

# 磁存储器环形带切口结构自由层磁化反转的微磁模拟\*

郝建红<sup>†</sup> 高辉

(华北电力大学, 电气与电子工程学院, 北京 102206)

(2012年7月4日收到; 2012年9月27日收到修改稿)

针对基于磁性隧道结的赝自旋阀磁随机存储器, 使用带斜面切口环形结构自由层, 抛弃采用厚度改变矫顽力的方式, 降低了磁性隧道结的面积电阻, 改进了垂直电流磁随机存储器. 通过集成工艺中淀积的二次效应生成磁环的切口, 利用微磁学方法计算分析了自由层的磁化反转特性, 结果表明该模型具有低串扰、低面积电阻、高磁阻率以及较强的抗干扰性能.

**关键词:** 自由层结构, 磁化翻转, 微磁, VMRAM

**PACS:** 75.70.AK, 75.90.+W, 75.40.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.62.057502

## 1 引言

基于磁性隧道结 (magnetic tunneling junction, MTJ) 的磁随机存储器 (magnetoresistive random-access memory, MRAM) 因具有传统半导体存储器所不具备的诸多优势<sup>[1,2]</sup>, 近几年来一直都是国际学术界关注的焦点, 也是产业界投入巨资予以研究开发的重点项目和产品. 2006年之前, 人们研究的主要是传统的交换偏置自旋阀 (exchange-biased spin-valve, EB-SV) 型 MTJs<sup>[3]</sup>, 这种 MTJs 具有铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层/反铁磁层结构, 然而 EB-SV 型 MTJs 存在明显的缺点和不足. 在 EB-SV 型 MTJs 中, 反铁磁钉扎层中的 Mn 原子在高温退火时向相邻的铁磁电极层和绝缘势垒层扩散, 从而导致隧穿磁电阻 (tunnel magnetoresistance, TMR) 值下降<sup>[4,5]</sup>. 为了克服反铁磁钉扎层带来的上述不良影响, 人们提出了非钉扎的赝自旋阀 (pseudo-spin-valve, PSV) 型 MTJs, PSV 型 MTJs 结构为铁磁层/非磁绝缘层/铁磁层三明治结构. PSV 型 MTJs 中两铁磁层的矫顽力不同, 通过外磁场来实现两铁磁层磁

矩的平行与反平行排列, 从而导致 TMR 效应的产生. PSV 型 MTJs 中固定层和自由层一般采用相同的材料, 但是厚度不同, 矫顽力的差别正是通过厚度的变化来实现的. 虽然 PSV 型 MTJs 的 TMR 值很高, 热稳定性也很好, 但是其面积电阻 RA 值较高, 不能满足实际应用的要求. 据文献报道 RA 值则应低于  $4\Omega \cdot \mu\text{m}^2$  才能满足实际需要<sup>[6,7]</sup>, 但目前所能获得的最佳 PSV 型 MTJs 的 RA 值仍比这一数值高出 2 个数量级. 通常状况下, 导体的电阻与厚度成正比, 通过微磁学模拟发现, 为了获得差距较大的矫顽力, PSV 型 MTJs 中固定层和自由层厚度的变化往往需要相差几十倍, 若可以通过较薄的固定层和自由层厚度来获得较大的矫顽力对比, 便可以成倍减低 RA, 提升 MRAM 在存储器市场中的竞争力. 基于此考虑, 本文通过对自由层进行切口设计, 达到在较薄厚度情况下获得较大的矫顽力改变和降低 RA 的目的.

当前, MRAM 翻转单元多是平行于膜面的字线电流驱动翻转, 要求磁体有简单、稳定、可重复、可以在尽可能短的时间内切换磁化状态的特性<sup>[8]</sup>. 人们制备了很多不同形状的具有简单结构

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10775018) 和科技部国际科技合作项目 (批准号: 2011DFR00780) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: jianhonghao@ncepu.edu.cn

的磁体, 期望通过改变存储单元的形貌得到简单的磁化状态, 来达到缩短读写时间的目的. Gadbois 等人研究了矩形、椭圆形以及锥形三种形状的图形化薄膜单元的磁畴结构以及反磁化过程<sup>[9]</sup>. 研究发现, 圆片状图形化存储单元结构可以在一定的尺寸下形成稳定的“vortex”结构, 这种结构由于形成磁通闭合的磁畴而具有很小的杂散场, 不会在边缘形成磁畴, 从而对相邻单元的影响很小<sup>[10]</sup>. 目前市场上 MRAM 集成度低并且抗串扰和外界干扰能力差, 需要添加屏蔽层, 事实上采用屏蔽层的芯片依然很脆弱, 比如 Everspin 公司 16M 的 MRAM, 一个带磁性的螺丝刀的接触就可能出现数据紊乱.

早在 2000 年, Zhu 等人就提出了环形结构磁体在 MRAM 中的使用, 并形成了一个基于巨磁阻效应的垂直随机存取记忆体装置 (vertical magnetoresistive random access memory, VMRAM), 其具有较强的抗干扰和串扰能力, 适合超高面积密度设计, 磁密度的内在限制高达 400 Gbits/in<sup>2</sup><sup>[11]</sup> (1 in = 2.54 cm). 该技术有望可使整个计算机系统在同一芯片上实现, 使 MRAM 设备可能取代硬盘驱动器以及目前整个内存系统. 基于该环形结构, 本文设计了基于磁性隧道结效应的带切口自由层的 MRAM 模型, 利用微磁学软件 MAGPAR 计算仿真了带有切口自由层的反转特性. 结果表明, 该结构自由层设计可以有效的降低矫顽力, 提高 MRAM 的抗干扰性能, 降低 RA.

## 2 微磁学理论及模型建立

### 2.1 微磁学理论

对于自由层的磁化翻转过程及机理的研究, 传统的方法是磁力显微镜, 磁光显微镜以及洛伦兹力透射显微镜. 新发展起来的几个分析手段, 如极化分析扫描电镜、光电子发射显微镜、磁性透射 X 射线显微镜等, 使用价格昂贵而且不能很好来研究低维系统的磁畴结构<sup>[12]</sup>. 近年来随着计算机计算能力的不断提高, 微磁学模拟已成为研究磁性材料磁化过程一个非常重要的手段<sup>[8]</sup>. 微磁学是一个连续介质近似的模型, 它假设磁体的磁化强度是空间的连续函数, 可以用来描述磁性材料的磁化状态和磁化翻转过程. 静态微磁学是当磁体处于平衡状态时, 磁体的 Gibbs 自由能取最小值, 磁体中各处的  $J$  与  $H_{\text{ext}}$  方向一致, 从而得到平衡状态的磁化强度矢量的分布情况. 动态微磁学模拟则是通过求解

Gilbert 动态方程, 得到磁化强度矢量随时间的运动变化图像.

磁体的 Gibbs 自由能由五种能量组成:

$$E_t = E_{\text{anionly}} + E_{\text{exchonly}} + E_{\text{ext}} + E_{\text{dem}} + E_{\sigma}, \quad (1)$$

其中  $E_{\text{anionly}}$  是磁晶各向异性能,  $E_{\text{exchonly}}$  是交换作用能,  $E_{\text{ext}}$  是外磁场能,  $E_{\text{dem}}$  是退磁场能,  $E_{\sigma}$  是弹性能. 磁矩从一个稳定状态到另一个稳定状态的变化过程依据 LLG 动态方程:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\omega}{1+\alpha^2} \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{\alpha\omega}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{M}$  是磁化强度,  $\omega$  是旋磁比,  $\alpha$  是阻尼系数,  $M_s$  是饱和磁化强度,  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  是有效场, 其定义为自由能的变分

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_t}{\partial \mathbf{M}}. \quad (3)$$

### 2.2 圆环形翻转结构的模型建立及仿真

本文采用的 MRAM 翻转单元模型基于图 1 中的 VMRAM 结构, 但改用非钉扎的 PSV 型 MTJ, 要模拟的翻转结构为圆环形. 图 2 是采用有限元方法对自由层进行的网格化离散处理的示意图. 为了能准确地模拟材料的微观磁结构, 微磁学模拟要求四面体的边长必须小于材料的交换特征长度. 本文设四面体的边长为 2 nm, 这个长度小于模拟材料的交换特征长度 2.89 nm (交换长度满足  $L_{\text{ex}} = \sqrt{2\mu_0 A / J_s^2}$ ). 模拟材料采用的磁晶各向异性参数为  $K_1 = 4.5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ , 饱和极化强度  $J_s = 1.76 \text{ T}$  和交换常数  $A = 1.03 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ . 考虑到在集成电路工艺中令磁晶各向异性场的方向沿着环形的实现难度较大, 我们设磁晶各向异性场垂直于环形面.

该模型的翻转磁场来自于通过自由层中心垂直流过的电流, 由于 MAGPAR 软件中只有均匀外场, 需要用户自己编写电流产生的磁场, 本文编写了一个随电流参数成倍改变的旋转磁场, 计算了不同情况下磁环的退磁曲线, 曲线中纵坐标均采用无量纲量, 即平均磁化强度与饱和磁化强度的比值. 在如图 2 所示的坐标系下, 磁化强度  $\mathbf{M}_\theta$  的方向沿着柱坐标的  $\theta$  方向. 图 3 给出了不同厚度磁环的退磁曲线, 仿真结果显示, 当磁环较薄时, 磁矩翻转过程发生在薄膜面内, 而当磁环较厚时翻转过程变复杂, 除膜面内的翻转过程外, 还存在着其他方向的

翻转过程. 此外, 厚度增加, 电阻也随着增大. 由图 3 可见, 当磁环厚度由 5 nm 增加到 15 nm 时, 矫顽力改变很小 (图中翻转电流改变约为 0.1 mA); 当厚度超过 30 nm 后矫顽力接近于零. 这个结果说明, 对于采用通过厚度改变来达到矫顽力改变的方法, 若

由于工艺原因不能产生较薄器件时, 便会由于矫顽力变化太小或者磁膜太厚导致面积电阻过大而无法满足实际使用. 考虑到矫顽力改变量过小将大大增加实际中翻转控制的难度, 因此比起改变膜的厚度, 钉扎层的使用应该更方便.

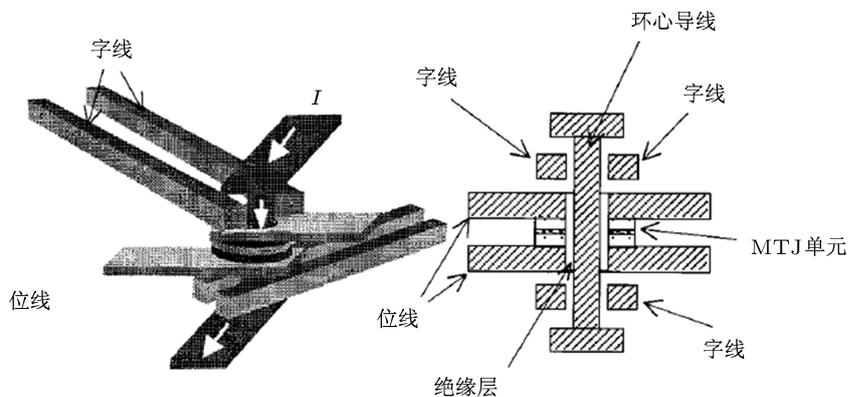


图 1 MRAM 翻转单元结构

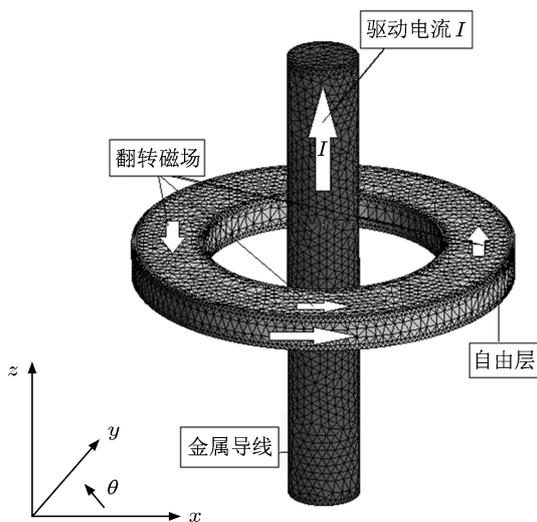


图 2 自由层结构和有限元网格划分

### 3 VMRAM 翻转单元的抗干扰特性

由于磁性自由层容易被外界影响, 所以模型的抗干扰性能也是需要特别关注的. 为了将圆环形结构与其他形状结构进行对比, 本文在抗干扰模拟测试中, 采用了如图 4 所示的 ABC 三种不同的干扰模型, 我们可以认为外界的干扰场是一个均匀平行于膜面的外磁场, A, B 模型中磁层均为方形薄膜, 不同的是初始磁化强度分别平行和垂直于外磁场,

且都平行于薄膜面, C 模型磁层为图 2 所示的环形状, 初始磁化强度为绕环心的旋转磁场形成的旋转磁化强度. 三种模型的厚度都为 5 nm, 设定材料的各向异性场都是垂直薄膜的, 而磁矩的翻转都在薄膜面内. 模型中磁畴的翻转情况可以由外场作用下平均磁矩的改变来判断. 图 5 和图 6 分别是三种模型的退磁曲线及磁化强度  $M$  ( $x$  方向的平均磁矩) 的时间演化.

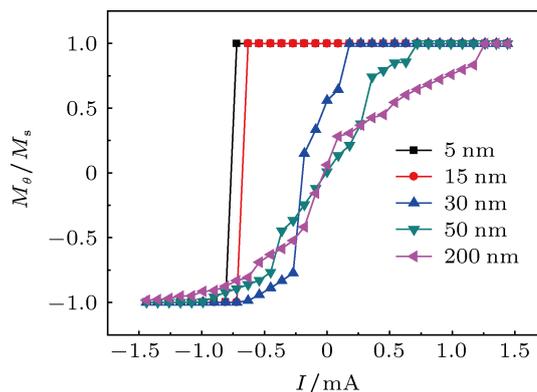


图 3 不同厚度时磁环磁化强度与翻转电流的关系曲线

从模拟结果可以发现, 采用传统的均匀磁化方式的 A, B 模型在外场的干扰下翻转最快, 翻转所需的临界磁场  $H_c$  也是最小的. 换句话说, 与其它形状

模型相比,采用环心电流驱动模型 C 状态改变所需的干扰磁场最大,即受外界干扰的影响最小.在外磁场的作用下,当磁化方向垂直于干扰磁场时,磁畴受到的磁矩最大,因而最先翻转(如图 6 中的 B 线).更有意思的是,实际中干扰磁场的方向常常是多变的,所以尽管出现干扰磁场与自由层的初始磁化方向平行的 A 模型概率比较低,但两次垂直方

向的干扰场可以引发磁化强度的翻转的概率却非常大,我们可以称之为双 B 模型,其磁阻改变与 A 效果相似.而 C 模型则可以有效的应对这种干扰场.而且通过计算发现,当磁环中流过电流时,无论是均匀电流分布还是具有趋肤效应的非均匀高频电流,其形成的磁场都是绕着磁环,该磁场也有利于对抗外部磁场的干扰.

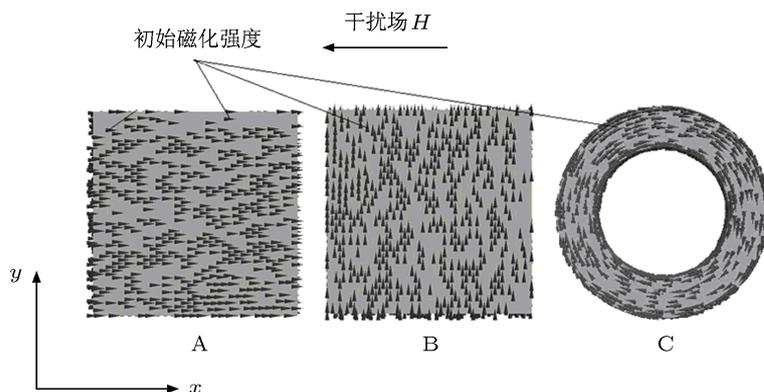


图 4 A, B, C 三种模型示意图

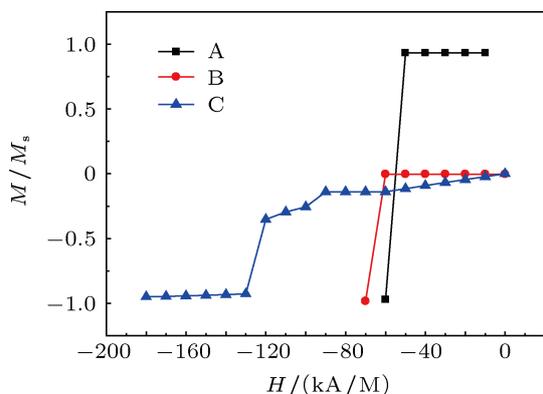


图 5 厚度同为 5 nm 时 A, B, C 三种模型在外场 H 下的退磁曲线

此外,降低内部串扰一直是提高集成度的关键,在理论上环形磁体的磁场是完全封闭的,其产生的外磁场几乎为零,增加了 MJT 之间的抗串扰能力,两个环形磁体之间的距离可以无限地接近而彼此不产生影响,这大大地增加了磁存储单元的密度,可以制造大规模的单元阵列.

#### 4 带切口的环形结构自由层设计及模拟

我们通过对方柱形和扁平纳米线进行微磁学

模拟,观察发现,在有限长的线性材料中,磁畴的翻转总是从纳米线的两端开始然后向中间运动.这是由于两端的退磁场比中间大很多,在纳米线性材料末端加上一段软磁体或者斜面可以促进材料的 180° 畴壁(如图 11 中的奈尔壁)的形成,加快翻转过程和降低矫顽力,可使纳米线在较低的磁场下产生一个 180° 畴壁,该畴壁将在外磁场作用下从纳米线的两端旋转运动到中间,最终导致整个器件磁畴的翻转.将线状或者条状材料卷成环状,便可利用这个现象大大降低磁环矫顽力.

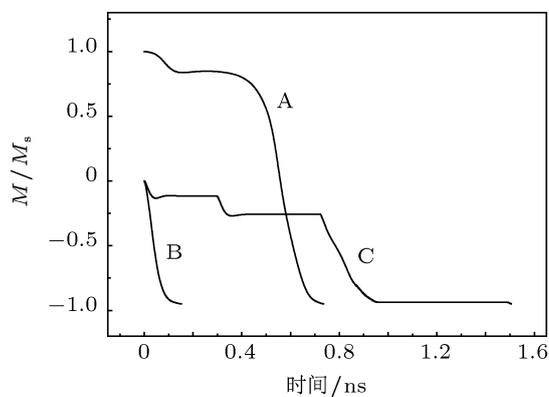


图 6 厚度同为 5 nm、外场 H = 150 kA/m 时, A, B, C 三种模型磁化强度随时间的演化

随着光刻和淀积工艺不断发展, 集成工艺中纳米磁环制造越来越成熟, 内径小于 30nm 的磁环制造工艺已经可以实现<sup>[14]</sup>. 在集成电路工艺中, 由于淀积材料和曝光中的二级效应, 会很容易产生不

平整, 我们可以利用这个效应来生成一个带斜面切口的磁环, 具体工艺过程如图 7. 值得一提的是, 这样的切口斜面的制作实际上是个自对准工艺, 这种方法保证了带切口磁环实现的准确度和成品率.

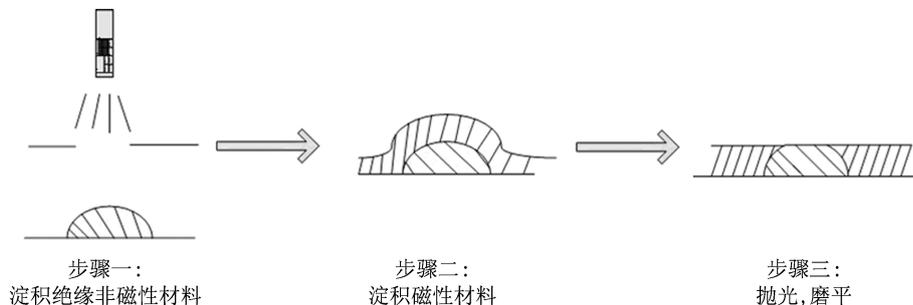


图 7 斜面切口磁环的实现过程

相对于添加软磁, 在材料的末端添加一个斜面在集成工艺中更加具有可实现性, 基于以上考虑, 本文设计一种新型的带斜面切口的自由层, 如 8 图所示.

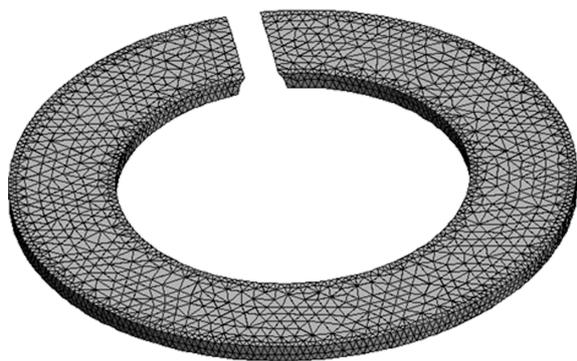


图 8 带切口自由层的三维模型

为了分析对比带切口自由层的翻转特性, 我们对图 3 中磁环做切口处理, 切口平均宽度为 10 nm. 图 9 计算了不同厚度带切口磁环的退磁曲线, 与不带切口的磁环退磁曲线(图 3)相比较, 可以看出: 带切口的设计使得矫顽力有明显的降低, 如厚度为 5 nm 的磁环的翻转电流从 0.75 mA 降到 0.3 mA. 磁畴翻转过程图 10 显示当磁环厚度为 5 nm 时, 畴壁模型为奈尔壁, 分别产生了 2 个 180° 畴壁, 由切口向内部移动. 当厚度增大后, 畴壁结构变为布洛赫壁和奈尔壁的组合, 产生类似螺旋前进的畴壁的不规则运动.

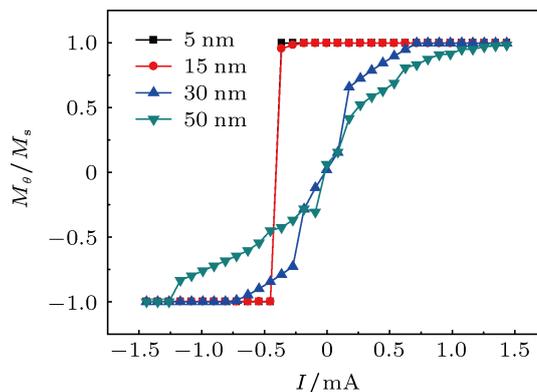


图 9 不同厚度时, 带切口磁环的磁化强度与翻转电流的关系曲线

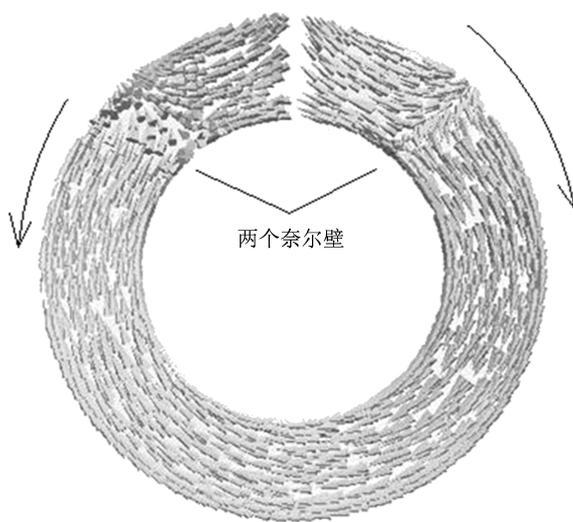


图 10 带切口磁环的磁畴翻转过程图

图 11 给出了厚度为 5 nm 的带切口与不带切

口的磁环翻转过程能量对比图, 由图可以清楚地看出, 切口加快了奈尔壁的形成, 但却并没有加快整个自由层的翻转速度. 通过计算分析发现, 若在翻转层中多开一个切口则可加速整个自由层翻转速

度, 图 12 给出了双切口磁环的翻转过程和能量变化曲线, 图 12(b) 和 (c) 分别是磁畴翻转过程和 (初始时刻) 退磁场分布图. 与图 11 相比较, 磁环翻转时间从 0.8 ns 降低到 0.4 ns 左右.

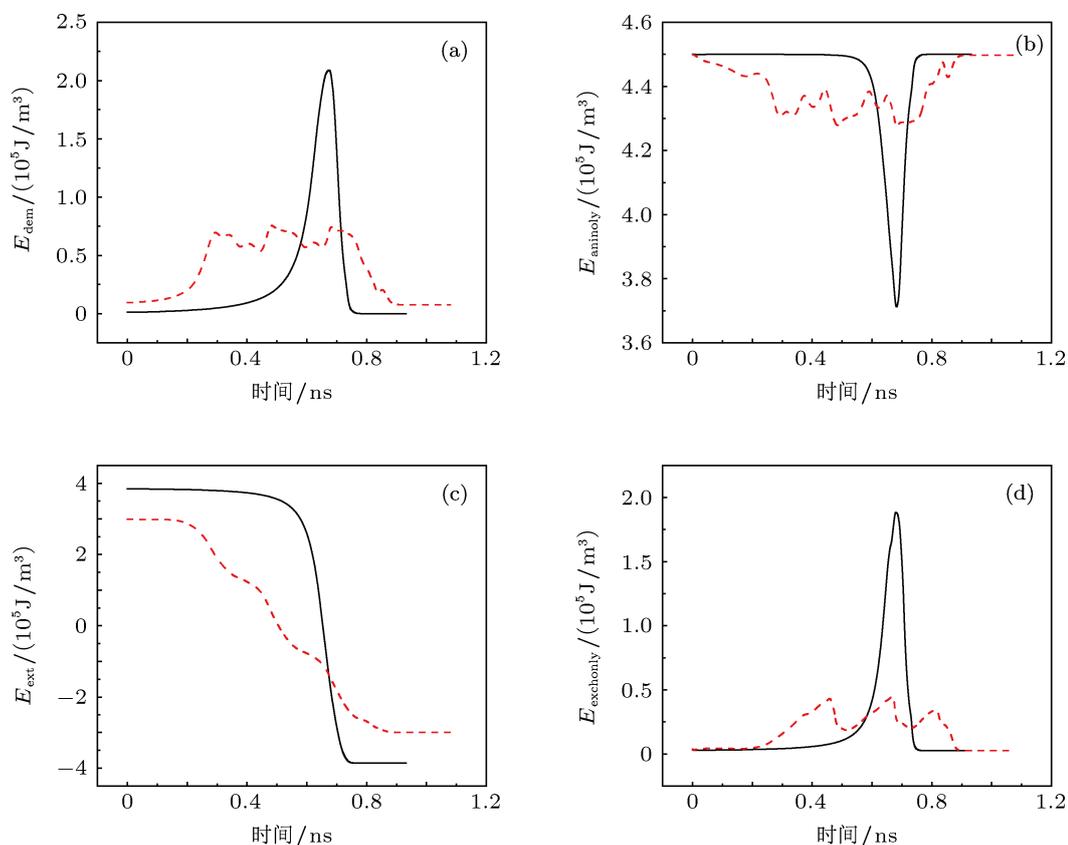


图 11 厚度为 5 nm 不带切口与带切口的磁环翻转过程能量对比图 (虚线为带切口磁环的翻转曲线, 实线为不带切口磁环的翻转曲线) (a) 是退磁能; (b) 为磁晶各向异性能; (c) 为退磁场能; (d) 为交换作用能

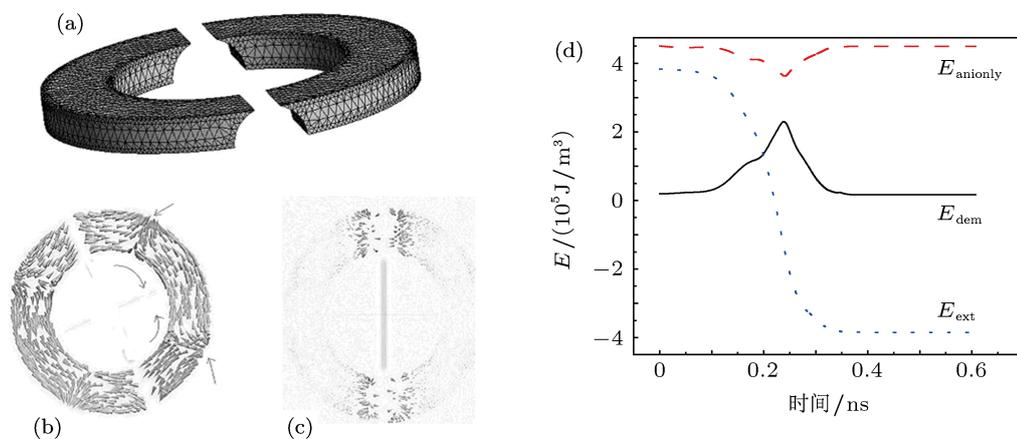


图 12 厚度为 5 nm 双切口磁环翻转过程及能量示意图

在仿真过程中我们发现: 在带切口自由层反转过程中, 与退磁场的变化相比, 交换场和磁晶各向异性场改变不是很明显。在不考虑弹性能  $E_{\sigma}$  的情况下, 文献 [15], 通过 (3) 式推导出有效场为

$$H_{\text{eff}} = \frac{2A}{J_s} \Delta u + \frac{2K_1}{J_s} \alpha(u \cdot \alpha) + H_{\text{ext}} + H_{\text{demag}}, \quad (4)$$

式中的前两项可以看作是交换能和磁晶各向异性的等效场, 主要由晶胞结构和各向异性参数决定。所以, 在材料、温度、外场一定情况下, 退磁场  $H_{\text{demag}}$  是影响有效场(翻转场)的主要因素, 也就是说矫顽力主要受退磁场影响, 而退磁场  $H_{\text{demag}} = N_i M_s$  ( $M_s$  为饱和磁化强度), 其中  $N_i$  为退磁化因子, 与材料形状有关。因此磁环上的切口使得材料局部形状发生改变, 导致切口处退磁场发生改变。我们的仿真计算结果与上述理论分析一致, 图 12 显示, 磁环切口处的退磁场明显增大, 这将导

致矫顽力的下降。

## 5 结论

借鉴 VMRAM 模型, 本文设计了带斜面切口的 PSV 型 TMR 结结构的 VMRAM, 并对其翻转特性进行了微磁学模拟仿真。与块状自由层的单元相比, 该模型具有低串扰、抗干扰能力强、有利于提升 MRAM 集成度等优点; 带切口环形结构自由层与不带切口环形固定层相比, 所需翻转电流改变明显(如厚度为 5 nm 时, 翻转电流从 0.75 mA 降到 0.3 mA), 其可以取代通过厚度来进行矫顽力改变的 PSV 型 TMR 结, 降低了磁存储器中翻转电流的控制难度并且可以有效的降低 RA 值。此外切口的实现利用淀积或光刻的二次效应, 该工艺具有自对准的特点, 有较高的可实现性。

感谢华为公司北京研究院龙浩辉博士的讨论和支持。

- [1] Daughton J M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3758
- [2] IBM 2000 *Patent* US 6097625
- [3] Li Y B, Wei F L, Yang Z 2009 *Physics* (in Chinese) [李彦波, 魏福林, 杨正 2009 物理]
- [4] Hayakawa J, Ikeda S, Lee Y Me 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 232510
- [5] Wang Y, Zeng Z M, Han X Fetal 2007 *Phys. Rev. B* **75** 214424
- [6] Nagasaka K, Seyama Y, Kondo Retal 2001 *Fujitsu Sci. Tech. J.* **37** 192
- [7] Tsunekawa K, Djayaprawira D D, Nagai M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 072503
- [8] Weiss P Journ 1907 *de Phys. et Radium* **6** 661
- [9] Yin A J, Li J, Jian W, Bennett A J, Xu J M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1039
- [10] Wachowiak A, Wiebe J, Bode M, Pietzseh O, Morgenstern M, Wiesendanger R 2002 *Science* **298** 577
- [11] Zhu J G, Zheng Y F, Prinz G A 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6668
- [12] Zhu Xiaobin, Allwood Dan A, Gang Xiong 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062503
- [13] Zhang H w, Rong C B, Zhang J, Zhang S Y, Shen B C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 748 (in Chinese) [张宏伟, 荣传兵, 张健, 张绍英, 沈保根 2003 物理学报 **52** 718]
- [14] Heyderman L J, Vaz C A F, Bland J A C 2004 *Microelectronie Engineering* **73** 780
- [15] Werner Scholz, *Ph. D. Dissertation* (Eingereicht an der Technischen Universit"at Wien)

# Micromagnetic simulation of magnetization reversal on the annular free layer with nick in magnetic random access memory\*

Hao Jian-Hong<sup>†</sup> Gao Hui

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(Received 4 July 2012; revised manuscript received 27 September 2012)

## Abstract

Based on magnetic tunnel junctions (MTJs), the magnetic random access memory with the pseudo-spin value film model, the annular structure with slanted cuts is used as free layer and the way to vary coercivity by changing thickness is discarded. With this improvement, the area resistance of the MTJs is reduced. The analysis of the cuts on the annular layer generated from the secondary effects of deposition in the IC process, is made by the micromagnetic simulations. The magnetization reversal characteristics from the analysis reveal the properties of low crosstalk, low RA, high magnetic reluctance, and strong anti-interference.

**Keywords:** free layer, micromagnetic, magnetization reversal, VMRAM

**PACS:** 75.70.AK, 75.90.+W, 75.40.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.62.057502

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775018), and the International Science and Technology Cooperation Program (Grant No. 2011DFR00780).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jianhonghao@ncepu.edu.cn