



执轨道转移力矩之笔, 书写磁随机存储器新篇章

潘振存¹, 李栋², 廖志敏^{1,3*}

1. 北京大学物理学院介观物理国家重点实验室和纳光电子前沿科学中心, 北京 100871;

2. 北京大学前沿交叉学科研究院, 北京 100871;

3. 合肥国家实验室, 合肥 230088

* 联系人, E-mail: liaoym@pku.edu.cn

Orbit-transfer torque propelling magnetoresistive memories into a new era

Zhen-Cun Pan¹, Dong Li² & Zhi-Min Liao^{1,3*}

¹ State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China

* Corresponding author, E-mail: liaoym@pku.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2023-1250

磁随机存取存储器(magnetoresistive random access memory, MRAM)以其高能效和快速的数据存储能力在大数据时代备受关注^[1,2]. 在MRAM单元中, 数据通过两个铁磁层磁化状态的平行和反平行排列以低电阻态和高电阻态形式存储在磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)中^[3,4]. MRAM单元的数据写入通过电流诱导的磁化对MTJ中作为自由层的铁磁体的翻转来实现^[5-7]. MRAM具有非易失性, 有望推动诸如存内计算、神经形态计算和随机计算等新兴应用领域的发展^[8]. 二维(two-dimensional, 2D)材料及其范德瓦耳斯异质结具有原子级平滑的界面和可调的物理特性, 为MRAM的技术发展提供了新方案. 传统MRAM的信息写入主要通过奥斯特场、自旋转移力矩(spin-transfer torque, STT)和自旋轨道力矩(spin-orbit torque, SOT)3种方式来实现磁化翻转. 利用电流诱导的奥斯特场实现磁化翻转的器件结构复杂, 能耗较高; 自旋转移力矩则存在读写路径不分离, 从而耐受性较差的问题. 基于拓扑表面态、Rashba效应或者自旋霍尔效应的SOT则通常面临着与垂直磁化翻转不兼容的问题, 而垂直磁各向异性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)是MRAM器件小型化的关键. 要利用SOT实现垂直磁化翻转, 通常需要特殊的结构设计或者外磁场的辅助. 近年来, 通过在材料中引入结构不对称性^[9]、利用反铁磁的钉扎作用^[10,11], 以及在压电陶瓷衬底上施加电场^[12], 均成功实现了无外磁场辅助的全电学操控的磁化状态翻转.

最近, 一种称为轨道转移力矩(orbit-transfer torque, OTT)的新奇效应被提出^[13]. OTT效应利用的是电流诱导的布洛赫电子的轨道磁化. 在2D材料体系, 这种轨道磁化自然指向面外, 可以实现对相邻铁磁层的无外场辅助的垂直磁化翻转. 利用OTT效应, 无外场辅助的垂直磁化翻转已经在WTe₂/Fe₃GeTe₂异质结中实现. 但是由于Fe₃GeTe₂的居里温度较低, 基于OTT效应的室温MRAM还未实现. 近日, 我们课题组报道了一种在室温下工作的基于OTT效应的磁随机存储器单元^[14]. 它由二维范德华材料WTe₂/Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂构成异质结, 其中Fe₃GaTe₂是一种二维铁磁金属, 具有PMA和高于室温的居里温度. 通过电流诱导WTe₂中的轨道磁矩极化, 利用界面OTT效应驱动Fe₃GaTe₂的垂直磁化翻转, 从而实现数据的写入. 数据读取通过Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂构成的MTJ来实现. 这种全二维的磁电阻存储器单元实现了在室温下的无外磁场辅助的数据写入和读取.

我们首先在WTe₂/Fe₃GaTe₂异质结构中展示了通过OTT效应实现的无外磁场辅助的垂直磁化翻转(图1(a), (b)). OTT驱动的垂直磁化翻转如图1(a), (b), T_d-WTe₂晶体具有新奇的轨道织构, 沿着T_d-WTe₂晶体的 a 轴施加电流可以诱导轨道磁化, 而沿 b 轴则不会诱导轨道磁化. 当WTe₂邻近铁磁层时, 轨道磁化 $\vec{m}$ 会产生类场矩 $\tau^{\text{FL}} \sim M \times \vec{m}$ 和类阻尼矩 $\tau^{\text{AD}} \sim M \times (\vec{m} \times M)$. 与SOT不同, 由于维度限制, OTT产生的轨道磁化沿面外方向. 室温下, 在WTe₂的 a 轴施加脉冲电流, 利用

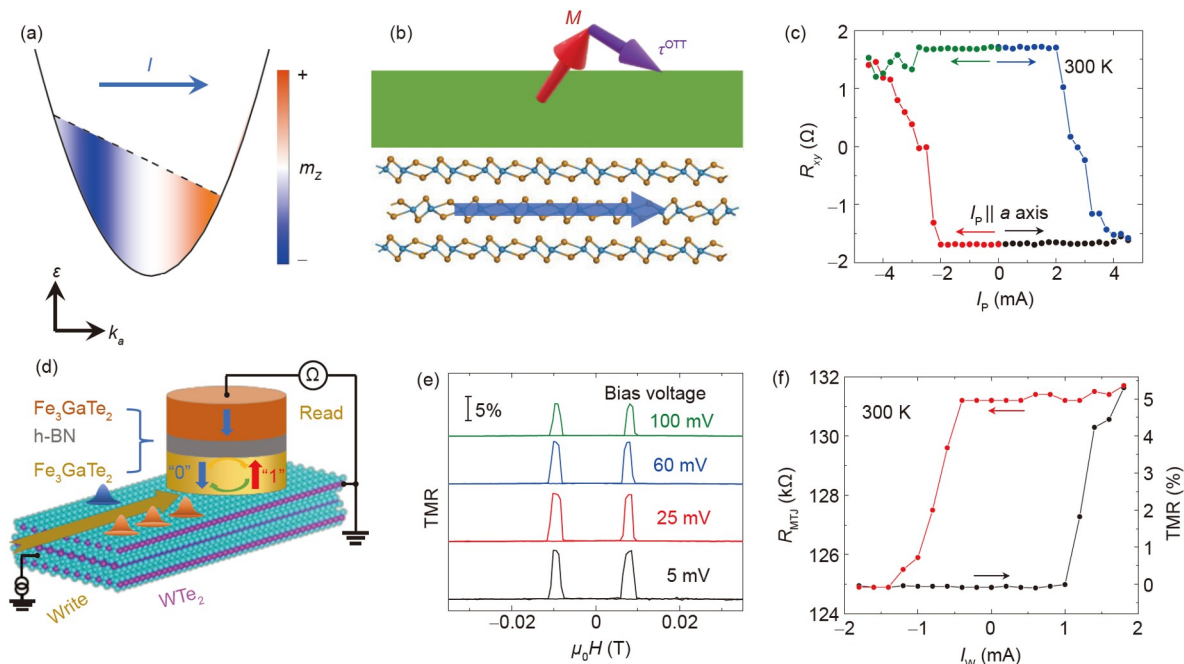


图 1 (网络版彩色)基于OTT效应的室温范德瓦耳磁存储单元^[14]. (a), (b) OTT效应驱动的垂直磁化翻转: (a) 电流诱导的轨道磁化示意图; (b) WTe₂中轨道磁化对相邻Fe₃GaTe₂施加力矩实现的垂直磁化翻转. (c) 霍尔电阻随沿WTe₂晶体 a 轴方向施加脉冲的变化, 其高度与霍尔电阻随磁场的变化相同, 实现了无外场的完全垂直磁化翻转. (d) MRAM单元示意图. (e) 室温下, 不同偏压下MRAM单元的隧穿磁电阻(tunneling magnetoresistance, TMR)随磁场的变化, 即MRAM的读取过程. (f) 室温下, 磁隧道结电阻在脉冲电流 I_W 作用下高低电阻态之间的切换, 即MRAM的写入过程

Figure 1 (Color online) OTT-based room-temperature van der Waals magnetoresistive memory cells^[14]. (a), (b) Illustration of OTT driven magnetization switching: (a) Current-induced magnetization of orbital magnetic moments; (b) torque exerted by orbital magnetic moment in the WTe₂ layer making PMA switching in Fe₃GaTe₂ layer. (c) Hall resistance as a function of the pulse current along crystalline a axis of WTe₂, and the height of which is the same as the changes of Hall resistance as a function of the magnetic field, indicating a full field-free PMA switching. (d) Illustration of the MRAM cell. (e) Tunneling magnetoresistance (TMR) at 300 K plotted as a function of the magnetic field under various bias voltages, that is, the reading process of MRAM. (f) The switching between high and low resistance states of the tunneling resistance by applying writing current (I_W) pulses at 300 K, that is, the writing process of MRAM

τ^{AD} 实现了对邻近铁磁层Fe₃GaTe₂的垂直磁化翻转, 施加一系列电流脉冲实现了高低电阻态之间的切换. 基于此, 我们构筑了WTe₂/Fe₃GaTe₂异质结. 为了展示无外场的垂直磁化翻转, 沿着WTe₂的 a 轴施加脉冲电流. 撤掉脉冲电流后, 利用小的交流电流 $i \ll I_p$ 进行霍尔电阻探测, 其霍尔电阻随着脉冲电流出现高度突变的高低电阻态(图1(c)), 表明了非易失的垂直磁化翻转. 此外, 电流诱导的霍尔电阻的高低电阻态与霍尔电阻随磁场变化的高低电阻态大小一致, 表明实现了100%的垂直磁化翻转. 此外, MTJ作为MRAM单元的重要组成部分, 我们构筑了基于Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂的MTJ. 选取两个具有不同厚度的Fe₃GaTe₂薄片, 其矫顽场也不相同, 其中上面Fe₃GaTe₂作为参考层, 下面Fe₃GaTe₂作为自由层, 薄BN (小于3 nm厚)作为隧穿层. 器件在室温下表现出典型的非线性隧穿行为, 改变垂直磁场使得上下两层Fe₃GaTe₂处于平行磁化或反平行磁化, MTJ则分别处于低或高电阻态, 室温下隧穿磁电阻(TMR)达到14%, 10 K下达到122%. 最后, 我们将WTe₂层与基于Fe₃GaTe₂的MTJ堆垛实现了全二维OTT-

MRAM单元WTe₂/Fe₃GaTe₂/BN/Fe₃GaTe₂(图1(d)). 室温下, 不同偏压下MRAM单元的TMR随磁场的变化处于5%~10%(图1(e)). 在300 K下施加脉冲电流驱动底层Fe₃GaTe₂的磁化翻转, 顶层Fe₃GaTe₂的磁化状态一直保持不变, 从而实现信息数据的写入(图1(f)). 信息的读取通过测量MTJ的电阻来完成, 低电阻状态和高电阻状态分别对应于编码“0”和“1”.

2D材料以其原子级平整界面、高度可调的物理性质和可控的晶体对称性, 对于促进MRAM技术的发展具有潜在的价值. 此前已经有文献报道基于2D材料的MTJ的TMR达到了与传统技术相当的数值, 比如, 基于CrI₃和Fe₃GeTe₂的MTJ的TMR分别可以达到310%^[15]和160%^[16]. 但是, 由于所用磁性材料的居里温度低于室温, 限制了它们在室温下的性能. 随着2D室温铁磁材料Fe₃GaTe₂的成功生长, 构筑基于2D材料的室温MRAM成为可能. 我们课题组基于Fe₃GaTe₂制备的MTJ的TMR达到了可观的14%. 此外, 通过设计2D材料的对称性, 有望实现高效率的MRAM器件. 我们课题组利用OTT效应实现的无外场辅助的PMA翻转, 利用的就是WTe₂低的晶体对

称性和独特的轨道结构。与基于STT和SOT的传统MTJ相比, 室温下OTT-MTJ的TMR大小相似。但是在当前器件的信息写入过程中, OTT-MTJ展现了相对较低的临界电流密度 $J_c \sim 3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。目前OTT器件使用1.8 mA/60 μs 脉冲电流进行

数据写入的能耗约为1 fJ/nm²。后续可通过使用更短时间的电流脉冲、减小器件尺寸和优化设计来进一步降低能耗和提升TMR数值。总之, 这项工作将积极推动超快速、高能效MRAM技术的发展。

致谢 感谢国家自然科学基金(61825401, 91964201)和合肥国家实验室科技创新2030——“量子通信与量子计算机”重大项目(2021ZD0302403)的资助。

推荐阅读文献

- 1 Žutić I, Fabian J, Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications. *Rev Mod Phys*, 2004, 76: 323–410
- 2 Yang H, Valenzuela S O, Chshiev M, et al. Two-dimensional materials prospects for non-volatile spintronic memories. *Nature*, 2022, 606: 663–673
- 3 Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, et al. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 082508
- 4 Ikeda S, Miura K, Yamamoto H, et al. A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction. *Nat Mater*, 2010, 9: 721–724
- 5 Liu L, Pai C F, Li Y, et al. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of tantalum. *Science*, 2012, 336: 555–558
- 6 Pai C F, Liu L, Li Y, et al. Spin transfer torque devices utilizing the giant spin Hall effect of tungsten. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 122404
- 7 Liu L, Lee O J, Gudmundsen T J, et al. Current-induced switching of perpendicularly magnetized magnetic layers using spin torque from the spin Hall effect. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 096602
- 8 Jung S, Lee H, Myung S, et al. A crossbar array of magnetoresistive memory devices for in-memory computing. *Nature*, 2022, 601: 211–216
- 9 Yu G, Upadhyaya P, Fan Y, et al. Switching of perpendicular magnetization by spin–orbit torques in the absence of external magnetic fields. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 548–554
- 10 van den Brink A, Vermeij G, Solignac A, et al. Field-free magnetization reversal by spin-Hall effect and exchange bias. *Nat Commun*, 2016, 7: 10854
- 11 Fukami S, Zhang C, DuttaGupta S, et al. Magnetization switching by spin–orbit torque in an antiferromagnet–ferromagnet bilayer system. *Nat Mater*, 2016, 15: 535–541
- 12 Cai K, Yang M, Ju H, et al. Electric field control of deterministic current-induced magnetization switching in a hybrid ferromagnetic/ferroelectric structure. *Nat Mater*, 2017, 16: 712–716
- 13 Ye X G, Zhu P F, Xu W Z, et al. Orbit-transfer torque driven field-free switching of perpendicular magnetization. *Chin Phys Lett*, 2022, 39: 037303
- 14 Pan Z C, Li D, Ye X G, et al. Room-temperature orbit-transfer torque enabling van der Waals magnetoresistive memories. *Sci Bull*, 2023, 68: 2743–2749
- 15 Song T, Cai X, Tu M W Y, et al. Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures. *Science*, 2018, 360: 1214–1218
- 16 Wang Z, Sapkota D, Taniguchi T, et al. Tunneling spin valves based on Fe₃GeTe₂/hBN/Fe₃GeTe₂ van der Waals heterostructures. *Nano Lett*, 2018, 18: 4303–4308