



全反铁磁隧道结

周晓荣, 秦培鑫*, 刘知琪*

北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191

*联系人, 秦培鑫, E-mail: qinpeixin@buaa.edu.cn; 刘知琪, E-mail: zhiqi@buaa.edu.cn

收稿日期: 2024-09-30; 接受日期: 2024-11-13; 网络出版日期: 2025-06-05

国家自然科学基金(编号: 52401300, 52425106, 52271235, 52121001)、国家重点研发计划(编号: 2022YFB3506000, 2022YFA1602700)、北京市自然科学基金(编号: JQ23005)、博士后创新人才支持计划(编号: BX20230451)和中国博士后科学基金(编号: 2024M754058)资助项目

摘要 磁隧道结是磁性随机存储器的重要组成部分, 主要依靠自旋依赖的电子隧穿进行信息的读取. 传统的磁隧道结以铁磁材料作为核心功能材料, 在超快速响应和高密度集成等方面遇到了挑战. 近期, 全反铁磁隧道结作为一种新型的磁隧道结器件吸引了人们的目光. 基于一些具有特殊对称性的反铁磁材料, 全反铁磁隧道结表现出显著的隧穿磁电阻效应, 有望克服传统铁磁隧道结的一系列缺点. 进一步发掘新奇的反铁磁材料, 探究低能耗、可靠的信息写入方式将是未来全反铁磁隧道结的研究重点之一.

关键词 磁隧道结, 反铁磁材料, 隧穿磁电阻, 自旋劈裂

PACS: 85.75.-d, 85.75.Dd, 75.50.Ee, 72.25.-b

近年来, 随着半导体工艺节点尺寸的不断减小, 摩尔定律接近失效, 传统的内存芯片性能遭遇瓶颈. 磁性随机存储器作为一种快速发展的存储介质受到了广泛关注, 其兼具了静态随机存取存储器和动态随机存取存储器的特点, 具有读写速度快、存储密度高、重复擦写耐久能力强、非易失性等优势, 有望成为一种通用的存储器从而取代传统的内存芯片. 磁隧道结是磁性随机存储器的核心器件之一. 通过外界信号的写入, 磁隧道结会表现出两个不同的电阻状态, 这两个电阻状态分别对应二进制中的“0”和“1”, 从而实现信息的存储.

磁隧道结的出现与薄膜界面间自旋依赖的电子隧穿研究密切相关. 从20世纪70年代开始, 受益于纳米薄

膜制备技术的进步, 研究人员通过制备高质量、低粗糙度的纳米多层膜来探究薄膜之间的相互作用. 在一些早期的研究中, 研究人员发现, 磁性材料多层膜在不同的磁化状态下电子会表现出不同的隧穿行为. 例如, Julliere^[1]报道了Fe-Ge-Co多层膜中铁磁层磁化平行排列和反平行排列会表现出不同的电导. 1988年, 来自德国和法国的研究团队几乎同时在Fe-Cr多层膜中发现了奇异的磁电阻现象, 其中Binasch等人^[2]在5 K下的Fe/Cr多层膜中观测到了~10%的磁电阻现象, 而Baibich等人^[3]在4.2 K下(Fe/Cr)₆₀超晶格中观测到了~50%的磁电阻现象(图1). 由于观测到的磁电阻数值明显大于传统磁性金属的磁电阻数值(通常不超过1%), 这一新奇的现象也被称为巨磁电阻效应. 尽管两个研

引用格式: 周晓荣, 秦培鑫, 刘知琪. 全反铁磁隧道结. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 227510

Zhou X R, Qin P X, Liu Z Q. All-antiferromagnetic tunnel junction (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 227510, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0421](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0421)

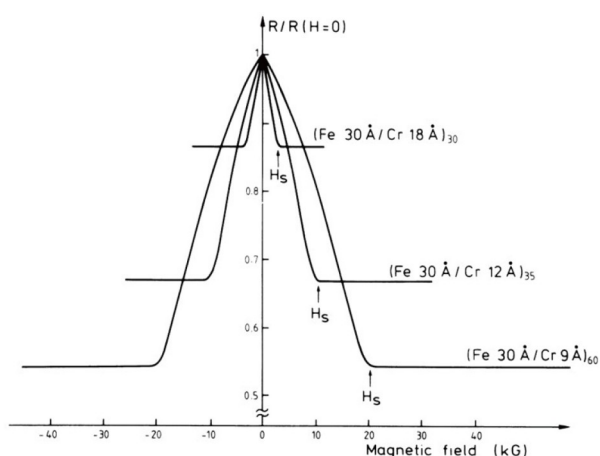


图 1 4.2 K 下 Fe/Cr 超晶格的巨磁电阻效应. 图片取自文献 [3], 已获授权

Figure 1 Giant magnetoresistance in Fe/Cr superlattices at 4.2 K. Reprinted with permission from ref. [3]. Copyright©1988, American Physical Society.

究团队所观测到的磁电阻数值并不完全相同, 但二者背后的物理机理却是一致的: 在零磁场下, 相邻 Fe 薄膜由于 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida 相互作用表现出反铁磁耦合, 即二者的磁矩反平行排列, 薄膜体系表现出高阻态; 当施加外磁场时, 相邻 Fe 薄膜表现出铁磁耦合, 即二者的磁矩平行排列, 薄膜体系表现出低阻态. 后续的研究发现, 将巨磁阻效应中的非铁磁层(例如 Fe-Cr 超晶格中的 Cr)替换为绝缘层, 多层膜系统(铁磁层/绝缘层/铁磁层)会因为电子的隧穿效应表现出更大的磁电阻效应, 故而这种效应也被称为隧穿磁电阻效应. 隧穿磁电阻的出现奠定了隧道结的结构基础, 更大的磁电阻也使得隧道结快速在机械硬盘的读磁头上产生了实际的应用, 同时也为磁性随机存储器的发展创造了条件.

最基础的磁隧道结由以下三个部分组成: 自由层、势垒层、参考层(图 2(a)). 其中自由层由磁矩自由转动的铁磁薄膜构成; 势垒层一般是绝缘氧化物薄膜, 为电子在自由层和参考层之间隧穿提供能量势垒; 参考层为磁矩无法自由转动的铁磁薄膜. 工作过程中, 外界激励(如磁场、电流、电压等)会改变自由层磁矩的方向, 而参考层磁矩方向不会受到影响, 从而获得两个非易失的电阻态. 在实际的应用中, 隧道结存在复杂的钉扎层, 而参考层有时会使用人工合成反铁磁层所代替(图 2(b)). 另外, 自旋过滤隧道结也引起了广泛的研究兴趣. 这种隧道结由磁性绝缘体和非磁性电极组

成, 磁电阻主要来源于电子在磁性绝缘体中的隧穿(图 2(c)). 例如, Lüders 等人^[4]在 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 中发现了 50% 的隧穿磁电阻现象; Song 等人^[5]在石墨烯/ CrI_3 /石墨烯二维材料自旋过滤隧道结中发现了 19000% 的隧穿磁电阻.

传统的磁隧道结以铁磁材料为核心材料, 受限于铁磁材料自身存在的杂散磁场和较低的共振频率. 近期, 反铁磁材料作为一种新型的信息功能材料受到了人们的关注^[6-10]. 反铁磁材料存在多个磁子晶格, 这些磁子晶格以特有的方式排列, 从而使得磁矩相互抵消, 最终使得反铁磁材料杂散磁场几乎为零. 此外, 反铁磁材料的共振频率为 THz 级别, 对应信息的写入时间为 ps 量级, 远远优于铁磁材料(共振频率为 GHz 级别, 对应信息写入时间为 ns 量级). 这些优势使得反铁磁材料可能成为新一代信息器件的核心材料. 如何构建以反铁磁为核心材料的磁隧道结, 以及如何进一步操控反铁磁隧道结并完成高效、低能耗的信息写入成为本领域的关键科学问题之一.

2011 年, Park 等人^[11]最先报道了具有单层反铁磁电极的隧道结器件 $\text{Pt}/\text{MgO}/\text{IrMn}/\text{NiFe}$. 由于 IrMn 和 NiFe 的交换弹簧效应, 通过磁场改变 NiFe 层的磁矩方向, 反铁磁 IrMn 的反铁磁轴的方向可以被随之改变, 从而表现出隧穿磁电阻效应. 在低温下, 该隧道结表现出了 160% 的隧穿磁电阻. 随后的 2012 年, Wang 等人^[12]也展示了具有相似结构的单层反铁磁电极的隧道结器件 $\text{Pt}/\text{AlO}_x/\text{MnIr}/[\text{CoPt}]$. 由于 CoPt 具有垂直磁化特征, MnIr 和 CoPt 之间的交换作用为垂直交换耦合作用. 这一特殊的交换耦合作用使得隧穿磁电阻可以在室温存在, 其室温隧穿磁电阻为 ~0.24%. 2016 年, Wadley 等人^[13]报道了一种利用电流操控反铁磁材料的方法, 为反铁磁隧道结的电流写入提供了一种新的思路. 实验结果表明, 室温下电流可以操控 CuMnAs 中的反铁磁序并获得两个稳定的反铁磁排布状态. 并且这两个稳定的反铁磁排布状态可以通过测量电阻的方式读出. 2024 年, Chou 等人^[14]在 $\text{Mn}_3\text{-Sn}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ 单层反铁磁隧道结中观测到了大于 100% 的隧穿磁电阻, 证实了非共线反铁磁中存在的自旋极化. 上述研究成果验证了反铁磁隧道结的初步可行性, 但此领域仍然存在着一些关键问题限制着反铁磁隧道结的进一步应用. 例如, 部分研究利用了铁磁层与反铁磁层的相互作用来进行写入, 这使得写入过程受限于铁磁材料较低的共振频率; 另外, 铁磁层的存

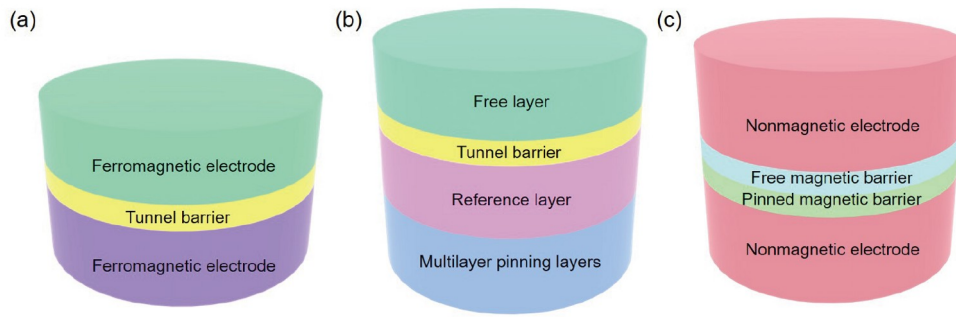


图 2 (网络版彩图) (a) 磁隧道结的基本结构; (b) 工业生产中常见的磁隧道结; (c) 自旋过滤磁隧道结

Figure 2 (Color online) (a) Structure of a basic magnetic tunnel junction; (b) magnetic tunnel junction used in industrial production; (c) spin-filter magnetic tunnel junction.

在使得杂散磁场依然存在。

最近的研究表明, 不包含铁磁层的全反铁磁隧道结可以解决上述问题并进一步发挥反铁磁材料的优势. 2023年, Qin等人^[15]报道了一种以非共线反铁磁 Mn_3Pt 和共线反铁磁 MnPt 为基础的全反铁磁隧道结 $\text{Mn}_3\text{Pt}/\text{MgO}/\text{Mn}_3\text{Pt}/\text{MnPt}$. 非共线反铁磁作为一种特殊的反铁磁材料, 往往存在一些未补偿的磁矩, 这使得其结合了铁磁材料和反铁磁材料的一些特点, 也可以响应外磁场. 故而全反铁磁隧道结中使用非共线反铁磁 Mn_3Pt 作为自由层和参考层, 并且仍然使用传统的共线反铁磁 MnPt 作为钉扎层钉扎相邻参考层的磁矩, 具体的结构如图3(a)和(b)所示. 电输运测量表明, 非共线反铁磁 Mn_3Pt /共线反铁磁 MnPt 发生了明显的交换偏置现象, 与传统的铁磁/反铁磁异质结类似. 原子自旋动力学模拟显示, 界面间 MnPt 未补偿的局域磁矩产生了交换偏置现象. 磁电阻测试表明, 这种全反铁磁隧道结表现出了非易失的隧穿磁电阻, 最大室温隧穿磁电阻可以达到~100%, 比最初的铁磁隧道结高1个数量级(图3(c)和(d)), 并且在10 K下最大可以达到138%. 第一性原理计算显示, 这种隧穿磁电阻来源于非共线反铁磁 Mn_3Pt 中动量空间的自旋劈裂. 同一时间, Chen等人^[16]也报道了相似的全反铁磁隧道结(图3(e)). 基于非共线反铁磁 Mn_3Sn , 全反铁磁隧道结 $\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{MgO}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ 表现出了室温2%的隧穿磁电阻, 理论研究显示此全反铁磁隧道结的隧穿磁电阻来源于磁八极矩不同排列方式. 上述全反铁磁隧道结的研究工作验证了非共线反铁磁中的自旋劈裂现象, 为超快、高效反铁磁自旋电子学器件的发展指明了新的方向. 受到全反铁磁隧道结的启发, Wang等人^[17]在单层的 Mn_3Sn -Ag复合物薄膜中也成功观测到磁电阻效应. 通过优化的磁

控溅射方式, 颗粒状的 Mn_3Sn 被包裹在Ag中, 形成了类似自旋阀的结构. 磁电阻测试显示这种复合物薄膜表现出了室温~0.3%的磁电阻, 进一步证明了非共线反铁磁中的自旋劈裂现象.

在上述全反铁磁隧道结相关的工作中, 自由层磁矩的操控需要通过磁场完成, 并且薄膜的外延生长需要合适的衬底(如 MgAl_2O_4 , MgO 等). 这些具体的要求与半导体CMOS工艺并不完全兼容, 使得全反铁磁隧道结的应用受到一定的限制. 基于这些思考, 2024年, Shi等人^[18]报道了一种基于非共线反铁磁 Mn_3Pt 的三端全反铁磁隧道结器件 $\text{Pt}/\text{Mn}_3\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mn}_3\text{Pt}/\text{Pt}$. 通过优化工艺参数, 这种全反铁磁隧道结可以使用Si为衬底进行制备. 进一步, 利用电流在Pt中产生的自旋轨道力矩, 自由层的磁矩可以在零磁场下被有效操控, 即可以实现信号的电写入和读出. 磁电阻测试显示, 最大的隧穿磁电阻可以达到~110%. 这些优势大大增加了全反铁磁隧道结的CMOS兼容性, 为全反铁磁隧道结的实际应用奠定了重要基础.

迄今为止, 全反铁磁隧道结以非共线反铁磁为核心材料. 非共线反铁磁虽然只有很小的未补偿磁矩, 但仍然存在一些杂散场, 对存储密度仍有影响. Chen等人^[19]报道了一种完全没有杂散场的石墨烯/双层 CrSBr /双层 CrSBr /石墨烯全反铁磁自旋过滤隧道结. 这种隧道结利用双层 CrSBr 的反铁磁性和面内各向异性, 将一个双层 CrSBr 转一定角度叠加在另一个双层 CrSBr 上, 这两个双层 CrSBr 充当隧道结的隧穿层. 由于层间的相互作用, 隧道结存在两个非易失态, 其中一个非易失态所有的相邻 CrSBr 两两都为反平行排列, 此为高阻态; 另一个非易失态最中间的相邻 CrSBr 为平行排列, 此为低阻态. 磁电阻测量显示, 低温下隧穿

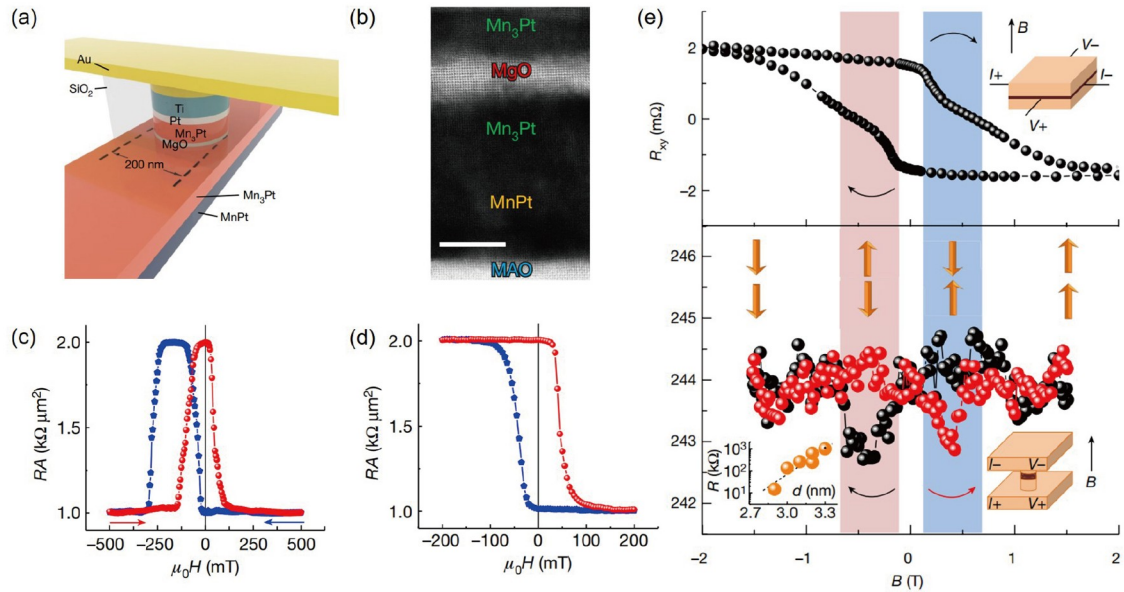


图 3 (网络版彩图) (a) 全反铁磁隧道结的结构示意图; (b) 全反铁磁隧道结的纵截面的透射电子显微镜图; (c) 室温隧穿磁电阻随磁场的变化关系图; (d) 室温隧穿磁电阻随小磁场的变化关系图。图片取自文献[15], 已获授权。 (e) 全反铁磁隧道结的霍尔电阻和隧穿磁电阻随磁场的变化关系图。图片取自文献[16], 已获授权

Figure 3 (Color online) (a) Schematic of an all-antiferromagnetic tunnel junction; (b) cross-sectional transmission electron microscopy image of the all-antiferromagnetic tunnel junction; (c) room-temperature tunnelling magnetoresistance as a function of the magnetic field; (d) room-temperature tunnelling magnetoresistance as a function of the small magnetic field. Reprinted with permission from ref. [15]. Copyright©2023, Springer Nature. (e) Hall resistance and tunnelling magnetoresistance versus magnetic fields for the all-antiferromagnetic tunnel junction. Reprinted with permission from ref. [16]. Copyright©2023, Springer Nature.

磁电阻可以达到700%以上。虽然这种隧道结还无法在室温工作, 但这一工作将全反铁磁隧道结的概念引入到二维材料领域, 为新器件的研发提供了新的思路。

综上所述, 全反铁磁隧道结作为一种新兴的自旋电子学器件, 目前正处于快速发展的阶段。未来全反铁磁隧道结的研究主要聚焦于寻找更适宜的材料体系、更丰富的器件结构和更有效的磁矩翻转方式。根据当前最新的研究趋势, 未来全反铁磁隧道结的研究可能在以下两个方面取得一些进展。第一, 使用交变磁体作为核心材料构建全反铁磁隧道结。交变磁体是最近发现的一类特殊的共线反铁磁材料。交变磁体拥有传统共线反铁磁的优势, 即磁矩反平行排列, 没有杂散场的存在。交变磁体的特殊点在于独特的晶格对称性赋予了其自旋劈裂, 不需要非共线反铁磁中复杂的磁结构。这些特点奠定了以交变磁体为核心材料的全反铁磁隧道结的理论基础。近期的理论预言表明, 以交变磁体 RuO_2 为基础的 $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2/\text{RuO}_2$ ^[20]和 $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2/\text{CrO}_2$ ^[21]等反铁磁隧道结中可能存在很大的隧穿磁电阻, 这些理论研究进一步支撑了以交变磁体为基

础的全反铁磁隧道结的可行性。未来的实验研究中需要通过工艺参数优化制备得到高质量单晶 RuO_2 薄膜, 并且需要尽可能降低表面粗糙度。由于交变磁体属于共线反铁磁的一种, 如何对其磁矩进行有效操控也是需要克服的难点之一。第二, 使用电压操控全反铁磁隧道结的磁矩。迄今为止, 磁场、电流都被证实可以操控全反铁磁隧道结。然而, 使用磁场和电流进行信息写入需要很大的电流, 这造成了大量的能源消耗, 也会影响器件尺寸进一步缩小。使用电压代替电流可以有效解决上述问题。利用电压进行信息写入有多种不同的物理机制, 电压调控磁各向异性是其中重要的机理之一。电压调控磁各向异性最早被发现存在于 Fe/MgO 界面, 电压改变了界面处杂化轨道的填充情况, 从而通过自旋轨道耦合作用改变了铁磁层的磁各向异性。近期的理论研究表明, 电压调控磁各向异性也可以作用于反铁磁, 仅仅消耗250 aJ就可以翻转反铁磁层, 并且整个翻转过程需要的时间小于30 ps^[22]。这些初步的研究成果为电压调控磁各向异性全反铁磁隧道结的发展奠定了重要基础。

参考文献

- 1 Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films. *Phys Lett A*, 1975, 54: 225–226
- 2 Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys Rev B*, 1989, 39: 4828–4830
- 3 Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2472–2475
- 4 Lüders U, Barthélémy A, Bibes M, et al. NiFe_2O_4 : A versatile spinel material brings new opportunities for spintronics. *Adv Mater*, 2006, 18: 1733–1736
- 5 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
- 6 Yan H, Feng Z, Shang S, et al. A piezoelectric, strain-controlled antiferromagnetic memory insensitive to magnetic fields. *Nat Nanotech*, 2019, 14: 131–136
- 7 Yan H, Feng Z, Qin P, et al. Electric-field-controlled antiferromagnetic spintronic devices. *Adv Mater*, 2020, 32: 1905603
- 8 Feng Z, Zhou X, Šmejkal L, et al. An anomalous hall effect in altermagnetic ruthenium dioxide. *Nat Electron*, 2022, 5: 735–743
- 9 Qin P, Zhou X, Liu L, et al. Antiferromagnetic spintronics: Towards high-density and ultrafast information technology. *Sci Bull*, 2023, 68: 972–974
- 10 Chen H, Liu L, Zhou X, et al. Emerging antiferromagnets for spintronics. *Adv Mater*, 2024, 36: 2310379
- 11 Park B G, Wunderlich J, Martí X, et al. A spin-valve-like magnetoresistance of an antiferromagnet-based tunnel junction. *Nat Mater*, 2011, 10: 347–351
- 12 Wang Y Y, Song C, Cui B, et al. Room-temperature perpendicular exchange coupling and tunneling anisotropic magnetoresistance in an antiferromagnet-based tunnel junction. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 137201
- 13 Wadley P, Howells B, Železný J, et al. Electrical switching of an antiferromagnet. *Science*, 2016, 351: 587–590
- 14 Chou C T, Ghosh S, McGoldrick B C, et al. Large spin polarization from symmetry-breaking antiferromagnets in antiferromagnetic tunnel junctions. *Nat Commun*, 2024, 15: 7840
- 15 Qin P, Yan H, Wang X, et al. Room-temperature magnetoresistance in an all-antiferromagnetic tunnel junction. *Nature*, 2023, 613: 485–489
- 16 Chen X, Higo T, Tanaka K, et al. Octupole-driven magnetoresistance in an antiferromagnetic tunnel junction. *Nature*, 2023, 613: 490–495
- 17 Wang X, Chen H, Yan H, et al. Room-temperature magnetoresistance in a single-layer composite film based on noncollinear antiferromagnetic Mn_3Sn . *Appl Phys Lett*, 2023, 122: 152403
- 18 Shi J, Arpacı S, Lopez-Dominguez V, et al. Electrically controlled all-antiferromagnetic tunnel junctions on silicon with large room-temperature magnetoresistance. *Adv Mater*, 2024, 36: 2312008
- 19 Chen Y, Samanta K, Shahed N A, et al. Twist-assisted all-antiferromagnetic tunnel junction in the atomic limit. *Nature*, 2024, 632: 1045–1051
- 20 Jiang Y Y, Wang Z A, Samanta K, et al. Prediction of giant tunneling magnetoresistance in $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2/\text{RuO}_2(110)$ antiferromagnetic tunnel junctions. *Phys Rev B*, 2023, 108: 174439
- 21 Chi B, Jiang L, Zhu Y, et al. Crystal-facet-oriented altermagnets for detecting ferromagnetic and antiferromagnetic states by giant tunneling magnetoresistance. *Phys Rev Appl*, 2024, 21: 034038
- 22 Lopez-Dominguez V, Almasi H, Amiri P K. Picosecond electric-field-induced switching of antiferromagnets. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 024019

All-antiferromagnetic tunnel junction

ZHOU XiaoRong, QIN PeiXin^{*} & LIU ZhiQi^{*}

School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Corresponding authors (QIN PeiXin, email: qinpeixin@buaa.edu.cn; LIU ZhiQi, email: zhiqui@buaa.edu.cn)*

Magnetic tunnel junction is an important part of magnetoresistive random access memory, which mainly relies on spin-dependent electron tunnelling for information reading. Traditional magnetic tunnel junctions, which use ferromagnetic materials as the core functional materials, have encountered challenges in terms of ultra-fast response and high-density integration. Recently, the all-antiferromagnetic tunnel junction has attracted considerable attention as a new type of magnetic tunnel junction device. Based on some kinds of antiferromagnetic materials with certain symmetries, the all-antiferromagnetic tunnel junction exhibits obvious tunnelling magnetoresistance, and has the potential to overcome a series of shortcomings of traditional ferromagnetic tunnel junctions. Further exploration of novel antiferromagnetic materials, along with the development of low-energy and reliable information storage methods, will be crucial in advancing this research field.

magnetic tunnel junction, antiferromagnetic materials, tunnelling magnetoresistance, spin splitting

PACS: 85.75.-d, 85.75.Dd, 75.50.Ee, 72.25.-b

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0421](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0421)