



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

金冬月 陈虎 王佑 张万荣 那伟聪 郭斌 吴玲 杨绍萌 孙晟

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

Jin Dong-Yue Chen Hu Wang You Zhang Wan-Rong Na Wei-Cong Guo Bin Wu Ling Yang Shao-Meng Sun Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 198502 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200228

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228>

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

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>

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>

HfO₂基铁电场效应晶体管读写电路的单粒子翻转效应模拟

Single-event-upset effect simulation of HfO₂-based ferroelectric field effect transistor read and write circuits

物理学报. 2020, 69(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200123>

过量B的Ta/CoFeB/MgO薄膜垂直各向异性和温度稳定性的增强

Large enhanced perpendicular magnetic anisotropy and thermal stability in Ta/CoFeB/MgO films with excess boron

物理学报. 2017, 66(1): 017502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.017502>

磁畴壁手性和磁斯格明子的拓扑性表征及其调控

Magnetic domain chirality and tuning of skyrmion topology

物理学报. 2018, 67(13): 137508 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180513>

电学方法调控磁化翻转和磁畴壁运动的研究进展

Progress of electrical control magnetization reversal and domain wall motion

物理学报. 2017, 66(2): 027501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.027501>

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*

金冬月^{1)†} 陈虎¹⁾ 王佑²⁾ 张万荣¹⁾ 那伟聪¹⁾
郭斌¹⁾ 吴玲¹⁾ 杨绍萌¹⁾ 孙晟¹⁾

1) (北京工业大学信息学部, 北京 100124)

2) (北京航空航天大学微电子学院, 北京 100191)

(2020年2月15日收到; 2020年5月9日收到修改稿)

电压调控磁各向异性磁隧道结 (voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction, VCMA-MTJ) 作为磁随机存储器 (magnetic random access memory, MRAM) 的核心器件, 具有读写速度快、功耗低、与 CMOS 工艺相兼容等优点, 现已得到国内外学者的广泛关注. 然而随着 VCMA-MTJ 尺寸不断缩小、MRAM 存储容量不断增大, 工艺偏差对 MTJ 性能的影响变得越来越显著, 甚至会引起 VCMA-MTJ 电路的读写错误. 本文在充分考虑磁控溅射薄膜生长工艺中自由层厚度偏差 (γ_{tf})、氧化势垒层厚度偏差 (γ_{tox}) 以及离子束刻蚀工艺中由侧壁再沉积层引入的刻蚀工艺稳定因子 (α) 偏差影响的情况下, 给出了基于工艺偏差的 VCMA-MTJ 电学模型, 并将该模型应用到 VCMA-MTJ 读写电路中, 研究了工艺偏差对上述电路读写错误率的影响. 结果表明: 当 $\gamma_{\text{tf}} \geq 13\%$, $\gamma_{\text{tox}} \geq 11\%$ 时, VCMA-MTJ 将无法实现磁化状态的有效切换; 当 $\alpha \leq 0.7$ 时, VCMA-MTJ 磁化方向的进动过程变得不稳定. 进一步地, VCMA-MTJ 电路的读错误率和写错误率也将随着工艺偏差的增大而增大. 研究表明, 通过增大外加电压 (V_{b}) 和减小外加电压脉冲宽度 (t_{pw}) 可有效降低 VCMA-MTJ 电路的写错误率, 增大电路的读驱动电压 (V_{dd}) 可有效降低 VCMA-MTJ 电路的读错误率.

关键词: 磁隧道结, 电压调控磁各向异性, 工艺偏差, 读写电路

PACS: 85.70.Ay, 85.75.-d, 75.78.-n

DOI: 10.7498/aps.69.20200228

1 引言

物联网、5G 通信和人工智能技术的飞速发展以及大数据云时代的来临, 对计算机体系结构中随机存储器 (random access memory, RAM) 的速度、功耗、集成度和可靠性均提出了更高要求^[1]. 对于传统的基于互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺的易失

性 RAM 而言, 随着器件特征尺寸的不断缩小, 漏电流的增加以及处理器与存储器的互连延迟都将制约存储器性能提升^[2]. 为了解决上述问题, 国内外学者对包括相变存储器 (phase change random access memory, PCRAM)、阻变存储器 (resistive random access memory, RRAM) 以及自旋转移力矩磁随机存储器 (spin-transfer torque magnetoresistive random access memory, STT-MRAM) 和自旋轨道转矩磁随机存储器 (spin-orbit torque magnetoresistive random access memory, SOT-

* 国家自然科学基金 (批准号: 61006059, 61774012, 61901010)、北京市自然科学基金 (批准号: 4143059, 4192014, 4204092)、北京市教委科技发展计划项目 (批准号: KM201710005027)、北京市博士后科学基金 (批准号: 2015ZZ-11)、中国博士后科学基金 (批准号: 2015M580951、2019M650404) 和北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金 (批准号: KYJJ2016008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dyjin@bjut.edu.cn

MRAM) 在内的以磁随机存储器 (magnetic random access memory, MRAM) 为代表的非易失性 RAM 进行了广泛研究 [3-5]. 上述非易失性 RAM 使系统在断电情况下不丢失数据, 可用以消除漏电流和静态功耗, 同时采用后道工艺可减小互连延迟. 其中, STT-MRAM 以其高速、小尺寸且与 CMOS 工艺相兼容等优点, 已进入商业化初始阶段 [6-8]. 然而 STT-MRAM 写入数据时需要较大的写入电流, 动态功耗较高 [9,10].

不同于 STT-MRAM 通过改变电流来引入自旋力矩和磁场, 电压调控磁各向异性磁随机存储器 (voltage controlled magnetic anisotropy magnetic random access memory, VCMA-MRAM) 通过改变外加电压即电场来快速调控磁化方向, 从而有效减小由电流引起的欧姆损耗, 因此具有写入速度快且写入功耗低的显著特点, 有望成为下一代的主流非易失性存储器 [11-13]. 而作为构成 VCMA-MRAM 基本存储单元的磁隧道结 (magnetic tunnel junction, MTJ), 现已受到国内外学者的广泛关注 [14-16]. 近年来, 随着 VCMA-MTJ 理论不断深入, 有关学者基于 VCMA 效应建立了 VCMA-MTJ 的电学模型 [17,18], 通过电压来调控 MTJ 自由层磁化方向, 从而实现数据存储. 然而随着 VCMA-MTJ 尺寸的不断缩小, 工艺偏差对 MTJ 性能的影响变得越来越严重, 甚至对 VCMA-MTJ 电路的读写功能产生了较大影响. 本文在充分考虑磁控溅射 (magnetron sputtering) 薄膜生长工艺和离子束刻蚀 (ion beam etching) 工艺会引入工艺偏差的情况下, 给出基于工艺偏差的 VCMA-MTJ 电学模型, 并研究工艺偏差对 VCMA-MTJ 自由层磁化方向翻转的影响. 在此基础上, 进一步研究工艺偏差对 VCMA-MTJ 读写电路中写错误率和读错误率的影响. 本文的研究工作对于 VCMA-MTJ 器件及其应用电路的设计具有重要的理论和指导意义.

2 VCMA-MTJ 磁化动力学研究

图 1 为 VCMA-MTJ 结构示意图, 其中氧化势垒层由氧化镁 (MgO) 材料构成; 参考层和自由层作为 VCMA-MTJ 的两个电极, 均由钴铁硼 (CoFeB) 材料构成. 参考层磁化方向固定不变, 当外加电压 (V_b) 变化时, 自由层磁化方向会发生翻转 [19]. 当自由层磁化方向与参考层磁化方向平行

时称为平行态 (P 态), 器件呈低阻特性; 当自由层磁化方向与参考层磁化方向反平行时称为反平行态 (AP 态), 器件呈高阻特性.

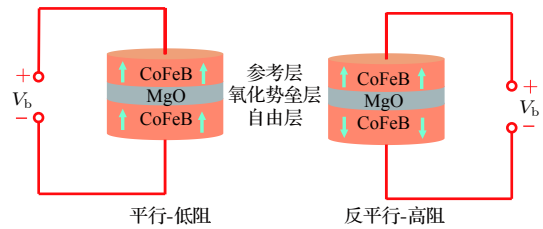


图 1 VCMA-MTJ 结构示意图

Fig. 1. Schematic structure of the VCMA-MTJ device.

进一步地, VCMA-MTJ 在 P 态和 AP 态之间的切换与 V_b 的大小和加载时间密切相关, 下面将结合图 2 给出的 VCMA-MTJ 磁化动力学示意图进行分析.

从图 2(a) 中可以看出, VCMA-MTJ 在两个稳定磁化状态 (P 态和 AP 态) 切换时需要克服一定的能量势垒. 该势垒大小受 V_b 的影响, 当 V_b 增大时, P 态与 AP 态之间的能量势垒会随之降低, 这有利于 VCMA-MTJ 的状态切换. 从能量势垒角度来看, 当能量势垒完全消除时, 对应的外加电压称为临界电压 (V_C).

在图 2(b) 中, 设参考层磁化方向为 z 轴正方向且固定不变, 当 $V_b = 0$ V 时, 自由层的磁化矢量 (\mathbf{M}) 将围绕有效场 (\mathbf{H}_{eff}) 做强度不变而方向改变的拉莫尔进动, \mathbf{M} 末端的运动轨迹为一个圆周. 由于自由层 \mathbf{M} 在 z 轴分量为正, 即与参考层磁化方向平行, 因此 VCMA-MTJ 将处于 P 态. 当在 t_1 时刻加载 V_b 且 $0 < V_b < V_C$ 时, 电荷会在自由层与氧化势垒层接触界面处聚集, 使得垂直磁各向异性发生变化, 导致 \mathbf{H}_{eff} 向 $x-y$ 平面偏转, 此现象即为电压调控磁各向异性 (VCMA) 效应 [20]. 此时, \mathbf{M} 将围绕新的 \mathbf{H}_{eff} 方向进动, 并随着时间从 $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$ 的增加, \mathbf{M} 将不断靠近 \mathbf{H}_{eff} . 由于 \mathbf{M} 在 z 轴分量始终为正, VCMA-MTJ 仍然处于 P 态, 无法实现 VCMA-MTJ 状态的切换. 在 t_4 时刻撤除外加电压 ($V_b = 0$ V) 后, \mathbf{H}_{eff} 和 \mathbf{M} 都将返回初始状态, \mathbf{M} 仍将围绕 \mathbf{H}_{eff} 做强度不变而方向改变的拉莫尔进动, VCMA-MT 仍将处于 P 态.

在图 2(c) 中, 设参考层磁化方向为 z 轴正方向且固定不变, 当在 t_1 时刻加载 V_b 且 $V_b \geq V_C$ 时, \mathbf{H}_{eff} 方向偏转并与 $x-y$ 平面重合, \mathbf{M} 将围绕新

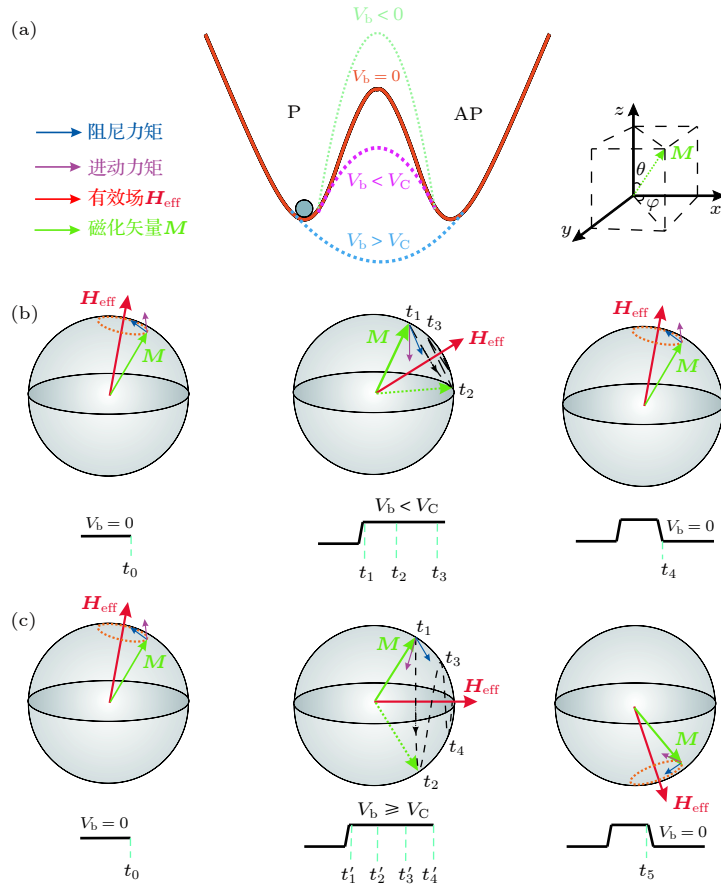


图2 VCMA-MTJ的磁化动力学示意图 (a)不同电压对MTJ磁化状态能量势垒的影响; (b) $V_b < V_C$ 的情况; (c) $V_b > V_C$ 的情况
 Fig. 2. Illustration of magnetization dynamics for the VCMA-MTJ device: (a) The impacts of different voltages on the energy barrier of MTJ; (b) at a relatively low voltage ($V_b < V_C$); (c) at a high positive voltage ($V_b > V_C$).

的 H_{eff} 方向进动. 在 t_1 时刻 M 在 z 轴的分量为正, VCMA-MTJ 处于 P 态. 在 t_2 时刻 M 在 z 轴的分量变为负, 此时 VCMA-MTJ 将由 P 态切换到 AP 态. 进一步, 随着时间从 $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_4$ 的增加, VCMA-MTJ 将在 P 态 \rightarrow AP 态 \rightarrow P 态 \rightarrow AP 态之间循环切换, 同时 M 不断靠近 H_{eff} 方向. 当在 t_5 时刻撤除外加电压 ($V_b = 0$ V) 时, H_{eff} 将向 $-z$ 轴偏转, 且 M 仍将围绕 H_{eff} 做强度不变而方向发生改变的拉莫尔进动, 此时 VCMA-MTJ 将处于 AP 态. 可见, VCMA-MTJ 切换状态不仅与 V_b 的大小有关, 还与 V_b 的加载时间即外加电压脉冲宽度密切相关.

3 基于工艺偏差的 VCMA-MTJ 电学模型

由于 VCMA-MTJ 中自由层的磁化矢量 M 是在空间中呈连续分布的, 其动态特性可采用

LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程^[21] 进行描述,

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha_d}{M_s} \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right), \quad (1)$$

其中, γ 为简化的旋磁比, α_d 为与自由层材料相关的 Gilbert 阻尼因子, M_s 为饱和磁化强度. 等式右侧第一项表示为 M 围绕 H_{eff} 进行的拉莫尔进动; 第二项为 Gilbert 阻尼力矩. 可以看出, 若不考虑阻尼力矩的影响, M 和 H_{eff} 的夹角将保持不变; 若考虑阻尼力矩的影响, 在进动过程中, M 的方向会越来越靠近 H_{eff} , 并最终与 H_{eff} 的磁化方向重合.

设 \mathbf{m} 为自由层磁化矢量方向上的单位向量, 则有 $\mathbf{M} = M_s \cdot \mathbf{m}$, 且 \mathbf{m} 在直角坐标系中可表示为

$$\mathbf{m} = m_x \mathbf{e}_x + m_y \mathbf{e}_y + m_z \mathbf{e}_z, \quad (2)$$

其中, m_x, m_y, m_z 分别为 \mathbf{m} 在 x, y, z 轴上的分量, $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ 分别为 x, y, z 轴上的单位向量.

当考虑外加电压 V_b 对有效磁场 H_{eff} 的影响时, H_{eff} 可具体表示为^[22]

$$\mathbf{H}_{\text{eff}}(V_b) = \mathbf{H}_{\text{ext}} + \mathbf{H}_{\text{dem}} + \mathbf{H}_{\text{th}} + \mathbf{H}_k(V_b), \quad (3)$$

其中, \mathbf{H}_{ext} 为外加磁场, \mathbf{H}_{dem} 为退磁化场, \mathbf{H}_{th} 为热噪声场, $\mathbf{H}_k(V_b)$ 为垂直磁各向异性场.

可以看出, \mathbf{H}_k 与外加电压 V_b 有关, 可进一步表示^[23] 为

$$\mathbf{H}_k(V_b) = \left(\frac{2K_i t_{\text{ox}} - 2\xi V_b}{\mu_0 M_s t_f t_{\text{ox}}} \right) m_z \mathbf{e}_z, \quad (4)$$

其中, K_i 为垂直磁各向异性系数, ξ 为电压调控磁各向异性系数, t_{ox} 为氧化势垒层厚度标准值, t_f 为自由层厚度标准值, μ_0 为磁导率, M_s 为饱和磁化强度, m_z 为 \mathbf{m} 在 z 轴上的分量.

同时, 设参考层磁化方向为 z 轴正方向且固定不变, 则 \mathbf{m} 还可表示为

$$\mathbf{m} = \sin\theta \cos\varphi \mathbf{e}_x + \sin\theta \sin\varphi \mathbf{e}_y + \cos\theta \mathbf{e}_z, \quad (5)$$

其中, θ 为 \mathbf{m} 与 z 轴的夹角, φ 为 \mathbf{m} 在 $x-y$ 平面上投影向量与 x 轴的夹角. 可以看出, \mathbf{m} 的动态可由 θ 和 φ 随时间的变化来描述, 而 VCMA-MTJ 状态的切换可由 m_z (即 $m_z = \cos\theta$) 来确定.

将 (2)—(5) 式带入 (1) 式, 求解得到

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \frac{\gamma}{1 + \alpha_d^2} \\ &\times \left[(H_x - N_x M_S \sin\theta \cos\varphi) (\alpha_d \cos\theta \cos\varphi - \sin\varphi) \right. \\ &+ (H_y - N_y M_S \sin\theta \sin\varphi) (\alpha_d \cos\theta \sin\varphi + \cos\varphi) \\ &\left. - (H_z + (H_k(V_b) - N_z M_S) \cos\theta) \alpha_d \sin\theta \right], \quad (6) \end{aligned}$$

其中, H_x, H_y, H_z 分别为 \mathbf{H}_{ext} 在 x, y, z 轴上的分量, 且 $H_y = H_z = 0$; N_x, N_y, N_z 分别为 \mathbf{H}_{dem} 在 x, y, z 轴上的退磁因子.

进一步地, 通过求解 θ 即 $m_z = \cos\theta$ 来确定 VCMA-MTJ 的磁化状态. 本文中 VCMA-MTJ 模型用到的部分参数^[17,18] 如表 1 所示.

表 1 VCMA-MTJ 模型参数列表

Table 1. Parameters of the VCMA-MTJ model.

参数	符号	数值	单位
氧化势垒层厚度标准值	t_{ox}	1.4	nm
垂直磁各向异性系数	K_i	0.32	mJ/m ²
电压调控磁各向异性系数	ξ	60	fJ/(V·m)
自由层厚度标准值	t_f	1.1	nm
简化的旋磁比	γ	2.21×10^5	m/(A·s)
磁导率	μ_0	1.256×10^{-6}	H/m
吉尔伯特阻尼因子	α_d	0.05	
饱和磁化强度	M_s	0.625×10^6	A/m
x, y 轴退磁因子	$N_{x, y}$	0.0168	
z 轴退磁因子	N_z	0.966	
外加磁场在 x 轴分量	H_x	31830	A/m

图 3 给出了 VCMA-MTJ 自由层磁化矢量在 z 轴分量 (即 m_z) 随时间的变化曲线, 并分析了 V_b 对磁化状态切换的影响. 从图 3 可以看出, 在恒定的外加电压脉冲宽度 ($t_{\text{pw}} = 0.4$ ns) 下, 当 $V_b \leq 0.9$ V 时, m_z 始终为正, VCMA-MTJ 磁化状态保持不变, 始终处于初始态 P 态; 当 $V_b \geq 1.0$ V 时, 随着时间的增加, m_z 将由正变负, 即磁化状态发生改变, VCMA-MTJ 将由初始的 P 态切换为 AP 态. 同时, 将 m_z 首次经由 1 降低至 -0.95 所持续的时间定义为 VCMA-MTJ 的切换速度 (t_{sw}), 则 $V_b = 1.0$ V, $t_{\text{pw}} = 0.4$ ns 时对应的 t_{sw} 为 1.25 ns.

图 4 进一步给出了 t_{sw} 随 V_b 的变化曲线. 从图 4 可以看出, 在 $t_{\text{pw}} = 0.4$ ns 时, 当 $V_b \leq 1.3$ V

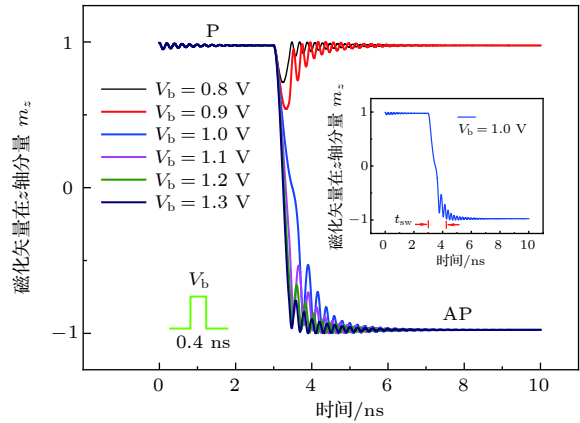


图 3 VCMA-MTJ 磁化状态随时间的变化曲线, 其中插图是切换速度的定义

Fig. 3. Magnetization state versus time of VCMA-MTJ, the inset represents the definition of the switching speed.

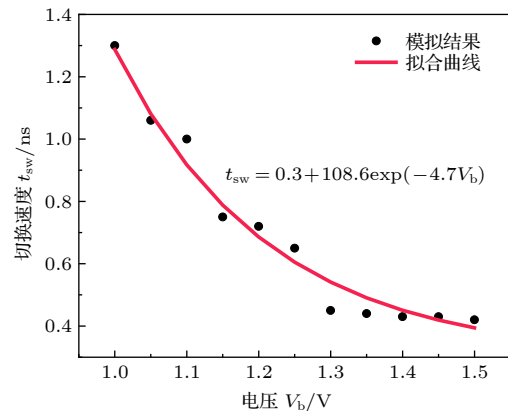


图 4 不同 V_b 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换速度的影响, 其中 $t_{\text{pw}} = 0.4$ ns

Fig. 4. Effect of V_b on the magnetization direction switching speed of VCMA-MTJ at $t_{\text{pw}} = 0.4$ ns.

时, t_{sw} 随 V_b 的增加呈显著下降趋势; 当 $V_b > 1.3$ V 时, V_b 对 t_{sw} 的影响不大, t_{sw} 几乎保持不变. 通过拟合可以看出, t_{sw} 与 V_b 近似呈 e 指数关系.

图 5 给出了 t_{pw} 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响. 从图 5 可以看出, 在恒定的外加电压 ($V_b = 1.2$ V) 下, 当 $t_{\text{pw}} \leq 0.1$ ns 时, m_z 始终为正, VCMA-MTJ 磁化状态保持不变, 始终处于初始态 P 态; 当 0.2 ns $\leq t_{\text{pw}} \leq 0.6$ ns 时, 随着时间的增加, m_z 将由正变负, 即磁化状态发生改变, VCMA-MTJ 将由初始的 P 态切换为 AP 态. 当 t_{pw} 进一步增大 (例如 $t_{\text{pw}} = 0.8$ ns) 时, 在拉莫尔进动过程中随着时间从 $t'_1 \rightarrow t'_2 \rightarrow t'_3$ 的增加, VCMA-MTJ 将经由 P 态到 AP 态后, 再次切换为 P 态.

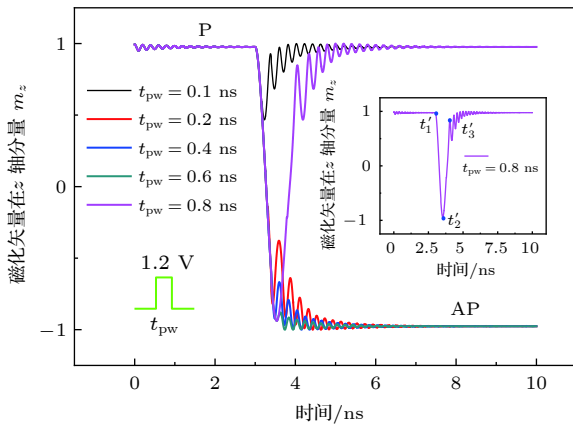


图 5 不同 t_{pw} 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响, 插图为与图 2(c) 相对应的 m_z 变化情况

Fig. 5. Effect of t_{pw} on the magnetization direction switching of VCMA-MTJ, the inset shows the precession of m_z corresponding to Fig. 2(c).

3.1 薄膜生长工艺偏差的影响

VCMA-MTJ 的典型制备工艺主要包括薄膜生长、热退火及刻蚀工艺. 其中 VCMA-MTJ 中自由层、氧化势垒层和参考层大都是采用磁控溅射法 [24,25] 制备得到, 该方法具有薄膜沉积速度快、适用于多种材料混合溅射、可实现大批量生产等优点. 然而在薄膜生长过程中, 薄膜厚度会不可避免地存在几个原子层厚度范围内的微小偏差 [26,27], 如图 6 所示, 其中 $t_{\text{ox}0}$ 和 $t_{\text{ox}1}$ 分别为氧化势垒层厚度的最大值和最小值, $t_{\text{f}0}$ 和 $t_{\text{f}1}$ 分别为自由层厚度的最大值和最小值, t_{oxm} 和 t_{fm} 分别为考虑薄膜厚度偏差情况下氧化势垒层厚度和自由层厚度的等效均值. 随着 VCMA-MTJ 尺寸的不断缩小, 上述薄

膜厚度偏差将会对器件的磁化翻转产生重要的影响.

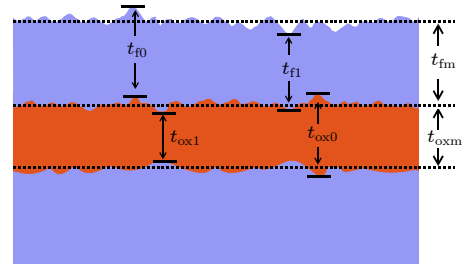


图 6 薄膜生长工艺产生的厚度偏差示意图

Fig. 6. Schematic illustration of thickness deviation caused by the thin film growth process.

考虑到垂直磁各向异性主要来源于自由层和氧化势垒层之间的界面相互作用, 垂直磁各向异性对自由层厚度和氧化势垒层厚度的变化更为敏感 [28]. 本文采用自由层厚度偏差 (γ_{tf}) 和氧化势垒层厚度偏差 (γ_{tox}) 来具体表征在磁控溅射工艺生长薄膜中产生的厚度偏差. 此时, 可分别表示为

$$\gamma_{\text{tf}} = \frac{t_{\text{fm}} - t_{\text{f}}}{t_{\text{f}}}, \quad (7)$$

$$\gamma_{\text{tox}} = \frac{t_{\text{oxm}} - t_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}}, \quad (8)$$

其中 t_{f} 和 t_{ox} 为不考虑薄膜生长工艺偏差的理想情况下自由层厚度和氧化势垒层厚度的标准值.

此时, 垂直磁各向异性场 \mathbf{H}_k 可表示为

$$\mathbf{H}_k = \left[\frac{2K_{\text{i}}t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}}) - 2\xi V_b}{\mu_0 M_{\text{s}}t_{\text{f}}(1 + \gamma_{\text{tf}})t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}})} \right] m_z \mathbf{e}_z. \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (3) 式并令 \mathbf{H}_{eff} 在 z 轴分量为零, 此时的外加电压即为临界电压 V_C , 可表示为

$$V_C = \frac{K_{\text{i}}t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}})}{\xi} - \frac{\mu_0 M_{\text{s}}^2 t_{\text{f}}(1 + \gamma_{\text{tf}})t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}})N_z}{2\xi}. \quad (10)$$

其中 (10) 式中等式右侧第二项远小于第一项, 可忽略不计, 即 γ_{tox} 与 V_C 呈正比关系.

图 7 给出了不同 γ_{tf} 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响, 其中 $V_b = 1.2$ V, $t_{\text{pw}} = 0.4$ ns. 当 $\gamma_{\text{tf}} \leq 12\%$ 时, MTJ 自由层的磁化方向能够实现从 P 态到 AP 态的切换; 当 $\gamma_{\text{tf}} \geq 13\%$ 时, MTJ 不能实现从 P 态到 AP 态的切换. 这是因为, 从 (9) 式可知, 随着 γ_{tf} 的增加, \mathbf{H}_k 将减小, 从而导致 MTJ 的 \mathbf{H}_{eff} 向 x - y 平面偏转, 这不利于磁化方向的有效翻转.

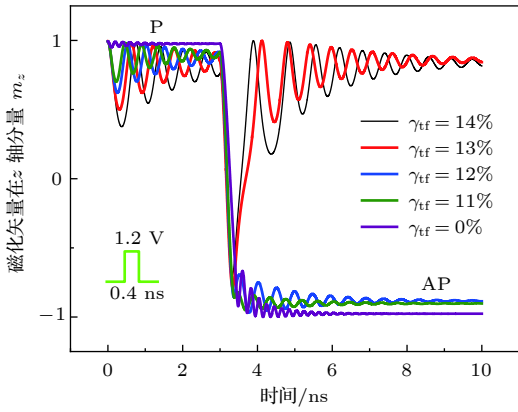


图 7 γ_{tf} 对 VCMA-MTJ 磁化方向切换的影响, 其中 $V_b = 1.2$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns
 Fig. 7. Effect of γ_{tf} on the magnetization direction switching of VCMA-MTJ at $V_b = 1.2$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns.

图 8 给出了不同 γ_{tox} 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响. 当 $\gamma_{tox} \leq 10\%$ 时, 自由层的磁化矢量能够发生翻转, VCMA-MTJ 将由初始的 P 态切换为 AP 态; 当 $\gamma_{tox} \geq 11\%$ 时, VCMA-MTJ 将无法实现磁化状态的切换. 这是因为, 从 (10) 式可知, 当 γ_{tox} 较大时, 临界电压 V_C 增大, 进而影响了自由层磁化矢量的进动, 从而导致切换错误.

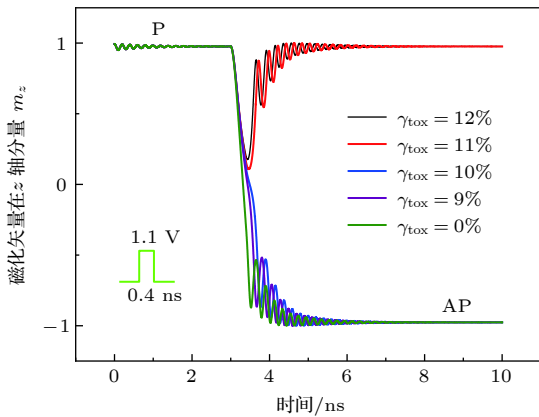


图 8 不同 γ_{tox} 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响, 其中 $V_b = 1.1$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns
 Fig. 8. Effect of γ_{tox} on magnetization direction switching of VCMA-MTJ at $V_b = 1.1$ V and $t_{pw} = 0.4$ ns.

3.2 刻蚀工艺

离子束刻蚀技术具有刻蚀速率快、图形精度高、工艺参数可控性好等优势, 因此成为 MTJ 刻蚀的主流工具 [29–31]. 但离子束刻蚀不可避免地会产生具有磁性的非挥发刻蚀产物, 如果沟槽深度较大或者沟槽宽度较小, 则粒子不能全部飞出槽外,

导致部分粒子附着在侧壁上, 形成再沉积层 [32,33] (图 9).

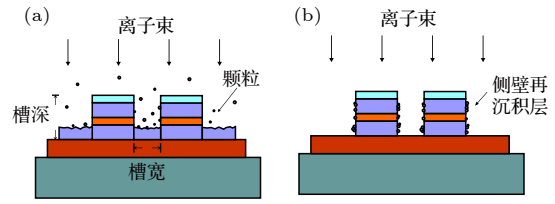


图 9 离子束刻蚀产生侧壁再沉积层示意图 (a) 刻蚀产生磁性粒子; (b) 粒子聚集形成再沉积层
 Fig. 9. Illustration of the formation of the sidewall re-deposited layer with ion beam etching: (a) Producing of magnetic particles with etching process; (b) formation of the re-deposition layer with magnetic particles.

由于侧壁再沉积层引入的磁性会干扰自由层的垂直磁各向异性场 [34], 因而需要考虑再沉积层对自由层磁性的影响. 此时, 有效的垂直磁各向异性场可表示为

$$\mathbf{H}_k = \left[\alpha^\beta \left(\frac{2K_i}{\mu_0 M_s t_f} \right) - \frac{2\xi V_b}{\mu_0 M_s t_{ox}} \right] m_z \mathbf{e}_z, \quad (11)$$

其中, α 为刻蚀工艺稳定因子 ($0 \leq \alpha \leq 1$), 主要取决于刻蚀角度、刻蚀时间和温度等; β 为常数 ($\beta = 0.3$).

图 10 给出了不同 α 对 VCMA-MTJ 磁化状态切换的影响. 当 $0.8 \leq \alpha \leq 1$ 时, 自由层的磁化方向可以实现稳定的翻转; 当 $\alpha \leq 0.7$ 时, 磁化方向的进动过程变得紊乱. 这是因为随着 α 的减小, \mathbf{H}_k 将呈指数式减小, 即再沉积层的存在显著降低了垂直磁各向异性, 使得有效磁场的垂直方向发生偏移, 稳定性降低, 此时 VCMA-MTJ 的自由层磁化方向在翻转的过程中更易受到温度相关因素的干扰.

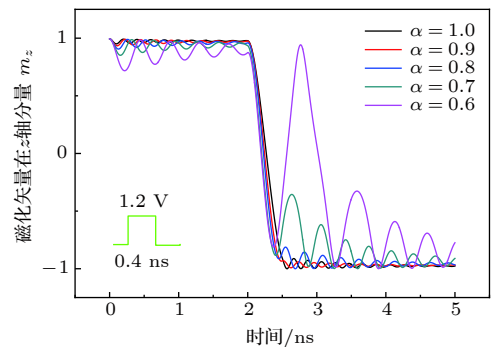


图 10 不同 α 对 VCMA-MTJ 磁化方向切换的影响
 Fig. 10. Effect of α on magnetization direction switching of VCMA-MTJ.

综上所述, 工艺偏差的存在使得 VCMA-MTJ 自由层磁化方向的翻转变得不确定, 从而影响到 VCMA-MTJ 读写电路数据存储的正确性. 下面将采用上述电学模型来分析工艺偏差对 VCMA-MTJ 读写电路错误率的影响.

4 VCMA-MTJ 电学模型在读写电路中的应用

图 11 给出了典型的 VCMA-MTJ 读写电路结构^[35], 它由 2 个 VCMA-MTJ(MTJ0, MTJ1), 5 个 PMOS(P₀, P₁, P₂, P₃, P₄) 和 6 个 NMOS(N₀, N₁, N₂, N₃, N₄, N₅) 组成, V_{dd} 为电路的读驱动电压, CLK 为时钟脉冲控制信号, 高电平时开启电路. 其中, MTJ1 为工作单元, 当电路写信号 (Write) 有效时, 可通过 MTJ1 高低阻态的改变来存储数据 “1” 和 “0”; MTJ0 为参考单元, 当电路读信号 (Read) 有效时, 可用于辅助读出 MTJ1 存储的数据. VCMA-MTJ 读写电路的仿真波形如图 12 所示, 假设初始 MTJ1 为 P 态. 结合图 11 和图 12 可以看出, 当时钟脉冲信号 (CLK) 为低电平 “0” 时, N₄, N₅ 关断, MTJ1 的阻态保持不变, 读写电路不工作, MTJ1 保持 P 态不变.

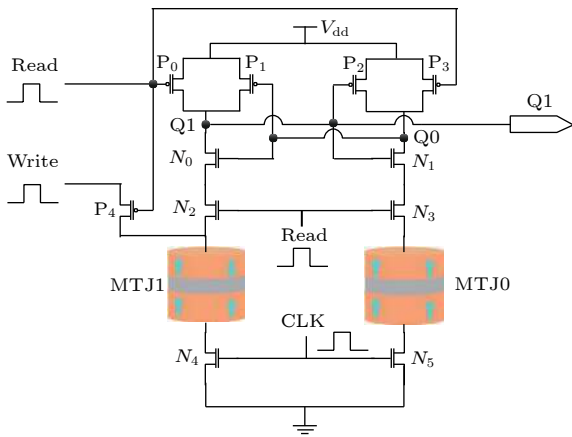


图 11 VCMA-MTJ 读写电路
Fig. 11. Reading and writing circuit of VCMA-MTJ.

当 CLK 为高电平 “1” 时, N₄, N₅ 导通. 若 Read 为 “0”, 则 N₂, N₃ 关断, N₄ 导通. 此时当 Write 为 “1” 时, 进行写操作, MTJ1 从 P 态变为 AP 态, 存入数据 “1”.

由于 Read 为 “0”, P₀, P₁, P₂ 和 P₃ 导通, 且 N₂, N₃ 关断, V_{dd} 将 Q₀, Q₁ 上拉到高电平, N₀,

N₁ 导通. 若此时 Read 变为 “1”, 则 P₀, P₃ 关断, N₂, N₃ 导通, 上述电路通过比较 MTJ1 和 MTJ0 的阻值来进行读操作, 共有两种情况: 1) 当 MTJ1 存储数据为 “1” 时, 呈 AP 态, 其电阻 (R₁) 大于 MTJ0 的电阻 (R₀), 此时 Q₀ 电位下降速度快于 Q₁, 相应地, P₁ 早于 P₂ 导通, Q₁ 将由 V_{dd} 上拉到高电平, 输出 “1”, 实现读操作; 2) 当 MTJ1 存储数据为 “0” 时, 呈 P 态, 即 R₁ 小于 R₀, 此时 Q₁ 电位下降速度快于 Q₀, 相应地, P₂ 早于 P₁ 导通, Q₀ 将由 V_{dd} 上拉到高电平, N₀ 持续导通, 使得 Q₁ 输出 “0”, 实现读操作.

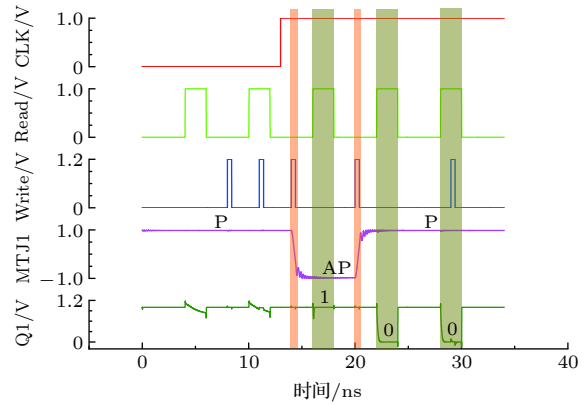


图 12 VCMA-MTJ 读写电路的仿真波形

Fig. 12. Simulation waveform of the reading and writing circuit of VCMA-MTJ.

现今, 基于自旋转移力矩磁隧道结 (spin-transfer torque-magnetic tunnel junction, STT-MTJ) 的 MRAM 存储容量已高达 1 GB^[36], 此时工艺偏差对 MTJ 的影响将变得越来越严重. 本文以 VCMA-MTJ 为研究对象, 重点研究了工艺偏差对器件几何参数 (包括 t_f , t_{ox} , α) 及其所在读写电路特性的影响. 通常在考虑工艺偏差影响的情况下, 可认为 MRAM 中 VCMA-MTJ 的 t_f , t_{ox} 和 α 遵循高斯分布^[37], 即

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (13)$$

其中, x 可分别代表 t_f , t_{ox} , α ; μ 为参数平均值; σ 为标准偏差; N 为 MRAM 中包含的 VCMA-MTJ 个数; x_i 为第 i 个 MTJ 对应的几何参数 (分别为 t_{fi} , t_{oxi} , α_i). 下文将使用 $3\sigma/\mu$ 来表征工艺偏差对

MRAM 中 VCMA-MTJ 读写电路工作状态的影响, 并采用蒙特卡洛仿真研究工艺偏差对 VCMA-MTJ 电路数据读写错误率的影响.

4.1 写错误率

图 13 给出了 VCMA-MTJ 读写电路在进行写“1”操作时的蒙特卡洛仿真波形, 其中 $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.03$, $V_b = 1.2$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns. 结果表明, 由于工艺误差的影响, 4% 的 VCMA-MTJ 未能实现磁化方向的翻转而出现写错误, 即写错误率为 4%.

图 14 给出了不同 V_b 下写错误率随 $3\sigma/\mu$ 的变化关系曲线. 从图 14 可以看出, 写错误率均随着 $3\sigma/\mu$ 的增大而增大, 适当增大 V_b 可显著降低写错误率. 当 $V_b = 1.3$ V, $3\sigma/\mu$ 增大为 0.05 时, 写错误率为 0%, 远低于 $V_b = 1.15$ V, $3\sigma/\mu = 0.05$ 时的写错误率 (30%).

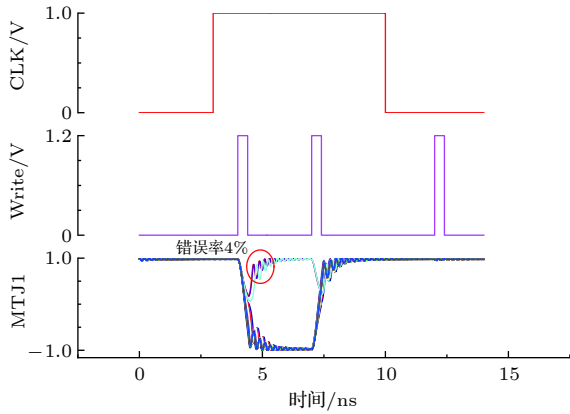


图 13 VCMA-MTJ 写电路的蒙特卡洛仿真波形, 其中 $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.03$, $V_b = 1.2$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns
Fig. 13. Monte Carlo simulation waveform of the writing circuit of VCMA-MTJ at $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.03$, $V_b = 1.2$ V, $t_{pw} = 0.4$ ns.

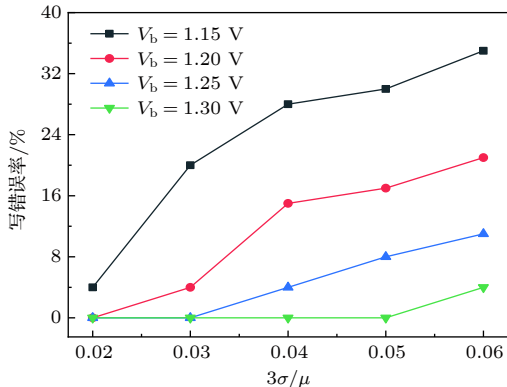


图 14 不同 V_b 下写错误率随 $3\sigma/\mu$ 的变化关系
Fig. 14. Writing error rate versus $3\sigma/\mu$ at different V_b .

图 15 给出了不同 t_{pw} 下写错误率随 $3\sigma/\mu$ 的变化关系曲线. 从图 15 可以看出, 写错误率均随着 $3\sigma/\mu$ 的增大而增大, 适当减小 t_{pw} 可显著降低写错误率. 当 $t_{pw} = 0.5$ ns, $3\sigma/\mu = 0.05$ 时, 写错误率仅为 15%, 远低于 $t_{pw} = 0.8$ ns, $3\sigma/\mu = 0.05$ 时的写错误率 (42%).

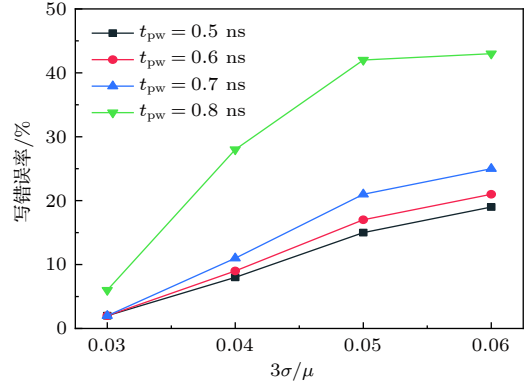


图 15 不同 t_{pw} 下写错误率随 $3\sigma/\mu$ 的变化关系
Fig. 15. Writing error rate versus $3\sigma/\mu$ at different t_{pw} .

4.2 读错误率

图 16 给出了 VCMA-MTJ 读写电路在进行读“0”操作时的蒙特卡洛仿真波形, 其中 $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.07$, $V_{dd} = 0.8$ V. 结果表明, 由于工艺误差的影响, 读错误率为 2%.

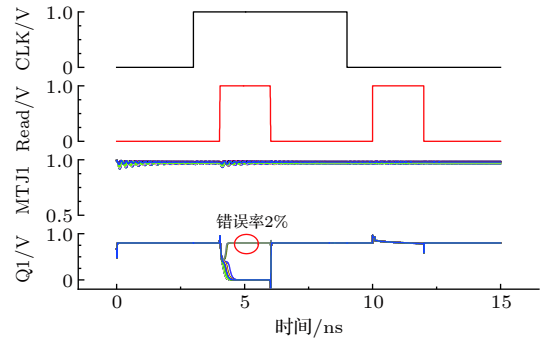


图 16 VCMA-MTJ 读电路的蒙特卡洛仿真波形, 其中 $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.07$, $V_{dd} = 0.8$ V
Fig. 16. Monte Carlo simulation waveform of the reading circuit of VCMA-MTJ at $N = 100$, $3\sigma/\mu = 0.07$, $V_{dd} = 0.8$ V.

图 17 给出了不同 V_{dd} 下 VCMA-MTJ 读写电路发生读操作错误时读错误率随 $3\sigma/\mu$ 变化的关系曲线, 上述读写电路中 $N = 100$. 从图 17 可以看出, 读错误率均随着 $3\sigma/\mu$ 的增大而增大, 适当增大 V_{dd} 可显著降低读错误率. 在相同 $3\sigma/\mu = 0.07$

下, 当 $V_{dd} = 0.9 \text{ V}$ 时, 读错误率为 0%, 远低于 $V_{dd} = 0.6 \text{ V}$ 时的读错误率 (31%). 然而增大 V_{dd} 会增加读写电路的功耗, 需要折中考虑.

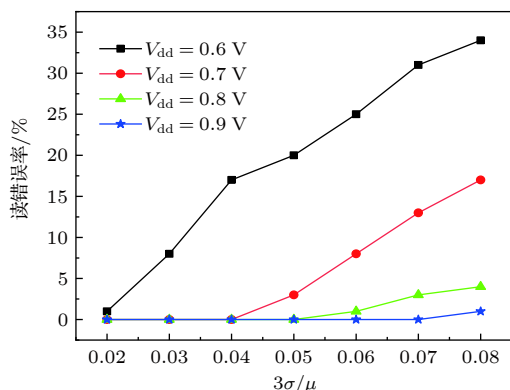


图 17 不同 V_{dd} 下读错误率随 $3\sigma/\mu$ 的变化关系

Fig. 17. Reading error rate versus $3\sigma/\mu$ at different V_{dd} .

5 结论

随着 MRAM 存储容量的不断增大以及 VCMA-MTJ 尺寸的不断缩小, 在制备 VCMA-MTJ 电路时的工艺偏差会对 MTJ 性能产生重要影响, 甚至会引起上述电路的读写错误. 本文在充分考虑磁控溅射薄膜生长工艺中自由层厚度偏差 (γ_{tf})、氧化势垒层厚度偏差 (γ_{tox}) 以及离子束刻蚀工艺中由侧壁再沉积层引入的刻蚀工艺稳定因子 (α) 偏差影响的情况下, 给出了基于工艺偏差的 VCMA-MTJ 电学模型, 研究了上述工艺偏差对 VCMA-MTJ 磁化方向翻转的影响. 结果表明, 垂直磁各向异性场 (H_k) 随着 γ_{tf} 的增加而减小, 临界电压 (V_C) 随着 γ_{tox} 的增加而增大, 当 $\gamma_{\text{tox}} \geq 11\%$, $\gamma_{\text{tf}} \geq 13\%$ 时, VCMA-MTJ 将无法实现磁化方向的有效翻转. 同时, H_k 随着 α 的减小呈指数式减小, 当 $\alpha \leq 0.7$ 时, VCMA-MTJ 磁化方向的进动过程将变得紊乱而不稳定. 进一步地, 本文将上述模型应用到 VCMA-MTJ 读写电路中, 使用 $3\sigma/\mu$ 来表征工艺偏差 (γ_{tf} , t_{ox} 和 α), 并采用蒙特卡洛仿真方法进行研究. 可以看出, 在 VCMA-MTJ 电路中, 当 $3\sigma/\mu = 0.05$, 外加电压 $V_b = 1.15 \text{ V}$ 时, 写错误率高达 30%; 当 $3\sigma/\mu = 0.05$, 读驱动电压 $V_{dd} = 0.6 \text{ V}$ 时, 读错误率为 20%. 通过适当增大 V_b 和减小外加电压脉冲宽度 (t_{pw}) 均可有效降低 VCMA-MTJ 电路的写错误率; 适当增大 V_{dd} 会有利于 VCMA-MTJ 电路读错误率的显著改善. 本文的研

究工作将会对 VCMA-MTJ 器件及其应用电路的设计和可靠性分析提供有益指导.

参考文献

- [1] Ikegawa S, Mancoff F B, Janesky J, Aggarwal S 2020 *IEEE Trans. Electron Devices* **67** 1407
- [2] Nehra V, Prajapati S, Tankwal P, Zilic Z, Kumar T N, Kaushik B K 2020 *IEEE Trans. Magn.* **56** 1
- [3] Sun Y, Gu J, He W, Wang Q, Jing N, Mao Z, Qian W, Jiang L 2019 *IEEE Trans. Circuits Syst. II-Express Briefs* **66** 753
- [4] Burr G W, Brightsky M J, Sebastian A, Cheng H, Wu J, Kim S, Sosa N E, Papandreou N, Lung H, Pozidis H, Eleftheriou E, Lam C H 2016 *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.* **6** 146
- [5] Wang C Z, Zhang D M, Zhang K L, Zeng L, Wang Y, Hou Z Y, Zhang Y G, Zhao W S 2020 *IEEE Trans. Magn.* **67** 1965
- [6] Ryu J W, Kwon K W 2016 *IEEE Trans. Magn.* **52** 1
- [7] Prajapati S, Kaushik B K 2018 *IEEE Trans. Magn.* **55** 1
- [8] Lee D G, Park S G 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 1
- [9] Khalili A P, Alzate J G, Cai X Q, Ebrahimi F, Hu Q, Wong K, Wang K L 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 1
- [10] Zhang X L, Wang C J, Liu Y W, Zhang Z Z, Jin Q Y, Duan C G 2016 *Sci. Rep.* **6** 18719
- [11] Miriyala V P K, Fong X, Liang G 2019 *IEEE Trans. Electron Devices.* **66** 944
- [12] Long M, Zeng L, Gao T, Zhang D, Qin X, Zhang Y, Zhao W 2018 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **17** 492
- [13] Song J, Ahmed I, Zhao Z, Zhang D, Sapatnekar S S, Wang J P, Kim C H 2018 *IEEE J. Explor. Solid-State Computat. Dev. Circ.* **4** 76
- [14] Cao K, Li H, Cai W, Wei J, Wang L, Hu Y, Jiang Q, Cui H, Zhao C, Zhao W 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 1
- [15] Jaiswal A, Agrawal A, Roy K 2018 *Sci. Rep.* **8** 1
- [16] 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** 5 (in Chinese) [张楠, 张保, 杨美音, 蔡凯明, 盛宇, 李予才, 邓永城, 王开友 2017 *物理学报* **66** 5]
- [17] Kang W, Ran Y, Zhang Y, Lü W, Zhao W 2017 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **16** 387
- [18] Lee H, Lee A, Wang S, Ebrahimi F, Gupta P, Amiri P K, Wang K L 2018 *IEEE Trans. Magn.* **54** 1
- [19] Alzate J G, Amiri P K, Upadhyaya P, Cherepov S S, Zhu J, Lewis M, Dorrance R, Katine J A, Langer J, Galatsis K 2012 *2012 International Electron Devices Meeting San Francisco, US, December 10-13, 2012* p51
- [20] Niranjan M K, Duan C G, Jaswal S S, Tsymbal E Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 222504
- [21] Gilbert T L 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 3443
- [22] Ahmed R, Victora R H 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 182401
- [23] Alzate Vinasco J G 2014 *Ph. D. Dissertation* (California: University of California, Los Angeles)
- [24] Tsunekawa K, Nagamine Y, Maehara H, Djayaprawira D D, Watanabe N 2007 *2006 IEEE International Magnetism Conference San Diego, US, May 8-12, 2006* p855
- [25] Rata A D, Braak H, Bürgler D E, Schneider C M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 162512
- [26] Zhao W, Zhao X, Zhang B, Cao K, Wang L, Kang W, Shi Q, Wang M, Zhang Y, Wang Y 2016 *Materials* **9** 41
- [27] Wang Y, Cai H, Naviner L A B, Zhao X X, Zhang Y, Slimani M, Klein J O, Zhao W S 2016 *Microelectron. Rehab.* **64** 26

- [28] Ikeda S, Miura K, Yamamoto H, Mizunuma K, Gan H D, Endo M, Kanai S, Hayakawa J, Matsukura F, Ohno H 2010 *Nat. Mater.* **9** 721
- [29] Chen E, Schwarz B, Choi C J, Kula W, Wolfman J, Ounadjela K, Geha S 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8379
- [30] Ohsawa Y, Shimomura N, Daibou T, Kamiguchi Y, Shirotori S, Inokuchi T, Saida D, Altansargai B, Kato Y, Yoda H 2016 *IEEE Trans. Magn.* **52** 1
- [31] Ip V, Huang S, Carnevale S D, Berry I L, Rook K, Lill T B, Paranjpe A P, Cerio F 2017 *IEEE Trans. Magn.* **53** 1
- [32] Sugiura K, Takahashi S, Amano M, Kajiyama T, Iwayama M, Asao Y, Shimomura N, Kishi T, Ikegawa S, Yoda H 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 08HD02
- [33] Takahashi S, Kai T, Shimomura N, Ueda T, Amano M, Yoshikawa M, Kitagawa E, Asao Y, Ikegawa S, Kishi T 2006 *IEEE Trans. Magn.* **42** 2745
- [34] Xue L, Nistor L, Alm J, Germain J, Ching C, Balseanu M, Trinh C, Chen H, Hassan S, Pakala M 2014 *IEEE Trans. Magn.* **50** 1
- [35] Wang Y, Zhang Y, Deng E Y, Klein J O, Naviner L A B, Zhao W S 2014 *Microelectron. Reliab.* **54** 1774
- [36] Aggarwal S, Almasi H, DeHerrera M, Hughes B, Ikegawa S, Janesky J, Lee H K, Lu H, Mancoff F B, Nagel K, Shimon G, Sun J J, Andre T, Alam S M 2019 *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, USA, December 7–11, 2019 p18
- [37] Li J, Augustine C, Salahuddin S, Roy K 2008 *Proceedings of the 45th annual Design Automation Conference* New York, USA, June, 2008 p278

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

Jin Dong-Yue^{1)†} Chen Hu¹⁾ Wang You²⁾ Zhang Wan-Rong¹⁾
Na Wei-Cong¹⁾ Guo Bin¹⁾ Wu Ling¹⁾ Yang Shao-Meng¹⁾ Sun Sheng¹⁾

1) (*Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

2) (*Microelectronics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 15 February 2020; revised manuscript received 9 May 2020)

Abstract

As one of the primary elements in magnetoresistive random access memory (MRAM), voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction (VCMA-MTJ) has received wide attention due to its fast read and write speed, low power dissipation, and compatibility with standard CMOS technology. However, with the downscaling of VCMA-MTJ and the increasing of storage density of MRAM, the effect of process deviation on the characteristics of MTJ becomes more and more obvious, which even leads to Read/Write (R/W) error in VCMA-MTJ circuits. Taking into account the depth deviation of the free layer (γ_{tf}) and the depth deviation of the oxide barrier layer (γ_{tox}) in magnetron sputtering technique as well as the etching process stability factor (α) caused by the sidewall re-deposition layer in the ion beam etching process, the electrical model of VCMA-MTJ with process deviation is presented in the paper. It is shown that the VCMA-MTJ cannot achieve the effective reversal of the magnetization direction when $\gamma_{\text{tf}} \geq 13\%$ and $\gamma_{\text{tox}} \geq 11\%$. The precession of magnetization direction in VCMA-MTJ also becomes instable when $\alpha \leq 0.7$. Furthermore, the electrical model of VCMA-MTJ with process deviation is also applied to the R/W circuit to study the effect of process deviation on the R/W error in the circuit. Considering the fact that all of γ_{tf} , γ_{tox} , and α follow Gauss distribution, The $3\sigma/\mu$ is adopted to represent the process deviation, with using Monte Carlo simulation, where σ is the standard deviation, and μ is the average value. It is shown that the write error of the circuit goes up to 30 % with $3\sigma/\mu$ of 0.05 and the voltage (V_b) of 1.15 V. At the same time, the read error of the circuit is 20% with $3\sigma/\mu$ of 0.05 and driving voltage (V_{dd}) of 0.6 V. Both the read error rate and the write error rate of the VCMA-MTJ circuit increase as process deviation increases. It is found that the write error rate can be effectively reduced by increasing V_b and reducing the voltage pulse width (t_{pw}). The increasing of V_{dd} is helpful in reducing the read error rate effectively. Our research presents a useful guideline for designing and analyzing the VCMA-MTJ and VCMA-MTJ read/write circuits.

Keywords: magnetic tunnel junction, voltage controlled magnetic anisotropy, process deviation, read/write circuits

PACS: 85.70.Ay, 85.75.-d, 75.78.-n

DOI: [10.7498/aps.69.20200228](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61006059, 6177402, 61901010), Beijing Natural Science Foundation, China (Grant Nos. 4143059, 4192014, 4204092), Beijing Municipal Education Committee Project, China (Grant No. KM201710005027), Postdoctoral Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 2015ZZ-11), China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2015M580951, 2019M650404), and Beijing Future Chip Technology High-tech Innovation Center Scientific Research Fund, China (Grant No. KYJJ2016008).

† Corresponding author. E-mail: djyin@bjut.edu.cn