



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

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

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

Jin Dong-Yue Cao Lu-Ming Wang You Jia Xiao-Xue Pan Yong-An Zhou Yu-Xin Lei Xin Liu Yuan-Yuan Yang Ying-Qi Zhang Wan-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 107501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211700

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211700>

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>

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>

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>

具有倾斜极化层的自旋阀结构中磁翻转以及磁振荡模式的微磁模拟

Micromagnetic modeling of magnetization switching and oscillation modes in spin valve with tilted spin polarizer

物理学报. 2018, 67(17): 177502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180947>

铁磁纳米线中磁化强度的磁怪波

Rogue wave solution in ferromagnetic nanowires

物理学报. 2020, 69(1): 017501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191352>

垂直各向异性 $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜的外延生长与其异质结构的自旋输运

Epitaxial growth of  $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  films with perpendicular magnetic anisotropy and spin transport properties in  $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$  heterostructures

物理学报. 2021, 70(7): 077501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201737>

# 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\*

金冬月<sup>1)</sup> 曹路明<sup>1)</sup> 王佑<sup>2)</sup> 贾晓雪<sup>1)</sup> 潘永安<sup>1)</sup> 周钰鑫<sup>1)</sup>  
雷鑫<sup>1)</sup> 刘圆圆<sup>1)</sup> 杨滢齐<sup>1)</sup> 张万荣<sup>1)†</sup>

1) (北京工业大学信息学部, 北京 100124)

2) (北京航空航天大学合肥创新研究院, 合肥 230013)

(2021年9月12日收到; 2022年1月9日收到修改稿)

自旋转移矩辅助电压调控磁各向异性磁隧道结 (STT 辅助 VCMA-MTJ) 作为非易失性全加器 (NV-FA) 中的核心部件, 具有切换速度快、功耗低、稳定性好等优点, 将在物联网、人工智能等领域具有良好的发展前景. 然而随着磁隧道结 (MTJ) 尺寸的不断缩小以及芯片集成度的不断提高, 工艺偏差对 MTJ 及 NV-FA 电路性能的影响将变得越来越显著. 本文基于 STT 辅助 VCMA-MTJ 磁化动力学, 在充分考虑薄膜生长工艺偏差以及刻蚀工艺偏差影响的情况下, 建立了更为精确的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型, 研究了上述两种工艺偏差对 MTJ 及 NV-FA 电路性能的影响. 结果表明, 当自由层厚度偏差  $\gamma_{\text{tf}} \geq 6\%$  或氧化层厚度偏差  $\gamma_{\text{tox}} \geq 0.7\%$  时, MTJ 将无法实现状态切换; 当隧穿磁阻率偏差  $\beta$  增大到 30% 时, 读取裕度 SM 将下降高达 17.6%. 对于 NV-FA 电路, 通过增大电压  $V_{b1}$  以及写‘0’时增大电压  $V_{b2}$  或写‘1’时减小  $V_{b2}$ , 可有效降低非易失性加数写入错误率; 通过增大逻辑运算驱动电压  $V_{\text{dd}}$ , 可有效降低逻辑运算结果输出错误率.

**关键词:** 磁隧道结, 自旋转移矩, 压控磁各向异性, 工艺偏差

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

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211700

## 1 引言

随着以云存储、实时识别和智能电子设备为中心的物联网时代的到来, 人们对于构成上述计算设备的核心部件算术逻辑单元 (ALU) 及其重要组件全加器在速度、功耗和可靠性方面均提出了更高的要求<sup>[1]</sup>. 与传统的基于互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 晶体管的易失性全加器相比, 基于磁隧道结 (MTJ) 的非易失性全加器 (NV-FA) 具有功

低、延迟时间短、版图面积小、抗辐照能力强等特点, 现已受到国内外学者的广泛关注<sup>[2-6]</sup>. 根据驱动方式的不同, 应用在 NV-FA 中的 MTJ 又可分为自旋转移矩 (STT)MTJ<sup>[2]</sup>、压控磁各向异性 (VCMA)MTJ<sup>[3]</sup>、自旋轨道矩 (SOT)MTJ<sup>[4]</sup>、自旋霍尔效应 (SHE)MTJ<sup>[5]</sup>、STT 辅助 VCMA-MTJ<sup>[6]</sup> 和 SOT 辅助 STT-MTJ<sup>[3]</sup> 等. 其中, STT-MTJ 驱动电流较大, 动态功耗较高, 且需要大尺寸的底层晶体管, 因此不利于高密度集成<sup>[7]</sup>. VCMA-MTJ 采用电压驱动, 虽可大幅降低动态功耗, 缩短延迟时间, 但对外加电压脉冲信号宽度的精确控制提出

\* 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: wrzhang@bjut.edu.cn

了更高要求,从而增加了相关电路的设计难度<sup>[8]</sup>.而 STT 辅助 VCMA-MTJ 的提出,在兼具上述两种器件动态功耗低、延迟时间短的优点的同时,无需精确控制电压脉冲信号的宽度,因此具有了良好的整体性能和广阔的发展前景<sup>[9]</sup>.

近年来,随着对 STT 辅助 VCMA-MTJ 研究的不断深入,先后建立了 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型,并将其应用到 NV-FA 中以实现高速、低功耗的加法运算<sup>[10]</sup>.然而随着 MTJ 尺寸的不断缩小,薄膜生长工艺偏差<sup>[11,12]</sup>及刻蚀工艺偏差<sup>[13–15]</sup>对 STT 辅助 VCMA-MTJ 性能的影响将越来越严重,甚至对 NV-FA 中非易失性加数写入功能以及逻辑运算结果输出功能产生较大影响.

本文基于 STT 辅助 VCMA-MTJ 磁化动力学分析研究,在充分考虑薄膜生长工艺偏差对 MTJ 状态切换影响以及刻蚀工艺偏差对 MTJ 读取裕度影响的情况下,建立了更为精确的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型.在此基础上,进一步研究了上述两种工艺偏差对 NV-FA 电路中非易失性加数写入功能以及逻辑运算结果输出功能的影响.本工作对 STT 辅助 VCMA-MTJ 及 NV-FA 电路的优化设计及其可靠性研究具有理论和现实意义.

## 2 STT 辅助 VCMA-MTJ 磁化动力学研究

图 1 为 STT 辅助 VCMA-MTJ (以下简称 MTJ) 结构示意图,其中参考层和自由层主要为钴铁硼 (CoFeB),氧化层主要为氧化镁 (MgO),且参考层磁化方向固定不变.如图所示,当初始时刻 MTJ 两端未施加电压脉冲时,自由层和参考层磁化方向相同,称为平行态 (P 态),MTJ 呈低电阻特性,电阻值为  $R_P$ ; 当在 MTJ 两端施加电压脉冲  $V_b$  ( $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$ ) 时,自由层磁化方向发生翻转,自由层和参考层磁化方向相反,称为反平行态 (AP 态),MTJ 呈高电阻特性,电阻值为  $R_{AP}$ ; 当继续在 MTJ 两端施加电压脉冲  $V_b$  ( $V_{b1}$ ,  $V'_{b2}$ ) 时,自由层磁化方向将再次发生翻转,MTJ 返回到 P 态.

不同于 VCMA-MTJ 工作时两端需施加电压脉冲  $V_b > 0$  V,且在 P 态和 AP 态之间的切换严格取决于  $V_b$  脉冲信号宽度,STT 辅助 VCMA-MTJ 在 P 态和 AP 态之间的切换时的  $V_b$  均由两段电压脉冲 ( $V_{b1}$ ) 和 ( $V_{b2}$  或  $V'_{b2}$ ) 构成,其中  $V_{b1}$  用于

调控 VCMA 效应<sup>[16]</sup>,  $V_{b2}$  或  $V'_{b2}$  用于调控 STT 效应<sup>[17]</sup>,且  $V'_{b2} < 0$  V. 图 2 为 VCMA 效应示意图,从图 2 可以看出, P 态和 AP 态之间的势垒高度会随着  $V_{b1}$  的增大而降低,这有利于 MTJ 状态的切换.当势垒被完全消除时对应的电压称为临界翻转电压 ( $V_c$ ),此时电荷在 MTJ 自由层和氧化层之间的界面处迅速聚集,改变界面处原子轨道的占有率,降低 MTJ 的垂直磁各向异性场<sup>[18]</sup>.

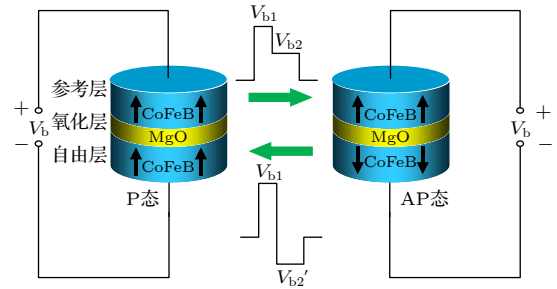


图 1 STT 辅助 VCMA-MTJ 结构示意图

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

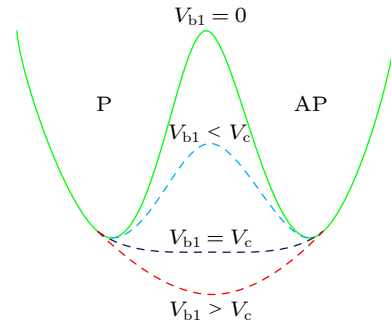


图 2 VCMA 效应示意图

Fig. 2. Schematic illustration of the VCMA effect.

相应地,在磁化动力学方面,由于 VCMA-MTJ 仅需考虑 VCMA 效应的影响,自由层磁化矢量  $m$  的进动由阻尼力矩和进动力矩二者共同作用,此时自由层磁化矢量  $m$  在  $xy$  平面上方和下方的翻转与 VCMA 效应持续时间 ( $V_b$  脉冲信号宽度) 的长短有关;而 STT 辅助 VCMA-MTJ 需要同时考虑 VCMA 效应和 STT 效应的影响,自由层磁化矢量  $m$  的进动由阻尼力矩、进动力矩和自旋转移力矩三者共同作用,且 VCMA 效应持续时间 ( $V_{b1}$  脉冲信号宽度) 较短,不会引起自由层磁化矢量  $m$  在  $xy$  平面上方和下方的翻转,  $m$  的翻转主要由 STT 效应 ( $V_{b2}$  或  $V'_{b2}$ ) 来实现.下面将从磁化动力学角度分析两种电压脉冲 ( $V_b$  ( $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$ ) 和  $V_b$  ( $V_{b1}$ ,  $V'_{b2}$ )) 对 MTJ 状态切换的影响.

## 2.1 P 态到 AP 态的切换

MTJ 外加电压脉冲  $V_b(V_{b1}, V_{b2})$  随时间变化曲线如图 3(a) 所示. 设参考层磁化方向为  $z$  轴正方向且固定不变, 在初始时刻  $t = t_0$  时, 自由层磁化矢量  $m$  在  $z$  轴分量为正, 此时 MTJ 为 P 态, 如图 3(b) 所示. 下面将具体分析在不同时刻下  $m$  的翻转情况.

当  $t_0 < t < t_1$  时,  $V_b = 0$  V, 有效场 ( $H_{\text{eff}}$ ) 位于  $xy$  平面上方的难磁化轴上,  $m$  在进动力矩 ( $T_p$ ) 和阻尼力矩 ( $T_d$ ) 的作用下围绕  $H_{\text{eff}}$  做 Lamor 进动, 并逐渐靠近  $H_{\text{eff}}$ . 当  $t = t_1$  时,  $V_b = V_{b1}$  且  $V_{b1} > V_C$ , 在 VCMA 效应的作用下,  $H_{\text{eff}}$  迅速向  $xy$  平面偏转并与  $xy$  平面重合,  $m'$  及  $H'_{\text{eff}}$  为  $t_1$  时刻  $m$  及  $H_{\text{eff}}$  的位置, 如图 3(c) 所示.

当  $t_1 < t < t_2$  时,  $V_b = V_{b1}$  且  $V_{b1} > V_C$ ,  $H_{\text{eff}}$  保持与  $xy$  平面重合,  $m$  围绕  $H_{\text{eff}}$  做进动并不断靠近  $H_{\text{eff}}$ . 当  $t = t_2$  时,  $V_b = V_{b2}$  且  $0$  V  $< V_{b2} < V_C$ , 此时  $m$  仍位于  $xy$  平面上方, VCMA 效应失效,  $H_{\text{eff}}$  在迅速向  $xy$  平面上方偏转,  $m'$  及  $H'_{\text{eff}}$  为  $t_2$  时刻  $m$  及  $H_{\text{eff}}$  的位置, 如图 3(d) 所示.

当  $t_2 < t < t_3$  时,  $V_b = V_{b2}$  且  $0$  V  $< V_{b2} < V_C$ ,  $V_{b2}$  在 MTJ 中形成自旋电子流, 与  $m$  作用产生自旋转移力矩 ( $T_{\text{stt}}$ ), 即 STT 效应. 此时忽略 VCMA

效应,  $m$  在  $T_p$ ,  $T_d$  和  $T_{\text{stt}}$  三个力矩的共同作用下围绕  $H_{\text{eff}}$  进动并偏转至  $xy$  平面下方, 同时带动  $H_{\text{eff}}$  迅速偏转至  $xy$  平面下方的难磁化轴上,  $m'$  及  $H'_{\text{eff}}$  为  $t_3$  时刻  $m$  及  $H_{\text{eff}}$  的位置, 如图 3(e) 所示.

当  $t > t_3$  时,  $V_b = 0$  V,  $m$  在  $T_p$  和  $T_d$  的作用下围绕新的  $H_{\text{eff}}$  做进动并不断靠近  $H_{\text{eff}}$ , 如图 3(f) 所示. 此时  $m$  在  $z$  轴分量为负, MTJ 实现了从 P 态到 AP 态的切换.

## 2.2 AP 态到 P 态的切换

MTJ 外加电压脉冲  $V_b(V_{b1}, V'_{b2})$  随时间变化曲线如图 4(a) 所示. 在初始时刻  $t_0$  时,  $m$  在  $z$  轴分量为负, 即 MTJ 为 AP 态, 如图 4(b) 所示. 下面将具体分析在不同时刻下  $m$  翻转情况.

当  $t_0 < t < t_1$  时,  $V_b = 0$  V,  $H_{\text{eff}}$  位于  $xy$  平面下方的难磁化轴上,  $m$  围绕  $H_{\text{eff}}$  做进动, 并逐渐靠近  $H_{\text{eff}}$ . 当  $t = t_1$  时,  $V_b = V_{b1}$  且  $V_{b1} > V_C$ ,  $H_{\text{eff}}$  迅速向  $xy$  平面偏转并与  $xy$  平面重合,  $m'$  及  $H'_{\text{eff}}$  为  $t_1$  时刻  $m$  及  $H_{\text{eff}}$  的位置, 如图 4(c) 所示.

当  $t_1 < t < t_2$  时,  $V_b = V_{b1}$  且  $V_{b1} > V_C$ ,  $m$  围绕  $H_{\text{eff}}$  做进动并不断靠近  $H_{\text{eff}}$ . 当  $t = t_2$  时,  $V_b = V'_{b2}$  且  $V'_{b2} < 0$  V,  $H_{\text{eff}}$  迅速向  $xy$  平面下方偏转,  $m'$  及  $H'_{\text{eff}}$  为  $t_2$  时刻  $m$  及  $H_{\text{eff}}$  的位置, 如图 4(d) 所示.

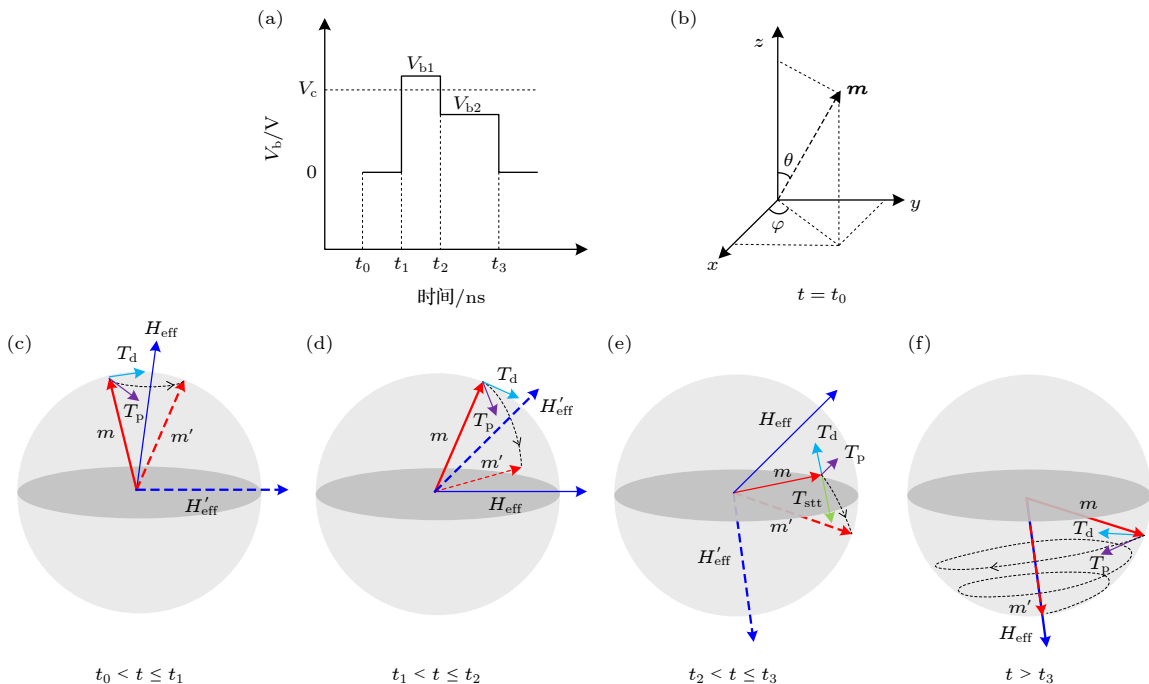


图 3 P 态切换到 AP 态时 STT 辅助 VCMA-MTJ 磁化动力学示意图

Fig. 3. Illustration of magnetization dynamics when STT assisted VCMA-MTJ switches from P state to AP state.

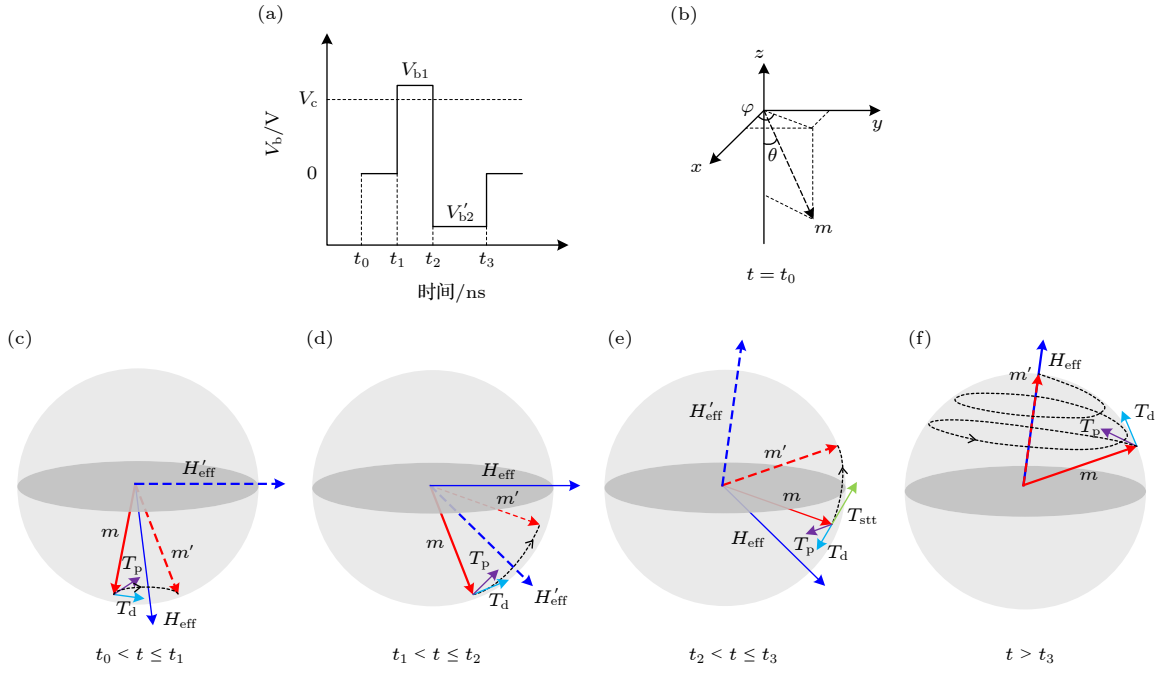


图 4 AP 态切换到 P 态时 STT 辅助 VCMA-MTJ 磁化动力学示意图

Fig. 4. Illustration of magnetization dynamics when STT assisted VCMA-MTJ switches from AP state to P state.

当  $t_2 < t < t_3$  时,  $V_b = V_{b2}$  且  $V'_{b2} < 0$  V, 在  $T_p$ ,  $T_d$  和  $T_{stt}$  的作用下,  $m$  围绕  $H_{eff}$  进动并偏转至  $xy$  平面上方, 同时带动  $H_{eff}$  迅速偏转至  $xy$  平面上方的难磁化轴上,  $m'$  及  $H'_{eff}$  为  $t_3$  时刻  $m$  及  $H_{eff}$  的位置, 如图 4(e) 所示.

当  $t > t_3$  时,  $V_b = 0$  V,  $m$  围绕新的  $H_{eff}$  做进动并不断向  $H_{eff}$  靠近, 如图 4(f) 所示. 此时  $m$  在  $z$  轴分量为正, MTJ 完成了从 AP 态到 P 态的状态切换.

### 3 基于工艺偏差的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型

众所周知, MTJ 在 NV-FA 中主要提供写入非易失性加数 ('0' 或 '1') 以及输出逻辑运算结果 (和或本位进位) 的功能. 其中写入功能是通过 NV-FA 写电路在 STT 辅助 VCMA-MTJ 两端产生电压脉冲信号, 使 MTJ 切换为 P 态或 AP 态, 来完成非易失性加数 '0' 或 '1' 的写入. 逻辑运算结果输出功能是利用 MTJ 在不同状态下电阻值变化较大的特性, 通过读取裕度 (SM) 来表征逻辑运算时流过一对不同状态 MTJ 的电流差, 根据电位放电速度的不同, 实现和或本位进位的输出.

在 MTJ 制备过程中, 薄膜生长工艺中的薄膜厚度偏差的存在会严重影响 MTJ 状态切换乃至

NV-FA 电路写入功能的实现; 而刻蚀工艺中形成的侧壁再沉积层会显著削弱 MTJ 在不同状态下电阻值变化较大的特性, 使 SM 降低, 从而降低 NV-FA 电路逻辑运算结果输出的正确性<sup>[19]</sup>.

本文将在分别考虑薄膜生长工艺偏差对 MTJ 状态切换影响以及刻蚀工艺偏差对 MTJ 读取裕度影响的情况下, 建立更为精确的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型.

#### 3.1 薄膜生长工艺偏差的影响

不同于 VCMA-MTJ 中只需考虑 VCMA 效应的影响, 对于 STT 辅助 VCMA-MTJ 还需考虑 STT 效应的影响, 此时其自由层磁化动力学可以用修正后的 LLG 方程描述<sup>[20]</sup>:

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma m \times H_{eff}(V_b) + \alpha m \times \frac{dm}{dt} - \frac{\gamma P J_{stt}}{2e\mu_0 t_f M_s} m \times (m \times m_r), \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为旋磁比,  $\alpha$  为 Gilbert 阻尼系数,  $m_r$  为参考层磁化方向,  $\hbar$  为约化普朗克常数,  $P$  为 STT 极化因子,  $J_{stt}$  为自旋电子流密度,  $e$  为电子电荷量,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $t_f$  为自由层厚度标准值,  $M_s$  为饱和磁化强度. 等式右侧各项依次为进动项、阻尼项和 STT 效应项.

$\mathbf{m}$  在直角坐标系中可以表示为

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

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  $V_b$  对  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  的影响时,  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  可以表示为

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

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

$\mathbf{H}_k$  与外加电压  $V_b$  有关, 可以进一步表示为

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

其中  $K_i$  为垂直磁各向异性系数,  $\xi$  为 VCMA 系数,  $t_{\text{ox}}$  为氧化层厚度标准值.

同时,  $\mathbf{m}$  还可以表示为

$$\mathbf{m} = e_x \sin\theta \cos\varphi + e_y \sin\theta \sin\varphi + e_z \cos\theta, \quad (5)$$

其中  $\theta$  为  $\mathbf{m}$  与  $z$  轴正半轴的夹角,  $\varphi$  为  $\mathbf{m}$  在  $x-y$  平面上投影向量与  $x$  轴正半轴的夹角. 可以看出,  $\mathbf{m}$  的动态可以由  $\theta$  和  $\varphi$  随时间的变化来描述, 而 MTJ 的状态可以由  $m_z$  (即  $m_z = \cos\theta$ ) 来确定.

由 Brinkman 电阻模型<sup>[21]</sup>, MTJ 电阻 ( $R_{\text{MTJ}}$ ) 随  $m_z$  的变化可以表示为

$$R_{\text{MTJ}} = \frac{t_{\text{ox}}(1 + \text{TMR}) \exp(C_e t_{\text{ox}} \bar{\varphi}^{1/2})}{FA \bar{\varphi}^{1/2} [1 + \text{TMR}(1 + m_z)/2]}, \quad (6)$$

其中 TMR 为隧穿磁阻率标准值,  $C_e$  为拟合因子,  $F$  为拟合系数,  $A$  为 MTJ 横截面积 (本文中 MTJ 横截面为圆形, 直径为  $d$ ),  $\bar{\varphi}$  为氧化层势垒高度.

进一步地, (1) 式中  $J_{\text{stt}}$  可以表示为

$$J_{\text{stt}} = - \frac{V_b F \bar{\varphi}^{1/2} [1 + \text{TMR}(1 + m_z)/2]}{t_{\text{ox}}(1 + \text{TMR}) \exp(C_e t_{\text{ox}} \bar{\varphi}^{1/2})}. \quad (7)$$

将 (2)—(7) 式代入 (1) 式, 忽略热噪声场的影响, 可以得到与图 3 和图 4 对应的  $\theta$  随时间的变化:

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \left[ (H_x - N_x M_s \sin\theta \cos\varphi)(\alpha \cos\theta \cos\varphi - \sin\varphi) + (H_y - N_y M_s \sin\theta \sin\varphi)(\alpha \cos\theta \sin\varphi + \cos\varphi) - (H_z + H_k \cos\theta - N_z M_s \cos\theta) \alpha \sin\theta \right], & t_1 < t \leq t_2, \\ \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \left[ (H_x - N_x M_s \sin\theta \cos\varphi)(\alpha \cos\theta \cos\varphi - \sin\varphi) + (H_y - N_y M_s \sin\theta \sin\varphi)(\alpha \cos\theta \sin\varphi + \cos\varphi) - (H_z + H_k \cos\theta - N_z M_s \cos\theta) \alpha \sin\theta \right] + \frac{\gamma \hbar P V_b F \bar{\varphi}^{1/2} \sin\theta [1 + \text{TMR}(1 + m_z)/2]}{2(1 + \alpha^2) e \mu_0 t_{\text{f}} M_s t_{\text{ox}} (1 + \text{TMR}) \exp(C_e t_{\text{ox}} \bar{\varphi}^{1/2})}, & t_2 < t \leq t_3. \end{cases} \quad (8)$$

本文中 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型用到的部分参数<sup>[20]</sup> 如表 1 所示.

本课题组前期研究了 MTJ 制备过程中薄膜生长工艺偏差对  $\mathbf{H}_k$  的影响<sup>[22]</sup>, 即:

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

其中,  $\gamma_{\text{tf}}$  和  $\gamma_{\text{tox}}$  分别为自由层厚度偏差和氧化层厚度偏差, 偏差越大表示薄膜厚度与标准值差距越大.

在此基础之上, 进一步研究  $\gamma_{\text{tf}}$  和  $\gamma_{\text{tox}}$  对于 STT 辅助 VCMA-MTJ 的  $J_{\text{stt}}$  的影响. 修正后的  $J_{\text{stt}}$  可以表示为

$$J_{\text{stt}} = - \frac{V_b F \bar{\varphi}^{1/2} [1 + \text{TMR}(1 + m_z)/2]}{t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}})(1 + \text{TMR}) \exp[t_{\text{ox}}(1 + \gamma_{\text{tox}}) C_e \bar{\varphi}^{1/2}]}. \quad (10)$$

下面以 STT 辅助 VCMA-MTJ 由 P 态切换至 AP 态为例, 研究电压脉冲信号、 $\gamma_{\text{tf}}$  及  $\gamma_{\text{tox}}$  对 MTJ 状态切换的影响.

图 5 给出了当保持  $V_{b1}$  的宽度为 0.18 ns,  $V_{b2}$  的宽度为 0.4 ns 不变时,  $V_{b1}, V_{b2}$  及  $\gamma_{\text{tf}}$  对 MTJ 状态切换的影响. 可以看出,  $\gamma_{\text{tf}}$  会影响 VCMA 效应. 在  $\gamma_{\text{tf}} = 0$  条件下, 当  $V_{b1} = 1.1$  V,  $V_{b2} = 0.7$  V 时, 由于  $V_{b1}$  未达到  $V_c$ , 因此 MTJ 无法实现状态切换; 当  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2} = 0.7$  V 时, 可以实现状态切换; 当  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2} = -0.7$  V 时, 由于此时  $V_{b2}$  为负, 不满足使 MTJ 从 P 态切换到 AP 态的电压脉冲信号条件, 因此无法实现状态切换. 在  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2} = 0.7$  V 条件下, 随着  $\gamma_{\text{tf}}$  的增大,  $\mathbf{H}_k$  降低,  $m_z$  翻转速度加快, 当  $\gamma_{\text{tf}} \leq 5\%$  时, MTJ 能够从 P 态切换至 AP 态; 当  $\gamma_{\text{tf}} = 6\%$  时, 0.18 ns 的  $V_{b1}$  宽度已经不匹配当前的  $m_z$  翻转速度, 因此无法实现状态切换.

图 6 给出了在  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2} = 0.7$  V 条件下,  $\gamma_{\text{tox}}$  对 MTJ 状态切换的影响. 可以看出, 当  $\gamma_{\text{tox}} \leq 0.6\%$  时, MTJ 能够从 P 态切换至 AP 态; 当  $\gamma_{\text{tox}} \geq 0.7\%$  时, MTJ 无法实现状态的切换. 这是由于  $\gamma_{\text{tox}}$

会严重影响 STT 效应, 随着  $\gamma_{\text{tox}}$  的增大,  $J_{\text{stt}}$  迅速减小, 导致自旋电子流产生的  $T_{\text{stt}}$  驱动  $m_z$  翻转的能力下降, 因此 MTJ 无法实现状态切换。

表 1 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型部分参数列表

Table 1. Partial parameters of the STT assisted VCMA-MTJ model.

参数	符号	值
自由层厚度标准值	$t_f$	1.1 nm
氧化层厚度标准值	$t_{\text{ox}}$	1.4 nm
MTJ 横截面直径	$d$	50 nm
Gilbert 阻尼系数	$\alpha$	0.05
STT 极化因子	$P$	0.58
饱和磁化强度	$M_s$	$0.625 \times 10^6$ A/m
垂直磁各向异性系数	$K_i$	$0.32$ mJ/m <sup>2</sup>
VCMA 系数	$\xi$	$60$ fJ/(V·m)
氧化层势垒高度	$\bar{\varphi}$	$0.4$ eV
隧穿磁阻率标准值	TMR	100%
外磁场在 $x$ 轴分量	$H_x$	$31830$ A/m
$x, y$ 轴退磁因子	$N_{x, y}$	$0.0168$
$z$ 轴退磁因子	$N_z$	$0.966$
旋磁比	$\gamma$	$2.21 \times 10^5$ m/(A·s)
拟合系数	$F$	$11.2727$ (m· $\Omega$ ·eV <sup>1/2</sup> ) <sup>-1</sup>
拟合因子	$C_c$	$1.025$ (m·eV <sup>1/2</sup> ) <sup>-1</sup>

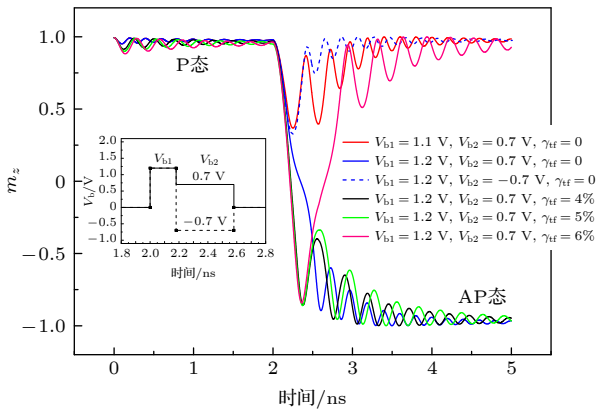


图 5  $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$  及  $\gamma_{\text{tf}}$  对 STT 辅助 VCMA-MTJ 状态切换的影响, 其中插图是  $V_b$  的设置

Fig. 5. Effects of  $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$  and  $\gamma_{\text{tf}}$  on the state switching of STT assisted VCMA-MTJ, in which the inset represents the setting of  $V_b$ .

### 3.2 刻蚀工艺偏差的影响

在 MTJ 制备过程中通常采用离子束刻蚀技术 (IBE)<sup>[23]</sup>, 但刻蚀过程中将会不可避免地产生具有磁性的非挥发性刻蚀产物, 对于沟槽深度较大或者宽度较小的 MTJ, 磁性粒子则无法全部飞出槽

外, 导致部分粒子附着在侧壁上, 聚集形成侧壁再沉积层<sup>[24]</sup>。

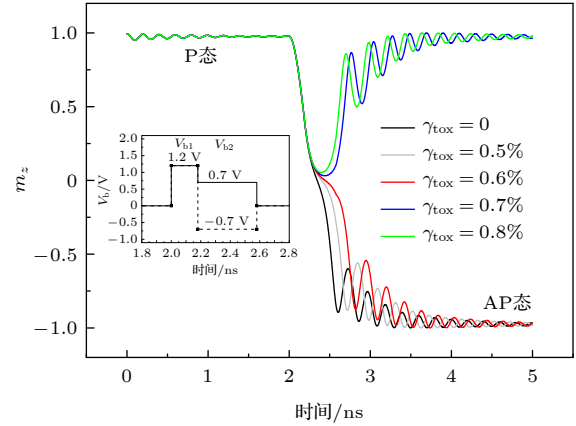


图 6  $\gamma_{\text{tox}}$  对 STT 辅助 VCMA-MTJ 状态切换的影响, 其中插图是  $V_b$  的设置

Fig. 6. Effect of  $\gamma_{\text{tox}}$  on the state switching of STT assisted VCMA-MTJ, in which the inset represents the setting of  $V_b$ .

对于以 VCMA 效应为主的 VCMA-MTJ 而言, 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<sup>[22,25]</sup>, 从而影响自由层磁化方向的稳定翻转, 因此需要重点考虑。

对于兼具 VCMA 效应和 STT 效应的 STT 辅助 VCMA-MTJ 而言, 一方面, 在  $V_{b1}$  作用下的 VCMA 效应持续时间较短, 其作用仅在于使  $m$  向  $xy$  平面靠近即可, 此时侧壁再沉积层对自由层垂直磁各向异性场的影响较小; 另一方面, 自由层磁化方向的有效翻转是通过后续  $V_{b2}$  作用下的 STT 效应实现的, 应重点考虑。从 (7) 式可以看出,  $J_{\text{stt}}$  与 TMR 密切相关, 而侧壁再沉积层会在 MTJ 的侧壁上形成连接自由层和参考层的导电通路, 引发短路电流<sup>[26,27]</sup>, 因此 MTJ 在不同状态下的电阻差距将缩小, TMR 降低<sup>[15,28]</sup>。

可以通过隧穿磁阻率偏差 ( $\beta$ ) 来表征侧壁再沉积层引起的 TMR 变化, 即

$$\beta = \frac{\text{TMR} - \text{TMR}_s}{\text{TMR}} \times 100\%, \quad (11)$$

其中,  $\text{TMR}_s$  为考虑刻蚀工艺偏差后的隧穿磁阻率实际值。

进一步地, 考虑刻蚀工艺偏差后的 SM 可以表示为

$$\text{SM} = \frac{V_{\text{dd}}}{R_{\text{p}}} \left[ 1 - \frac{1}{1 + (1 - \beta)\text{TMR}} \right]. \quad (12)$$

图 7 给出了不同  $\beta$  下, SM 随 TMR 的变化. 可以看出, SM 随 TMR 的增大而升高, 随  $\beta$  的增大而降低, 且当 TMR = 100% 时, 随着  $\beta$  从 0 增大到 30%, SM 从 5  $\mu\text{A}$  下降到 4.125  $\mu\text{A}$ , 下降高达 17.5%. 可见刻蚀工艺偏差产生的侧壁再沉积层使 MTJ 输出逻辑运算结果的容错能力下降, 因此更容易受到 CMOS 电路中晶体管工艺偏差的干扰, 甚至引发逻辑运算结果输出错误.

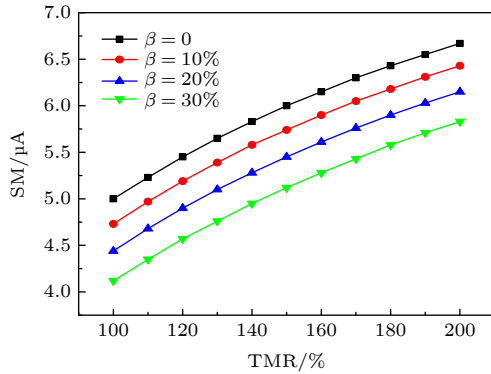


图 7 不同  $\beta$  下, SM 随 TMR 的变化  
Fig. 7. SM versus TMR with different  $\beta$ .

综上所述, 薄膜生长工艺偏差导致的自由层和氧化层厚度不均匀会影响 STT 辅助 VCMA-MTJ 状态的切换的稳定性, 甚至无法实现状态切换, 进而影响 NV-FA 的写入; 而刻蚀工艺偏差引起的侧

壁再沉积层会降低 MTJ 的 SM, 进而影响 NV-FA 输出逻辑运算结果. 下面将基于上述 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型, 进一步研究工艺偏差对于 NV-FA 电路写入功能和逻辑运算结果输出功能的影响.

#### 4 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型在 NV-FA 中的应用

图 8 给出了典型的 NV-FA 电路<sup>[29]</sup>, 其中 MTJ0 和 MTJ2 的状态相同, MTJ1 和 MTJ3 的状态相同且始终与 MTJ0 的状态相反.  $V_{\text{dd}}$  为逻辑运算驱动电压, CLK 为时钟信号, 输入为  $A$ ,  $B$  和  $C_i$ , 输出为 Sum 和  $C_o$ ,  $/A$ ,  $/B$  和  $/C_i$  分别为  $A$ ,  $B$  和  $C_i$  的反相信号. 其中  $A$  和  $C_i$  分别为加数和低位进位, 为外部输入的电位信号,  $B$  为非易失性加数, 当 MTJ 处于 P 态时  $B = '1'$ , 当 MTJ 处于 AP 态时  $B = '0'$ , Sum 和  $C_o$  分别为逻辑运算的和以及本位进位.  $V_{\text{VCMA}}$  为 NV-FA 写电路的 VCMA 效应电压,  $V_{\text{STT0}}$  和  $V_{\text{STT1}}$  分别为写 '0' 和写 '1' 时的 STT 效应电压,  $P_{\text{VCMA}}$ ,  $P_{\text{STT0}}$  和  $P_{\text{STT1}}$  分别为控制上述电压宽度的电压脉冲信号,  $/P_{\text{VCMA}}$ ,  $/P_{\text{STT0}}$  和  $/P_{\text{STT1}}$  分别为其反相信号. 以 MTJ0 为例, 蓝色部分电路构成了对 MTJ0 的 NV-FA 写电路.

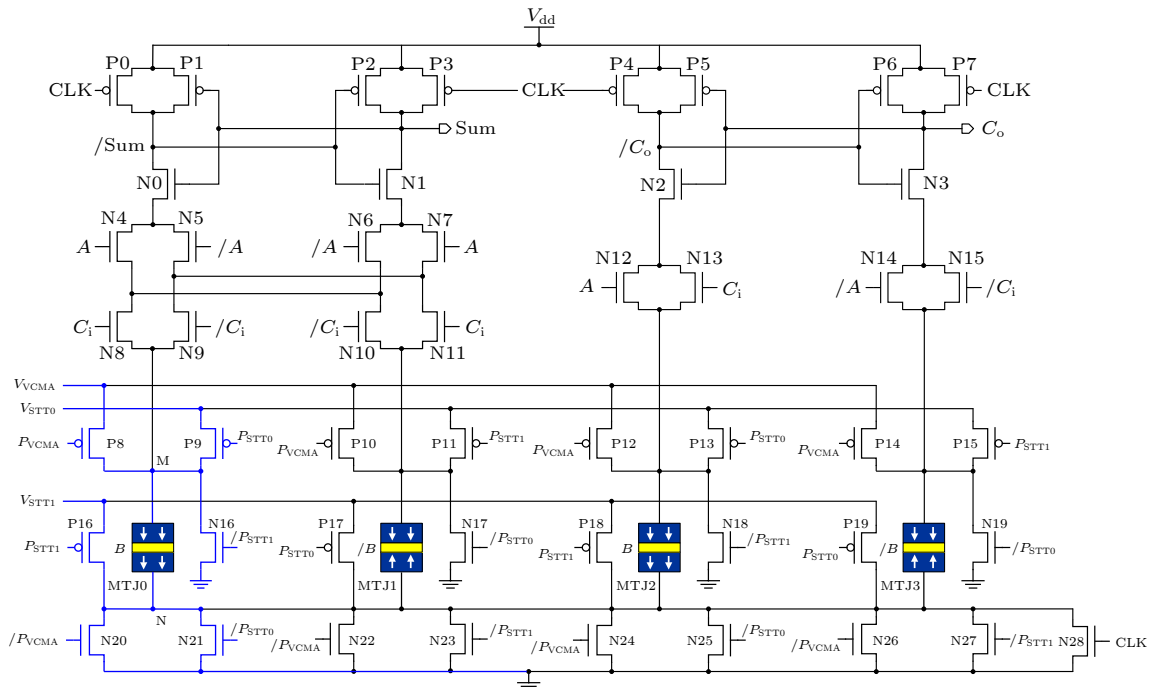


图 8 NV-FA 电路

Fig. 8. Circuit of NV-FA.

Sum 和  $C_0$  与  $A$ ,  $B$  和  $C_i$  的逻辑关系可以表示为

$$\text{Sum} = ABC_i + \overline{ABC}_i + \overline{ABC}_i + \overline{ABC}_i, \quad (13)$$

$$C_0 = AB + AC_i + BC_i. \quad (14)$$

NV-FA 写电路及 NV-FA 电路仿真波形分别如图 9 及图 10 所示, 其中  $V_{\text{VCMA}} = 1.3 \text{ V}$ ,  $V_{\text{STT0}} = 0.8 \text{ V}$ ,  $V_{\text{STT1}} = 0.8 \text{ V}$ ,  $V_{\text{dd}} = 1.0 \text{ V}$ ,  $V_b$  为 M, N 之间的电位差.

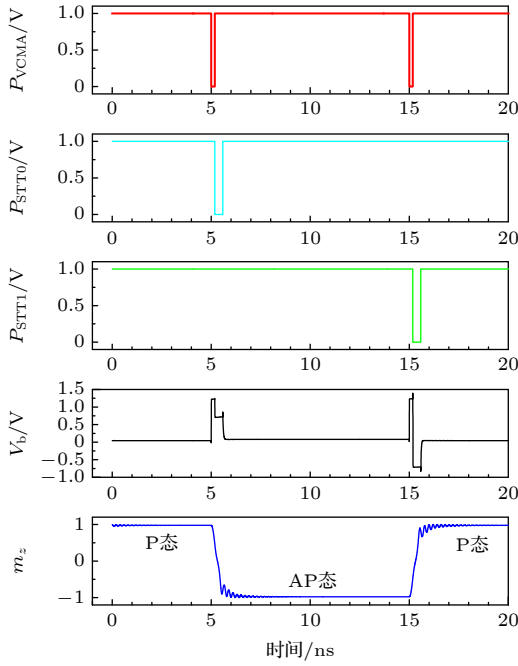


图 9 NV-FA 写电路仿真波形

Fig. 9. Simulation waveform of the writing circuit of NV-FA.

NV-FA 通过电位放电速度的不同来实现逻辑运算结果的输出. 以 Sum 为例, N0 所在的支路为第零支路, N1 所在的支路为第一支路. 当  $\text{CLK} = '0'$  时, P0 和 P3 导通, N28 关断,  $V_{\text{dd}}$  将 Sum 和 /Sum 上拉到高电位; 当  $\text{CLK} = '1'$  时, P0-P3 关断, N28 导通, 当第零支路的总电阻小于第一支路的总电阻时, /Sum 电位下降速度快于 Sum 电位, 当 /Sum 下降至低电位时, P2 导通, N1 关断, Sum 被迅速上拉至高电位, 输出 '1'; 当第零支路的电阻大于第一支路的电阻时, Sum 电位下降速度快于 /Sum 电位, 当 Sum 下降至低电位时, P1 导通, N0 关断, /Sum 被迅速上拉至高电位, 使 N1 持续导通, Sum 保持低电位, 输出 '0'. 类似的, 同样可以实现  $C_0$  的正确输出.

进一步在考虑工艺偏差影响的情况下, 可认为 NV-FA 中每一个 MTJ 的  $t_f$ ,  $t_{\text{ox}}$  和 TMR 均服从高斯分布 [30], 即:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (15)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (16)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2\right]^{1/2}, \quad (17)$$

其中,  $x$  可以替换为  $t_f$ ,  $t_{\text{ox}}$  和 TMR 参数,  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为标准差,  $n$  为 MTJ 总个数,  $x_i$  为第  $i$  个 MTJ 对应的参数. 本文利用  $3\sigma/\mu$  来表征工艺偏差参数

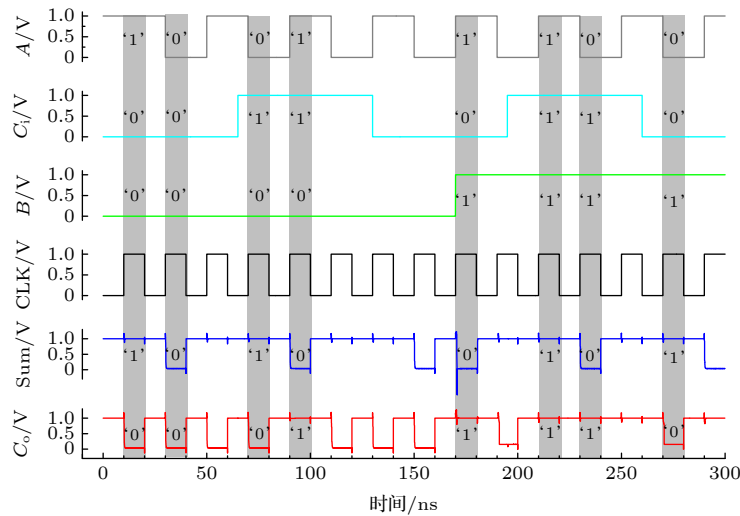


图 10 NV-FA 仿真波形

Fig. 10. Simulation waveform of NV-FA.

的分布范围, 通过 Verilog-A 语言建立更为精确的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型, 进一步通过蒙特卡罗仿真研究工艺偏差对 NV-FA 写入功能和逻辑运算结果输出功能的影响.

#### 4.1 工艺偏差对 NV-FA 写入功能的影响

图 11(a) 和 (b) 分别给出了在考虑薄膜生长工艺偏差影响的情况下, NV-FA 写电路在写‘0’和写‘1’时的蒙特卡罗仿真波形, 其中  $n = 100$ ,  $3\sigma/\mu =$

0.03,  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b1}$  宽度为 0.18 ns,  $V_{b2}$  宽度为 0.4 ns, 写‘0’时  $V_{b2} = 0.7$  V, 写‘1’时  $V_{b2} = -0.7$  V. 结果表明, 受工艺偏差的影响, 写‘0’和写‘1’操作时分别有 44% 和 46% 的 MTJ 无法实现状态切换, 即发生了写入错误.

图 12(a) 和 (b) 分别给出了 NV-FA 写电路写‘0’和写‘1’的错误率随  $V_{b1}$  及  $V_{b2}$  的变化曲线. 可以看出, 当  $V_{b2} = 0.7$  V,  $V_{b1}$  从 1.2 V 增大到 1.3 V 时, 写‘0’错误率降低了 38%; 当  $V_{b2} = -0.7$  V,

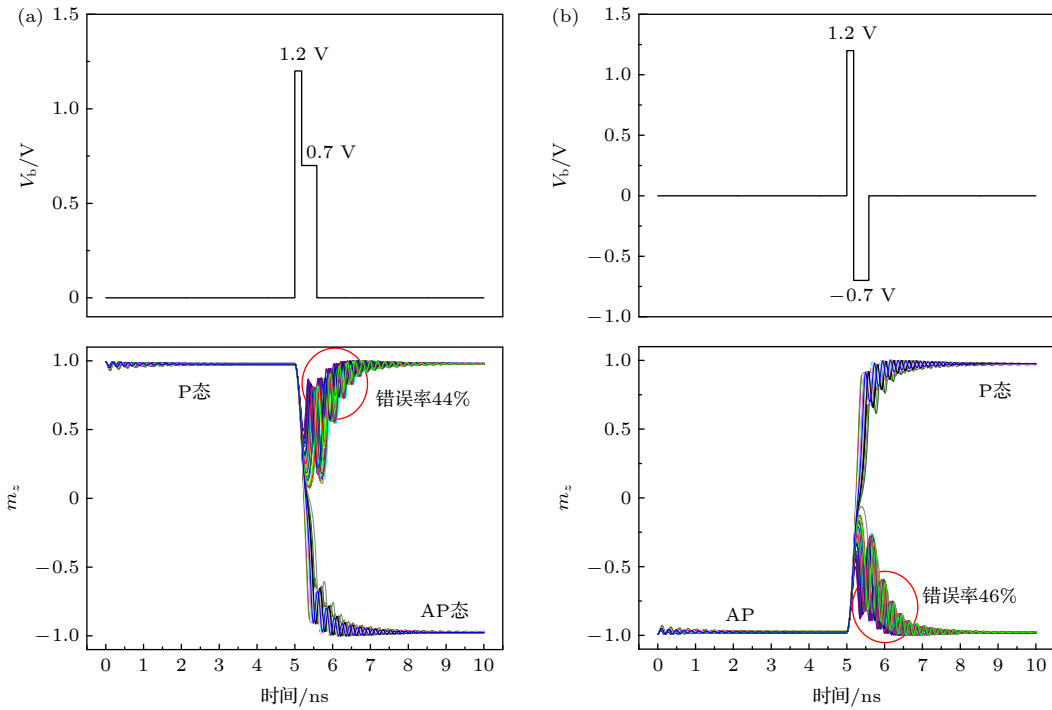


图 11 STT 辅助 VCMA-MTJ 写电路的蒙特卡罗仿真波形 (a) 写‘0’; (b) 写‘1’

Fig. 11. Monte Carlo simulation waveform of the writing circuit of STT assisted VCMA-MTJ: (a) Writing ‘0’; (b) writing ‘1’.

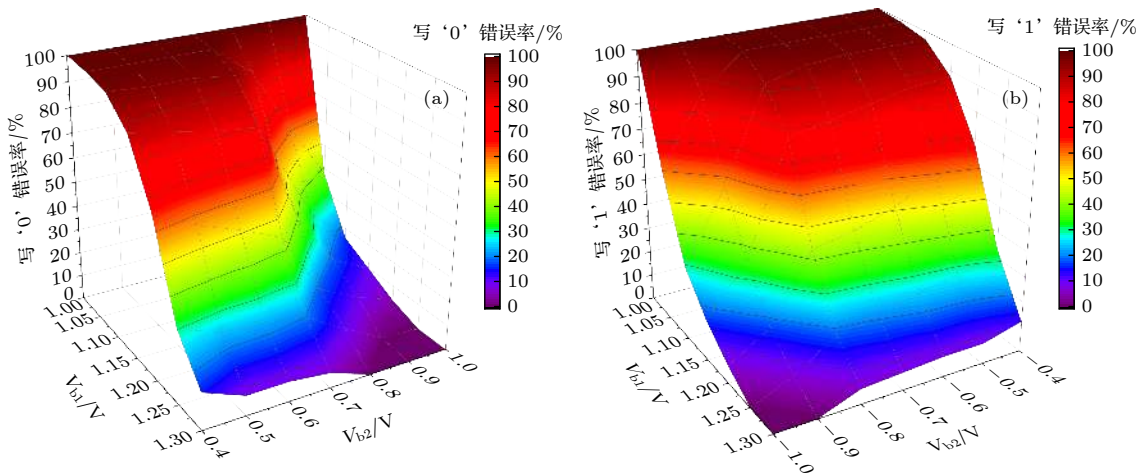


图 12 写入错误率随  $V_{b1}$  和  $V_{b2}$  的变化 (a) 写‘0’的错误率; (b) 写‘1’的错误率

Fig. 12. Writing error rate versus  $V_{b1}$  and  $V_{b2}$ : (a) Writing ‘0’; (b) writing ‘1’.

$V_{b1}$  从 1.2 V 增大到 1.3 V 时, 写‘1’错误率降低了 39%. 当  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2}$  从 0.7 V 增大到 0.9 V 时, 写‘0’错误率降低了 34%; 继续增大  $V_{b2}$  将不会显著降低写‘0’错误率; 当  $V_{b1} = 1.2$  V,  $V_{b2}$  从 -0.7 V 减小到 -0.9 V 时, 写‘1’错误率降低了 29%; 继续减小  $V_{b2}$  将不会显著降低写‘1’错误率. 虽然通过上述方法可以降低 NV-FA 电路的写入错误率, 但同时也会增大电路的功耗, 因此在设计和应用时需要折中考虑.

#### 4.2 工艺偏差对 NV-FA 逻辑运算结果输出功能的影响

图 13 给出了在考虑刻蚀工艺偏差影响的情况下,  $B = '0'$  时 NV-FA 的蒙特卡罗仿真波形, 其中  $n = 100$ ,  $3\sigma/\mu = 0.03$ ,  $V_{dd} = 1.0$  V. 结果表明, 受刻蚀工艺偏差的影响, Sum 和  $C_o$  均发生了逻辑运

算结果输出错误.

图 14(a) 和 (b) 分别给出了不同信号情况下 Sum 和  $C_o$  的错误率随  $V_{dd}$  的变化. 可以看出, 当  $V_{dd}$  从 0.4 V 增大到 0.5 V 时, Sum 的位错误率降低了 26%; 当  $V_{dd}$  从 0.5 V 增大到 1.0 V 时, Sum 的位错误率降低了 25%. 当  $A = '0'$ ,  $C_i = '0'$  时,  $C_o$  错误率保持 0 不变, 这是由于此时图 9 所示 NV-FA 电路中 N12 和 N13 关断, N14 和 N15 导通, 且 MOS 管关断电阻远大于 P 态及 AP 态 MTJ 电阻, 进而 N12, N13 及 MTJ2 构成的支路其总电阻始终大于 N14, N15 及 MTJ3 支路的总电阻,  $C_o$  电位放电速度快于  $C_o$  电位,  $C_o$  始终输出‘0’, 因此  $C_o$  错误率为 0. 同样, 当  $A = '1'$ ,  $C_i = '1'$  时,  $C_o$  错误率保持 0 不变. 在其他情况下, 当  $V_{dd}$  从 0.4 V 增大到 0.5 V 时,  $C_o$  的位错误率降低了 18%; 当  $V_{dd}$  从 0.5 V 增大到 1.0 V 时,  $C_o$  的位错误率降低

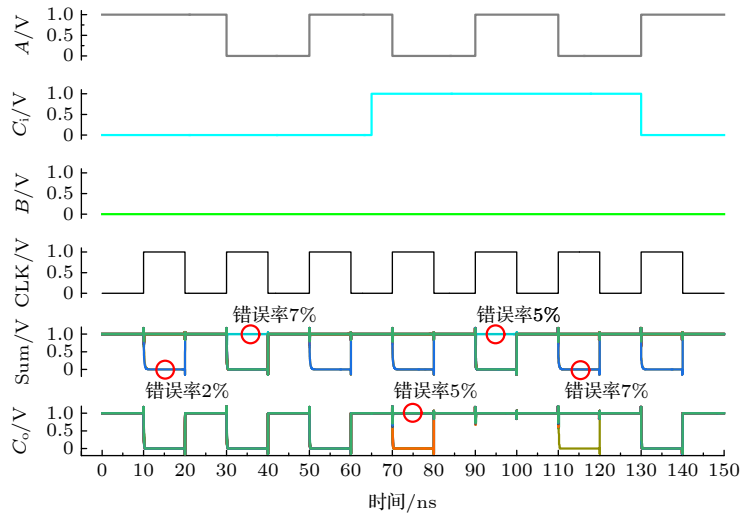


图 13 NV-FA 的蒙特卡罗仿真波形, 其中  $n = 100$ ,  $3\sigma/\mu = 0.03$ ,  $V_{dd} = 1.0$  V

Fig. 13. Monte Carlo simulation waveform of NV-FA with  $n = 100$ ,  $3\sigma/\mu = 0.03$ ,  $V_{dd} = 1.0$  V.

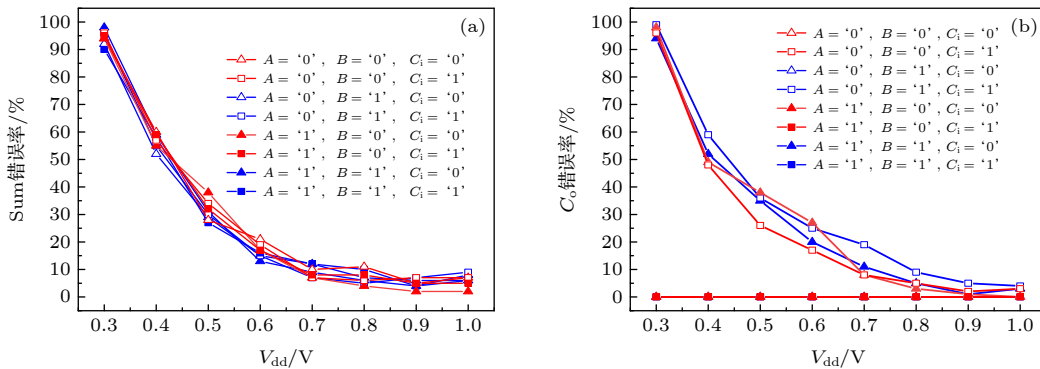


图 14 不同信号下错误率随  $V_{dd}$  的变化 (a) Sum 错误率; (b)  $C_o$  错误率

Fig. 14. Error rate versus  $V_{dd}$  under different signals: (a) Error rate of Sum; (b) error rate of  $C_o$ .

了 31%. 显然, 适当增大  $V_{dd}$  可有效降低 NV-FA 电路逻辑运算结果输出的错误率, 但同时也会增大电路的功耗, 因此在设计和应用时需要折中考虑.

图 15 分别给出了本文基于 STT 辅助 VCMA-MTJ 的 NV-FA(NV-FA1) 与文献 [31] 中基于 STT-MTJ 的 NV-FA(NV-FA2) 的输出错误率随  $V_{dd}$  变化的对比情况. 可以看出, 当  $V_{dd} \leq 0.6$  V 时, 与文献 [31] 中 NV-FA2 相比, 本文设计的 NV-FA1 输出错误率改善均大于 24.6%; 当  $V_{dd} \geq 0.7$  V 时, NV-FA1 与 NV-FA2 具有相比拟的输出错误率, 且均低于 12.5%.

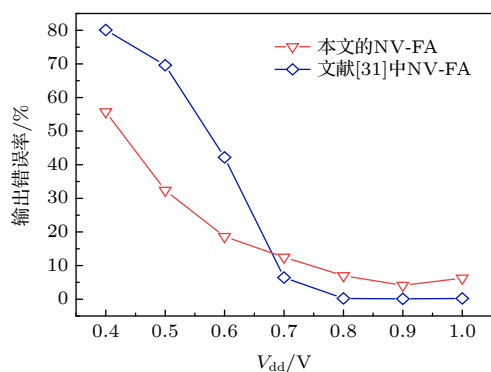


图 15 两款 NV-FA 输出错误率随  $V_{dd}$  变化情况的比较

Fig. 15. The sensing error rate versus  $V_{dd}$  in two types of NV-FA.

## 5 结 论

随着 MTJ 尺寸的不断缩小以及芯片集成度的不断提高, MTJ 制备过程中的薄膜生长工艺偏差和刻蚀工艺偏差的存在将会导致 MTJ 状态切换变得不稳定, 并降低 MTJ 的读取裕度, 甚至会严重影响 NV-FA 电路中非易失性加数写入功能和逻辑运算结果输出功能的正确性. 本文通过磁化动力学分析, 在充分考虑薄膜生长工艺中  $\gamma_{tf}$ ,  $\gamma_{tox}$  以及刻蚀工艺中  $\beta$  影响的情况下, 建立了更为精确的 STT 辅助 VCMA-MTJ 电学模型. 研究表明,  $\gamma_{tf}$  对  $H_k$  起主要作用, 且  $H_k$  随  $\gamma_{tf}$  的增大而降低, 当  $\gamma_{tf} \geq 6\%$  时, MTJ 将无法完成状态切换;  $\gamma_{tox}$  对  $J_{stt}$  起主要作用, 且  $J_{stt}$  随  $\gamma_{tox}$  的增大而迅速减小, 当  $\gamma_{tox} \geq 0.7\%$ , MTJ 也将无法实现状态切换. 同时, 随着  $\beta$  增大到 30%, SM 降低高达 17.5%, 会严重影响 NV-FA 的逻辑运算结果输出的正确性. 进一步地, 将上述电学模型应用到 NV-FA 电路中, 通过蒙特卡罗仿真研究了上述两种工艺偏差对 NV-

FA 电路中非易失性加数写入功能错误率和逻辑运算结果输出功能错误率的影响. 结果表明, 在写入功能中当  $V_{b1}$  从 1.2 V 增大到 1.3 V 时, 写‘0’和写‘1’对应的错误率分别降低了 38% 和 39%; 当  $V_{b1}$  不变,  $V_{b2}$  从 0.7 V 增大到 0.9 V 时, 写‘0’对应的错误率降低了 34%,  $V_{b2}$  从 -0.7 V 减小到 -0.9 V 时, 写‘1’对应的错误率降低了 29%. 在输出功能中当  $V_{dd}$  从 0.5 V 增大到 1.0 V 时, Sum 和  $C_0$  错误率平均值也分别降低了 25% 和 31%. 本文的研究工作将对 STT 辅助 VCMA-MTJ 及 NV-FA 电路的优化设计和可靠性分析提供有益参考.

## 参考文献

- [1] Verma G 2020 *Global Conference on Wireless and Optical Technologies (GCWOT)* Malaga, Spain, October 6-8, 2020 p1
- [2] Deng E Y, Zhang Y, Klein J O, Ravelsona D, Chappert C, Zhao W S 2013 *IEEE Trans. Magn.* **49** 4982
- [3] Cai H, Jiang H L, Han M L, Wang Z H, Wang Y, Yang J, Han J, Liu L B, Zhao W S 2019 *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)* Miami, USA, July 1, 2019 p111
- [4] Shreya S, Jain A, Kaushik B K 2020 *Microelectron. J.* **109** 104943
- [5] Roohi A, Zand R, Fan D, DeMara R F 2017 *IEEE Trans. Comput. AD. D.* **36** 2134
- [6] Sharmin S, Jaiswal A, Roy K 2016 *IEEE Trans. Electron. Devices* **63** 3493
- [7] Wang Y, Cai H, Naviner L, Zhang Y, Zhao X X, Deng E Y, Klein J O, Zhao W S 2016 *IEEE Trans. Electron. Devices* **63** 1762
- [8] Long M Z, Zeng L, Gao T Q, Zhang D M, Qin X W, Zhang Y G, Zhao W S 2018 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **17** 492
- [9] Kanai S, Nakatani Y, Yamanouchi M, Ikeda S, Sato H, Matsukura F, Ohno H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 212406
- [10] Zarei A, Safaei F 2018 *Microelectron. J.* **82** 62
- [11] Wang Y, Cai H, Naviner L, Zhao X X, Zhang Y, Slimani M, Klein J O, Zhao W S 2016 *Microelectron. Reliab.* **64** 26
- [12] Meng H, Lum W H, Sbiaa R, Lua S Y H, Tan H K 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 033904
- [13] Chun S W, Kim D, Kwon J 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 07C722
- [14] Jeong J, Endoh T 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 04CE09
- [15] Ji M H, Pan L, Hu Y G, Pan M C, Yang L, Peng J P, Qiu W C, Hu J F, Zhang Q, Li P S 2019 *AIP Adv.* **9** 085317
- [16] Amiri P K, Alzate J G, Cai X Q, Ebrahimi F, Hu Q, Wong K, Grezes 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 Trans. Magn.* **51** 1
- [17] Liu Y W, Zhang Z Z 2013 *Sci. China Phys. Mech.* **56** 184
- [18] Niranjan M K, Duan C G, Jaswal S S, Tsymbal E V 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 222504
- [19] Zhao W S, Zhao X X, Zhang B Y, Cao K H, Wang L Z, Kang W, Shi Q, Wang M X, Zhang Y, Wang Y, Peng S Z, Klein J O, Naviner L, Ravelsona D 2016 *Materials* **9** 41
- [20] Kang W, Ran Y, Zhang Y G, Lv W F, Zhao W S 2017 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **16** 387
- [21] Brinkman W F, Dynes R C, Rowell J M 1970 *J. Appl. Phys.*

- 41 1915
- [22] 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]
- [23] 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 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 132408
- [24] Chen E, Schwarz B, Choi C J, Kula W, Wolfman J, Ounadjela K, Geha S 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8379
- [25] Wu L Z, Taouil M, Rao S, Marinissen E J, Hamdioui S 2018 *IEEE International Test Conference (ITC)* Phoenix, USA, October 29–November 1, 2018 p18412682
- [26] Sugiura K, Takahashi S, Amano M, Kajiyama T, Iwayama M, Asao Y, Shimomura N, Kishi T, Ikegawa S, Yoda H, Nitayama A 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 08HD02
- [27] Kinoshita K, Utsumi H, Suemitsu K, Hada H, Sugibayashi T 2010 *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** 08JB02
- [28] Kinoshita K, Yamamoto T, Honjo H, Kasai N, Ikeda S, Ohno H 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 08HA01
- [29] Deng E Y, Wang Y, Wang Z H, Klein J O, Dieny B, Prenat G, Zhao W S 2015 *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures* Boston, USA, July 8–10, 2015 p27
- [30] Li J, Augustine C, Salahuddin S, Roy K 2008 *Proceedings of the 45th annual Design Automation Conference* New York, USA, June 8–13, 2008 p278
- [31] Cai H, Wang Y, Naviner L, Zhao W S 2017 *IEEE T. Circuits-I* **64** 847

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

Jin Dong-Yue<sup>1)</sup> Cao Lu-Ming<sup>1)</sup> Wang You<sup>2)</sup> Jia Xiao-Xue<sup>1)</sup>  
 Pan Yong-An<sup>1)</sup> Zhou Yu-Xin<sup>1)</sup> Lei Xin<sup>1)</sup> Liu Yuan-Yuan<sup>1)</sup>  
 Yang Ying-Qi<sup>1)</sup> Zhang Wan-Rong<sup>1)†</sup>

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

2) (*Hefei Innovation Research Institute, Beihang University, Hefei 230013, China*)

( Received 12 September 2021; revised manuscript received 9 January 2022 )

## Abstract

As one of the key components in the non-volatile full adder (NV-FA), spin transfer torque assisted voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction (STT assisted VCMA-MTJ) will possess superior development prospects in internet of things, artificial intelligence and other fields due to its fast switching speed, low power consumption and good stability. However, with the downscaling of magnetic tunnel junction (MTJ) and the improvement of chip integration, the effects of process deviation on the performances of MTJ device as well as NV-FA circuit become more and more important. Based on the magnetization dynamics of STT assisted VCMA-MTJ, a new electrical model of STT assisted VCMA-MTJ, in which the effects of the film growth variation and the etching variation are taken into account, is established to study the effects of the above deviations on the performances of MTJ device and NV-FA circuit. It is shown that the MTJ state fails to be switched under the free layer thickness deviation  $\gamma_{\text{tf}} \geq 6\%$  or the oxide layer thickness deviation  $\gamma_{\text{tox}} \geq 0.7\%$ . The sensing margin (SM) is reduced by 17.5% as the tunnel magnetoresistance ratio deviation  $\beta$  increases to 30%. The writing error rate can be effectively reduced by increasing  $V_{\text{b1}}$ , and increasing  $V_{\text{b2}}$  when writing '0' or reducing  $V_{\text{b2}}$  when writing '1' in the NV-FA circuit. The output error rate can also be effectively reduced by increasing the driving voltage of logical operation  $V_{\text{dd}}$ .

**Keywords:** magnetic tunnel junction, spin transfer torque, voltage controlled magnetic anisotropy magnetic, process deviation

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

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211700

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61006059, 61774012, 61901010), Natural Science Foundation of Beijing, 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: [wrzhang@bjut.edu.cn](mailto:wrzhang@bjut.edu.cn)