
轨道矩磁性存储器：从物理机制到器件应用*

王平 芦鹏 王丁丁 刘鹏飞 张德林[†] 姜勇[†]

(天津工业大学, 电子与信息工程学院 量子材料与器件研究院, 天津 300387)

摘要

后摩尔时代, 传统器件功耗瓶颈的日益凸显与人工智能算力需求的急剧增长, 对存储与逻辑芯片的性能提出了前所未有的挑战. 开发新型存储与逻辑器件, 已成为应对上述难题的研究热点. 轨道电子学聚焦于电子轨道角动量的产生、输运与调控, 为突破传统自旋电子学器件的技术瓶颈、实现高性能磁性存储与逻辑器件开辟了新路径. 本文综述了轨道霍尔效应及相关器件在物理机制、效率调控及器件应用方面的研究进展. 首先, 介绍了弱自旋轨道耦合材料中轨道霍尔效应与轨道 Rashba-Edelstein 效应的微观机制, 探讨了实现高效电荷流-轨道流转换效率的物理机制. 进而, 阐述了轨道矩的产生机制, 系统梳理了轨道矩效率的表征方法及调控策略. 在此基础上, 综述了轨道矩驱动下垂直磁各向异性铁磁材料磁化翻转的研究进展. 进一步面向器件应用, 论述了轨道矩驱动的磁隧道结在写入功耗与翻转速度方面的性能突破. 最后, 总结了轨道电子学领域的重要研究进展, 并对当前存在的问题与挑战进行了分析与展望.

关键词: 轨道电子学, 轨道霍尔效应, 轨道矩, 磁化翻转, 磁隧道结

基金: 国家重点研发计划(批准号:2022YFA1204003)和国家自然科学基金(批准号:U24A6002, 52271240, 52501253, U23A20551, 12304154)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yjiang@tiangong.edu.cn

通信作者. E-mail: zhangdelin@tiangong.edu.cn

第一作者. E-mail: pingwang@tiangong.edu.cn

1 引言

随着人工智能、物联网和大数据等新兴技术的快速发展，全球数据量呈指数增长。海量数据的存储、传输和处理对芯片性能提出了前所未有的挑战，探索新型存储和逻辑器件已成为应对上述难题的研究热点^[1,2]。磁性随机存储器(magnetic random-access memory, MRAM)凭借其高速度、高密度、低功耗和非易失性等显著优势，有望成为突破传统半导体器件性能瓶颈、支撑人工智能发展的关键前沿技术。磁隧道结(magnetic tunnel junction, MTJ)是磁性随机存取存储器核心存储单元，而磁化翻转的驱动方式作为磁性随机存储器的核心技术，直接决定了其读写速度、功耗和可靠性等关键性能指标。因此，持续开发和优化驱动方式已成为抢占未来芯片市场的关键所在。过去十余年间，基于电子自旋角动量的自旋电子学存储和逻辑器件研究取得诸多重要突破，开发和制备了基于自旋转移矩(spin-transfer torque, STT)与自旋轨道矩(spin-orbit torque, SOT)两类核心驱动方式的磁性随机存储器，为实现高速度、高密度和低功耗存储器件和逻辑器件奠定了基础^[3-9]，如图 1 所示。然而，随着器件特征尺寸不断逼近物理极限，对器件性能要求日益提高，上述两类存储器件也面临严峻的技术挑战。自旋转移矩器件受限于电流穿过隧穿势垒层，导致器件能耗很高、耐久性不足等问题^[3,4]。自旋轨道矩器件虽通过读写路径分离提高了器件耐久性，但其电荷-自旋流转换依赖于重金属等体系的自旋轨道耦合强度，自旋轨道矩效率有限，因而其能耗依然很高^[5-9]。

轨道电子学(Orbitronics)以电子的轨道角动量为参量，为设计和开发新型存储与逻辑器件提供了新的技术路径，有望解决上述自旋转移矩器件能耗高、耐久性不足，及自旋轨道矩器件依赖于强自旋轨道耦合、效率有限等关键难题，如图 1 所示。传统观点认为，在晶体场作用下，电子的轨道角动量通常被视为淬灭的自由度^[10-13]。然而，近年来的理论与实验研究证实，轨道角动量不仅可以产生、输运，还可以用于驱动磁化动力学。2005 年，张首晟教授团队首次从理论上预言了 *p* 型 Si 中本征轨道流的存在^[14]；2009 年和 2011 年，理论工作分别预测了 4*d*、5*d* 过渡金属中的轨道霍尔效应(orbital Hall effect, OHE)及轨道 Rashba 效应(orbital Rashba effect, ORE)^[15,16]。2018 年，理论计算进一步表明，在弱自旋轨道耦合的 3*d* 轻金属中，外加电场可在动量空间诱导轨道织构，实现电荷流-轨道流的高效转换^[17,18]。2021 年，理论工作预言轨道流可在非磁/铁磁异质结中输运并转换，借助铁磁材料自身的自旋轨道耦合与交换耦合将轨道流转换为自旋流，进而诱导轨道矩

(orbital torque, OT), 驱动磁化动力学^[19]. 2023年, Choi等人首次利用磁光克尔效应直接观察到3d轻金属Ti中的轨道霍尔效应,并在Ti/Ni结构中实现了电荷流-轨道流-自旋流的转换,产生轨道矩^[12]. 自此,轨道电子学迅速引起广泛关注.

大量研究表明,将3d(Ti^[12,20-23]、Cr^[24-28]、Mn^[29,30])、4d(Zr^[31-33]、Nb^[34-36]、Ru^[35])和5d(Ta^[37,38]、W^[20]、Pt^[39,40])等非磁材料,与Ni^[12,20,24,32,34,35]、Co^[28,29,36]、NiFe^[32]、CoTb^[26]、CoGd^[41]、CoPt^[42]、Co/Pt多层膜^[31]、Co/Ni多层膜^[43]、二维范德华Fe₃GaTe₂^[21]、铁磁绝缘体Tm₃Fe₅O₁₂^[44,45]和Y₃Fe₅O₁₂^[46,47]以及反铁磁Mn₃Sn^[27,48]等铁磁材料复合构成异质结,无需依赖非磁材料的强自旋轨道耦合便可实现电荷流-轨道流的高效转换,驱动磁化动力学. 此外,相对于自旋轨道矩驱动的磁隧道结(Magnetic tunnel junction, MTJ),轨道矩驱动的磁性隧道结也展现出优越的性能,例如Ru/Pt轨道霍尔通道的磁隧道结中,轨道矩驱动磁化翻转的功耗降低了60%^[43]; Ru/W轨道霍尔通道的磁隧道结写入速度快至28.7 ps^[49]; Ti/Ta轨道霍尔通道的磁隧道结在历经1000次开关循环后仍无性能衰减迹象^[50]. 上述研究结果表明,轨道矩器件在速度、功耗、耐久性等方面具有显著优势.

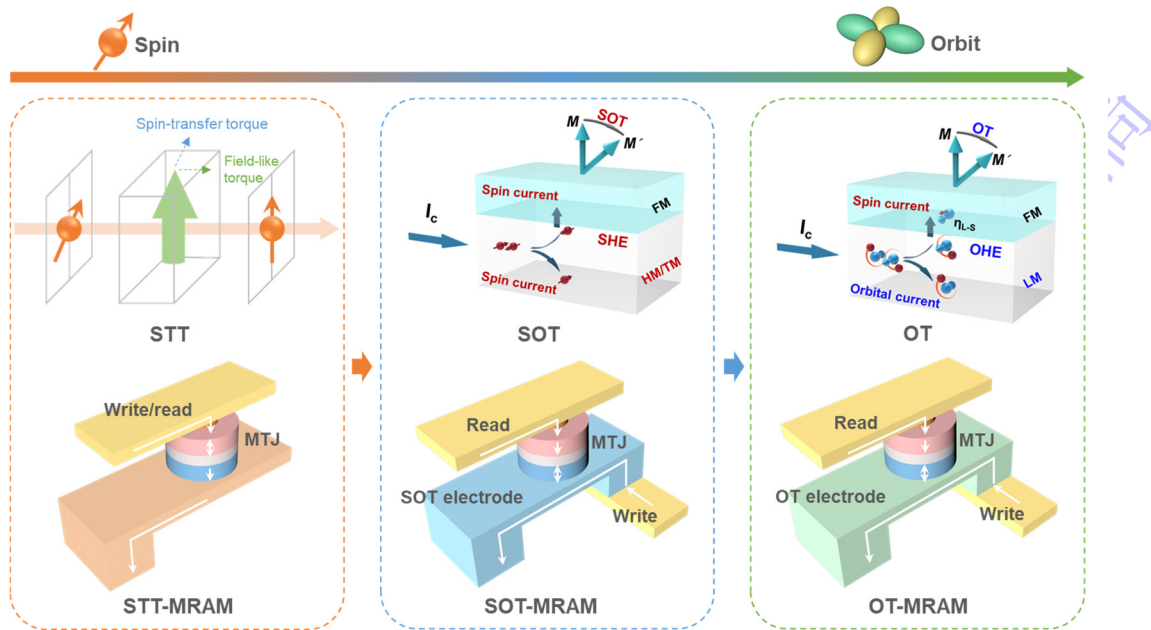


图 1. 自旋转移矩、自旋轨道矩和轨道矩磁性随机存储器物理机制和原型器件^[31]
 Fig. 1. Physical mechanism and prototype device of spin-transfer torque, spin-orbit torque, and orbital torque magnetic random access memories^[31].

本文旨在综述轨道霍尔效应及其器件的物理机制、效率调控策略及器件应用方面的研究进展. 首先,阐述了轨道霍尔效应与轨道 Rashba-Edelstein 效应的微观

机制；进而，介绍了轨道矩的产生机制、轨道矩效率的表征方法和调控策略；在此基础上，综述轨道矩驱动垂直磁化翻转的研究进展，并探讨轨道矩驱动磁隧道结的器件性能突破；最后，总结了本领域当前面临的挑战与未来机遇，展望了轨道电子学在高能效存储与逻辑器件中的潜在应用价值。

2 轨道效应

2.1 轨道霍尔效应

作为霍尔效应家族的一员，轨道霍尔效应是产生轨道流的体效应物理机制，主要源于中心对称金属体系中的轨道织构和非中心对称二维材料体系的轨道磁矩。在非磁材料体系中，当施加电场时，电荷流通过轨道霍尔效应可被转换为轨道流，且不依赖于非磁材料的强自旋轨道耦合，如图 2(a)所示^[13]。在中心对称金属材料体系中，尽管轨道磁矩因对称性而淬灭，但在外电场驱动下，轨道杂化可在动量空间中形成轨道织构，产生有限的轨道角动量 $\langle L_z \rangle$ ，从而诱导轨道霍尔效应和轨道流，如图 2(b)和 2(c)所示^[17,51]。在非中心对称二维过渡金属硫化物等材料体系中，反演对称性破缺诱导出稳定的动量空间本征轨道磁矩，由于 K 和 K' 处贝里曲率相反，当施加外电场时，这些轨道磁矩沿相反方向流动，从而产生轨道霍尔效应和轨道流，如图 2(d)所示^[52]。除了上述内禀轨道霍尔效应，还存在外禀轨道霍尔效应，其主要来源于斜散射和侧跳机制^[53-55]。外禀轨道霍尔效应与杂质和缺陷等密切相关，其轨道霍尔电导率对杂质散射势的强度和对称性等参数表现出强烈依赖性^[54,55]。

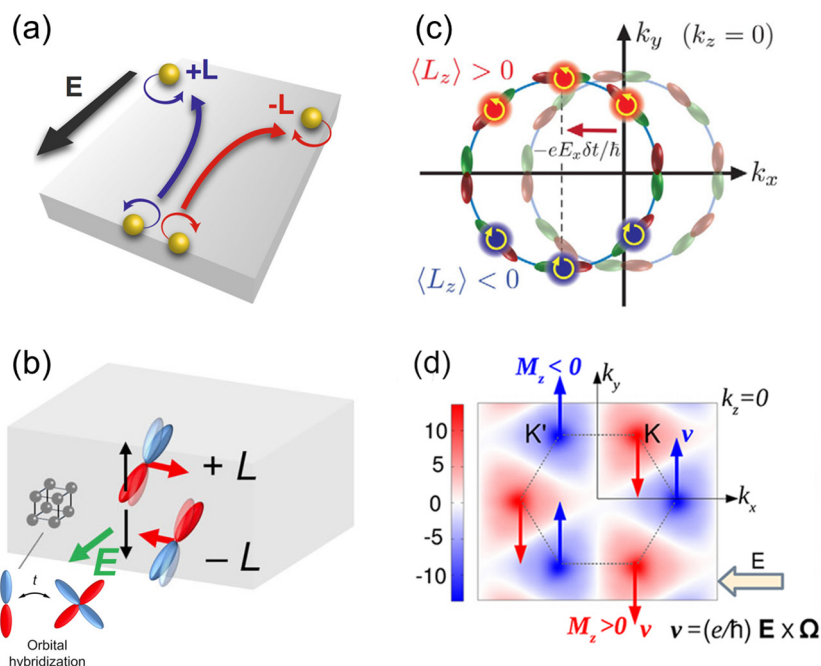


图 2. 轨道霍尔效应机制图. (a) 轨道霍尔效应产生轨道流示意图^[13]; (b) 轨道杂化产生轨道霍尔效应机制图^[51]; (c) 轨道杂化在动量空间中形成轨道织构机制图^[17]; (d) 轨道磁矩诱导轨道霍尔效应机制图^[52]

Fig. 2. Schematic diagrams of orbital Hall effect. (a) Schematic of orbital current generation via the orbital Hall effect ^[13]; (b) Mechanism diagram of orbital Hall effect based on orbital hybridization ^[51]; (c) Mechanism diagram of orbital texture formation in momentum space due to orbital hybridization ^[17]; (d) Mechanism diagram of orbital Hall effect induced by orbital magnetic moment ^[52].

2.2 轨道 Rashba-Edelstein 效应

与轨道霍尔效应不同，轨道 Rashba-Edelstein 效应主要源于材料表面和异质结界面的反演对称性破缺。当施加外电场时，通过轨道 Rashba-Edelstein 效应也可以不依赖材料的强自旋轨道耦合将电荷流转换为轨道流，如图 3(a)所示 ^[56]。轨道 Rashba-Edelstein 效应包括轨道 Rashba 效应和轨道 Edelstein 效应(orbital Edelstein effect, OEE)。轨道 Rashba 效应源于反演对称性破缺导致的能带劈裂，局域轨道角动量诱导出与 $\mathbf{L} \times \mathbf{k}$ 成正比的电偶极矩，该电偶极矩与表面电场(E_s)耦合并沿其方向排列，在动量空间中形成手性轨道角动量织构和 Rashba 劈裂 ^[16]。在轨道 Rashba 系统中，尽管每个本征态的轨道淬灭已被解除，但根据时间反演对称性的约束，整个费米面上的净轨道角动量积分仍应为零。然而，当施加外电场时，时间反演对称性被破坏，非平衡电子分布导致净轨道角动量不再为零，从而产生轨道 Edelstein 效应，如图 3(b)所示 ^[13,56]。

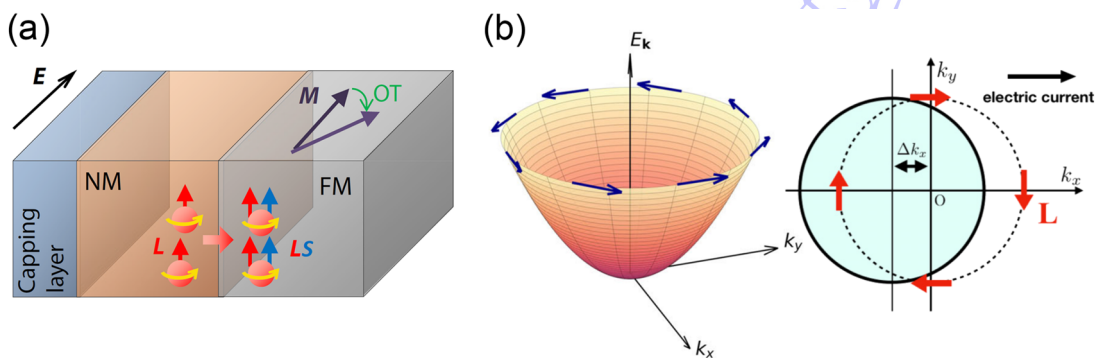


图 3. 轨道 Rashba-Edelstein 效应机制图. (a) 轨道 Rashba-Edelstein 效应产生轨道流示意图^[56]; (b) 动量空间轨道 Rashba-Edelstein 效应机制图^[13,56]。

Fig. 3. Schematic diagrams of orbital Rashba-Edelstein effect. (a) Schematic of orbital

current generation via the orbital Rashba-Edelstein effect ^[56]; (b) Mechanism diagram of orbital Rashba-Edelstein effect in momentum space ^[13,56].

3 轨道矩

3.1 轨道矩产生机制

轨道矩的产生机制与自旋轨道矩有所不同. 在自旋轨道矩主导的非磁/铁磁异质结体系中, 利用自旋霍尔效应或者自旋 Rashba-Edelstein 效应, 具有强自旋轨道耦合的非磁材料可以将电荷流转换为自旋流, 自旋流注入相邻铁磁层后直接与其磁矩产生交换耦合, 诱导自旋轨道矩, 其自旋轨道矩效率依赖于非磁层中自旋轨道霍尔角的大小, 如图 4(a)所示 ^[31]. 而在轨道矩主导的非磁/铁磁异质结体系中, 轨道矩的产生包括两个核心过程: 首先, 通过轨道霍尔效应或轨道 Rashba-Edelstein 效应, 弱自旋轨道耦合的非磁材料可将电荷流转换成轨道流; 进而, 由于轨道流无法直接与铁磁层的磁矩耦合, 该轨道流注入相邻铁磁层, 借助铁磁材料的自旋轨道耦合和交换耦合等将轨道流转换成自旋流, 产生轨道矩. 轨道矩效率取决于非磁材料的轨道霍尔角和铁磁材料的轨道-自旋转换系数, 如图 4(b)所示 ^[31].

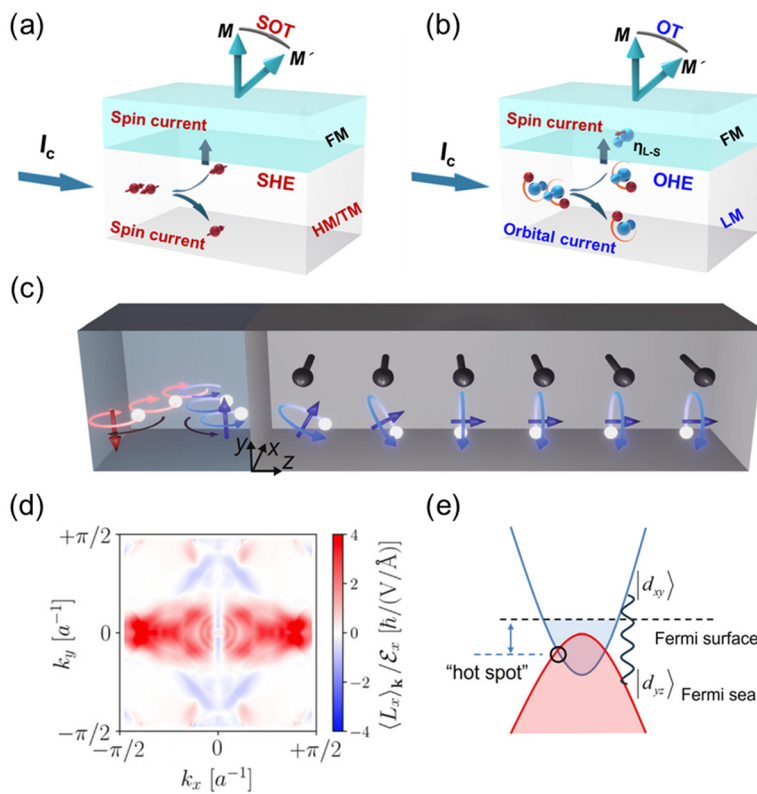


图 4 轨道矩产生机制. (a) 自旋轨道矩和(b) 轨道矩机制对比^[31]; (c) 轨道流在铁磁材料中通过轨道热点输运与磁矩作用机制图^[20]; (d) 动量空间中轨道角动量分布^[57]; (e) 轨道热点产生示意图^[51]

Fig. 4. Mechanisms of orbital torque generation. (a), (b) The comparison of spin-orbit torque and orbital torque mechanisms ^[31]; (c) Mechanism diagram of orbital current interacting with magnetic moments via orbital hot spot transport in ferromagnetic materials ^[20]; (d) Orbital angular momentum distribution in momentum space ^[57]; (e) Schematic of orbital hot spot generation ^[51].

在轨道矩产生的过程中, 非磁层产生的轨道流与铁磁层磁矩的作用机制主要有两种. 当沿 x 方向施加电场时, 非磁层中可诱导出携带 L_y 轨道角动量的轨道流. 该轨道流注入铁磁层后, 可通过以下过程产生轨道矩: (1) 具有 L_y 的轨道流在非磁/铁磁层界面附近通过铁磁层的自旋轨道耦合转换为携带 S_y 的自旋流, 随后通过交换耦合对铁磁层的磁矩施加轨道矩. 由于该过程依赖于自旋流的输运, 受自旋退相干影响, 其有效作用距离较短 ^[20,42]; (2) 铁磁层中的自旋轨道耦合与交换耦合共同作用, 诱导非平衡 L_y 绕 z 方向磁矩发生进动, 产生的 L_x 分量可通过动量空间中的轨道热点在铁磁层中长距离输运, 并通过自旋轨道耦合与交换耦合对磁矩产生轨道矩 ^[20,42], 如图 4(c)所示. 图 4(d)和 4(e)理论上揭示了铁磁材料中轨道流长程输运的微观机制 ^[51,57]. 在众多材料中, 晶体场使不同轨道能带发生劈裂, 但在动量空间中某些轨道热点处, 晶体对称性可使这些能带在费米面附近近乎简并, 动量空间中 k_x 轴附近存在显著的轨道热点, 该区域的电子态具有近简并的轨道特征, 从而导致 L_x 的大幅度响应, 这种热点被认为有助于长程输运 ^[51,57]. 同时, 费米面以下占据态与费米面以上未占据态之间的轨道杂化, 被认为是局域轨道角动量的来源 ^[51]. 因此, 轨道流的长程输运源于轨道的简并结构. 另外, 理论工作计算发现轨道流的弛豫长度小于 1.0 nm, 轨道流源于局域产生机制, 即边界或界面处电荷流分布不均产生梯度, 通过电子平均自由程尺度的“涡度”效应局域地产生轨道极化, 无序和晶界可能增强轨道角动量输运 ^[58,59].

3.2 轨道矩效率

基于轨道矩的产生机制, 轨道矩效率不仅取决于非磁材料中电荷流-轨道流转换效率(轨道霍尔角), 还取决于相邻铁磁材料中轨道流的转换和输运. 大量理论

计算结果表明, $3d$ 、 $4d$ 和 $5d$ 过渡金属材料均具有较大的轨道霍尔电导率, 表现出显著的轨道霍尔效应, 其氧化物表面或界面也可实现显著的轨道 Rashba-Edelstein 效应。轨道霍尔效应和轨道 Rashba-Edelstein 效应可产生较大的轨道霍尔角诱导轨道流, 且轨道流具有较长的轨道扩散长度。在众多轨道霍尔材料和轨道 Rashba-Edelstein 材料中, 弱自旋轨道耦合的 $3d$ 金属(Ti^[12,20-23,60-62]、Cr^[24-28,63]、Mn^[29,30])、 $4d$ 金属(Zr^[31-33]、Nb^[34-36]、Ru^[35])及其氧化物(CuO^[47,64-69])等, 因其低成本、环境友好和资源丰富等优势而备受关注。通过实验测量, 研究人员已经证实了 $3d$ 和 $4d$ 轻金属的轨道霍尔效应, 并且直接测量了其轨道霍尔角和轨道矩效率^[13,67]。2023 年, Choi 等人在 Nature 期刊发表突破性成果, 首次利用磁光克尔效应直接观察到 $3d$ 轻金属 Ti 中的轨道霍尔效应, 并在 Ti/Ni 结构中实现了电荷流-轨道流-自旋流转换, 产生了轨道矩, 轨道矩效率为 ~ 0.021 , 轨道扩散长度达 ~ 60 nm^[12]。在轻金属 Cr 中, 同样通过磁光克尔效应测量证明, 其具有显著的轨道霍尔效应, 轨道霍尔角和轨道扩散长度分别为 ~ 0.28 和 6.6 nm, 如图 5(a)和 5(b)^[63]。同时, Sala 等人还观察到轻金属 Mn 的轨道 Hanle 效应, 认为轨道角动量可随磁场方向变化发生进动, 产生显著的轨道 Hanle 磁电阻, 如图 5(c)所示^[30]。图 5(d)为 Mn 的 Hanle 磁电阻随其厚度的变化关系, 通过拟合得到 Mn 的轨道霍尔角为 ~ 0.016 , 轨道扩散长度为 ~ 2.0 nm, 其较小的轨道霍尔角可能是由于晶体缺陷导致了轨道淬灭和弛豫^[30]。

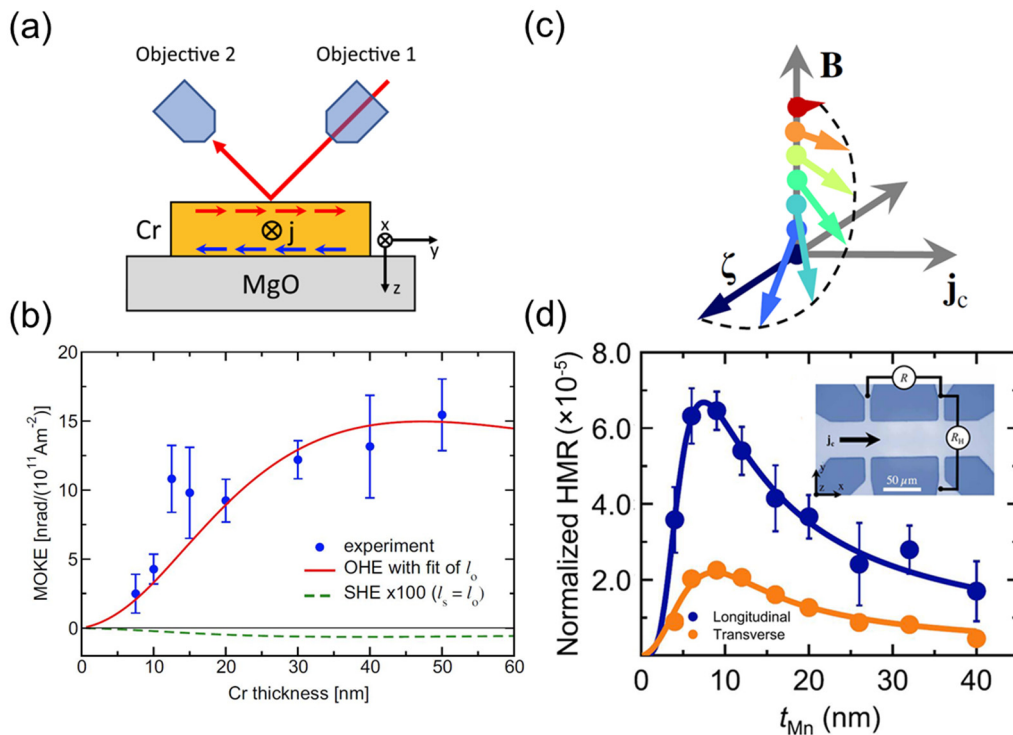


图 5 轨道霍尔材料的轨道霍尔角及其测量方法. (a)和(b) 利用磁光克尔效应方法测量轻金属 Cr 的轨道霍尔效应示意图及磁光克尔角与 Cr 厚度的依赖关系^[63]; (c)和(d) Mn 中 Hanle 磁电阻产生机制和测量示意图, 及 Mn 的 Hanle 磁电阻与 Mn 厚度的依赖关系^[30]

Fig. 5. Orbital Hall angle and the measurement methods in orbital Hall materials. (a) and (b) Schematic of orbital Hall effect measurement in light metal Cr by magneto-optical Kerr effect and the dependence of the magneto-optical Kerr rotation on Cr thickness^[63]; (c) and (d) Schematic of the generation mechanism and measurement of Hanle magnetoresistance in Mn, and the dependence of Hanle magnetoresistance on Mn thickness^[30].

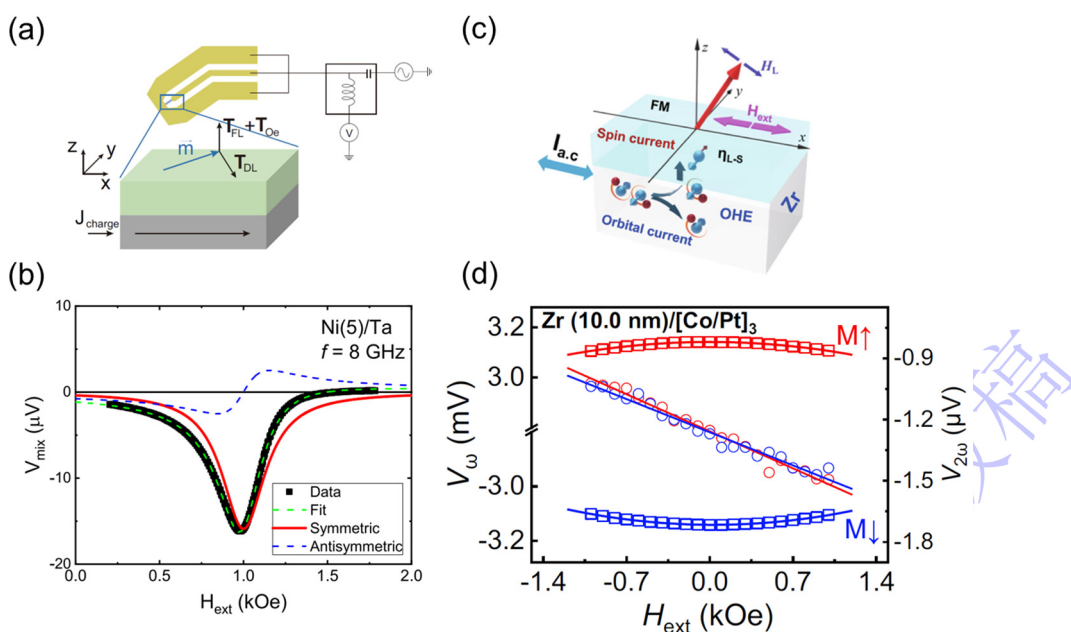


图 6 非磁/铁磁异质结中的轨道矩效率及其测量方法. (a)和(b) 利用自旋转矩-铁磁共振方法测量 Ta/Ni 异质结中轨道矩效率示意图及其测量曲线^[37]; (c)和(d) 利用谐波霍尔电压方法测量 Zr/[CoPt]₃ 异质结中轨道矩效率示意图及其测量曲线^[31]

Fig. 6. Orbital torque efficiency and the measurement methods in nonmagnetic/ferromagnetic heterostructures. (a) and (b) Schematic of orbital torque efficiency measurement in Ta/Ni heterostructures using the spin-torque ferromagnetic resonance and the corresponding measurement curves^[37]; (c) and (d) Schematic of orbital torque efficiency measurement in Zr/[CoPt]₃ heterostructures using the harmonic Hall voltage and the corresponding measurement curves^[31].

尽管材料的轨道霍尔效应和轨道 Rashba-Edelstein 效应被证实，但其产生的轨道流无法直接与铁磁材料的磁矩耦合，需要通过铁磁层的自旋轨道耦合或交换耦合进行转换，所以通常需要将具有较大轨道霍尔电导率的非磁材料和具有较大轨道-自旋转换系数的铁磁材料复合，获得大的轨道矩效率。目前，自旋力矩-铁磁共振(spin-torque ferromagnetic resonance, ST-FMR)和二次谐波(harmonic Hall effect, HHE)测量方法是表征轨道矩效率的常用手段，其中常用的铁磁材料包括 Ni^[12,20,24,32,34,35]、Co^[28,29,36]和 NiFe^[32]等。铁磁材料的选择不仅会影响轨道矩效率的大小，也决定了轨道矩效率的符号。Lee 等通过自旋力矩-铁磁共振测量发现，Ta/Ni 异质结中的轨道霍尔效应可诱导轨道流并产生轨道矩，其大小和方向与非磁层 Ta 的轨道霍尔电导率及铁磁层 Ni 的轨道-自旋转换系数均有关，实现了+0.03 的轨道矩效率，如图 6(a)和 6(b)所示^[37]。众多研究也表明当 3d 金属(Ti^[12,20-23,60-62]、Cr^[24-28,63]、Mn^[29,30])、4d 金属(Zr^[31-33]、Nb^[34-36]、Ru^[35])和 5d 金属(Ta^[37,38]、W^[20]、Pt^[39,40])与 Ni^[12,20,24,32,34,35]、Co^[28,29,36]和 NiFe^[32]铁磁材料复合时，其异质结的轨道矩效率的符号为正，这是因为 3d、4d 和 5d 金属的轨道霍尔电导率为正，Ni、Co、NiFe、CoFe 的轨道-自旋转换系数也是正的。因此，非磁/铁磁异质结的轨道矩效率大小和符号不仅取决于轨道霍尔角，还取决于相邻铁磁材料的轨道-自旋转换系数。

为了提高铁磁材料中轨道流-自旋流的转换效率，研究人员通过引入高轨道-自旋转换系数材料 Pt、Ta、Au、Tb 和 Gd 等作为插入层或与铁磁材料复合形成合金层，进一步提高铁磁材料体系轨道-自旋转换系数。实验表明，将重金属 Pt、Ta、Au 和稀土元素 Tb、Gd 作为插入层，构成 Cr/Pt/CoFeB、CuO_x/Pt/Tm₃Fe₅O₁₂、Ti/Ta/CoFeB、Cr/Au/Co 和 Cr/Tb/Co、Cr/Gd/Co、Mn/Gd/Co 异质结时^[24,28,29,44,70]，高轨道-自旋转换系数的 Pt、Ta、Au、Tb 和 Gd 层可将 Ti、Mn、Cr 和 CuO_x 层产生的轨道流高效地转换为自旋流，提高轨道矩效率。此外，将高轨道-自旋转换系数的重金属或稀土元素与铁磁材料复合制备多层膜或合金，也可实现轨道流-自旋流的高效转换。通过将 Pt 和 Co 复合构成多层膜，我们制备了 Zr/[Co/Pt]_n 异质结器件，通过谐波霍尔电压方法测量发现，其异质结的轨道矩效率可高达~0.78，如图 6(c)和 6(d)所示^[31]。同时，我们还利用掺杂策略对轻金属 Ti 的轨道霍尔特性进行调控，通过掺入 MgO、Gd 或 Pt 引入外禀散射、增强自旋轨道耦合及调控轨道杂化效应，可改变轨道霍尔材料的电阻率、轨道-自旋转换系数和轨道霍尔电导率，使轨道矩效率从纯 Ti 体系的~0.06 分别提升至~0.23、~0.20 和~0.27^[71]。另外，在

反铁磁 Mn/Pt/Mn₃Sn 异质结中, 实验结果表明其轨道矩效率高达~0.64, 轨道扩散长度达~11 nm^[48]. 在 Cr/CoTb 和 Gd_yCo_{100-y}/CuO_x 异质结中的轨道矩效率也分别可达~-0.57 和~-0.25(20 K)^[26,41]. 因此, 将重金属 Pt、Ta、Au 和稀土金属 Gd、Tb 用作插入层或掺杂元素, 可有效提高轨道矩效率. 此外, 通过轨道太赫兹、轨道泵浦和轨道 Seebeck 方法测量逆轨道霍尔效应或逆轨道 Rashba-Edelstein 效应, 也可有效表征轨道霍尔或轨道 Rashba-Edelstein 通道材料的轨道霍尔角及其异质结的轨道矩效率^[72-79].

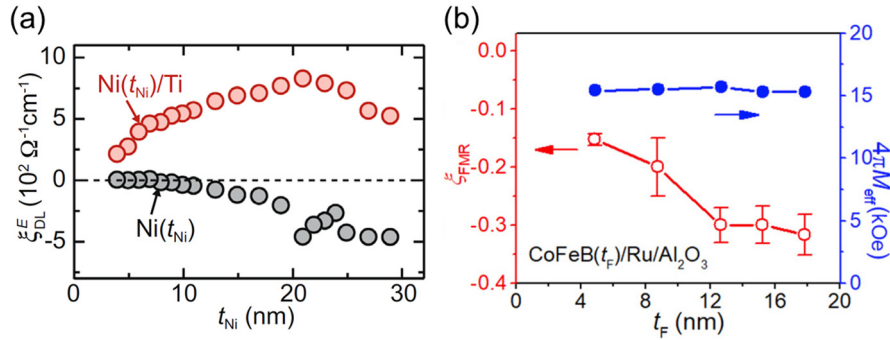


图 7 轨道流在铁磁材料中的长程输运特性. (a) Ti/Ni 体系的轨道矩效率随 Ni 厚度的变化^[20], (b) CoFeB/Ru/Al₂O₃ 体系的轨道矩效率随 CoFeB 厚度的变化^[80].

Fig. 7. Long-range transport characteristics of orbital current in ferromagnetic materials. (a) Dependence of orbital torque efficiency on Ni thickness in the Ti/Ni system^[20]; (b) Dependence of orbital torque efficiency on CoFeB thickness in the CoFeB/Ru/Al₂O₃ system^[80].

实验结果表明, 轨道流除了在非磁材料中具有较长的轨道扩散长度, 在铁磁材料中也具有长程输运特性, 这一特性也可显著调控轨道矩效率. 例如, 在 FeMn/CoPt 异质结中, 通过调控 CoPt 合金的结构对称性改变其轨道杂化, 可实现对轨道流输运特性和轨道矩效率的有效调控, 轨道流在 CoPt 中的输运距离可达~5 nm, 其轨道矩效率随 CoPt 厚度增加而增加^[42]. 基于轨道流长程输运的特性, 增加 Ti/Ni 结构中 Ni 的厚度, 可显著提高类阻尼力矩效率, 轨道流在 Ni 中的扩散长度可达~20 nm, 轨道矩效率可达~0.13, 如图 7(a)所示^[20]. 此外, Ru/Al₂O₃ 界面轨道 Rashba-Edelstein 效应产生的轨道流也可穿过 7 nm 厚的 Ru 层, 在 CoFeB/Ru/Al₂O₃ 异质结中诱导轨道矩, 其效率随 CoFeB 层厚度增加而显著增加, 当 CoFeB 层的厚度为 12 nm 时, 其效率可达~0.3, 如图 7(b)所示^[80]. 然而, 也有理论和实验工作证明轨道流具有短程输运特性^[58,59]. 在 W/Ni 异质结中, 利用太

赫兹技术测量发现 W 的轨道和自旋扩散长度分别为~0.36 nm 和~2.2 nm，其轨道扩散长度明显短于自旋扩散长度 [77]。

在不同材料体系中，轨道矩效率可通过晶体结构、轨道磁矩、界面自旋-涡度耦合以及外禀轨道斜散射等多种机制进行调控。晶体结构的变化可显著调控轨道矩效率，在 Ti/Ni(NiFe)异质结中，Ni、NiFe 与 Ti 的晶体取向变化可显著影响轨道矩效率，归因于轨道热点在动量空间中分布排列的调控 [81]。在轨道 Rashba-Edelstein 效应主导的 CuO/铁磁异质结中，CuO 晶体对称性的变化可有效改变转矩效率的符号 [82]。此外，在 CuO/CoO/Co 异质结中，其轨道矩效率显著受 CoO 层的轨道磁矩调控。相比于 NiO 和 MnO 插层，CoO 的轨道磁矩最大，因而其轨道流-自旋流转换作用最强，相应异质结的轨道矩效率最高，如图 8(a)和 8(b)所示 [83]。在 PtCo/Cu 异质结中，轨道矩效率随 Cu 厚度的变化规律，与 Cu 和 PtCo 电阻率比随 Cu 厚度的变化规律一致。这一现象归因于 Cu 和 PtCo 层之间的电阻率差异引起界面自旋-涡度耦合，该耦合效应亦可提高轨道矩效率，如图 8(c)和 8(d)所示 [84]。在以 SrRuO₃ 为轨道霍尔材料的研究中，SrRuO₃ 所产生的轨道矩效率显著依赖于其电导率。与自旋轨道矩效率不同，轨道矩效率随电导率减小而显著增加。该现象是由于体系中缺陷诱导的外禀轨道斜散射机制占据主导，缺陷散射会增加轨道弛豫时间，SrRuO₃ 中缺陷越多，电导率越低，散射越强，从而轨道霍尔电导率越大 [85]。

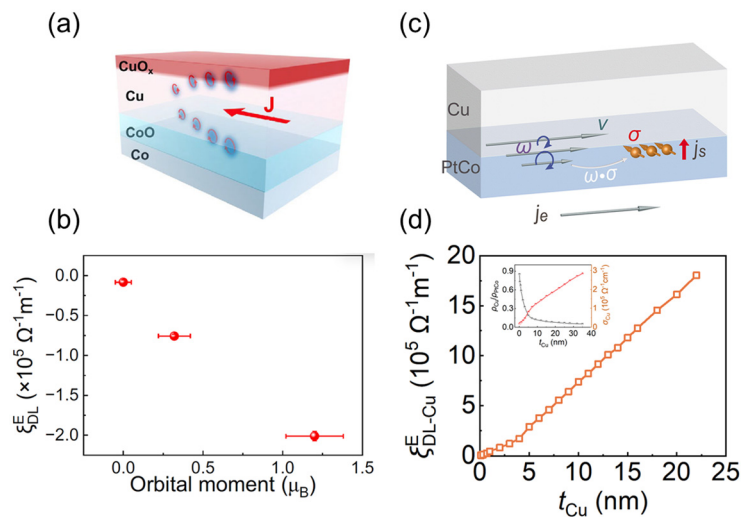


图 8 轨道矩效率的调控. (a)和(b) CuO_x/CoO/Co 体系中 CoO 的轨道磁矩调控轨道矩效率示意图和轨道矩效率随轨道磁矩变化关系 [83]，(c)和(d) Cu/PtCo 体系中界面自旋-涡度耦合调控轨道矩效率示意图和轨道矩效率随 Cu 厚度变化关系，插图 为 Cu/PtCo 电阻率比随 Cu 厚度变化关系 [84]

Fig. 8. Modulation of orbital torque efficiency. (a) and (b) Schematic diagram of orbital torque efficiency modulation via the orbital magnetic moment of CoO in the $\text{CuO}_x/\text{CoO}/\text{Co}$ system, and the dependence of orbital torque efficiency on the orbital magnetic moment ^[83]; (c) and (d) Schematic diagram of orbital torque efficiency modulation via interface spin-vorticity coupling in the Cu/PtCo system, and the dependence of orbital torque efficiency on Cu thickness, with the inset showing the dependence of the Cu/PtCo resistivity ratio on Cu thickness ^[84]

3.3 轨道矩驱动磁化翻转

实现高效的轨道矩驱动磁化翻转，是设计与制备高性能轨道矩存储器件过程中最为关键的性能指标。目前，已有众多研究成功实现了轨道矩驱动的磁化翻转。在以 CoFeB 为铁磁层的 $\text{Cr}/\text{Pt}/\text{CoFeB}$ 、 $\text{Ti}/\text{Ta}(\text{Pt})/\text{CoFeB}$ 、 Zr/CoFeB 、 $\text{CuO}_x/\text{CoFeB}$ 异质结中，均观察到了显著的轨道矩驱动磁化翻转。其翻转极性及临界翻转电流密度不仅依赖于 Ti 、 Cr 和 Zr 等轻金属的轨道霍尔角，还显著依赖 CoFeB 铁磁层及 Pt 、 Ta 插入层的轨道-自旋转换系数 ^[24,33,70,86]，如图 9(a)和 9(b)所示。我们将具有不同轨道-自旋转换系数的两类垂直磁各向异性铁磁层 $[\text{Co}/\text{Pt}]_3$ 和 $\text{CoFeB}/\text{Gd}/\text{CoFeB}$ ，分别与轻金属 Zr 复合构成异质结。利用 Zr 产生的轨道矩驱动了上述铁磁层的磁化翻转，其临界电流密度分别为 $\sim 2.6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 和 $\sim 4.9 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ，从而证实了轨道矩驱动磁化翻转对铁磁层的依赖性，如图 9(c)和 9(d)所示 ^[31]。为了进一步提升性能，我们利用高自旋-轨道转换系数的二维室温铁磁材料 Fe_3GaTe_2 作为垂直磁各向异性铁磁层与轻金属 Ti 构成异质结。 Ti 的轨道矩可高效翻转 Fe_3GaTe_2 ，其临界翻转电流密度低至 $\sim 1.6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。在 250 K 温度下， $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Ti}$ 异质结中的临界翻转电流密度约为 $2.4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ，显著低于 $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Pt}$ ($\sim 9.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$)和 $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2/\text{Pt}/\text{Ti}$ ($\sim 5.9 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$)异质结，如图 9(e)所示 ^[21]。

除了驱动铁磁材料的磁化翻转，轨道矩也可用于驱动反铁磁材料的磁化翻转 ^[27,48]。Zheng 等实验发现，将 Cu 和反铁磁 Mn_3Sn 直接复合无法实现电流驱动磁化翻转；然而，当 Cu 被氧化后， $\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{Cu}/\text{CuO}_x$ 异质结中可观察到显著的电流驱动磁化翻转，这是因为 Cu/CuO_x 产生的轨道流借助 Mn_3Sn 的自旋轨道耦合转换为自旋流，进而产生轨道矩驱动磁化翻转。此外，由于 Pt 层具有高效的轨道流-自旋流转换作用， $\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{Pt}/\text{Mn}$ 异质结中的临界翻转电流密度大幅度降低至

$\sim 1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, 如图 9(f)所示^[48]. 类似地, 在 $\text{Mn}_3\text{Sn/Cr}$ 体系中同样实现了轨道矩驱动反铁磁的磁化翻转^[27]. 此外, 基于轨道杂化和界面自旋-涡度耦合对轨道矩效率的调控和提高, 研究人员在 FeMn/CoPt 和 Cu/PtCo 异质结中也实现了轨道矩驱动磁化翻转^[42,84]. 在 $\text{SrRuO}_3/\text{CoPt}$ 体系中, 缺陷诱导的外禀轨道斜散射机制显著提高了轨道矩效率, 并有效调控了临界翻转电流密度^[85].

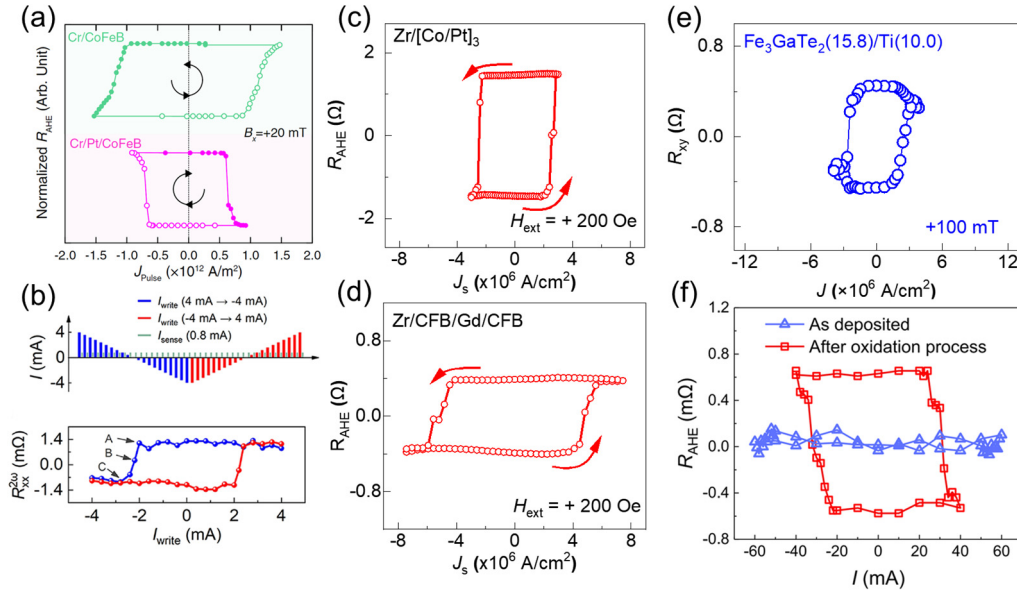


图 9 轨道矩驱动磁化翻转. (a) Cr/Pt/CoFeB ^[24]、(b) $\text{CuO}_x/\text{CoFeB}$ ^[86]、(c) $\text{Zr}/[\text{CoPt}]_n$ ^[31]、(d) $\text{Zr}/\text{CoFeB}/\text{Gd}/\text{CoFeB}$ ^[31]、(e) $\text{Ti}/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ^[21]和(f) $\text{CuO}_x/\text{Cu}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ ^[48]

Fig. 9. Magnetization switching driven by orbital torque. (a) Cr/Pt/CoFeB ^[24], (b) $\text{CuO}_x/\text{CoFeB}$ ^[86], (c) $\text{Zr}/[\text{CoPt}]_n$ ^[31], (d) $\text{Zr}/\text{CoFeB}/\text{Gd}/\text{CoFeB}$ ^[31], (e) $\text{Ti}/\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ ^[21], and (f) $\text{CuO}_x/\text{Cu}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ ^[48].

4 轨道矩驱动磁隧道结

目前, 基于自旋转移矩和自旋轨道矩效应的磁性随机存储器由于其能耗高、寿命低等问题, 实际应用依然面临众多局限^[5-9]. 作为一种新型驱动方式, 轨道矩为解决上述问题提供了新途径. 如前所述, 轨道矩源于轻金属等非磁材料中的轨道霍尔效应或轨道 Rashba-Edelstein 效应. 该机制无需依赖强自旋轨道耦合, 即可将电荷流高效转换为轨道流, 进而借助铁磁层的自旋轨道耦合或轨道热点输运产生净力矩, 驱动磁化翻转. 轨道矩具有无需强自旋轨道耦合、电荷流-轨道流转换效率高、轨道角动量可长程输运等显著优势^[11-13,67,87,88].

基于上述独特优势, 轨道矩驱动的磁隧道结兼具高效率、高耐久性与高速度等优异性能. Gupta 等利用了 Ru 层的轨道霍尔效应产生轨道流, 驱动磁隧道结.

与自旋霍尔通道的 Pt/[Co/Ni]₃ 磁隧道结相比，采用 Ru/Pt 通道的磁隧道结的类阻尼力矩效率显著提高~30%，临界翻转电流密度降低~20%，功耗降低 60%，如图 10(a)和 10(b)所示^[43]。在利用 Ti/Ta 轨道霍尔通道的磁隧道结中，基于轨道矩驱动实现了 66%的隧道磁电阻，且在经过 1000 次高低阻态切换后仍无性能衰减迹象，如图 10(c)和 10(d)所示^[50]。此外，在 Ru/W 轨道霍尔通道磁隧道结中，实现了~28.7 ps 的写入速度。与传统的 β -W 基自旋轨道矩磁隧道结相比，其驱动电压也降低 5 至 8 倍。单个 Ru/W 轨道霍尔通道中可集成多达 32 个磁隧道结，形成高密度阵列，使器件面积减少 45%，如图 10(e)和 10(f)所示^[49]。此外，半导体材料也被证实具有较高的轨道霍尔电导率（如：Ge），可有效产生轨道霍尔效应和轨道矩，这对于推动轨道矩磁随机存储器与半导体产业的融合具有重要意义^[89]。

综上所述，与传统自旋轨道矩驱动方式相比，轨道矩驱动磁隧道结的磁化翻转不依赖强自旋轨道耦合，材料选择范围更广。基于轨道霍尔材料中电荷流到轨道流的高效转换，轨道矩驱动显著提高了器件效率，降低了临界翻转电流密度和功耗。28.7 ps 的写入速度以及 1000 次高低阻态切换后无性能衰减迹象，进一步证明了轨道矩磁隧道结的高速度与高耐久性。此外，高轨道霍尔电导率半导体材料的发现，表明轨道矩磁随机存储器更易于与半导体工艺融合。综上，轨道矩驱动方式在效率、功耗、速度、耐久性和工艺兼容性等方面均展现出优势，为解决当前自旋转移矩和自旋轨道矩存储器面临的高能耗、寿命低等局限性提供了新途径。

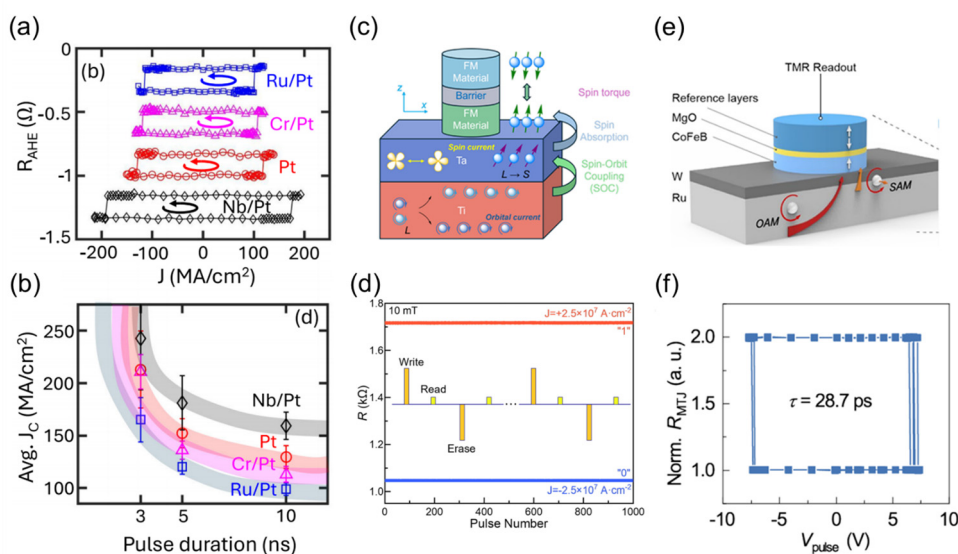


图 10 轨道矩驱动磁隧道结。(a)和(b) Ru/Pt/磁隧道结^[43]，(c)和(d) Ti/Ta/磁隧道结^[50]，(e)和(f) Ru/W/磁隧道结^[49]

Fig. 10. Orbital torque-driven magnetic tunnel junctions. (a) and (b) Ru/Pt/magnetic tunnel junction ^[43]; (c) and (d) Ti/Ta/magnetic tunnel junction ^[50]; (e) and (f) Ru/W/magnetic tunnel junction ^[49].

5 总结和展望

本文综述了轨道矩器件的物理机制、效率调控策略及其在器件应用方面的研究进展。在物理机制方面，轨道流产生的两种主要机制—轨道霍尔效应与轨道 Rashba-Edelstein 效应已得到实验证实，两者分别源于动量空间中的轨道织构（轨道磁矩）和反演对称性破缺。轨道流通过材料的自旋轨道耦合和轨道热点进行输运与转换，进而与铁磁材料磁矩耦合。因此，轨道矩的诱导不仅依赖于轨道流的产生，还取决于轨道流的输运与转换过程。在效率调控方面，通过筛选轨道霍尔材料、优化铁磁材料轨道-自旋转换系数及增强外禀斜散射等方法，可显著提高轨道矩效率。在器件应用方面，利用轨道矩可高效驱动垂直磁各向异性异质结的磁化翻转，临界电流密度低至 $\sim 10^6$ A/cm²，轨道矩驱动磁隧道结的写入速度可达 ~ 28.7 ps，功耗可降低 $\sim 60\%$ 。

尽管轨道电子学领域已取得上述重要进展，但仍面临若干关键挑战，有待进一步探索与突破。在物理机制方面，轨道流的输运与淬灭机制尚存争议，需深入研究轨道角动量在输运过程中与晶格、缺陷的相互作用，明确轨道角动量的扩散长度及其与自旋角动量的本征差异。在表征技术方面，目前仍缺乏轨道流的直接探测手段，亟需开发能够对轨道流的大小、方向及相干长度进行直接可视化测量的新方法。在器件应用方面，轨道矩驱动磁隧道结的制备工艺与性能优势有待深入挖掘，并需基于其自身优势，重点解决与传统半导体器件的兼容性问题。

参考文献

- [1] Manipatruni S, Nikonov D E, Lin C C, Gosavi T A, Liu H, Prasad B, Huang Y L, Bonturim E, Ramesh R, Young I A 2019 *Nature* **565** 35
- [2] Dieny B, Prejbeanu I L, Garello K, Gambardella P, Freitas P, Lehndorff R, Raberg W, Ebels U, Demokritov S O, Akerman J, Deac A, Pirro P, Adelman C, Anane A, Chumak A V, Hirohata A, Mangin S, Valenzuela S O, Onbaşlı M C, d'Aquino M, Prenat G, Finocchio G, Lopez-Diaz L, Chantrell R, Chubykalo-Fesenko O, Bortolotti P 2020 *Nat. Electron.* **3** 446
- [3] Brataas A, Kent A D, Ohno H 2012 *Nat. Mater.* **11** 372
- [4] Worledge D C, Hu G, Mellnik A R 2024 *Nat. Rev. Electr. Eng.* **1** 730
- [5] Manchon A, Koo H C, Nitta J, Frolov S M, Duine R A 2015 *Nat. Mater.* **14** 871
- [6] Song C, Zhang R Q, Liao L Y, Zhou Y J, Zhou X F, Chen R Y, You Y F, Chen X Z, Pan F 2021 *Prog. Mater. Sci.* **118** 100761
- [7] Liu L Q, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [8] Jungwirth T, Wunderlich J, Olejník K 2012 *Nat. Mater.* **11** 382
- [9] Yu G Q, Upadhyaya P, Fan Y B, Alzate J G, Jiang W J, Wong K L, Takei S, Bender S A, Chang L T, Jiang Y, Lang M R, Tang J S, Wang Y, Tserkovnyak Y, Amiri P K, Wang K L 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 548
- [10] Lee K J, Cros V, Lee H W 2024 *Nat. Mater.* **23** 1302
- [11] Go D, Jo D, Lee H W, Kläui M, Mokrousov Y 2021 *EPL* **135** 37001
- [12] Choi Y G, Jo D, Ko K H, Go D, Kim K H, Park H G, Kim C, Min B C, Choi G M, Lee H W 2023 *Nature* **619** 52
- [13] Jo D, Go D, Choi G M, Lee H W 2024 *npj Spintronics* **2** 19
- [14] Bernevig B A, Hughes T L, Zhang S C 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 066601
- [15] Kontani H, Tanaka T, Hirashima D S, Yamada K, Inoue J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 016601
- [16] Park S R, Kim C H, Yu J, Han J H, Kim C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 156803
- [17] Go D, Jo D, Kim C, Lee H W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 086602
- [18] Jo D, Go D, Lee H W 2018 *Phys. Rev. B* **98** 214405
- [19] Go D, Lee H W 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 013177

-
- [20] Hayashi H, Jo D, Go D, Gao T H, Haku S S, Mokrousov Y, Lee H W, Ando K 2023 *Commun. Phys.* **6** 32
- [21] Zhang D L, Wei H S, Duan J Y, Chen J L, Chen J X, Yue D D, Gong W X, Liu P F, Yang Y H, Gou J L, Yan J X, Zhai K, Wang P, Hu S, Jia Z Y, Jiang W, Liu L, Wang W H, Li Y, Jiang Y 2025 *Nat. Commun.* **16** 7047
- [22] Zhu L J, Buhrman R A 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** L031001
- [23] Hayashi H, Ando K 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 172401
- [24] Lee S, Kang M G, Go D, Kim D, Kang J H, Lee T, Lee G H, Kang J, Lee N J, Mokrousov Y, Kim S, Kim K J, Lee K J, Park B G 2021 *Commun. Phys.* **4** 234
- [25] Lyu H C, Zhao Y C, Qi J, Yang G, Qin W D, Shao B K, Zhang Y, Hu C Q, Wang K, Zhang Q Q, Zhang J Y, Zhu T, Long Y W, Wei H X, Shen B G, Wang S G 2022 *J. Appl. Phys.* **132** 013901
- [26] Guo Y H, Zhang Y, Lv W B, Wang B, Zhang B, Cao J W 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 022408
- [27] Xie H, Zhang N, Ma Y T, Chen X, Ke L, Wu Y H 2023 *Nano Lett.* **23** 10274
- [28] Zhang J R, Xie H F, Zhang X, Yan Z, Zhai Y B, Chi J H, Xu H Y, Zuo Y L, Xi L 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 172405
- [29] Sala G, Gambardella P 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 033037
- [30] Sala G, Wang H C, Legrand W, Gambardella P 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 156703
- [31] Yang Y H, Wang P, Chen J L, Zhang D L, Pan C, Hu S, Wang T, Yue W S, Chen C, Jiang W, Zhu L J, Qiu X P, Yao Y G, Li Y, Wang W H, Jiang Y 2024 *Nat. Commun.* **15** 8645
- [32] Fukunaga R, Haku S, Hayashi H, Ando K 2023 *Phys. Rev. Res.* **5** 023054
- [33] Zheng Z C, Guo Q X, Jo D, Go D, Wang L H, Chen H C, Yin W, Wang X M, Yu G H, He W, Lee H W, Teng J, Zhu T 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 013127
- [34] Dutta S, Tulapurkar A A 2022 *Phys. Rev. B* **106** 184406
- [35] Bose A, Kammerbauer F, Gupta R, Go D, Mokrousov Y, Jakob G, Kläui M 2023 *Phys. Rev. B* **107** 134423
- [36] Liu F, Liang B K, Xu J, Jia C L, Jiang C J 2023 *Phys. Rev. B* **107** 054404
- [37] Lee D, Go D, Park H J, Jeong W, Ko H W, Yun D, Jo D, Lee S, Go G, Oh J H, Kim K J, Park B G, Min B C, Koo H C, Lee H W, Lee O, Lee K J 2021 *Nat. Commun.*

- [38] Zhang Z Z, Zhang J, Weng Z Y, Li J H, Song H Y, Lin W N 2025 *Phys. Rev. B* **111** 104412
- [39] Moriya H, Taniguchi M, Jo D, Go D, Soya N, Hayashi H, Mokrousov Y, Lee H W, Ando K 2024 *Nano Lett.* **24** 6459
- [40] Yang Y M, Xie Z C, Zhao Z Y, Lei N, Zhao J H, Wei D H 2024 *Commun. Phys.* **7** 336
- [41] Ding S L, Kang M G, Legrand W, Gambardella P 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 236702.
- [42] Gao T H, Ruessmann P, Wang Q W, Fukunaga R, Hayashi H, Go D, Harumoto T, Tu R, Zhang S, Zhang L M, Mokrousov Y, Shi J, Ando K 2024 *Nat. Phys.* **20** 1896
- [43] Gupta R, Bouard C, Kammerbauer F, Ledesma-Martin J O, Bose A, Kononenko I, Martin S, Usé P, Jakob G, Drouard M, Kläui M 2025 *Nat. Commun.* **16** 130
- [44] Ding S L, Ross A, Go D, Baldrati L, Ren Z Y, Freimuth F, Becker S, Kammerbauer F, Yang J B, Jakob G, Mokrousov Y, Kläui M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 177201
- [45] Bi L Z, Ke J T, Bai H, Li G S, Zhu Z Z, Hu C Q, Cheng Y H, Wang P J, Jiang W J, Zhang Y, Cai J W 2024 *Adv. Electron. Mater.* **10** 2300627
- [46] Santos E, Abrao J E, Go D, de Assis L K, Mokrousov Y, Mendes J B S, Azevedo A 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 014069
- [47] Mendoza-Rodarte J A, Cosset-Chéneau M, Wees B J V, Guimaraes M H D 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 226704
- [48] Zheng Z Y, Zeng T, Zhao T Y, Shi S, Ren L Z, Zhang T T, Jia L X, Gu Y D, Xiao R, Zhou H G, Zhang Q H, Lu J Q, Wang G L, Zhao C, Li H H, Tay B K, Chen J S 2024 *Nat. Commun.* **15** 745
- [49] Yao Y X, Xiao C, Ning X B, Cai W L, Guo X Z, Guo Z X, Yang K L, Xiong D R, Yan Z J, Lu S Y, Zhang H C, Cheng S Y, Xu R Y, Ma D H, Wang C, Wang Z H, Zhu D Q, Cao K H, Liu H X, Manchon A, Zhao W S 2025 [arXiv:2504.08394](https://arxiv.org/abs/2504.08394) [[cond-mat.mtrl-sci](https://arxiv.org/abs/2504.08394)]
- [50] Xu J K, Zheng D X, Tang M, Liu C, He B, Yang M, Li H, Li Y, Chen A T, Zhang S F, Qiu Z Q, Zhang X X 2026 *Phys. Rev. Appl.* **25** 034023
- [51] Liao L, Otani Y 2026 *Commun. Phys.* **9** 48
- [52] Bhowal S, Satpathy S 2020 *Phys. Rev. B* **101** 121112(R)

-
- [53] Liu H, Culcer D 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 186302
- [54] Mankovsky S, Ebert H 2024 *Phys. Rev. B* **110** 184417
- [55] Veneri A, Rappoport T G, Ferreira A 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 136201
- [56] Kim J, Go D, Tsai H, Jo D, Kondou K, Lee H W, Otani Y 2021 *Phys. Rev. B* **103** L020407
- [57] Go D, Jo D, Kim K W, Lee S, Kang M G, Park B G, Blügel S, Lee H W, Mokrousov Y 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 246701
- [58] Rang M, Kelly P J 2024 *Phys. Rev. B* **109** 214427
- [59] Valet T, Jaffrès H, Cros V, Raimondi R 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 256301
- [60] Wang P, Feng Z, Yang Y H, Zhang D L, Liu Q C, Xu Z D, Jia Z Y, Wu Y, Yu G Q, Xu X G, Jiang Y 2023 *npj Quantum Mater.* **8** 28
- [61] Costa J L, Santos E, Mendes J B S, Azevedo A 2025 *Phys. Rev. B* **112** 054443
- [62] Hayashi H, Go D, Haku S, Mokrousov Y, Ando K 2024 *Nat. Electron.* **7** 646
- [63] Lyalin I, Alikhah S, Berritta M, Oppeneer P M, Kawakami R K 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 156702
- [64] Xu Y, Zhang F, Fert A, Jaffres H Y, Liu Y S, Xu R Y, Jiang Y H, Cheng H Y, Zhao W S 2024 *Nat. Commun.* **15** 2043
- [65] Wang H, Kang M G, Petrosyan D, Ding S, Schiltz R, Riddiford L J, Legrand W, Gambardella P 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 126701
- [66] Gao W, Liao L, Isshiki H, Budai N, Kim J, Lee H W, Lee K J, Go D, Mokrousov Y, Miwa S, Otani Y 2025 *Nat. Commun.* **16** 6380
- [67] Wang P, Chen F, Yang Y, Hu S, Li Y, Wang W, Zhang D, Jiang Y 2025 *Adv. Electron. Mater.* **11** 2400554
- [68] An T, Cui B, Zhang M, Liu F, Cheng S, Zhang K, Ren X, Liu L, Cheng B, Jiang C, Hu J 2023 *Adv. Mater.* **35** 2300858
- [69] Ding S L, Liang Z Y, Go D, Yun C, Xue M Z, Liu Z, Becker S, Yang W N, Du H L, Wang C S, Yang Y C, Jakob G, Kläui M, Mokrousov Y, Yang J B 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 067201
- [70] Shin S, Han D, Lee S, Park B G 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2425932
- [71] Yang Y, Yang Y, Liu P, Zhang D, Wang P, Chen C, Duan J, Lu P, Wei H, Jiang W, Hou W, Kong J, Hu S, Zhang L, Liu L, Li Y, Wang W, Jiang Y 2026 *Adv. Funct.*

- [72] Seifert T S, Go D, Hayashi H, Rouzegar R, Freimuth F, Ando K, Mokrousov Y, Kampfrath T 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 1132
- [73] Xu H, Yang Y, Jin Z, Wang P, Feng Z, Wang T, Yue W, Chen C, Chen F, Zhu Y, Peng Y, Zhang D, Jiang Y, Zhuang S 2025 *Commun. Phys.* **8** 115
- [74] Kumar S, Kumar S 2023 *Nat. Commun.* **14** 8185
- [75] Mishra S S, Lourembam J, Lin D J X, Singh R 2024 *Nat. Commun.* **15** 4568
- [76] Liu Y, Xu Y, Fert A, Jaffrès H Y, Nie T, Eimer S, Zhang X, Zhao W S 2024 *Adv. Mater.* **36** 2404174
- [77] Guan T, Liu J H, Qin W T, Cui Y W, Wang S J, Wu Y Z, Tao Z S 2026 *Nat. Nanotechnol.* **21** 538
- [78] Hamdi A E, Chauleau J Y, Boselli M, Thibault C, Gorini C, Smogunov A, Barreteau C, Gariglio S, Triscone J M, Viret M 2023 *Nat. Phys.* **19** 1855
- [79] Nabei Y, Yang C, Sun H, Jones H, Mai T, Wang T, Bodin R, Pandey B, Wang Z, Xiong Y, Comstock A H, Ewing B, Bingen J, Sun R, Smirnov D, Zhang W, Hoffmann A, Rao R, Hu M, Vardeny Z V, Yan B, Li X, Zhou J, Liu J, Sun D 2026 *Nat. Phys.* **22** 245
- [80] Liao L Y, Xue F H, Han L, Kim J, Zhang R Q, Li L, Liu J M, Kou X F, Song C, Pan F, Otani Y 2022 *Phys. Rev. B* **105** 104434
- [81] Hayashi H, Chen J, Jo D, Sakamoto S, Gao T, Go D, Mokrousov Y, Lee H W, Miwa S, Ando K 2025 *Nano Lett.* **25** 15124
- [82] Xiao R, Zhao T, Baek I, Lee H, Zheng Z, Shi S, Xie Z, Zhang Q, Jia L, Yang P, Yu X, Song D, Lee H W, Chen J 2026 *Nat. Commun.* <https://doi.org/10.1038/s41467-026-71018-6>
- [83] Ding S, Noël P, Krishnaswamy G K, Davitti N, Sala G, Fantauzzi M, Rossi A, Gambardella P 2025 *Nat. Commun.* **16** 9239
- [84] Yi L, Yang T, Tan C, Xie R, Liu S, Cai L, Cao Q, Wang Y, Lü W, Tian Y, Huang Q, Yan S 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 156702
- [85] Peng S, Zheng X, Li S, Lao B, Han Y, Liao Z, Zheng H, Yang Y, Yu T, Liu P, Sun Y, Chen X, Peng S, Zhao W, Li R, Wang Z 2025 *Nat. Mater.* **24** 1749
- [86] Huang Q K, Liu S M, Yang T X, Xie R H, Cai L, Cao Q, Lu W M, Bai L H, Tian Y

F, Yan S S 2023 *Nano Lett.* **23** 11323

[87] Yang H, Wang Q W, Zeng X H, Gao T H, An H Y 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** DOI: 10.7498/aps.75.20260288 (in Chinese) [杨卉, 王倩文, 曾祥辉, 高藤华, 安红雨 2026 物理学报 **75** DOI: 10.7498/aps.75.20260288]

[88] Chen F, Wang P, Zhang Z J, He K, Feng Z, Zhang D L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 137501 (in Chinese) [陈锋, 王平, 张志佳, 何康, 冯正, 张德林 2025 物理学报 **74** 137501]

[89] Santos E, Abrão J E, Costa J L, Santos J G S, Rodrigues-Junior G, Mendes J S, Azevedo A 2024 *Phys. Rev. Appl.* **22** 064071

录用稿件，非最终出版稿

Orbital Torque Magnetic Memory: From Physical Mechanisms to Device Applications*

WANG Ping LU Peng WANG Dingding LIU Pengfei ZHANG Delin[†] JIANG Yong[†]

(Institute of Quantum Materials and Devices, School of Electronic and Information Engineering,
Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract

In the post-Moore era, the increasingly prominent bottleneck of power consumption in conventional devices, together with the rapidly growing demand for computing power from artificial intelligence, poses unprecedented challenges to the performance of memory and logic chips. Consequently, the development of novel memory and logic devices has become a research hotspot to address these issues. Orbitronics, which focuses on the generation, transport, and manipulation of electronic orbital angular momentum, opens a new pathway to overcome the technical bottlenecks of conventional spintronic devices and realize high-performance magnetic memory and logic devices. This review summarizes the research progress on the orbital Hall effect and related devices in terms of physical mechanisms, torque efficiency manipulation, and device applications. First, the microscopic mechanisms of the orbital Hall effect and orbital Rashba-Edelstein effect in materials with weak spin-orbit coupling are introduced, and the physical mechanisms for achieving efficient charge-to-orbital current conversion are discussed. Then, the generation mechanisms of orbital torque are elucidated, followed by a systematic overview of characterization methods and modulation strategies for orbital torque efficiency. On this basis, the research progress on orbital torque-driven magnetization switching of perpendicularly magnetized ferromagnetic materials is reviewed. Further focusing on device applications, the performance breakthroughs achieved by orbital torque-driven magnetic tunnel junctions in terms of write power consumption and switching speed are discussed. Finally, key advances in the field of orbitronics are summarized, and an analysis and outlook on current challenges and open issues are provided.

Keywords: orbitronics, orbital Hall effect, orbital torque, magnetization switching,

magnetic tunnel junction

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1204003), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U24A6002, 52271240, 52501253, U23A20551, 12304154)

† Corresponding author. E-mail: yjiang@tiangong.edu.cn

Corresponding author. E-mail: zhangdelin@tiangong.edu.cn

The first author. E-mail: pingwang@tiangong.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿