

自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性四态存储器结构

盛宇 张楠 王开友 马星桥

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

Sheng Yu Zhang Nan Wang Kai-You Ma Xing-Qiao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 117501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180216

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[过渡金属掺杂的扶手椅型氮化硼纳米带的磁电子学特性及力-磁耦合效应](#)

Magneto-electronic properties and mechano-magnetic coupling effects in transition metal-doped armchair boron nitride nanoribbons

物理学报.2017, 66(23): 238501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.238501>

[石墨烯沟道全自旋逻辑器件开关特性](#)

Switching characteristics of all-spin logic devices based on graphene interconnects

物理学报.2017, 66(20): 208501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.208501>

[三角形石墨烯量子点阵列的磁电子学特性和磁输运性质](#)

Magneto-electronic and magnetic transport properties of triangular graphene quantum-dot arrays

物理学报.2017, 66(13): 138501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.138501>

[功能化扶手椅型石墨烯纳米带异质结的磁器件特性](#)

Magnetic device properties for a heterojunction based on functionalized armchair-edged graphene nanoribbons

物理学报.2016, 65(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.118501>

[界面铁掺杂锯齿形石墨烯纳米带的自旋输运性能](#)

Spin transport properties for iron-doped zigzag-graphene nanoribbons interface

物理学报.2016, 65(6): 068503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068503>

# 自旋轨道矩调控的垂直磁各向异性 四态存储器结构\*

盛宇<sup>1)2)</sup> 张楠<sup>2)3)</sup> 王开友<sup>2)3)4)</sup> 马星桥<sup>1)†</sup>

1) (北京科技大学数理学院, 北京 100083)

2) (中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

3) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

4) (中国科学院拓扑量子计算卓越创新中心, 北京 100049)

(2018年1月29日收到; 2018年3月5日收到修改稿)

利用氧化钽缓冲层对垂直各向异性钴铂多层膜磁性的影响, 构想并验证了一种四态存储器单元. 存储器器件包含两个区域, 其中一区域的钴铂多层膜 [Pt(3 nm)/Co (0.47 nm)/Pt(1.5 nm)] 直接生长在热氧化硅衬底上, 另一个区域在磁性膜和衬底之间沉积了一层氧化钽作为缓冲层 [TaO<sub>x</sub>(0.3 nm)/Pt(3 nm)/Co(0.47 nm)/Pt(1.5 nm)], 缓冲层导致两个区域的垂直磁各向异性不同. 在固定的水平磁场下对器件施加与磁场同向的电流, 由于电流引起的自旋轨道耦合力矩, 两个区域的磁化取向均会发生翻转, 且拥有不同的临界翻转电流. 改变通过器件导电通道的电流脉冲形式, 器件的磁化状态可以在4个态之间切换. 本文器件的结构为设计自旋轨道矩存储器件提供了新的思路.

**关键词:** 自旋电子学, 自旋轨道耦合矩, 四态存储器

**PACS:** 75.70.Tj, 85.75.-d

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180216

## 1 引言

用电学的手段, 如用电场或电流, 来调控器件的磁性是自旋电子学领域的重要方向之一<sup>[1-9]</sup>. 自旋轨道耦合矩 (spin-orbit torques, SOTs) 诱导磁化取向的翻转作为一种高速、低功耗的操控磁性的手段, 在近年来引起了研究者的广泛关注<sup>[2,3,5,10-13]</sup>. 利用自旋轨道耦合矩来翻转自旋, 首先是在铁磁半导体中被观察到<sup>[14-17]</sup>, 随后被广泛应用于重金属/铁磁多层膜结构中, 这里自旋轨道耦合矩来源于重金属层的自旋霍尔效应以及层间界面处的 Rashba 效应<sup>[2,8,9,11]</sup>. 自旋霍尔效应<sup>[1,18,19]</sup> 使得在重金属层内流动的电流产生垂直于面流动的自旋

流, 自旋流与铁磁层的磁矩相互作用, 改变铁磁层的磁化状态. Rashba 效应来源于界面处的电场, 流动中的电子在电场中受到等效磁场的作用, 改变了自身的自旋取向<sup>[12,20-22]</sup>. 通常, 对于具有垂直磁各向异性的样品, 要想使其磁化取向在自旋轨道耦合矩的作用下翻转, 需要在通入电流的同时, 施加一沿电流方向的面内磁场. 沿电流方向的面内磁场破坏了向上磁化与向下磁化的对称性, 使得磁矩在正负电流的作用下倾向于不同的取向, 从而实现定向翻转. 对于磁存储器件, 磁化取向的向上与向下对应着信息的0与1, 磁化取向的翻转意味着新信息的写入. 通常, 可控的电流诱导磁化翻转只涉及向上与向下两个态. 如果一个导电通道能控制多个磁化状态, 做成多态的存储单元, 将更有利于器件

\* 国家科技支撑计划 (批准号: 2017YFA0303400)、国家自然科学基金 (批准号: 11174030, 11474272, 61774144)、中国科学院基金 (批准号: QYZDY-SSW-JSC020, XDPB0603) 和香港王宽诚教育基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xqma@sas.ustb.edu.cn

的高密度集成 [11,23,24].

本文基于重金属层/铁磁层结构中自旋轨道耦合矩引起磁化翻转的机制,设计了一种四态存储器,利用一条导电通道中的电流脉冲,实现任意4种磁化状态.为进一步提高磁存储密度提供了一种方案与思路.

## 2 样品制备

实验中使用的样品薄膜是用磁控溅射在热氧化硅衬底上生长的TaO<sub>x</sub>(0.3)/Pt(3)/Co(0.47)/Pt(1.5)和Pt(3)/Co(0.47)/Pt(1.5)多层膜,括号内为厚度,单位是nm,如图1(a)所示.材料生长温度约20 °C,本底真空优于10<sup>-8</sup> Torr (1 Torr = 1.33 × 10<sup>2</sup> Pa).溅射时通入氩气,真空度为0.8 mTorr.参与溅射的靶为Ta靶、Co靶与Pt靶,

三者均采用直流溅射,溅射功率都是30 W,溅射速率分别为0.018, 0.014, 0.0271 nm/s.其中TaO<sub>x</sub>的沉积是在溅射Ta的过程中通入5 sccm/s的氧气,Ta溅射的过程中被氧化,生成TaO<sub>x</sub>沉积在基片上.溅射过程中,为保证薄膜均匀沉积在基片上,基片以每分钟10圈的速度旋转.整个生长过程由计算机控制时间,以此精确控制薄膜的厚度.图1(a)展示了样品的结构.利用光刻-显影的办法,使衬底一半被光刻胶覆盖,而另一半暴露在外;随后在衬底上沉积一层0.3 nm的TaO<sub>x</sub>薄层,沉积结束放到去胶溶液里进行剥离;然后再进行一次光刻-沉积-剥离,这次沉积的是Pt/Co/Pt薄膜,剥离之后获得两个电极以及一个导电通道,导电通道宽10 μm,沿着法向穿过Pt/Co/Pt与TaO<sub>x</sub>/Pt/Co/Pt的交界,如图1(b)所示.

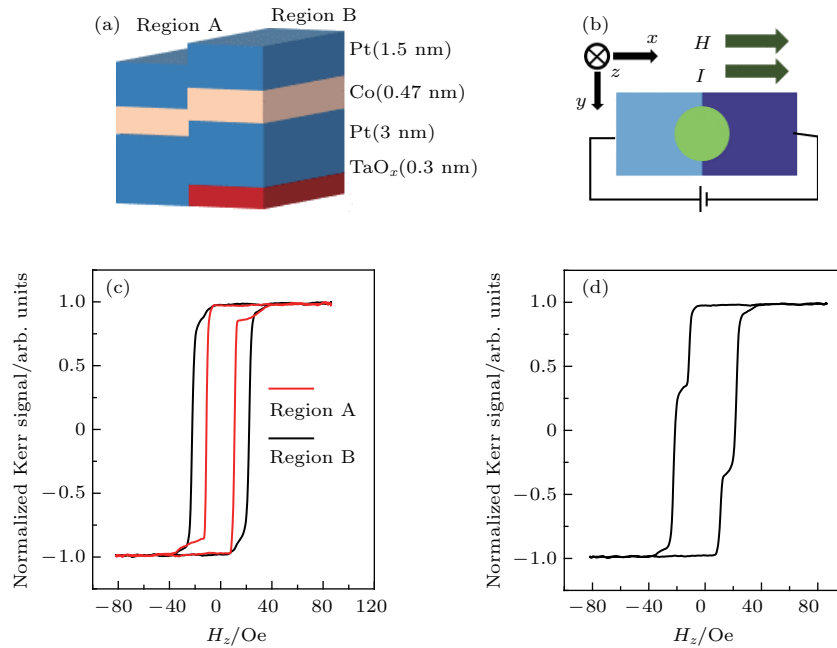


图1 多层膜结构与性质 (a) 样品的层状结构(没有生长在TaO<sub>x</sub>缓冲层上的多层膜为Region A,生长在TaO<sub>x</sub>缓冲层上的Pt/Co/Pt多层膜为Region B);(b) 器件结构,坐标轴和测试条件(右边的深蓝色区域代表有氧化铝缓冲层的多层膜,左边的蓝色区域代表没有氧化铝缓冲层的多层膜,导电通道的宽度为10 μm,中间绿色的圆代表用于磁光克尔测试的光斑位置,光斑的直径大约2 μm);(c) Region A的沿z轴磁化曲线(红色实线)和Region B的沿z轴磁化曲线(黑色实线)(图中纵轴为归一化以后的磁光克尔信号);(d) Region A和Region B交界处沿z轴的磁化曲线(因为Region A与Region B矫顽力不同,磁化状态在随磁场变化时有两次翻转)

Fig. 1. Structure and properties of multilayers: (a) Layer structure of the sample (the Pt/Co/Pt multilayers with 0.3 nm TaO<sub>x</sub> buffer layer is named Region B, and the one without TaO<sub>x</sub> buffer layer is named Region A); (b) device structure, coordinate axis, and measurement scheme (the dark blue square at right side indicates multilayers with TaO<sub>x</sub> buffer layers (Region B), and the blue square at left side indicates multilayers without TaO<sub>x</sub> buffer layer (Region A), the green circle is the laser spot for Kerr measurement with about 2 μm diameter); (c) magnetized loops along z axis of Region A (red solid line) and Region B (black solid line); (The longitudinal axis is normalized Kerr signal); (d) magnetized loop along z axis at the junction between Region A and Region B (a two-step switching is originated from the different coercivities of these two regions).

### 3 实验结果与讨论

首先, 定义没有缓冲层的区域为 Region A, 有缓冲层的区域为 Region B. 图 1(c) 展示了归一化的极向磁光克尔信号随垂直磁场从 80 Oe 到 -80 Oe 再返回 80 Oe 产生的变化, 体现出磁化强度在法向分量随磁场的改变. 实验发现虽然 TaO<sub>x</sub> 只有 0.3 nm 厚, 但其对样品垂直各向异性的影响却很显著. 有 TaO<sub>x</sub> 作为缓冲层的磁性多层膜显示了更加优良的垂直各向异性, 其矫顽力为 23 Oe, 而直接生长在硅片衬底的多层膜矫顽力为 11 Oe, 几乎只是拥有缓冲层样品的一半. 这应该归功于 TaO<sub>x</sub> 缓冲层促进了 Pt/Co 界面处 (111) 织构的形成, 而 Pt/Co 界面的 (111) 织构有利于增强界面垂直磁各向异性 [25].

将测试所用的光斑放在 Region A 和 Region B 的交界处, 观察交界处的磁化曲线, 如图 1(d). 样品磁化的取向在翻转的过程中跳跃了两次, 第一次在约为 11 Oe 的磁场下, 第二次在约为 23 Oe 的磁场下, 刚好对应了 Region A 和 Region B 的矫顽力. 说明在交界处光斑覆盖的区域 (约 2 μm 直径的区域), 两个区域没有发生显著的铁磁耦合, 并且

在外加磁场的作用下, 相互独立地改变了各自的磁化状态. 通过调节光斑的位置, 改变两个区域在光斑内所占面积的比例, 可以获得类似 Region A 的磁化曲线 (当光斑完全在 Region A), 也可以获得类似 Region B 的磁化曲线 (当光斑完全在 Region B) 以及两者叠加的任意形式的磁化曲线 (光斑在交界处). 图 1(d) 所示的磁化曲线说明, 通过改变磁场大小以及施加的方式, 可以获得清晰的 4 个态.

利用 Region A 和 B 矫顽力的不同, 可以在交界处用外加磁场来获得 4 个磁化状态. 若要以电流诱导磁化翻转来获得 4 种态, 则需要两个区域拥有不同的临界翻转电流. 因此, 在沿着电流方向固定面内磁场  $H_x = \pm 500$  Oe 条件下, 分别测试了 Region A 和 Region B 磁化状态随电流的变化关系. 图 2(a) 展示了不同的水平磁场  $H_x$  下, 电流从 3 mA 扫到 -3 mA, Region A 磁化取向发生改变; 当电流从 -3 mA 回到 3 mA, 磁化取向又恢复到初始的状态. 为了排除电流对磁光克尔信号的影响, 施加的电流采取脉冲的模式, 脉冲时间为 0.5 s; 脉冲过后, 开始测试磁光克尔信号的大小, 此时电流为 0, 测试时间为 1 s. 图 2 展示了脉冲后磁光克尔信号的大小和脉冲时电流的关系. 当水平磁场为 500 Oe

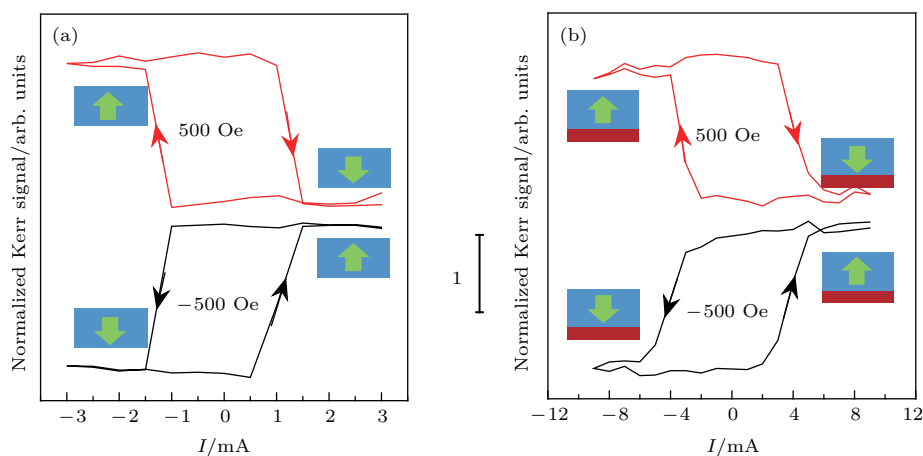


图 2 电流引起 Region A 与 Region B 磁化取向的定向翻转 (a) Region A 在 500 Oe 水平磁场  $H_x$  (红色实线) 下的克尔信号 (归一化后) 电流曲线以及在 -500 Oe 水平磁场  $H_x$  (黑色实线) 下的克尔信号-电流曲线; (b) Region B 在 500 Oe 水平磁场  $H_x$  (红色实线) 下的克尔信号-电流曲线, 以及在 -500 Oe 水平磁场  $H_x$  (黑色实线) 下的克尔信号 (归一化后)-电流曲线 (曲线图里面的插图表示了铁磁层的磁化状态. 其中, 绿色箭头指向磁化取向, 蓝色区域代表铁磁层, 深红色区域代表 TaO<sub>x</sub> 缓冲层)

Fig. 2. Current induced magnetization switching of Region A and Region B: (a) Normalized Kerr signal  $-I$  loops of Region A under 500 Oe (red solid line) and -500 Oe (black solid line) in-plane magnetic field  $H_x$ ; (b) normalized Kerr signal  $-I$  loops of Region B under 500 Oe (red solid line) and -500 Oe (black solid line) in-plane magnetic field  $H_x$  (Schematics inserted illustrate the magnetization configurations of ferromagnetic layers, in which green arrows represent the orientation of the magnetization, blue squares represent the ferromagnetic layer, and the dark red squares under blue squares represent the TaO<sub>x</sub> buffer layer).

时, 正电流倾向于使磁化取向朝下, 而负电流倾向于使磁化取向朝上, 翻转的规律为顺时针. 当水平磁场为  $-500$  Oe 时, 电流与磁化取向的关系刚好相反, 翻转的规律为逆时针. 电流与水平磁场共同决定了磁化取向的翻转方向, 符合自旋轨道矩驱动磁化取向翻转的特征 [3,5,10,21]. 此处, 自旋轨道矩使磁化取向翻转通常用两种力矩来解释: 一种叫作类阻尼矩 ( $\tau_{DL}$ , damping-like torque), 形式为  $\tau_{DL} \propto \mathbf{m} \times (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{m})$ ; 一种叫作类场矩 ( $\tau_{FL}$ , field-like torque), 形式为  $\tau_{FL} \propto \boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{m}$ , 其中  $\mathbf{m}$  为铁磁层的磁化强度,  $\boldsymbol{\sigma}$  为流入铁磁层的净自旋流的自旋取向. 在本文中, 定义电流与外加磁场沿  $x$  方向,  $\mathbf{m}$  沿  $z$  方向,  $\boldsymbol{\sigma}$  沿  $y$  方向. 两种力矩共同作用使得磁化取向发生偏转. 在没有外加水平磁场的情形下, 电流使磁化取向向上与向下翻转的概率是相同的, 宏观上看不到有规律的翻转. 在外加水平磁场固定的情形下, 磁化取向向上与向下的对称性被打破, 其中类阻尼矩决定翻转的方向, 而类场矩影响临界翻转电流的大小 [26]. 本文定义使磁化取向完全翻转的电流值为临界电流, 如图 2 (a) 所示, 当电流大小超过  $1.5$  mA, 即  $|I| > 1.5$  mA, 继续增大电流, 样品的磁化状态保持稳定, 说明  $1.5$  mA 足以使样品磁化取向发生改变. 图 2 (b) 为 Region B 的磁化状态随电流的变化, 其翻转规律随磁场的变化与

Region A 的一致. 与 Region A 不同的是, Region B 需要更大的临界翻转电流, 大约为  $5$  mA, 超过了 Region A 临界翻转电流的 3 倍. 利用两个区域临界翻转电流的显著差异, 可以通过改变电流脉冲的模式来获得 4 种磁化状态.

图 3 (a) 和图 3 (b) 分别显示了面内磁场为  $500$  Oe 以及  $-500$  Oe 时, 在不同的脉冲机制下, 样品磁化状态的改变. 脉冲的幅值分为  $8$  mA 和  $2$  mA 两种, 持续时间均为  $0.5$  s, 而且在正负外加磁场下, 电流实现磁化翻转的状态刚好相反. 如果需要使得两个区域的磁化方向发生翻转, 可以通入  $+/-8$  mA 脉冲电流来实现; 而如果只需要改变 Region A 的磁化取向, 只需要通入  $+/-2$  mA 脉冲电流来实现; 如果只需要改变 Region B 的磁化取向, 而保持 Region A 的磁化取向不变, 可以首先通入一个大的电流 ( $+/-8$  mA) 脉冲后面紧随一个反向小电流 ( $-/+2$  mA) 脉冲, 先使得两个区域的磁矩共同翻转, 然后再通入一个小电流脉冲, 仅使 Region A 的磁矩发生翻转, 回到初始磁化状态. 可以看出, 在保持水平磁场不变的条件下, 4 种形式的电流脉冲使得磁光克尔信号保持在了 4 个不同的值上, 即为 4 种不同的磁化状态, 从而实现了电信号写入的四态存储.

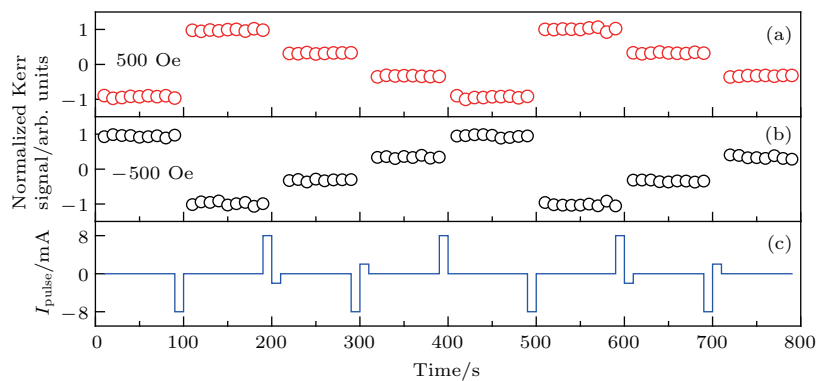


图 3 在幅值为  $500$  Oe 面内磁场下, Region A 和 Region B 的交界处磁光克尔信号随电流脉冲的变化 (a) 和 (b) 分别显示了在  $500$  Oe 和  $-500$  Oe 的面内磁场下, 电流改变交界处的磁化取向; (c) 器件被施加的 4 种脉冲:  $-8$  mA,  $8$  mA  $\rightarrow$   $-2$  mA,  $-8$  mA  $\rightarrow$   $2$  mA,  $+8$  mA, 其中  $+/-8$  mA 的脉冲持续  $0.5$  s,  $-/+8$  mA  $\rightarrow$   $-/+2$  mA 的脉冲由  $-/+8$  mA 的脉冲和紧随其后的  $-/+2$  mA 脉冲组成, 持续时间为两个脉冲时间之和 ( $1$  s); 为了清晰地展示脉冲的形式, 图 (c) 中脉冲的宽度为真实值的 20 倍

Fig. 3. The change of Kerr rotation at the junction of Region A and Region B under current pulses with  $500$  Oe amplitude of in-plane magnetic field: (a) and (b) show the current pulses induced switching of magnetization at the junction under  $H_x$  of  $500$  and  $-500$  Oe respectively; (c) four basic pulses ( $-8$  mA,  $8$  mA  $\rightarrow$   $-2$  mA,  $-8$  mA  $\rightarrow$   $2$  mA,  $+8$  mA) are applied to the device in this test, in which pulses of  $+/-8$  mA last for  $0.5$  s, and pulse of  $-/+8$  mA  $\rightarrow$   $-/+2$  mA consists of a pulse of  $-/+8$  mA and a followed pulse of  $-/+2$  mA with a total duration of  $1$  s. To clearly show the form of the pulse, the width of the pulse in Fig.(c) is 20 times the real value.

## 4 结 论

利用TaO<sub>x</sub>缓冲层对Pt/Co/Pt多层膜垂直各向异性的调节,通过预先在某些区域生长一层0.3 nm的TaO<sub>x</sub>,而在另外的区域直接生长Pt/Co/Pt多层膜,获得相邻区域具有不同磁各向异性的Pt/Co/Pt多层膜.在固定磁场下,电流驱动不同区域磁化方向的翻转研究显示,由于两个区域的临界翻转电流存在较大差异.利用临界电流的差异,通过改变脉冲形式,在具有不同磁性相邻区域的边界获得了四种磁化状态.通过一个导电通路使器件磁化状态在4个状态之间切换,相比于一个导电通道控制两个状态,减少了导电通道的数量,有望提高空间利用率,为未来实现高密度自旋电子学存储提供了一种思路和方案.

## 参考文献

- [1] Wang P, Jiang S W, Luan Z Z, Zhou L F, Ding H F, Zhou Y, Tao X D, Wu D 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 112406
- [2] Miron I M, Garello K, Gaudin G, Zermatten P J, Costache M V, Auffret S, Bandiera S, Rodmacq B, Schuhl A, Gambardella P 2011 *Nature* **476** 189
- [3] Cai K, Yang M, Ju H, Wang S, Ji Y, Li B, Edmonds K W, Sheng Y, Zhang B, Zhang N, Liu S, Zheng H, Wang K 2017 *Nat. Mater.* **16** 712
- [4] Wu D, Yu G, Shao Q, Li X, Wu H, Wong K L, Zhang Z, Han X, Khalili Amiri P, Wang K L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 202406
- [5] Yang M, Cai K, Ju H, Edmonds K W, Yang G, Liu S, Li B, Zhang B, Sheng Y, Wang S, Ji Y, Wang K 2016 *Sci. Rep.* **6** 20778
- [6] Yang S, Peng R, Jiang T, Liu Y, Feng L, Wang J, Chen L, Li X, Nan C 2014 *Adv. Mater.* **26** 7091
- [7] Zhang B, Meng K K, Yang M Y, Edmonds K W, Zhang H, Cai K M, Sheng Y, Zhang N, Ji Y, Zhao J H, Zheng H Z, Wang K Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 28458
- [8] Yan Y, Wan C, Zhou X, Shi G, Cui B, Han J, Fan Y, Han X, Wang K L, Pan F, Song C 2016 *Adv. Electron. Mater.* **2** 1600219
- [9] Liu L, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C, Buhrman R 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 96602
- [10] Zhang N, Zhang B, Yang M, Cai K, Sheng Y, Li Y, Deng Y, Wang K 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 27501
- [11] Avci C O, Mann M, Tan A J, Gambardella P, Beach G S D 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 203506
- [12] Yang Y, Xu Y, Zhang X, Wang Y, Zhang S, Li R W, Mirshekarloo M S, Yao K, Wu Y 2016 *Phys. Rev. B* **93** 94402
- [13] Yu J, Qiu X, Wu Y, Yoon J, Deorani P 2016 *Sci. Rep.* **6** 32629
- [14] Wang K Y, Edmonds K W, Irvine A C, Tatara G, Ranieri E D, Wunderlich J, Olejnik K, Rushforth A W, Champion R P, Williams D A, Foxon C T, Gallagher B L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 262102
- [15] Chernyshov A, Overby M, Liu X, Furdyna J K, Lyanda G Y, Rokhinson L P 2009 *Nat. Phys.* **5** 656
- [16] Li Y, Cao Y F, Wei G N, Li Y, Ji Y, Wang K Y, Edmonds K W, Champion R P, Rushforth A W, Foxon C T, Gallagher B L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 22401
- [17] Li Y, Luo W, Zhu L, Zhao J, Wang K 2015 *J. Magn. Magn. Mater.* **375** 148
- [18] Zhou H, Fan X, Ma L, Zhang Q, Cui L, Zhou S, Gui Y S, Hu C M, Xue D 2016 *Phys. Rev. B* **94** 134421
- [19] Wang H L, Du C H, Pu Y, Adur R, Hammel P C, Yang F Y 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 197201
- [20] Emori S, Bauer U, Woo S, Beach G S D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 2012
- [21] Yu G, Upadhyaya P, Fan Y, Alzate J G, Jiang W, Wong K L, Takei S, Bender S A, Chang L T, Jiang Y, Lang M, Tang J, Wang Y, Tserkovnyak Y, Amiri P K, Wang K L 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 548
- [22] Brataas A, Kent A D, Ohno H 2012 *Nat. Mater.* **11** 372
- [23] Petrie J R, Wieland K A, Timmerwilke J M, Barron S C, Burke R A, Newburgh G A, Burnette J E, Fischer G A, Edelstein A S 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 142403
- [24] Diller E, Miyashita S, Sitti M 2012 *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.* 2325
- [25] Emori S, Beach G S D 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 33919
- [26] Taniguchi T, Mitani S, Hayashi M 2015 *Phys. Rev. B* **92** 24428

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

Sheng Yu<sup>1)2)</sup> Zhang Nan<sup>2)3)</sup> Wang Kai-You<sup>2)3)4)</sup> Ma Xing-Qiao<sup>1)†</sup>

1) (School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

2) (State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

3) (College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (Center for Excellence in Topological Quantum Computation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 29 January 2018; revised manuscript received 5 March 2018 )

## Abstract

Current, instead of magnetic field, induced magnetization switching is very important for future spintronics in information storage or/and information processing. As one of the effective current-induced magnetization methods, spin-orbit torque (SOT) has aroused considerable interest because it has low-power consumption and can improve the device endurance. Normal metal (NM)/ferromagnetic metal (FM) are the common materials used for SOTs, where the NM denotes the materials with strong spin-orbit coupling such as Pt, Ta, W, etc. Owing to the spin Hall effect, the in-plane current in NM layer can be converted into a vertical spin current that exerts torques on the adjacent FM layers. Spin current can also come from the NM/FM interface charge-spin conversion due to interfacial asymmetry, exerting torques on the adjacent FM layers. Materials with in-plane and perpendicular magnetic anisotropy are used to study the SOT-induced magnetization switching. Compared with the memories using the in-plane ferromagnetic films, the magnetic memories using NM/FM multilayers with perpendicular magnetic anisotropy can have much high integration density. Currently the used information storage was based on the two-state memory cell. Owing to more than two states contained in one memory cell, multiple states memory manipulated by electric current could further benefit the higher-density memory.

In this paper, a four-state memory unit is demonstrated by the influence of TaO<sub>x</sub> buffer layer on the magnetic anisotropy of Pt/Co/Pt multilayers. The memory unit consists of two regions. One is directly deposited on thermal oxide Si substrate [Pt(3 nm)/Co(0.47 nm)/Pt(1.5 nm)] and the other has a buffer layer of TaO<sub>x</sub> [TaO<sub>x</sub>(0.3 nm)/Pt(3 nm)/Co(0.47 nm)/Pt(1.5 nm)], thus leading to the difference in magnetic property between these two regions. According to the *Z* axis magnetic hysteresis loops of two regions, measured by polar magneto-optical Kerr effect, the coercivity of the region with TaO<sub>x</sub> is obtained to be 23 Oe and that without TaO<sub>x</sub> is 11 Oe. At the junction between two regions, the magnetic hysteresis loop shows the superposition of hysteresis loops of two regions, resulting in switching four times as the magnetic field changes. Under a fixed magnetic field along the current direction, the magnetization orientation of region with TaO<sub>x</sub> and that of region without TaO<sub>x</sub> are switched by spin-orbit torques with threshold currents of 5 mA and 1.5 mA respectively. The switching direction can be changed as the in-plane magnetic field changes to the opposite direction, which is one of the typical features of SOTs-induced magnetization switching. At the junction between two regions, through applying different-form current pulses to one conductive channel of the device, the magnetic state of the memory cell can be switched between four clear states. This kind of structure provides a new idea to design SOT multi-state memory devices.

**Keywords:** spintronics, spin-orbit torque, four-state memory

**PACS:** 75.70.Tj, 85.75.-d

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180216

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0303400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174030, 11474272, 61774144), the Foundation of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. QYZDY-SSW-JSC020, XDPB0603), and the K. C. Wong Education Foundation, China.

† Corresponding author. E-mail: [xqma@sas.ustb.edu.cn](mailto:xqma@sas.ustb.edu.cn)