\alpha \leq 0.7$ 时, 器件无法成功完成磁化翻转. 这是由于垂直磁各项异性场 $\mathbf{H}_{\text{EFF}}^{\perp}$ 随 α 减小而急速降低, 导致器件的稳定性也相应降低, 更倾向于受到外界因素的干扰.

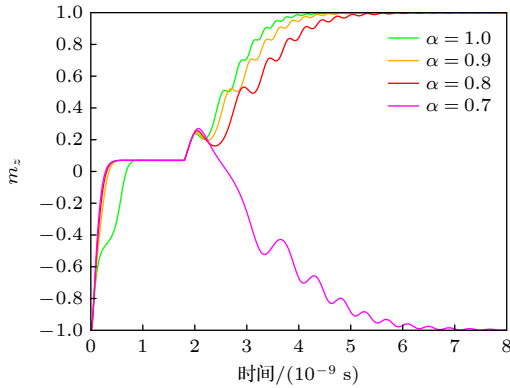


图 8 刻蚀偏差对 VCSOT-MTJ 磁化翻转的影响
Fig. 8. Effect of etching deviation on the magnetization direction switching of VCSOT-MTJ.

4 结 论

本文对基于 AFM/FM/Oxide 结构的 SOT-MTJ 器件工作原理及磁化动力学进行研究, 通过求解包含 VCMA 效应、SOT 效应以及交换偏置的修正 LLG 方程, 对决定器件磁化翻转的有效磁场构成进行分析. 在此基础上, 进一步考虑在应用过程中影响 VCSOT-MTJ 磁化翻转和磁性能的因素, 包括 VCMA 效应通过调节能量势垒影响 MTJ 状态切换, 交换偏置场对 I_{SOT} 的影响以及在 VCMA 效应、SOT 效应和 EB 同时作用下能够实现 MTJ 完全无场开关切换, SOT 类场项能够辅助器件实现状态切换, 且在一定情况下可实现器件在 ps 量级的无场磁化翻转, 以及在考虑实际应用时器件的工艺参数偏差和刻蚀偏差对 H_{VCMA} 和 H_{PMA} 的影响. 本文对 VCSOT-MTJ 模型及其磁化翻转影响因素的分析对器件优化设计和现实应用及发展具有一定意义, 也为新一代基于 AFM 的存储器 (如 EB-MRAM) 提供理论支撑和应用分析, 推动其在海量数据存储和超高速信息计算领域的应用.

参考文献

- [1] Bhatti S, Sbiaa R, Hirohata A, Ohno H, Fukami S, Piramanayagam S N 2017 *Mater. Today* **20** 530
- [2] Slonczewski J C 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1
- [3] Berger L 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 2721
- [4] Wang Z H, Zhou H C, Wang M X, Cai W L, Zhu D Q, Klein J O, Zhao W S 2019 *IEEE Electr. Device L.* **40** 726
- [5] Fong B, Fong A C M, Hong G Y, Ryu H 2005 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.* **4** 20
- [6] Manchon A, Železný J, Miron I M, Jungwirth T, Sinova J, Thiaville A, Garrello K, Gambardella P 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 035004
- [7] Su L, Tong L L, Li Q, Wang K X 2023 *Electr. Comp. Mater.* **42** 127 (in Chinese) [粟傑, 童良乐, 李晴, 王可欣 2023 *电子元件与材料* **42** 127]
- [8] Zhou J, Shu X Y, Liu Y H, Wang X, Lin W N, Chen S H, Liu L, Xie Q D, Hong T, Yang P, Yan B H, Han X F, Chen J S 2020 *Phys. Rev. B* **101** 184403
- [9] Park B G, Wunderlich J, Martí X, Holý V, Kurosaki Y, Yamada M, Yamamoto H, Nishide A, Hayakawa J, Takahashi H, Shick A B, Jungwirth T 2011 *Nat. Mater.* **10** 347
- [10] Lau Y C, Betto D, Rode K, Coey, J M D, Stamenov P 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 758
- [11] Liu Y, Zhou B, Zhu J G 2019 *Sci. Rep. UK* **9** 325
- [12] Wang M X, Zhou J, Xu X G, Zhang T Z, Zhu Z Q, Guo Z X, Deng Y B, Yang M, Meng K K, He B, Li J L, Yu G Q, Zhu T, Li A, Han X D, Jiang Y 2023 *Nat. Commun.* **14** 2871
- [13] Lin P H, Yang B Y, Tsai M H, Chen P C, Huang K F, Lin H H, La C H 2019 *Nat. Mater.* **18** 335
- [14] Kim H J, Je S G, Jung D H, Lee K S, Hong J I 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 022401
- [15] Amiri P K, Alzate J G, Cai X Q, Ebrahim F, Hu Q, Wong K, Grèzes C, Lee H, Yu G Q, Li X, Akyol M, Shao Q M, Katine J A, Langer J, Ocker B, Wang K L 2015 *IEEE T. Magn.* **51** 1
- [16] Wang W G, Li M, Hageman S, Chien C L 2012 *Nat. Mater.* **11** 64
- [17] Alzate J G, Amiri P K, Upadhyaya P, Cherepov S S, Zhu J, Lewis M, Dorrance R, Katine J A, Langer J, Galatsis K, Markovic D, Krivorotov I, Wang K L 2012 *IEEE IEDM San Francisco, CA, USA, December 10–13, 1999* p29.5. 1
- [18] Zhang H, Kang W, Wang L, Wang K L, Zhao W 2017 *IEEE T Electron. Dev.* **64** 4295
- [19] Inokuchi T, Yoda H, Kato Y, Shimizu M, Shirotori S, Shimomura N, Koi K, Kamiguchi Y, Sugiyama H, Oikawa S, Ikegami K, Ishikawa M, Altansargai B, Tiwari A, Ohsawa Y, Saito Y, Kurobe A 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 1
- [20] Lee K, Kan J, Kang S H 2017 US Patent 9 589 619
- [21] Zhang K L, Zhang D M, Wang C Z, Zeng L, Wang Y, Zhao W S 2020 *IEEE Access.* **8** 50792
- [22] Wang Y, Cai H, Naviner L A B, Zhao X X, Zhang Y, Slimani M, Klein J O, Zhao W S 2016 *Microelectron. Reliab.* **64** 26
- [23] Meng H, Lum W H, Sbiaa R, Lua S Y H, Tan H K 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 033904
- [24] Jeong J, Endoh T 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 04CE09
- [25] Wang M X, Cai W L, Zhu D Q, Wang Z H, Kan J, Zhao Z Y, Cao K H, Wang Z L, Zhang Y G, Zhang T R, Park C, Wang J P, Fert A, Zhao W S 2018 *Nat. Electron.* **1** 582
- [26] Kazemi M, Rowlands G E, Ipek E, Buhrman R A, Friedman E G 2016 *IEEE T. Electron. Dev.* **63** 848
- [27] Lee H, Lee A, Wang S D, Ebrahimi F, Gupta P, Amiri P K, Wang K L 2018 *IEEE T. Magn.* **54** 1

- [28] Kang W, Ran Y, Zhang Y G, Lü W F, Zhao W S 2017 *IEEE T. Nanotechnol.* **16** 387
- [29] Wang R X, Zeng Y H, Zhao J L, Li L, Xiao Y C 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 087202 (in Chinese) [王日兴, 曾逸涵, 赵婧莉, 李连, 肖运昌 2023 *物理学报* **72** 087202]
- [30] Legrand W, Ramaswamy R, Mishra R, Yang H 2015 *Phys. Rev. Appl.* **3** 064012
- [31] Jin D Y, Chen H, Wang Y, Zhang W R, Na W C, Guo B, Wu L, Yang S M, Sun S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 198502 (in Chinese) [金冬月, 陈虎, 王佑, 张万荣, 那伟聪, 郭斌, 吴玲, 杨绍萌, 孙晟 2020 *物理学报* **69** 198502]
- [32] Jin D Y, Cao L M, Wang Y, Jia X X, Pan Y A, Zhou Y X, Lei X, Liu Y Y, Yang Y Q, Zhang W R 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 107501 (in Chinese) [金冬月, 曹路明, 王佑, 贾晓雪, 潘永安, 周钰鑫, 雷鑫, 刘圆圆, 杨滢齐, 张万荣 2022 *物理学报* **71** 107501]
- [33] Rata A D, Braak H, Bürgler D E, Schneider C M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 162512
- [34] Gajek M, Nowak J J, Sun J Z, Trouilloud P L, O' sullivan E J, Abraham D W, Gaidis M C, Hu G, Brown S, Zhu Y, Robertazzi R P, Gallagher W J, Worledge D C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 132408

Analysis of spin-orbit torque magnetic tunnel junction model without external magnetic field assistance based on antiferromagnetism*

Wang Ke-Xin Su Li[†] Tong Liang-Le

(*Information Engineering College, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

(Received 31 May 2023; revised manuscript received 7 August 2023)

Abstract

The effect of spin-orbit torque (SOT) provides a new method of implementing ultra-low power spintronic devices. The in-plane exchange bias (EB) field in antiferromagnetic material can effectively assist SOT magnetization switching. Meanwhile, the utilization of voltage-controlled magnetic anisotropy (VCMA) can effectively reduce the switching barrier. Taking advantage of the EB and VCMA effect, it is possible to realize SOT magnetic tunnel junctions without external field assistance. In this work, a spin-orbit torque magnetic tunnel junction model composed of antiferromagnetic/ferromagnetism/oxides without external magnetic field is developed by solving the modified Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) modular equation, and its magnetization dynamics is analyzed and studied. The effective fields in the model include the demagnetization field, thermal noise field, perpendicular magnetic anisotropy field with VCMA effect, and exchange bias field. Taking IrMn/CoFeB/MgO material system for example, the factors affecting the precession of magnetization are investigated, such as the effect of the exchange bias field, the VCMA effect and the mechanism of SOT field-like torque. Considering the practical applications, the effect of the deviation of the fabrication process of magnetic tunnel junctions is also analyzed. The simulation results demonstrate that the combined effect of H_{EB} with VCMA effect can greatly reduce the critical I_{SOT} , thus assisting and realizing the complete field-free magnetization reversal; the SOT field-like torque plays a dominant role in realizing the magnetization reversal, and by adjusting the ratio of the SOT field-like torque to the damping-like torque, field free switching can be realized in the device at the ps grade ; and the MTJ can realize effective switching when the deviation of oxide thickness $\gamma_{if} \leq 10\%$ or the deviation of free layer thickness $\gamma_{tox} \leq 13\%$. Spin-orbit torque devices based on the antiferromagnetic without external magnetic field will provide highly promising solutions for a new-generation ultra-low power, ultra-high speed, and ultra-high integration devices and circuits.

Keywords: spin-orbit torque magnetic tunnel junction, voltage-controlled magnetic anisotropy, exchange bias, process deviation

PACS: 85.70.Ay, 75.70.Tj, 75.60.Jk

DOI: 10.7498/aps.72.20230901

* Project supported by the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4194073), the Science and Technology Plan General Project of Beijing, China (Grant No. KM202110028010), the Outstanding Talent Cultivation Funding for Young Backbone Individual Project and Organization Department of Beijing Municipal Committee, China (Grant No. 2018000020124G124).

[†] Corresponding author. E-mail: li.su@cnu.edu.cn

基于反铁磁的无外场辅助自旋轨道矩磁隧道结模型分析

王可欣 粟傑 童良乐

Analysis of spin-orbit torque magnetic tunnel junction model without external magnetic field assistance based on antiferromagnetism

Wang Ke-Xin Su Li Tong Liang-Le

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 198504 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230901

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230901>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于工艺偏差的自旋转移矩辅助压控磁各向异性磁隧道结电学模型及其应用研究

Process deviation based electrical model of spin transfer torque assisted voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application

物理学报. 2022, 71(10): 107501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211700>

基于工艺偏差的电压调控磁各向异性磁隧道结电学模型及其在读写电路中的应用

Process deviation based electrical model of voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application in read/write circuits

物理学报. 2020, 69(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228>

自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性四态存储器结构

Demonstration of four-state memory structure with perpendicular magnetic anisotropy by spin-orbit torque

物理学报. 2018, 67(11): 117501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180216>

基于IrMn/Fe/Pt交换偏置结构的无场自旋太赫兹源

Field-free spintronic terahertz emitters based on IrMn/Fe/Pt exchange bias heterostructures

物理学报. 2022, 71(4): 048703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211831>

三端磁隧道结的稳定性分析

Stability analysis in three-terminal magnetic tunnel junction

物理学报. 2019, 68(20): 207201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190927>

极性补偿对LaMnO₃/LaNiO₃超晶格交换偏置场强度的影响

Influence of polarity compensation on exchange bias field in LaMnO₃/LaNiO₃ superlattices

物理学报. 2022, 71(15): 156801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220365>