

专题: 应用磁学

Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用驱动的磁动力学*

陆世余¹⁾ 曾严¹⁾ 刘敏¹⁾ 王冠霖¹⁾ 李耀进²⁾ 贾成龙¹⁾ 于东星^{1)†}

1) (兰州大学物理科学与技术学院, 磁学与磁功能材料教育部重点实验室, 兰州 730000)

2) (兰州理工大学理学院, 兰州 730050)

(2025 年 11 月 30 日收到; 2026 年 1 月 6 日收到修改稿)

Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 作为一种反对称交换相互作用, 不仅是稳定非共线手性磁结构的关键机制之一, 也在多场调控磁动力学中扮演着核心角色, 为高密度、低功耗、非易失性自旋电子器件的设计与开发提供了新路径. 本文聚焦于 DMI 驱动的磁动力学操控, 首先回顾了 DMI 的物理机制及主要材料体系, 进而系统介绍了 DMI 与自旋-轨道力矩协同作用下实现零磁场确定性磁化翻转, 以及电流驱动手性磁动力学的国内外研究进展. 同时, 详细梳理了近年来基于 DMI 实现磁动力学电操控的相关理论与实验成果, 包括电场调控 DMI 的多种物理机制、DMI 主导的拓扑磁态的电场操控策略, 以及通过拓扑磁结构传递自旋角动量的全电场 DMI 力矩磁动力学操控机制, 并进一步讨论了基于上述物理效应的自旋电子器件设计方案及器件应用面临的问题. 最后, 对当前 DMI 驱动的磁动力学研究现状进行总结, 并从磁动力学理论、DMI 材料开发以及器件应用三个层面, 展望了该领域未来面临的挑战与发展机遇.

关键词: Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用, 电学磁操控, 磁动力学, 自旋电子学**DOI:** 10.7498/aps.75.20251635**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251635

1 引言

随着信息技术的持续发展, 数据存储与处理技术正面临着能耗、速度等多重挑战. 利用电子自旋自由度而非电荷进行信息存储与处理的自旋电子学技术因其非易失性、低功耗和高速度等优势, 成为后摩尔时代信息技术发展的重要方向. 磁随机存储器 (MRAM)、赛道存储器和磁逻辑器件等自旋电子器件在现代信息技术中已展现出巨大潜力. 如何通过电学手段实现高效的磁态调控, 并精准控制磁性材料中的各种自旋构型, 是自旋电子学研究的核心问题. Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) 是磁性材料中至关重要的一种反对称交换相互作用, 由 Dzyaloshinskii^[1] 在研究 α -Fe₂O₃ 的弱铁磁性现象时, 通过严格的对称性分析提出. 经 Moriya^[2]、

Fert 和 Levy^[3] 的完善, 建立起了从微观量子过程到宏观手性磁结构的完善物理图像. 因其独特的空间反演非对称性, DMI 驱动的电学磁操控机制在实现高效精确的磁态调控中展现出了巨大潜力, DMI 驱动的磁电动力学已成为自旋电子学中重要的研究内容.

DMI 的研究发展至今, 已经从基础物理现象研究扩展到了实际器件应用探索. 材料方面, 研究范围已从最初以 B20 族化合物 MnSi 和 FeGe 为代表的非中心对称体材料^[4,5] 拓展至重金属/铁磁体、铁磁绝缘体/重金属、合成反铁磁体、多铁性材料以及新兴的范德瓦耳斯异质结体系^[6-11]. 随着研究深入, DMI 在二维磁性材料中的发现进一步丰富了 DMI 物理本质的认识^[12]; 在多铁性材料和界面体系中, DMI 的电场可控性^[13] 则为实现电场控制的磁结构设计 with 动态操控提供了一条重要思路.

* 国家自然科学基金 (批准号: 12574123, 12204497, 12474114, 12304126, 12174164) 和兰州大学人才队伍建设经费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yudx@lzu.edu.cn

基于DMI的反对称特性及其电场可调制特性, DMI相关的磁动力学研究发展出了两个重要方向: 一是DMI与自旋-轨道力矩(SOT)协同作用下的磁操控, 二是基于DMI的电场磁操控.

在DMI与SOT协同作用实现磁操控的过程中, DMI作为打破对称性的因素参与到磁操控中, 可有效打破磁化进动路径的简并, 实现零磁场的确定性磁翻转. 近年来, 基于DMI与SOT协同作用, 研究人员已将磁翻转的临界电流密度降低至 10^5 A/cm²量级^[14]; DMI与SOT协同作用, 在各类DMI材料体系中实现了高速、低功耗的磁畴壁与磁斯格明子运动. 特别是在合成反铁磁体和亚铁磁体中, 通过DMI诱导的手性耦合, 实现了km/s量级的磁畴壁和磁斯格明子运动速度^[15,16], 为下一代高速度、高密度和低功耗自旋电子器件的开发提供了理论和实验支撑.

电场磁操控在实现超低功耗自旋电子器件方面具有重大潜力^[17-19]. 近年来, 从应变介导的晶格畸变^[20-22]到离子迁移诱导的界面重构^[23,24], 从电荷重分布^[13,25]到表面化学吸附^[26,27], 多种电场调控DMI的物理机制相继被提出, 实现了对磁畴壁、磁斯格明子等手性磁结构的螺旋度、尺寸、拓扑荷等属性的精确控制^[26,28-30], 以及电场驱动的磁化翻转^[31-33]. 这些突破加深了对磁电耦合本质的理解, 为电场控制的自旋电子器件设计提供了新思路. 电流驱动和电场驱动协同发展, 将为自旋电子器件在能耗、速度、密度和功能多样性等方面带来重大突破, 推动其在信息存储、逻辑运算、神经形态计算和量子信息处理等领域的广泛应用.

本文聚焦磁动力学操控这一核心主题, 详细梳理了近几年DMI驱动的磁动力学相关研究进展. 第2节回顾了DMI理论发展历程, 系统梳理了DMI主导下形成的非共线手性磁结构, 总结了具有显著DMI效应的材料体系, 涵盖传统非中心对称材料、各类人工异质结构以及二维材料; 第3节讨论了DMI在电流磁操控方面, 通过打破对称性实现的零磁场磁翻转和基于手性耦合实现的磁结构高效驱动; 第4节系统总结了电场调控DMI的多种物理机制, 以及由此实现的磁结构手性、尺寸、拓扑荷等属性的精确控制. 最后对DMI驱动的磁动力学研究现状及其在器件方面的应用进行了总结和展望. 我们期望这一综述能够为相关领域研究者提供有价值的学术参考, 亦期望通过梳理电

流驱动和电场调控两大技术路线的发展现状及其发展趋势, 为自旋电子器件开发和技术转化提供参考.

2 对称性破缺与DMI

1957年, Dzyaloshinskii^[1]在研究 α -Fe₂O₃的弱铁磁性现象时, 基于对称性原理和Landau理论, 通过严格的对称性分析, 首次从唯象学角度提出了这种反对称交换相互作用. Dzyaloshinskii发现传统的Heisenberg交换模型无法解释在反铁磁奈尔温度以下观察到的小净磁矩现象. Dzyaloshinskii基于Landau相变理论, 证明在缺乏中心对称性的晶体中, 磁化强度 \mathbf{M} 与反铁磁序参量 \mathbf{L} 之间可以存在线性耦合项 $H = \gamma \mathbf{M} \cdot \mathbf{L}$, 从而产生弱铁磁性, 奠定了DMI的唯象学基础^[1]. 1960年, Moriya^[2]在量子力学框架下, 通过二阶微扰理论, 系统阐明了DMI的微观起源. Moriya指出, 间接交换相互作用与自旋-轨道耦合是形成该相互作用的关键要素, 并将DMI归因于自旋-轨道耦合对超交换相互作用的修正. Moriya的理论工作不仅揭示了这种反对称交换相互作用的物理本质, 还严格证明了在空间反演对称性破缺的磁性系统中, 自旋-轨道耦合会诱导交换相互作用产生反对称分量.

Moriya分析了两种典型磁交换路径: 直接交换和超交换相互作用, 并证明当两个磁性原子缺乏反演中心时, 自旋-轨道耦合会导致交换相互作用产生反对称分量, 同时推导出DMI矢量 \mathbf{D}_{ij} 的方向规则: $\mathbf{D}_{ij} \propto \mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_{ij}$, 其中 \mathbf{e}_z 是晶体场主轴方向, \mathbf{r}_{ij} 是连接两个磁性原子的矢量. Moriya^[2]的工作为预测不同晶体结构中DMI的方向和强度提供了理论框架. 1980年, Fert和Levy^[3]进一步发展了界面DMI的微观理论, 通过三阶量子微扰理论, 揭示了非磁性杂质如何通过自旋-轨道散射和对称性破缺共同作用, 产生显著的DMI. 他们在铜锰合金中添加具有强自旋-轨道耦合的非磁性杂质(如Au, Pt), 通过三位点散射机制, 产生反对称交换相互作用. 他们推导出DMI与Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY)相互作用的强度比 $V_1/V_0 = 15(\lambda_{so}/E_F) \sin[(\pi/10)Z_d]$, 其中 λ_{so} 是自旋-轨道耦合常数, E_F 是费米能, Z_d 是d电子数. 这一理论不仅解释了实验观察到的各向异性增强现象, 更为现代自旋电子学中铁磁体/重金属(FM/HM)界面DMI

的理解奠定了基础^[3,34].

DMI 是磁性材料中至关重要的反对称交换相互作用, 通常将其哈密顿量写作

$$H_{\text{DM}} = D_{ij} \cdot (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j), \quad (1)$$

其中, \mathbf{S}_i 和 \mathbf{S}_j 是相邻格点上的自旋, D_{ij} 是 DMI 矢量. 在磁性材料中, Heisenberg 交换相互作用哈密顿量为 $H_{\text{ex}} = J_{ij}(\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j)$, J_{ij} 为交换耦合常数, 倾向于使邻近原子位点的两个自旋平行排列, DMI 则倾向于使邻近原子位点的两个自旋相互垂直. 各项能量的竞争, 使得相邻自旋倾向于非共线排列, 形成如图 1 中展示的多种拓扑磁结构^[35,36].

手性磁畴壁^[37] 是典型的非共线磁结构, 基于 DMI 的种类不同可以分为布洛赫型和奈尔型磁畴壁. 奈尔型由于 DMI 矢量不同, 也会产生不同的构型. 除了手性磁畴壁外, 以磁斯格明子为代表的拓扑磁结构是 DMI 更直接的体现, 其拓扑荷 Q 可以表征为

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{m} \cdot (\partial_x \mathbf{m} \times \partial_y \mathbf{m}) d^2r. \quad (2)$$

继 2009 年首次在 MnSi 中观察到磁斯格明子^[4] 之后, 又于 2011 年首次在磁性薄膜中观测到了磁斯格明子^[38], 而后通过不同方法, 在各种材料

中陆续发现了多种拓扑磁结构^[35,39-50]. 这些结构因拓扑保护性而具有高稳定性^[51-54], 在信息存储、逻辑器件与神经形态计算等下一代自旋电子器件中展现出巨大应用潜力.

近年来, DMI 的研究经历了从理论提出到在多样化材料体系中实验验证和工程化调控的演进过程. 空间反演对称性破缺通常发生在具有非中心对称晶格的铁磁薄膜, 以及具有超薄铁磁层和具有强烈自旋-轨道耦合的重金属层的层状异质结构中. 当前研究中, DMI 材料体系主要包括: 1) 非中心对称块体材料. 该类材料固有的晶体结构自然缺乏空间反演对称性. 主要是以 B20 族化合物为代表的自然具有非中心对称晶体结构的材料^[4,5,55]. 2) 异质界面系统. 通过多种材料合成的多层薄膜, 由于界面两侧材料不同, 沿界面法线方向的反演对称性被自然打破, 从而在界面处诱导出 DMI^[56,57]. 主要的多层系统包括: 重金属/铁磁系统, 沿用 Fert-Levy 模型, 主要研究集中于此框架下邻近重金属 (钨 (W)^[7,58,59]、铱 (Ir)^[8,60]、铂 (Pt)^[6,61] 等) 的磁性层. 此外异质结构系统还包括铁磁绝缘体/非磁金属异质结^[62,63]、铁磁/磁性拓扑绝缘体异质结^[54]、合成反铁磁/亚铁磁系统^[11,64]、金属氧化物/铁磁异质结^[13]、多铁性异质结^[65]、范德瓦耳斯异质结^[66-68]

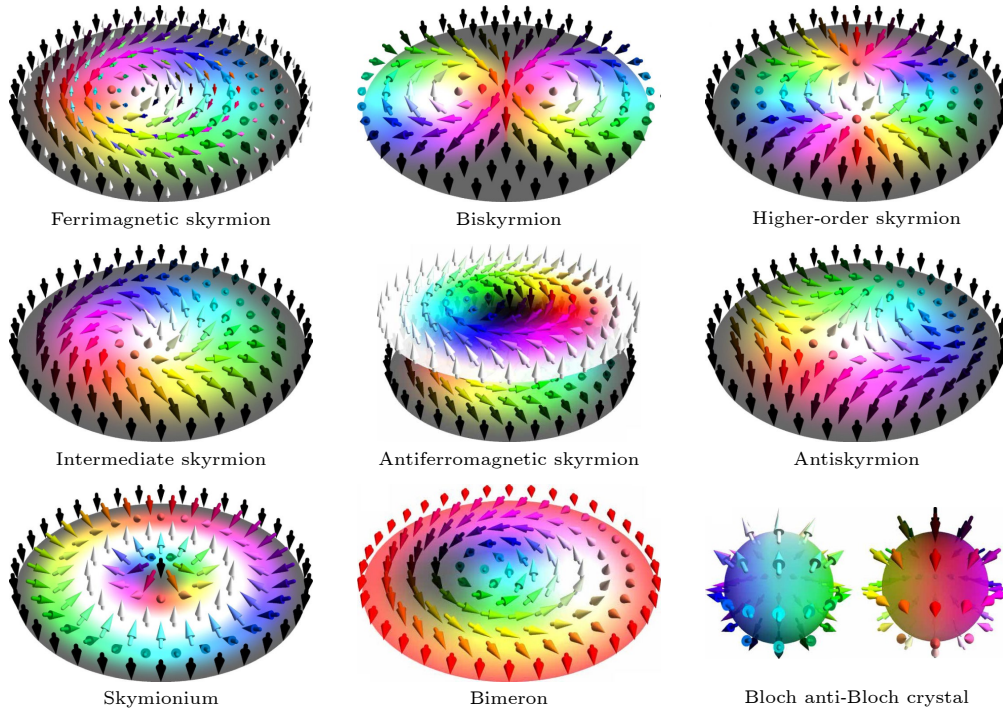


图 1 各种拓扑磁结构示意图^[35]

Fig. 1. Schematic of topological magnetic structures^[35].

等. 除了上述两种常规的材料/结构之外, 研究人员还通过各种方式在更多的材料体系中产生了 DMI, 如通过诱发不同类型的晶格畸变产生 DMI 的交错磁体^[69,70]、具有非中心轴晶体结构的一些铁磁半导体^[71]、手性绝缘磁体^[72] 以及一些二维材料^[12,73] 等. 此外, 通过界面工程/修饰方法还可实现对 DMI 的有效调节^[74-76]. 这些材料/结构经历长时间的探索, 为 DMI 驱动磁动力学提供了种类繁多的材料平台. 在此, 本文只展示了部分具有 DMI 的具体材料, 并未穷尽所有的研究内容, 目的是反映 DMI 材料体系的多样性. 一些材料中的 DMI 表现出了可由电场调制的性质, 例如多铁性材料同时表现出的铁磁性、铁电性等两种以上铁性序^[65], 为利用电场对磁性参数的调控提供了条件. 在众多材料中已经证实电场调控 DMI 的可行性^[74,75]. DMI 的电场调控机制为 DMI 驱动磁动力学提供了额外的自由度, 这一部分将在第 4 节详细展开.

实验上, DMI 常数的测量方法主要包括磁畴壁法、自旋波法和自旋-轨道力矩法^[77]. 磁畴壁法主要是通过面内磁场调控畴壁手性并测量其运动速度的极值点来标定 DMI 有效场; 自旋波法利用 DMI 引起的自旋波传播非互易性, 直接由正反波矢的频率差计算 DMI 强度; 自旋-轨道力矩法则通过测量面内磁场下电流诱导的垂直磁滞回线偏移量来提取 DMI 有效场. 基于自旋波非互易性的测量方法——布里渊光散射 (BLS) 是广泛应用的成熟技术^[34,77,78]. 当自旋波在具有界面 DMI 的薄膜中传播时, 由于 DMI 打破了空间反演对称性, 其色散关系对于正 (+ k) 反 (- k) 两个传播方向的波矢不再对称, 导致两个方向的自旋波频率出现一个固定的差值 Δf , 这个差值直接正比于 DMI 有效场^[79]. 此外, 第一性原理计算也被广泛运用于从理论上量化 DMI^[80,81].

DMI 的空间反演非对称性在实现零磁场电流磁翻转以及提高电流驱动磁操控效率方面也发挥重要作用, 其主导形成的非共线磁结构在下一代高密度、低功耗、高速度的自旋电子器件开发方面具有重大潜力. 已经在金属/氧化物界面系统以及其他多铁性材料系统中被证实可以实现的 DMI 电场调控机制, 则给追求全电场控制的自旋电子器件研究开拓了一条新路径. 磁性系统中 DMI 相关的探索研究正持续推动着自旋电子学的创新与发展.

3 DMI 辅助的 SOT 效应

3.1 SOT 效应

电流磁操控是实现新一代高密度、低功耗电子器件的一条成熟路线, 是自旋电子学中磁操控研究的重要领域. 基于自旋-转移力矩的磁随机存储器 (STT-MRAM) 已实现商业化应用, 其非易失性、低功耗和高耐久性的特点正在推动存储技术的革新. 基于自旋-轨道力矩的存储器件则以超快速度和超高耐久性, 成为下一代高速缓存技术研究的重要方向^[82-84]. 电流驱动磁化翻转可以简单地概括为两个过程, 首先将流入材料中的纯电流转化为自旋流, 而后自旋流对磁性材料中的磁矩施加力矩实现磁翻转. SOT 中自旋流的产生基于自旋霍尔效应^[85,86] 和界面 Rashba-Edelstein 效应^[87,88] 两种自旋-轨道耦合现象, 这两种效应都会在重金属/铁磁体界面引发自旋积累.

自旋霍尔效应是整体的 SOC 效应. 电流注入重金属层, 由于自旋-轨道耦合, 电流中自旋相反的电子被分开形成垂直于界面流动的自旋流^[89-91]. 这种情况下产生的自旋流密度描述为 $\mathbf{J}_s = (h\theta_{SH}/2e)\mathbf{J}_e \times \boldsymbol{\sigma}$, 其中 \mathbf{J}_e 是电荷流密度, $\boldsymbol{\sigma}$ 是自旋极化方向, θ_{SH} 为自旋霍尔角. Rashba-Edelstein 效应是界面的 SOC 效应. 在 HM/FM 异质结构中, 会产生一个垂直于界面的内建电场 \mathbf{E} , 具有动量 \mathbf{p} 的电子与该电场相互作用时会产生一个使电子极化的等效磁场, 其方向为 $\mathbf{E} \times \mathbf{p}$. 这两种效应都会在重金属/铁磁体界面引发自旋积累, 自旋随后扩散到 FM 层, 从而将自旋流的角动量传递给铁磁层的磁矩, 并对磁矩施加力矩^[92,93]. 该力矩通常包含方向为 $\mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \boldsymbol{\sigma})$ 的类阻尼分量 $\boldsymbol{\tau}_{DL}$ ^[94,95], 以及方向为 $\mathbf{m} \times \boldsymbol{\sigma}$ 的类场分量 $\boldsymbol{\tau}_{FL}$ ^[96].

SOT 磁动力学具有高速度、低功耗的优势, 在高速缓存、磁逻辑门、神经形态计算等应用方向上表现出巨大潜力^[97,98]. 在实际应用中, 由于体系固有的对称性, 磁化的进动路径存在简并, SOT 无法自行完成确定性磁翻转. 若要实现确定性磁翻转, 通常需要引入额外的磁场实现对称性破缺, 这会大大增加器件制造的难度, 不利于 SOT 器件迈向应用. 因此, 在 SOT 中实现零磁场磁操控, 成为自旋电子学中备受关注的研究方向^[99-102]. DMI 为磁系统赋予确定的手性, 其有效场的面内分量可提供打

破对称性所需的内置面内场, 为实现零磁场 SOT 器件提供一条利用材料本身属性来破解对称性困境的有效途径.

3.2 DMI 协同的零磁场磁翻转

基于 SOT 的电流磁操控机制中, DMI 起到打破对称性的作用, 在实现零磁场条件下的确定性磁化翻转方面展现出独特优势^[64,103-106]. DMI 有效场的面内分量打破空间反演对称性, 使 SOT 能够实现确定性的垂直磁化翻转. 这一过程涉及磁畴壁成核与传播、磁动力学演化等多个阶段, DMI 的存在不仅改变了磁系统能量分布, 还会显著影响磁动力学路径^[103].

众多研究证实, 异质结诱导产生的 DMI 可以与 SOT 协同实现零磁场的磁化确定性翻转, DMI 在这种无场磁翻转中起关键作用^[104,107-109]. 当电流脉冲方向垂直于 DMI 矢量时, 系统的最终磁化取向如图 2 所示, 取决于初始状态和脉冲宽度^[103]. 而当电流脉冲与 DMI 矢量平行时, 无论结构是铁磁耦合还是反铁磁耦合, 都能确保可预测的最终磁

化状态^[104]. Lin 等^[108]在此基础上优化结构, 报道了 在零温下临界磁翻转电流密度仅需 $1.67 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$. 通过精确控制中间非磁性层厚度, Wang 等^[107]实现了临界电流密度低至约 10^6 A/cm^2 量级的确定性磁翻转. 这些基于 DMI 的零磁场 SOT 磁翻转方案具有与当前 MRAM 技术兼容的优势, 为开发实用的 SOT-MRAM 和其他 SOT 器件开辟了路径. 在具有垂直磁各向异性系统中, 研究人员比较了不同重金属元素 (特别是 Pt 和 W) 对 SOT 驱动切换特性和 DMI 的影响^[34], 通过精确测量异常霍尔电阻与面内/面外磁场的关系, 量化了 DMI 有效场, 为设计高效 SOT-MRAM 器件提供了重要指导^[109].

从实验室的小规模材料制备到大规模的器件生产, 是 DMI 和 SOT 协同作用实现的零磁场确定性磁翻转迈向应用的必经之路. 在这方面, Chen 等^[110]通过在楔形自旋耦合层上沉积 [Co/Pd]/Ru 结构, 获得了各向异性的完全补偿合成反铁磁, 实现了 SOT 诱导的零磁场磁化翻转, 这对实际应用至关重要. Bai 等^[111]进一步设计了互补的双楔形结构, 实现了显著的 z/y 有效场比 89.8%, 均匀覆

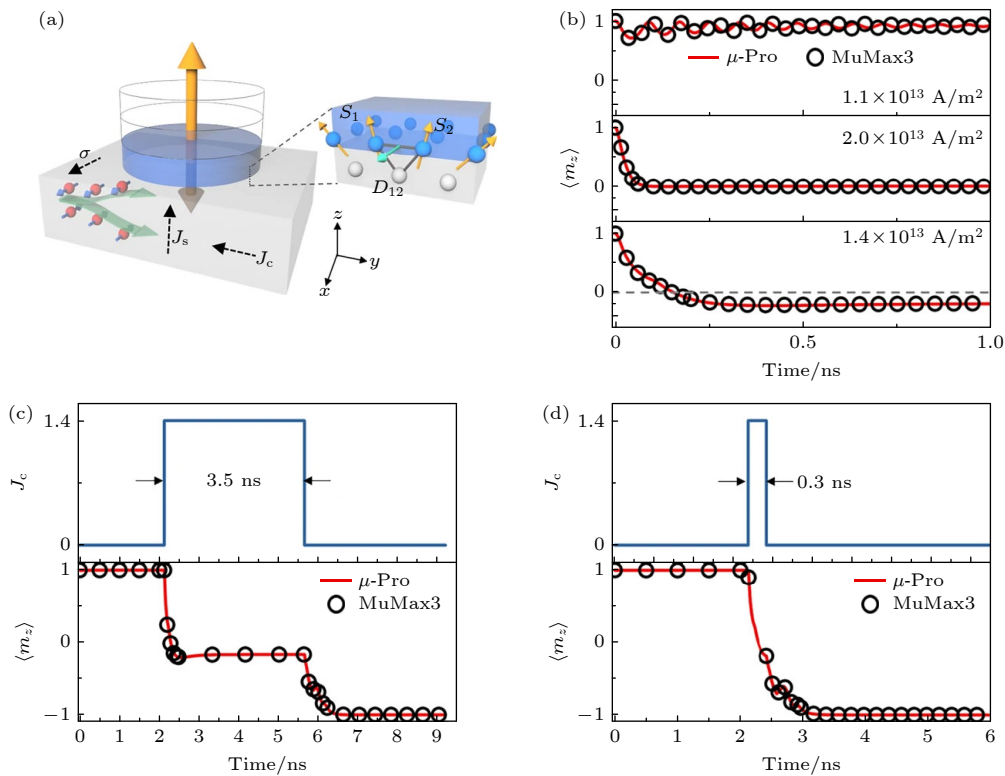


图 2 DMI 协同的零磁场 SOT 垂直磁翻转^[103] (a) SOT-MRAM 单元的示意图; (b)–(d) 不同电流密度和电流脉冲宽度下的磁翻转动力学

Fig. 2. Field-free SOT perpendicular magnetization switching assisted by the DMI^[103]: (a) Schematic of the SOT-MRAM cell structure; (b)–(d) magnetization switching dynamics under varying current densities and pulse widths.

盖 2 in, 与 CMOS 后端工艺兼容, 适合大规模生产. Feng 等^[14] 使用工业兼容的磁控溅射技术成功制备了 $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ (BST) 薄膜, 在溅射制备的 BST 基器件中观察到了较强的 DMI, 实现了高效垂直磁化翻转, 所需电流密度仅为 $1.36 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$. 这些方法与半导体制造工艺兼容, 同时保证了高效的零磁场磁翻转.

此外, 在其他更多具有 DMI 的材料中也实现了零磁场的确定性磁化翻转. 其中, Song 等^[69,70] 在交错磁体 CrSb 中诱发了不同类型的晶格畸变, 产生了不同取向的 DMI 矢量, 并在 CrSb/重金属异质结中实现了零磁场的磁翻转. 同时提出了在交错磁体中实现零磁场电学磁翻转的判据, 当电流诱导的自旋极化、奈尔矢量与 DMI 矢量三者之间两两存在垂直分量时, 即可实现零磁场磁翻转. 此外, 在合成反铁磁^[112]、铁磁绝缘体如钇和铥铁石榴石/Pt^[113-115]、稀土/过渡金属/亚铁磁体结构^[116]、单层 Gd-Fe-Co^[117]、铁磁半导体^[71] 中, 均实现了 DMI 与 SOT 协同作用下的零磁场确定性磁翻转.

DMI 是一种源于反演对称性破缺的反对称交换相互作用, 其有效磁场的面内分量可等效为一个内禀的、具有特定方向的面内偏置磁场. 该磁场本质上打破了磁系统的对称性, 解除了磁化进动路径的能量简并, 为磁化翻转提供了确定的路径. DMI 与 SOT 协同时, SOT 提供的自旋流驱动磁化状态高速进动与能量耗散, 而 DMI 提供的面内等效磁场则作为内在的导向场, 共同驱动磁化状态的可控翻转. 这种协同机制使得即使在外置磁场的条件下, 也能实现确定性的磁化翻转过程, 极大地降低了自旋电子器件的操作能耗与设计复杂度, 为高效、稳定的电控磁化翻转提供了有效路径.

3.3 手性磁动力学中的 DMI 效应

随着对界面自旋-轨道耦合物理理解的深入, DMI 与 SOT 协同作用的电流驱动技术已从基础物理现象发展为高密度、低功耗磁存储与逻辑器件的实用性技术, 为磁畴壁和拓扑磁结构的电流驱动提供了新机制. 基于电流驱动的磁畴壁的运动, Parkin 等^[118-120] 提出了一种赛道存储器的构想 (图 3). 存储器由水平或垂直排列在硅芯片上的磁性纳米线阵列组成, 磁畴壁在每根纳米线中存储一系列数据位.

DMI 促成了各类手性磁畴壁的产生, 并在这些磁畴壁运动的调控中起重要作用^[121]. 2021 年,

Du 等^[122] 从理论角度分析了长而窄自旋阀中 DMI 对 180° 磁畴壁动力学的影响, 证明了 DMI 可显著推迟 Walker 击穿, 稳定原本不稳定的传播模式, 同时保持高饱和速度. 理论分析表明, 当自旋极化电流密度在一定范围内时, 180° 磁畴壁在具有重金属属性覆盖层的自旋阀中可保持稳定的高速传播, 速度可达数百米每秒.

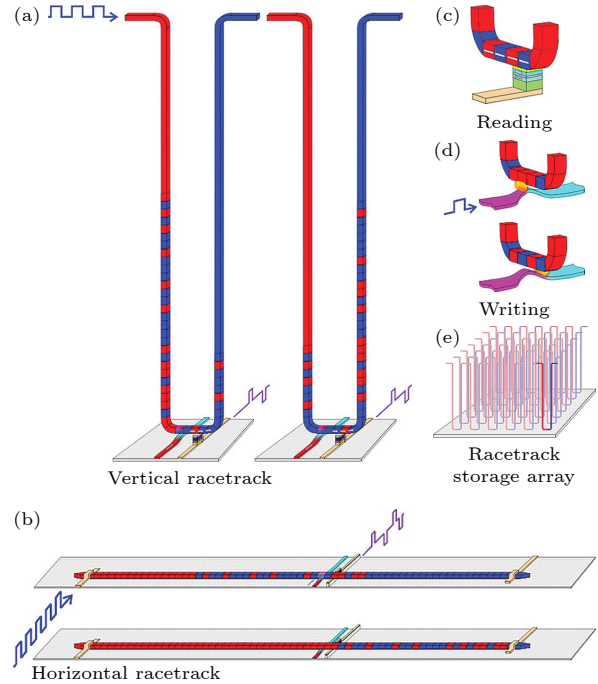


图 3 基于纳米线中磁畴壁运动的赛道存储器概念图 (出自文献 [118], 已获得授权)

Fig. 3. Conceptual illustration of racetrack memory based on magnetic domain wall motion in a nanowire (Reproduced with permission from Ref. [118]).

2024 年, Beaulieu 等^[123] 系统探究了自旋-轨道力矩、手性耦合和器件设计在磁畴壁赛道中的相互作用, 发现通过改变赛道中的垂直磁各向异性可以改变面内磁化方向, 进而精确调控电流诱导的畴核生成过程. 研究表明, 当电流密度在 $(1.5-2.5) \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 范围内时, 可实现从单畴核生成到交替畴重复核生成的转变, 磁畴壁生成效率高达 90% 以上. 这种元件构成了磁畴壁多路分配器的基础, 对构建互连的磁逻辑门网络至关重要. Stetco 等^[124] 则证明了通过调整磁畴壁通道与电流方向之间的角度, 可以对电流诱导的磁畴壁运动提供几何控制, 展现出不对称的磁畴壁行为. 在 CoFeB/Ta/Pd 体系中, 当磁畴壁通道有一部分相对于电流方向 45° 时, 对于一种极性的磁畴壁, 运动可以自由进

行, 而相反极性的磁畴壁则在 45° 区域受到阻碍甚至阻断. 在低 DMI 样品中 (DMI 常数 0.48 mJ/m^2), 当脉冲电流密度为 $2.1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 时, 磁畴壁可自由通过 45° 区域; 而反向电流为 $2.0 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 时, 磁畴壁运动被完全阻断, 这种特性使器件能够作为磁畴壁二极管工作.

为解决高密度赛道存储器中紧密排列磁畴难以读取的问题, Jeon 等^[125]提出了两种动态调控手性磁畴壁间距的新方法, 第一种方法通过在导管特定位点增加电流密度, 局部加速磁畴壁运动, 实现磁畴壁间距的解压缩; 第二种方法利用局部偏置电流区域实现磁畴壁间距的可控压缩和解压缩. 这些方法可在纳秒时间尺度内实现高达 88% 的磁畴壁压缩/解压缩率, 同时保持磁畴壁稳定性, 为赛道存储器中的信息读取和信息密度的提升提供了解决方案. 之后, Umetsu 等^[126]进一步探究了具有准布洛赫态的磁畴壁在 W/CoFeB/MgO 结构中的 SOT 驱动行为, 发现磁畴壁运动方向是 DMI 和自旋霍尔角的符号组合、DMI 强度、自旋-转移力矩和外在畴壁钉扎多重作用的结果. 通过构建一维模型并结合实验测量的材料参数, 他们成功重现了不同样品中磁畴壁运动方向和阈值电流密度的变化, 并提供了 SOT 驱动准布洛赫磁畴壁运动阈值电流密度的解析表达式, 为后续设计具有特定运动特性的磁畴壁器件提供了理论指导.

为追求更高速运动的磁畴, 以实现更高速度的器件应用, 研究人员在更多材料中进行尝试. 在合成反铁磁体结构中, 层间反铁磁耦合与 DMI 的共同作用, 对开发高密度、快响应的磁畴壁存储器具有重要意义^[127-129]. Masuda 等^[128]在 Pt/Co/Ir/Co/Pt 中, 通过上下两个 Pt 层的自旋流, 对钴层的垂直磁化施加双重 SOT, 在 10^7 A/cm^2 量级的电流密度下, 能有效形成反向磁畴并驱动, 层间交换强度与磁畴壁速度呈正相关, 而反向磁畴成核所需电流密度与层间交换强度呈负相关. 在另一种反铁磁材料 Mn_3Sn 中, Xu 等^[130]则报道了由 SOT 驱动的快速手性磁畴壁运动, 在仅 $9 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 的低电流密度下, 磁畴壁运动速度超过 545.3 m/s , 表明了反铁磁材料在下一代高速度、高密度存储器中具有重要应用潜力. 此外, 亚铁磁体展现出独具特色的动态特性, 结合 DMI 可实现超快磁畴壁运动, 研究人员在其中实现了 km/s 量级的磁畴壁运动速度. 并展示了包括 NOT, AND 和 OR 在内

的多种逻辑操作^[15]. 为解决“功耗墙”问题, 实现高频、超低功耗微芯片提供了可行路径.

DMI 协同的电流操控手性磁畴壁可实现包括如图 4 所示的 NOT, AND 等多种逻辑操作^[15,131-133]. 2020 年, Luo 及其团队^[133]利用 DMI 诱导的相邻磁畴间手性耦合效应, 设计并实现了布尔逻辑的基本构建模块畴壁反相器, 成功构建了包括 NAND, NOR 和 XOR 门在内的多种逻辑门. 他们的反相器由嵌入面外磁化赛道组成, 当畴壁接近面内磁化区域时, 在 SOT 作用下, 畴壁被压缩, 导致静磁能和交换能增加, 最终通过湮灭入射磁畴壁并在面内磁化区域另一侧形成新磁畴壁来释放能量, 实现磁化方向反转. 理论估计表明, 当器件缩小到 $10 \times 10 \text{ nm}^2$ 时, 单次 NOT 操作的能耗可低至 1.3 fJ , 操作时间仅需几十皮秒. 此外, 磁畴壁斯格明子的研究揭示了一种可以在域壁中存储额外数据位, 而不会影响磁畴壁运动的机制, 为下一代磁存储器件的发展提供了一条新思路^[134,135].

磁斯格明子因具有拓扑稳定性和小尺寸以及运动所需的电流极低等优势, 被认为是赛道存储器的潜在存储单元^[136-138]. 以磁斯格明子为存储单元的赛道存储器概念如图 5 所示. 磁斯格明子由于其独特的涌现磁电效应, 在电流驱动单个磁斯格明子的过程中总是伴随着磁斯格明子的横向运动, 称为磁斯格明子霍尔效应. 因此与磁畴壁相比, 在使用磁斯格明子作为存储单元时, 既需要追求高速的运动, 还要抑制或合理利用磁斯格明子的霍尔效应.

磁斯格明子的成核是电流驱动磁斯格明子研究的前提. 江万军团队^[139]最先在纳米条带中通过电流驱动磁畴壁的方式实现了磁斯格明子的成核 (如图 6), 并研究了磁斯格明子电流驱动的物理性质. 近年, Chen 等^[140]进一步利用电流实现高效、线性且按需的磁斯格明子生成动力学. 在 DMI 为 1.2 mJ/m^2 , 电流密度为 $3.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 时, 磁斯格明子生成效率达到最高, 每 10 个电流脉冲可生成 1 个磁斯格明子. Wang 等^[141]则通过电流实现了对拓扑荷大小和符号的高效控制, 为按需调控拓扑磁结构提供了新的思路.

在铁磁材料中用电流驱动单个磁斯格明子时, 如何克服或有效利用磁斯格明子霍尔效应是一个重要的课题^[142,143]. 研究表明, 反铁磁体中的磁斯格明子^[144,145]、磁斯格明子对^[16,145-147]以及椭圆

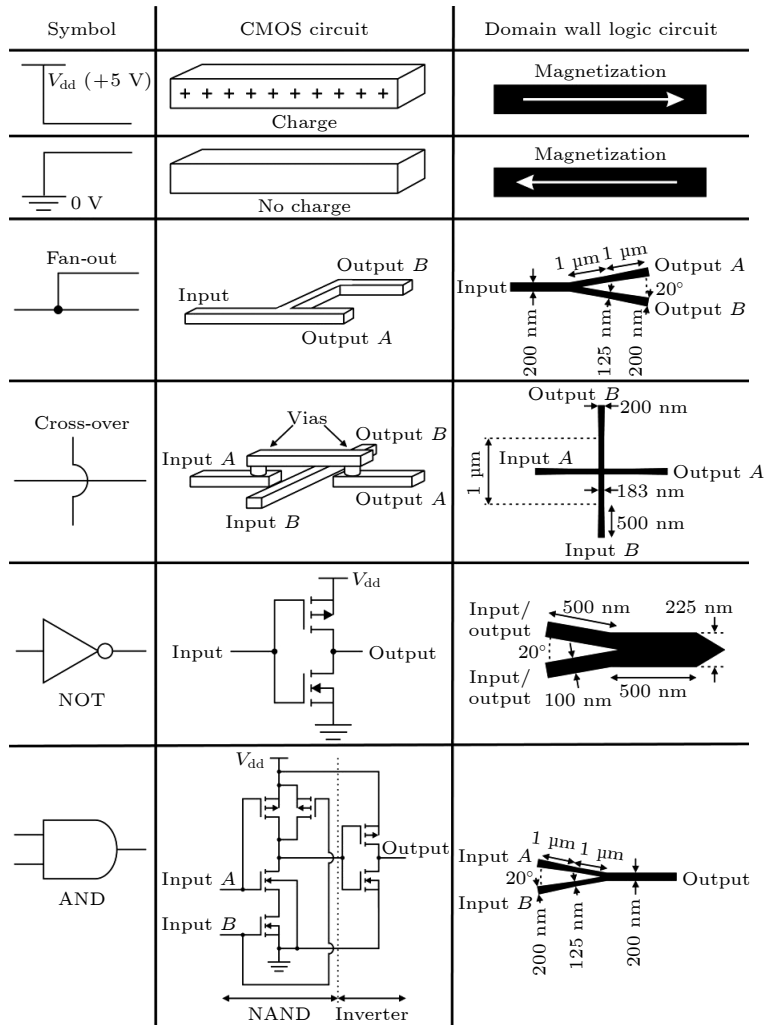


图 4 磁畴壁逻辑元件示意图. 电子逻辑符号, 及其对应的 CMOS 电路元件和磁畴壁逻辑元件 (出自文献 [131], 已获得授权)
 Fig. 4. Schematic drawing of the domain-wall logic element. Symbols for electronic logic, together with the appropriate CMOS circuit element and the domain-wall logic element (Reproduced with permission from Ref. [131]).

磁斯格明子 [148-151] 可以有效克服磁斯格明子霍尔效应. 2019 年, Dohi 等 [144] 报道了合成反铁磁中电流诱导磁斯格明子的运动, 在电流密度约为 $6.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 时, 磁斯格明子运动从蠕变/脱钉状态过渡到流动状态, 速度与电流密度呈线性关系. Li 等 [145] 研究发现, 在 SOT 驱动下, 反铁磁斯格明子在电流驱动下无横向偏移, 速度可达到 6 km/s , 且无磁斯格明子霍尔效应, 但是临界驱动电流密度较大. 此项研究还提出了在双层结构中通过反铁磁耦合的反斯格明子-反斯格明子对, 可进一步抑制磁斯格明子霍尔效应. 而 Yagan 等 [146] 进一步通过计算模拟和理论分析, 系统探究了合成反铁磁耦合斯格明子对的稳定性和控制特性. 研究表明, 反铁磁斯格明子可在极低电流密度 (10^4 A/cm^2) 下实现绝热驱动, 为反铁磁耦合斯格明子对的电流驱动

提供了理论依据. 而后, Pham 团队 [16] 进行了实验上的验证. 在补偿合成反铁磁体中, 如图 7 所示的具有相反拓扑荷的磁斯格明子对以高达 900 m/s 的速度运动, 且霍尔角为零.

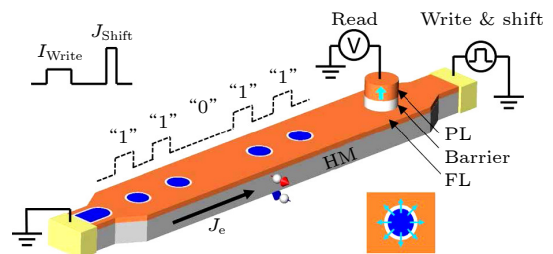


图 5 以磁斯格明子为存储单元的赛道存储器概念图 (出自文献 [136], 已获得授权)
 Fig. 5. Schematic illustration of a nanowire-based racetrack memory device using magnetic skyrmions as information carriers (Reproduced with permission from Ref. [136]).

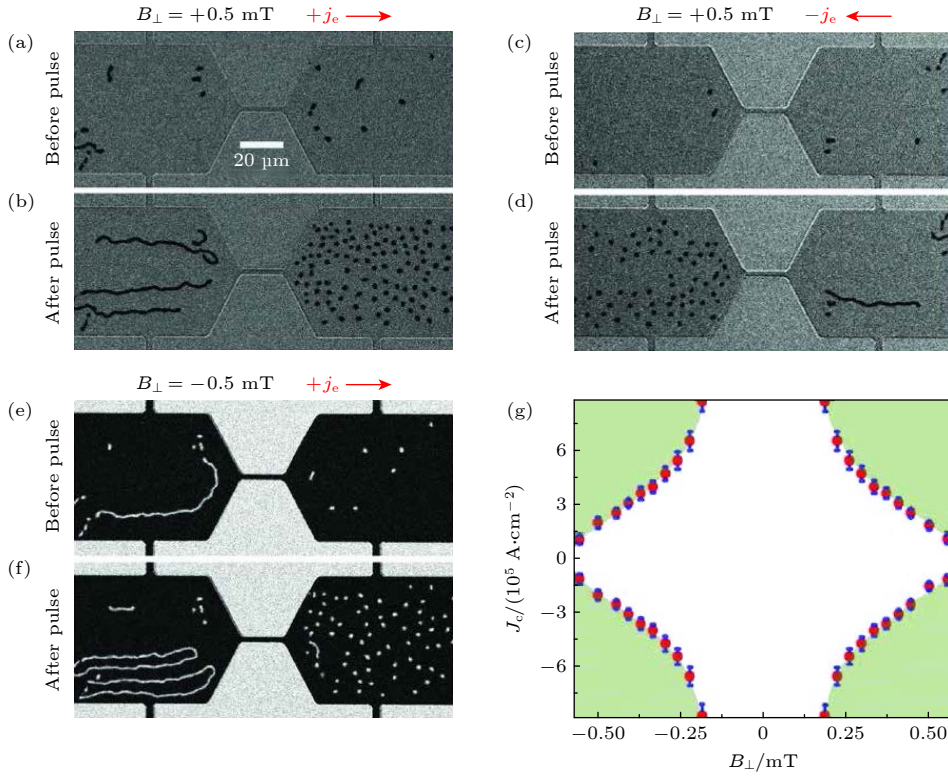


图 6 纳米条带中电流驱动磁畴运动生成磁斯格明子过程 (出自文献 [139], 已获得授权)

Fig. 6. Skyrmion formation in a nanostrip through current-driven magnetic domain motion (Reproduced with permission from Ref. [139]).

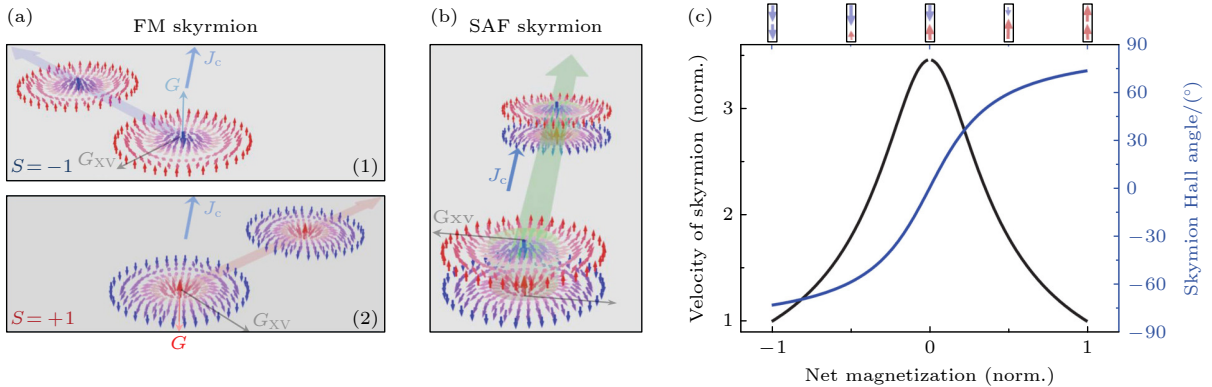


图 7 在合成反铁磁中使用两个中心极性相反的磁斯格明子组成磁斯格明子对实现电流驱动为零霍尔角运动 (出自文献 [16], 已获得授权)

Fig. 7. Current-driven zero-Hall-angle motion of an antiferromagnetically coupled skyrmion pair with opposite core polarities in a synthetic antiferromagnet (Reproduced with permission from Ref. [16]).

除了上述的垂直分布的磁斯格明子对外, Qiu 等 [147] 提出了将具有相反拓扑荷的磁斯格明子置于纳米带的两侧边界的方案, 两个磁斯格明子形成互补的运动轨迹, 可解决单个磁斯格明子赛道中因霍尔效应导致的边界碰撞问题, 同时保持了磁斯格明子器件的低能耗优势. 椭圆形磁斯格明子由于结构各向异性, 可通过调节椭圆形磁斯格明子的形变, 使其霍尔角为零 [148,149,151]; 此外, 通过调控 DMI

和亚铁磁体中混合斯格明子螺旋净角动量, 也能有效抑制磁斯格明子霍尔效应 [152,153]. 在其他应用层面, 磁斯格明子可模拟生物突触的增强和抑制行为, 用于神经形态计算 [154]. 此外, 基于磁斯格明子运动构建的 AND, OR, NOT, NAND, NOR 等逻辑器件也被相继提出 [155], 极大丰富了 DMI 驱动的磁斯格明子动力学应用.

DMI 与磁性材料中其他相互作用的竞争机制

促成了各类手性磁结构, 这些非共线自旋构型与自旋流有更高的耦合效率, 为高效、高密度自旋电子器件设计提供了信息载体。

4 电场调制的 DMI

4.1 DMI 的磁电效应

在追求低能耗、高密度信息存储与处理的自旋电子器件的研究中, 磁动力学的电场操控机制展现出巨大的应用潜力. 电场调制 DMI 是实现纯电场磁动力学操控的一种低功耗、高效率方式^[19,156-158], 当前研究中, DMI 的电场调控可以通过多种机制实现。

首先, 电场可以通过调节界面电荷分布、轨道占据等方法, 实现对 DMI 的快速调控. 在这个过程中, 响应通常较快且在小电压下即可观察到明显效应. 这种方法通常依赖于由界面工程产生的强 SOC. 通过外加电场可显著改变界面电荷密度、电子占据等, 实现 DMI 幅值与手性的可逆调制^[13,25,159,160].

其次, 通过电场诱导晶格位移可以实现对 DMI 的调制. 在一些压电材料以及磁电耦合异质结等材料系统中^[21,22], 外加电场通过异质结构中的压电材料在外电场下的形变, 将应变传递至毗邻的磁性薄膜或者直接使得磁性材料发生晶格结构改变, 进而改变其晶格常数与对称性, 有效地调制 DMI^[29,161,162]. DMI 对原子间距和晶体结构对称性高度敏感, 通过应变的形式, 直接改变磁性层中晶体的键长和角度, 或是改变材料的电子能带结构进而影响态密度和自旋-轨道耦合强度的方式, 都可以实现电场-晶格-DMI 的连锁反应, 为实现 DMI 的“大范围, 非易失”调控提供了有效方案。

另外, 离子参与和化学吸附/脱附的间接调控机制也可以实现 DMI 的电场调控, 这些方法绕开了对磁层本征物理性质的直接依赖. 在离子参与的调控路径中, 电场的静电力可驱动体系中可移动离子发生定向迁移, 这种离子的动态行为会破坏或重构原有的空间反演对称性, 调节体系的自旋-轨道耦合强度, 最终实现 DMI 的增强、抑制或手性调制^[23,24,163]. 利用化学吸附/脱附的方式也可以调控界面电子结构和几何结构变化. 当氢^[27]或氧^[26]等轻元素在铁磁层表面发生化学吸附时, 它们与表面原子形成化学键, 引起界面处的电荷转移、轨道重新杂化以及表面原子的轻微外向弛豫, 这种结构变

化破坏了界面的空间反演对称性, 从而诱导出 DMI.

电场调控 DMI 的机制众多, 物理核心都是围绕电场改变“对称性”和“自旋-轨道耦合”来调节 DMI. 不同机制在调控速度、可逆性、非易失性和调控幅度上各具特点, 并且有时共同参与电场调控 DMI, 为实现电场作用下的磁结构写入、操控与器件化提供了系统性的物理基础. 随着异质结构设计、电化学控制和新型低维磁体研究的推进, 基于电场的多通道 DMI 调控有望为未来低功耗、高密度自旋电子器件提供重要技术支点。

4.2 拓扑磁态的电场调控

DMI 在拓扑磁结构的形成中发挥着关键作用, 其影响主要体现在磁结构的尺寸、手性和拓扑荷等重要属性上. 通过电场调控 DMI, 可以有效改变其强度和方向, 从而精确调节拓扑磁结构的几何形态与拓扑性质, 实现拓扑磁态的高效转变, 为拓扑磁结构的研究和应用提供了新的思路。

研究人员已成功在低电压、室温条件下实现拓扑磁结构尺寸的调控, 并且具备较大的调控范围. Srivastava 等^[13]在 Ta/FeCoB/TaO_x 三层膜的复合异质结材料中通过电场调控界面电荷, 观测到了 DMI 约 1.3 倍的变化, 并发现 DMI 和磁斯格明子尺寸随电场强度单调变化. 研究预测, 在更高电压下 DMI 可能发生符号反转, 从而实现手性切换. Zhang 等^[159]则同样展示了复合多铁材料中 DMI 在强电场下可以实现小幅度的强度改变. 2024 年, Kasagawa 等^[160]在 Ta/Co-Fe-B/Pt/MgO 体系中, 通过垂直电场改变 Pt/MgO 界面电子态, 实现了电场对 DMI 单一磁参数的调控. 2025 年, Zhao 等^[164]的研究在范德瓦耳斯多铁异质结构 Fe₃GaTe₂/CuInP₂S₆ 中实现了室温下磁性的非易失性电场调控. CuInP₂S₆ 铁电层的极化能在界面处打破对称性, 显著增强 Fe₃GaTe₂ 磁性层中的 DMI, 且其强度随铁电极化方向可调. 第一性原理计算证实, 铁电极化诱导的界面电荷重分布导致 Fe 原子位点的不对称性, 从而产生 DMI (0.40—0.74 mJ/m²).

此外, 还可以通过电场调控 DMI 操控磁斯格明子产生、湮灭等动力学行为. Ba 等^[161]在铁磁/铁电多铁性异质结构中, 利用应变介导的磁电耦合, 实现了室温条件下对磁斯格明子的电场控制. PMN-PT 传递的拉伸面外应变增加 Co 和 Pt 原子在界面处的距离, 降低 Co-Pt-Co 原子间轨道杂化

的强度, 进而减弱了 DMI 强度. 实验结果和微磁模拟表明, 电场通过应变诱导的垂直磁各向异性和界面 DMI 强度的变化来影响磁斯格明子, 并且观察到了在不同电场下磁斯格明子会产生和湮灭 (如图 8 所示). Sun 等^[165] 通过电场和磁场调控磁斯格明子, 他们将 $\text{WTe}_2/\text{CrCl}_3$ 异质结构放置在铁电 CuInP_2S_6 单层衬底上, 通过改变 CuInP_2S_6 的铁电极化方向, 调控 DMI 强度, 从而影响磁斯格明子的产生和湮灭. Zhou 等^[166] 同样在实验上通过异质结构实现了无磁场下的磁斯格明子生成和湮灭. Hou 等^[162] 的研究聚焦 $\text{Pt}/\text{Co}/\text{Ta}$ 纳米点与 PMN-PT 铁电基底组成的多铁异质结构. 外加电场使铁电层产生应变, 实现 DMI 和有效单轴各向异性的调控. 实验观察到电场可诱导磁斯格明子簇的级联转变, 实现纳米点中磁斯格明子数量的精确、非易失性控制. 理论分析表明, 应变引起的自由能变化由两部分组成: 单轴各向异性变化促进相变, 而 DMI 变化抑制相变.

Wang 等^[29] 的工作清晰展示了 DMI 在磁斯格明子形成和湮灭中起到的重要作用. 他们进行了详细的数值模拟, 在铁磁/铁电异质结中, 电场通过逆磁致伸缩效应调控关键磁性参数, 如 DMI 和垂直磁各向异性, 实现包括磁斯格明子在内的非共线手性磁结构的电场操控. 拉伸应变降低 DMI 强

度和面内磁各向异性, 促进条纹畴向磁斯格明子转变; 压缩应变则显著增强面内磁各向异性, 驱动磁斯格明子向磁涡旋态演化. 如图 9 所示, 微磁模拟证实 DMI 变化主导条纹畴-磁斯格明子转换, 而磁各向异性变化主导磁斯格明子-磁涡旋转换. 非易失性机制分析表明, 磁斯格明子的稳定性主要源于纳米点几何边缘的钉扎效应, 而磁涡旋态则依赖于铁电基底的应变. 二维多铁性材料中, 研究人员通过第一性原理计算与原子级自旋动力学模拟发现, 电场可通过反转铁电极化方向调控 DMI, 且 DMI 强度与材料电极化正相关, 在增强垂直磁各向异性后仍能保留^[167].

电场可通过对 DMI 的调制, 实现磁结构手性、极性和螺旋度的操控. Chen 等^[26] 在 2021 年的工作展现了 DMI 对磁结构的调控作用, 他们提出可以通过氢分子在 $\text{Ni}/\text{Co}/\text{Pd}/\text{W}(110)$ 多层膜表面的化学吸附和脱附来调控 DMI, 进而实现磁手性的可逆切换, 为通过电场调控拓扑磁结构提供了思路. 在 $\text{Ta}/\text{FeCoB}/\text{TaO}_x$ 三层结构中, Fillion 等^[23] 通过施加 2—3 V 栅压, 即可动态、可逆且局部地调控磁斯格明子及磁畴壁的手性, 如图 10 所示. 该研究证明了栅极电压能够反转 DMI 的符号而非仅调节其幅度, 这种反转源于电压诱导的氧离子迁移导致 $\text{FeCoB}/\text{TaO}_x$ 界面氧化状态的改变. 微磁

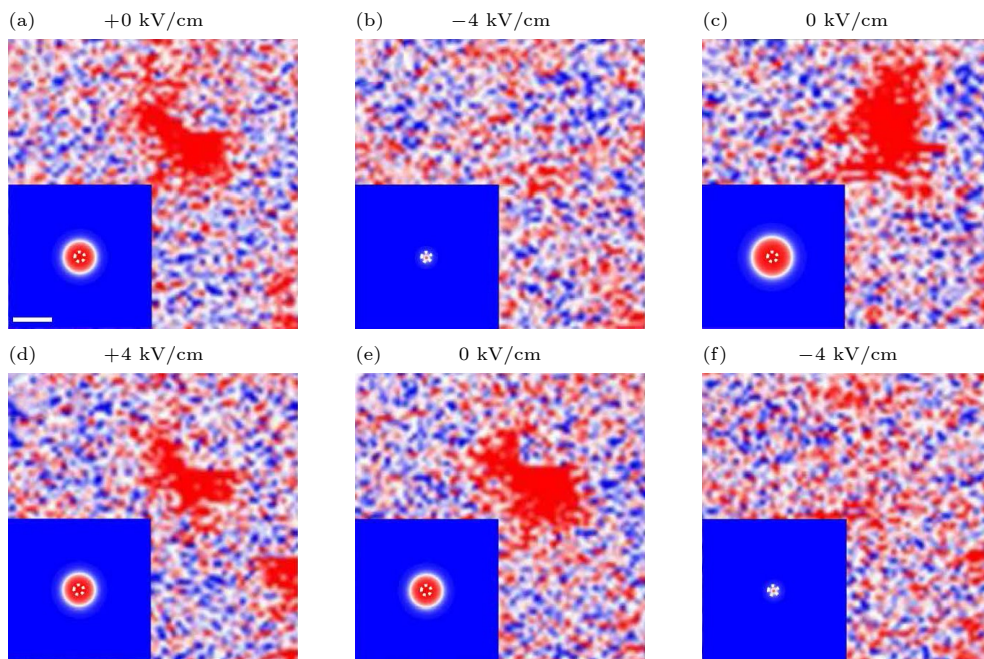


图 8 电场调控磁斯格明子的产生和湮灭^[161]

Fig. 8. Electric field control of the generation and annihilation of skyrmions^[161].

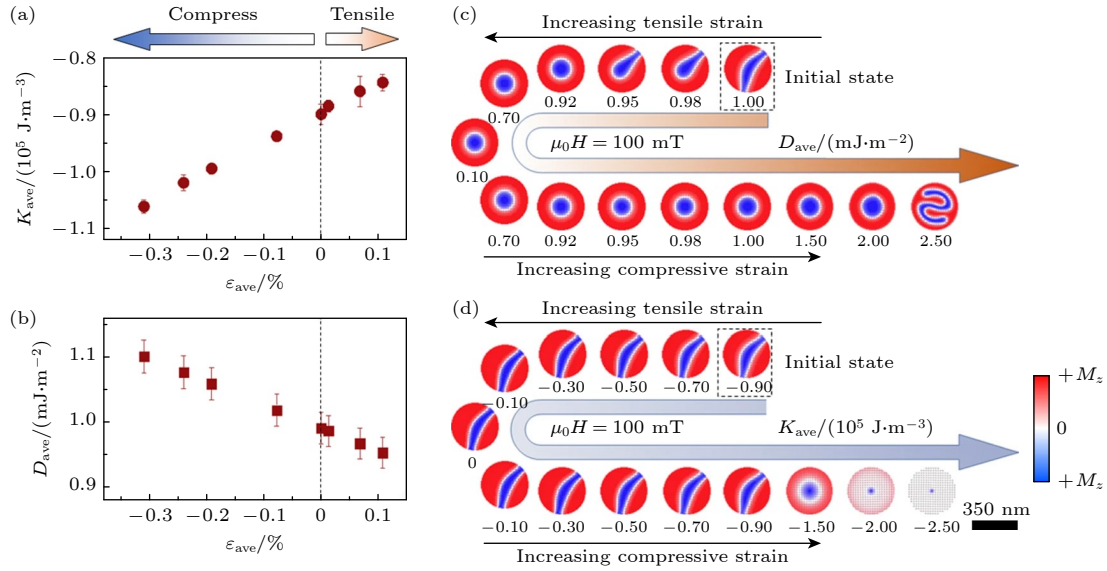


图 9 电场通过调控 D_{ave} 和 K_{ave} 变化驱动磁畴演化过程的模拟^[29] (a), (b) 电场作用引起的 D_{ave} 和 K_{ave} 变化; (c) D_{ave} 对磁畴演化影响的模拟结果; (d) K_{ave} 对磁畴演化影响的模拟结果

Fig. 9. Simulation of magnetic domain evolution induced by changes in D_{ave} and K_{ave} under the influence of an electric field^[29]: (a), (b) Changes in D_{ave} and K_{ave} induced by the electric field; (c) simulations of the influence of D_{ave} on the magnetic domain evolution; (d) simulations of the variation of K_{ave} on the magnetic domain evolution.

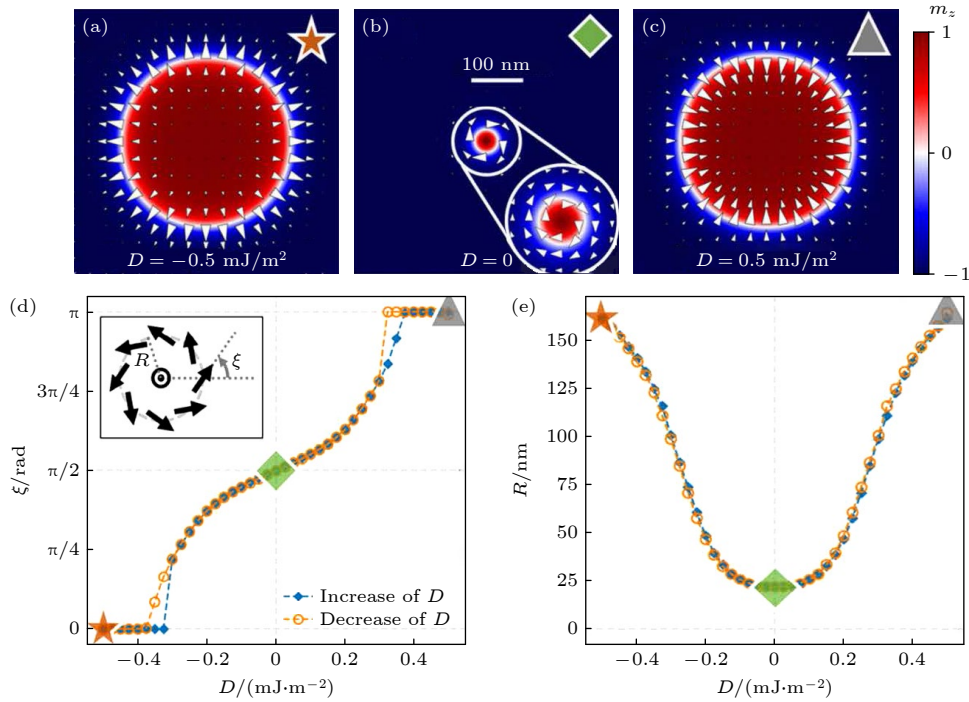


图 10 磁斯格明子手性翻转的微磁模拟^[23]. 随着 DMI 常数从 -0.5 mJ/m^2 变化到 0.5 mJ/m^2 , 磁斯格明子状态从顺时针奈尔型, 经由布洛赫型, 最终转变为逆时针奈尔型

Fig. 10. Micromagnetic simulation of magnetic skyrmion chirality switching^[23]. As the DMI constant changes from -0.5 mJ/m^2 to 0.5 mJ/m^2 , the skyrmion state transitions from a clockwise Néel type, through the Bloch type, to an anti-clockwise Néel type.

模拟进一步验证, 磁斯格明子的手性翻转是一个连续的动力学过程, 且在反转过程中磁斯格明子保持稳定. 在 $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{In}_2\text{Se}_3$ 范德瓦耳斯异质结构中, Huang 等^[25] 通过铁电极化反转的方式,

改变界面轨道杂化, 转移界面电荷, 从而实现了 DMI 大小的调控 ($0.06\text{--}0.28 \text{ mJ/m}^2$). 他们基于密度泛函理论, 预测这种方式还能改变 DMI 符号, 实现磁斯格明子手性反转.

Dai 等^[168]在 2023 年报道了另外一种对磁斯格明子手性的电控方案. 该研究不仅阐明了异质结构中电场调控 DMI 的物理机制, 还通过实验进一步验证了在 Ta/CoFeB/Ir/MgO 异质结上施加栅压能够驱动 DMI 手性翻转并调节其强度, 从而实现了磁斯格明子手性、螺旋度和动力学行为的全电学控制, 如图 11 所示. Niu 等^[27]则通过工程化的空间交替 DMI 模式, 在 Ni/Co/Pd/W 多层中实现了磁斯格明子拓扑荷的可控转变, 并提出可以通过电场调控的氧离子吸附/脱附的机制实现 DMI 符号的翻转, 展示了通过 DMI 工程在室温下调控拓扑磁结构的新途径. Ga 等^[169]则在多铁性反铁磁体 PbVO₃ 中发现, 通过电场反转铁电极化调控 DMI, 可以实现四种不同手性和极性反铁磁斯格明子态的非易失性切换. 除了磁斯格明子和磁双半子, 电场对拓扑磁结构的调控还可以体现在磁半子上. 通过施加电场脉冲, Kang 等^[170]通过数值仿真实现了有效 DMI 的可逆翻转, 进而成功诱导磁半子在不同状态间切换.

电场对 DMI 的调制特性还可以导致拓扑磁结构的拓扑荷等属性的改变. Xu 等^[171]在 2020 年提

供了一个电场调控拓扑性质的方案. 如图 12, 该工作展示了在单层 VOI₂ 多铁体系中, 铁电极化的翻转能够同步翻转 DMI 的符号, 并进一步诱导磁双半子的拓扑荷符号发生反转, 实现拓扑荷在 1 和 -1 之间的可逆切换. 该研究证明了“电场-极化-DMI-拓扑荷”的完整耦合链条, 为拓扑磁结构的电场调控研究提供了新的材料体系与物理机制.

Shen 等^[172]在 2023 年的工作则探讨了在范德瓦耳斯异质结构 CrISe/In₂Se₃ 中, 电场通过翻转 In₂Se₃ 层的铁电极化方向, 改变界面电子结构与对称性, 从而调控磁各向异性, 实现面内-面外磁各向异性的切换. 虽然 DMI 大小主要由 Se 原子强自旋-轨道耦合决定而相对稳定, 但电场改变了 DMI 的表现形式, 实现了无外磁场条件下的磁斯格明子-磁双半子可逆转换及拓扑荷符号反转. Wang 等^[167]在 2023 年通过第一性原理计算与原子级自旋动力学模拟, 在二维多铁性材料中发现电场可通过翻转铁电极化来调控 DMI 的手性, 且 DMI 强度与材料的电极化呈正相关. 2025 年, Han 等^[173]在中心对称二维范德瓦耳斯磁体 Cr₂Ge₂Te₆ 中实现了电场对磁斯格明子螺旋度的精确控制. 研究发现负电场

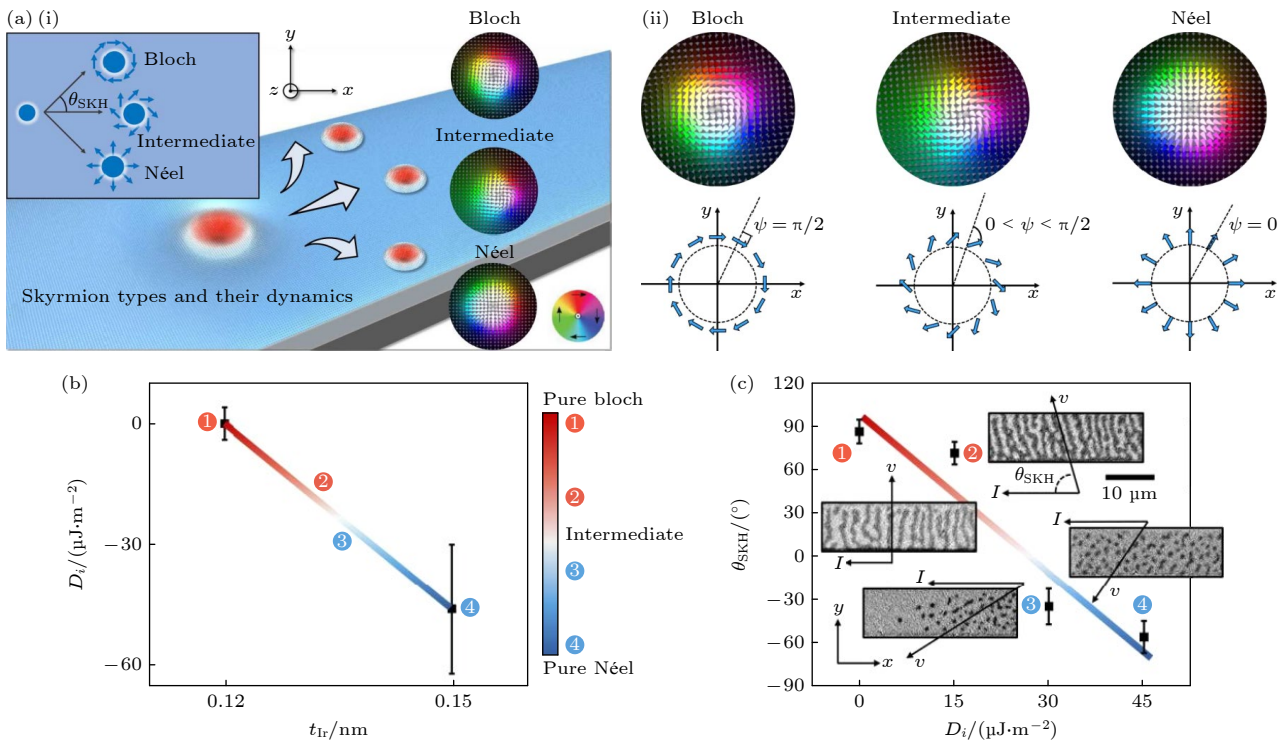


图 11 布洛赫型、奈尔型与中间型磁斯格明子的自旋结构及其动力学行为, 其中, 中间型磁斯格明子沿直线运动^[168]

Fig. 11. Spin structures and dynamic behaviors of Bloch-type, Néel-type, and intermediate-type skyrmions, with the intermediate-type skyrmion moving in a straight line^[168].

诱导产生逆时针螺旋的磁斯格明子, 正电场诱导产生顺时针螺旋的磁斯格明子, 调控后的状态在低温下稳定. 密度泛函理论计算揭示, 电场通过破缺晶格对称性诱导出非零 DMI, 其矢量随电场方向改变.

诸多研究表明, 电场可有效调控 DMI 强度及其矢量方向, 进而改变拓扑磁结构的尺寸、手性、极性、螺旋度、拓扑荷等性质. 这些研究深化了对拓扑磁结构调控机制的认知, 为后续基于 DMI 的

磁动力学操控提供了新思路.

4.3 电场控制的 DMI 力矩

通过电场调控 DMI, 可产生并操控 DMI 诱导的力矩, 进而精确调控磁态, 以此可实现非共线手性磁结构的驱动, 以及垂直或面内磁化翻转. 基于 DMI 力矩的电场磁操控机制不依赖于电流, 在低能耗、高密度自旋电子器件的开发上具有重大潜力 [20,21,23,33,174,175].

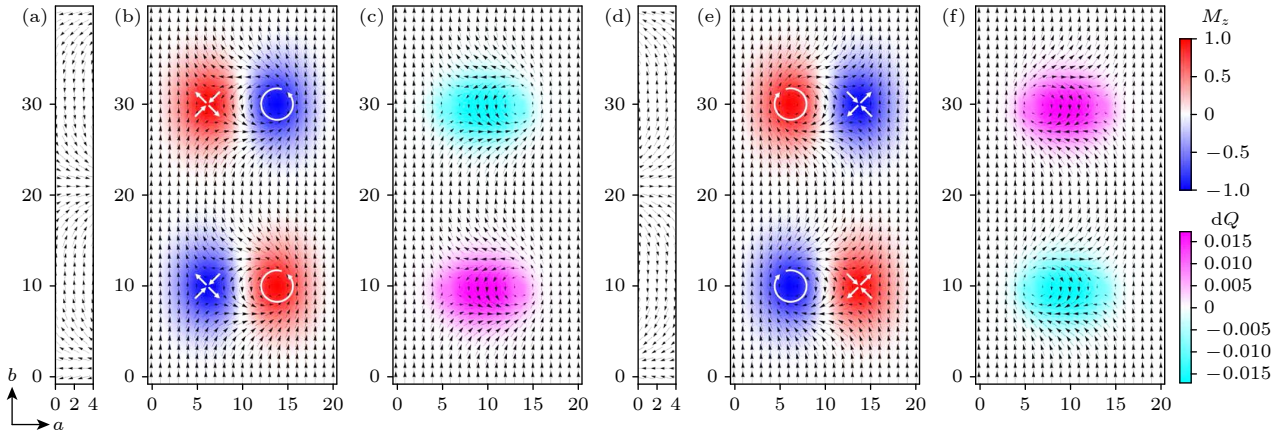


图 12 自旋结构与拓扑荷 Q 的分布 (出自文献 [171], 已获得授权)

Fig. 12. Spin textures and the distribution of topological charge Q (Reproduced with permission from Ref. [171]).

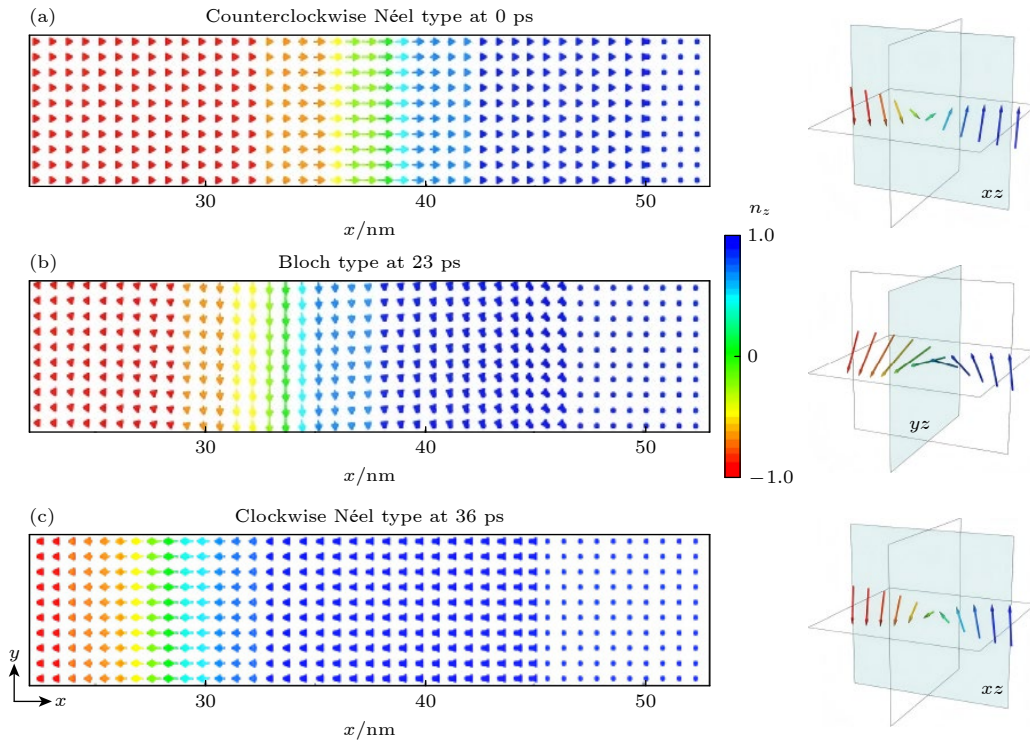


图 13 电场驱动磁畴壁运动 (a)–(c) 展示了 DMI 翻转导致的磁畴壁动态演变, 时间点分别为 0, 23 和 36 ps (出自文献 [30], 已获得授权)

Fig. 13. Movement of magnetic domain wall driven by electric field: (a)–(c) show the dynamic evolution of the magnetic domain wall at 0, 23, and 36 ps, respectively, resulting from the reversal of the DMI (Reproduced with permission from Ref. [30]).

Chen 和 Dong^[30] 在 2021 年的工作提出了一种通过电场驱动亚铁磁或多铁性材料中磁畴壁运动的机制. 通过电极化切换驱动的自旋手性反转, 实现了如图 13 所示纳米尺度上磁畴壁的滚动式运动. 他们发现驱动力直接来源于 DMI, 而非自旋电流. 磁畴壁最终的运动位移与 DMI 强度无关, 但依赖于阻尼系数和亚铁磁比率 σ . 磁畴壁运动的方向可以通过沿 y 轴的偏置磁场或沿 x 轴的电场来控制. 这种基于动态过程的磁电耦合机制具有普适性, 可扩展至其他多铁材料体系. Nikitchenko 和 Pertsev^[176] 的研究进一步明确了 DMI 力矩在磁畴壁运动中的作用. 在 Pt/Co/ MgO/Si 体系中, 通过电场控制垂直磁各向异性梯度与 DMI, 观察到了 260 nm 的位移和 100 m/s 的最大速度. 而在无 DMI 时, 磁畴壁只能来回振荡且最大位移小于 40 nm. DMI 的缺失导致磁畴壁在奈尔型和布洛赫型之间反复转换, 无法驱动磁畴壁进行持续性运动. Zhao 等^[164] 则通过微磁模拟揭示了 DMI 可降低磁畴壁的形成能, 并在实验上观测到了由此导致的磁滞回线变形与磁畴演化.

2023 年, Yu 等^[31] 提出了一种利用电场调控 DMI 力矩来实现垂直磁化翻转的新机制 (如图 14). 他们通过在二维多铁材料 $\text{CuCrP}_2\text{Se}_6$ 中施加电场, 调节 Cu 原子位置来改变 DMI 的符号. DMI 变化

瞬间, 体系能量改变, 在 DMI 力矩的作用下, 磁斯格明子通过膨胀然后再收缩的方式降低体系能量达到新的稳态. 在磁斯格明子膨胀但未收缩到稳态的过程中再次施加相反电场, 磁斯格明子继续膨胀, 最终可以实现完全的垂直磁翻转. Yu 等建立起了磁斯格明子的膨胀方程, 并证明该机制在 CrN 单层等 DMI 手性可翻转体系中具有普适性, 实现了电场控制下的垂直磁翻转. 这种全电场控制的 DMI 力矩驱动垂直磁翻转机制, 能够显著降低焦耳热损耗, 从而为无需外加磁场和电流的自旋电子器件设计提供了新的思路.

2024 年, Yu 等^[32] 进一步提出了基于磁双半子的磁操控方案. 通过电场调控磁双半子作为中介来传递自旋角动量, 进而实现面内磁化翻转. 基于第一性原理计算和原子级自旋动力学模拟, 他们在 $\text{Co}(\text{MoTe}_2)_2$ 和 HgInP_2O_6 中进一步证实了该机制的有效性. 该研究拓展了自旋角动量载体的范畴, 推导出有效自旋极化流密度公式, 建立了 DMI 力矩与传统自旋力矩的理论联系.

DMI 的电场调控机制也推动了自旋电子器件的研究. 基于此机制, 研究人员设计了磁斯格明子减法器^[177]、晶体管^[178,179]、自旋波发生器^[180] 等多种自旋电子器件. 但实际器件化仍面临若干关键挑战. 基于界面电荷或轨道重构的电子尺度机制响应

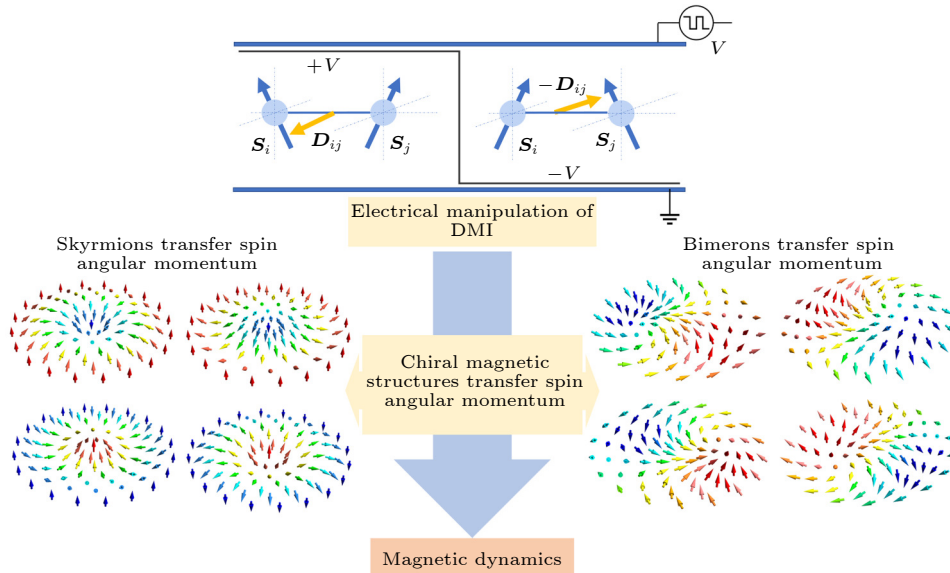


图 14 全电场 DMI 力矩驱动的动力学示意图. 利用电场调控 DMI 以产生自旋力矩, 并通过手性磁结构传递自旋角动量, 从而实现对磁动力学的操控

Fig. 14. Schematic of magnetic dynamics driven by all-electric-field-induced DMI torque. Electric-field modulation of the DMI generates spin torques, with spin angular momentum transferred via chiral magnetic structures to enable the control of magnetic dynamics.

最快,但通常为易失性,需持续施加偏压^[13];相比之下,应变或电化学路径可实现非易失性控制,却普遍响应较慢,限制了写入速率与重复写入能力.在可靠性方面,离子迁移与界面化学反应可能导致界面化学态不可逆演化、阈值漂移与循环疲劳^[23];连续应变循环亦会引发机械疲劳与界面退化.在纳米尺度上,界面粗糙度、原子层化学非均匀性与局域应变梯度会使DMI在器件间产生不稳定波动,阻碍阵列化与大规模集成.电场调控DMI机制的实际应用,亟需在温度、工艺兼容和精细化界面工程等方面找到最佳解决方案.

国内外研究表明,利用电场调控DMI可有效调节DMI力矩的大小与方向,从而实现对磁矩动态行为的精确调控,最终达成磁动力学的可控操作.DMI力矩的研究为实现超高频、低功耗、高集成度的自旋电子器件开辟了新的技术路径.基于DMI的电场调控机制为手性磁畴壁和拓扑磁结构的操控提供了可行方案,为新一代无需外磁场与电流驱动的自旋电子器件中的若干挑战提供了新的解决思路.

5 总结和展望

DMI是自旋电子学中的一种关键相互作用,其形成基于自旋-轨道耦合和反演对称性破缺.因其在手性磁结构的形成和稳定性中的重要性,以及在电流磁操控中的关键作用,成为自旋电子学领域的研究热点.当前对DMI的研究已从基础理论扩展到材料体系开发和前沿技术应用探索.DMI驱动的磁动力学研究可为开发新一代低功耗、多功能自旋电子器件提供新思路.本文系统回顾了DMI的研究脉络,介绍了由其诱导产生的非共线手性磁结构,列举了若干典型DMI材料体系;梳理了基于DMI与SOT协同的磁操控,以及通过电场调控DMI实现磁操控的相关研究工作.基于DMI与SOT协同作用,研究人员已实现了零磁场磁翻转和对非共线手性磁结构的驱动.全电场DMI力矩机制则为实现纳米尺度上磁动力学的精确调控提供了新路径.

目前,DMI驱动的磁动力学研究仍然有一些问题亟待解决.首先,在磁动力学操控方面,DMI可有效提升电流磁操控的效率,电场控制的DMI力矩则为全电场磁操控提供了新方案,但相关机制的理论框架仍有待完善.对DMI驱动磁动力学的

进一步探索,可为全电学自旋电子器件的设计提供理论指导.在材料设计方面,如何在室温条件下实现强DMI效应、高热稳定性与低功耗磁操控的协同优化,仍是需要解决的难题;此外,随着研究深入,DMI在亚铁磁体^[152,153]、交错磁体^[69,70]以及二维磁性材料^[12,117,181,182]中的新奇效应不断涌现,既丰富了我们对于DMI物理本质的认识,也对现有理论框架提出了新的挑战.在器件应用方面,DMI驱动的磁操控机制需要进一步优化以满足实际应用需求.将实验室中的突破性发现转化为可大规模集成的实用技术,仍有材料兼容性、工艺稳定性以及集成架构设计等一系列工程问题有待解决.以这些问题为导向,DMI驱动的磁动力学研究将继续推动DMI相关的理论创新、材料设计和器件应用等方面的突破,助力新一代低功耗、高性能自旋电子器件的开发与应用.

参考文献

- [1] Dzyaloshinsky I 1958 *J. Phys. Chem. Solids* **4** 241
- [2] Moriya T 1960 *Phys. Rev.* **120** 91
- [3] Fert A, Levy P M 1980 *Phys. Rev. Lett.* **44** 1538
- [4] Mühlbauer S, Binz B, Jonietz F, Pfleiderer C, Rosch A, Neubauer A, Georgii R, Böni P 2009 *Science* **323** 915
- [5] Yu X Z, Onose Y, Kanazawa N, Park J H, Han J H, Matsui Y, Nagaosa N, Tokura Y 2010 *Nature* **465** 901
- [6] Ma X, Yu G, Tang C, Li X, He C, Shi J, Wang K L, Li X 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 157204
- [7] Chen G, N'Diaye A T, Kang S P, Kwon H Y, Won C, Wu Y, Qiu Z Q, Schmid A K 2015 *Nat. Commun.* **6** 6598
- [8] Guan Y, Zhou X, Ma T, Bläsing R, Deniz H, Yang S H, Parkin S S P 2021 *Adv. Mater.* **33** 2007991
- [9] Soumyanarayanan A, Raju M, Gonzalez Oyarce A L, Tan A K C, Im M Y, Petrović A P, Ho P, Khoo K H, Tran M, Gan C K, Ernult F, Panagopoulos C 2017 *Nat. Mater.* **16** 898
- [10] Xu Z, Zhu Y, Wang Y, Li X, Liu Q, Chen K, Wang J, Jiang Y, Chen L 2024 *Adv. Sci.* **11** 2403852
- [11] Yun J, Cui B, Cui Q, He X, Chang Y, Zhu Y, Yan Z, Guo X, Xie H, Zhang J, Bai Q, Zhai Y, Xu H, Zuo Y, Yang D, Jia C, Yu G, Wu H, Yang H, Xue D, Xi L 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2301731
- [12] Li X, Wang Z, Chen Z, Yu Z, Xu C 2025 *npj Comput. Mater.* **11** 123
- [13] Srivastava T, Schott M, Juge R, Křižáková V, Belmeguenai M, Roussigné Y, Bernard-Mantel A, Ranno L, Pizzini S, Chérif S M, Stashkevich A, Auffret S, Boule O, Gaudin G, Chshiev M, Baraduc C, Béa H 2018 *Nano Lett.* **18** 4871
- [14] Feng Y, Zhang Y, Zhang J, Zuo Y, Meng F, Zhang T, Yang L, Song D, Sun M, Kozlov A G, Ognev A V, Xi L, Zhao J, Wang Y 2025 *Phys. Rev. B* **112** 104445
- [15] Ma Y, Wu D, Yan F, Fang X, Qin P, Wang L, Liu L, Shen L, Liu Z, Yang W, Zhang J, Zhou Y, Luo F, Yang J, Yang H, Cai K, Ning S, Luo Z 2025 *Newton* **1** 100208
- [16] Pham V T, Sisodia N, Manici I D, Urrestarazu-Larrañaga J, Bairagi K, Pelloux-Prayer J, Guedas R, Buda-Prejbeanu L D, Auffret S, Locatelli A, Mentş T O, Pizzini S, Kumar P,

- Finco A, Jacques V, Gaudin G, Bouille O 2024 *Science* **384** 307
- [17] Gajek M, Bibes M, Fusil S, et al. 2007 *Nat. Mater.* **6** 296
- [18] Bibes M, Barthélemy A 2008 *Nat. Mater.* **7** 425
- [19] Heron J, Bosse J, He Q, et al. 2014 *Nature* **516** 370
- [20] Qi J, Wang H, Chen X, Qian X 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 043102
- [21] Luo W, Xu K, Xiang H 2017 *Phys. Rev. B* **96** 235415
- [22] Sun Y, Lin T, Lei N, Chen X, Kang W, Zhao Z, Wei D, Chen C, Pang S, Hu L, Yang L, Dong E, Zhao L, Liu L, Yuan Z, Ullrich A, Back C H, Zhang J, Pan D, Zhao J, Feng M, Fert A, Zhao W 2023 *Nat. Commun.* **14** 3434
- [23] Fillion C E, Fischer J, Kumar R, et al. 2022 *Nat. Commun.* **13** 5257
- [24] de Rojas J, Quintana A, Rius G, Stefani C, Domingo N, Costa-Krämer J L, Menéndez E, Sort J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 070501
- [25] Huang K, Shao D F, Tsymbal E Y 2022 *Nano Lett.* **22** 3349
- [26] Chen G, Robertson M, Hoffmann M, Ophus C, Fernandes Cauduro A L, Lo Conte R, Ding H, Wiesendanger R, Blügel S, Schmid A K, Liu K 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021015
- [27] Niu H, Yoon H, Kwon H, et al. 2025 *Nat. Commun.* **16** 3453
- [28] Hsu P, Kubetzka A, Finco A, Romming N, von Bergmann K, Wiesendanger R 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 123
- [29] Wang Y, Wang L, Xia J, et al. 2020 *Nat. Commun.* **11** 3577
- [30] Chen J, Dong S 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 117603
- [31] Yu D, Ga Y, Liang J, Jia C, Yang H 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 056701
- [32] Yu D, Ga Y, Li P, Jiang J, Liang J, Wang L, Jia C, Chang K, Yang H 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 206701
- [33] Zhu M, Li Y, Hu H, Cui S, Qiu Y, Yu G, Zhou H M 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 032402
- [34] Zhang Q, Liang J, Bi K, Zhao L, Bai H, Cui Q, Zhou H A, Bai H, Feng H, Song W, Chai G, Gladii O, Schultheiss H, Zhu T, Zhang J, Peng Y, Yang H, Jiang W 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 167202
- [35] Göbel B, Mertig I, Tretiakov O A 2021 *Phys. Rep.* **895** 1
- [36] Bode M, Heide M, von Bergmann K, Ferriani P, Heinze S, Bihlmayer G, Kubetzka A, Pietzsch O, Blügel S, Wiesendanger R 2007 *Nature* **447** 190
- [37] Léveillé C, Burgos-Parra E, Sassi Y, Ajejas F, Chardonnet V, Pedersoli E, Capotondi F, De Ninno G, Maccherozzi F, Dhesi S, Burn D M, van der Laan G, Latcham O S, Shtyov A V, Kruglyak V V, Jal E, Cros V, Chauleau J Y, Reyren N, Viret M, Jaouen N 2022 *Nat. Commun.* **13** 1412
- [38] Heinze S, von Bergmann K, Menzel M, Brede J, Kubetzka A, Wiesendanger R, Bihlmayer G, Blügel S 2011 *Nat. Phys.* **7** 713
- [39] Nagaosa N, Tokura Y 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 899
- [40] Yu X Z, Tokunaga Y, Kaneko Y, Zhang W Z, Kimoto K, Matsui Y, Taguchi Y, Tokura Y 2014 *Nat. Commun.* **5** 3198
- [41] Zhang X, Zhou Y, Ezawa M 2016 *Nat. Commun.* **7** 10293
- [42] Woo S, Song K M, Zhang X, Zhou Y, Ezawa M, Liu X, Finizio S, Raabe J, Lee N J, Kim S I, Park S Y, Kim Y, Kim J Y, Lee D, Lee O, Choi J W, Min B C, Koo H C, Chang J 2018 *Nat. Commun.* **9** 959
- [43] Gao N, Je S G, Im M Y, Choi J W, Yang M, Li Q, Wang T Y, Lee S, Han H S, Lee K S, Chao W, Hwang C, Li J, Qiu Z Q 2019 *Nat. Commun.* **10** 5603
- [44] Yang M, Li Q, Chopdekar R V, Dhall R, Turner J, Carlström J D, Ophus C, Klewe C, Shafer P, N' Diaye A T, Choi J W, Chen G, Wu Y Z, Hwang C, Wang F, Qiu Z Q 2020 *Sci. Adv.* **6** eabb5157
- [45] Kharkov Y A, Sushkov O P, Mostovoy M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 207201
- [46] Okubo T, Chung S, Kawamura H 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 017206
- [47] Garlow J A, Pollard S D, Beleggia M, Dutta T, Yang H, Zhu Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 237201
- [48] Barker J, Tretiakov O A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 147203
- [49] Liu Y, Watanabe H, Nagaosa N 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 267201
- [50] Cai M, Wang S, Zhang Y, Bao X, Shen D, Ren J, Qiu L, Yu H, Luo Z, Kläui M, Zhang S, Jaouen N, van der Laan G, Hesjedal T, Shen K, Zhang J 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 116703
- [51] Tang J, Wu Y, Wang W, Kong L, Lv B, Wei W, Zang J, Tian M, Du H 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 1086
- [52] Tang J, Wu Y, Kong L, Wang W, Chen Y, Wang Y, Soh Y, Xiong Y, Tian M, Du H 2020 *Natl. Sci. Rev.* **8** nwaa200
- [53] Zhang S L, van der Laan G, Wang W W, Haghighirad A A, Hesjedal T 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 227202
- [54] Zhang S, Kronast F, van der Laan G, Hesjedal T 2018 *Nano Lett.* **18** 1057
- [55] Kanazawa N, Seki S, Tokura Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1603227
- [56] Vedmedenko E Y, Riego P, Arregi J A, Berger A 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 257202
- [57] Ren Z, Zhou Y, Cui Q, Cheung S K, Liu R, Tian S, Wu X, Yang H, Zhou Y, Shao Q 2025 *Phys. Rev. Appl.* **23** 064048
- [58] Chen G, Ma T, N'Diaye A T, Kwon H, Won C, Wu Y, Schmid A K 2013 *Nat. Commun.* **4** 2671
- [59] Nakayama H, Nozaki T, Nozaki T, Yuasa S 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 032403
- [60] Moreau-Luchaire C, Moutafis C, Reyren N, Sampaio J, Vaz C A F, Van Horne N, Bouzehouane K, Garcia K, Deranlot C, Warnicke P, Wöllhüter P, George J M, Weigand M, Raabe J, Cros V, Fert A 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 444
- [61] Belabbes A, Bihlmayer G, Bechstedt F, Blügel S, Manchon A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 247202
- [62] Fedel S, Villa M, Damerio S, Demiroglu E, Deger C, Gazquez J, Avci C O 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2418653
- [63] Avci C O, Rosenberg E, Caretta L, Büttner F, Mann M, Marcus C, Bono D, Ross C A, Beach G S D 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 561
- [64] Fernández-Pacheco A, Vedmedenko E, Ummelen F, Mansell R, Petit D, Cowburn R P 2019 *Nat. Mater.* **18** 679
- [65] Yu H, Ji J, Luo W, Gong X, Xiang H 2025 *Adv. Mater.* DOI: 10.1002/adma.202507070
- [66] Guo D, Rui X Y, Du S, Liang Q R, Yang H, Zheng S J 2025 *Rare Metals* **44** 9936
- [67] Yang H, Bouille O, Cros V, Fert A, Chshiev M 2018 *Sci. Rep.* **8** 12356
- [68] Ajejas F, Gudín A, Guerrero R, Anadón Barcelona A, Diez J M, de Melo Costa L, Olleros P, Niño M A, Pizzini S, Vogel J, Valvidares M, Gargiani P, Cabero M, Varela M, Camarero J, Miranda R, Perna P 2018 *Nano Lett.* **18** 5364
- [69] Han L, Fu X, Peng R, Cheng X, Dai J, Liu L, Li Y, Zhang Y, Zhu W, Bai H, Zhou Y, Liang S, Chen C, Wang Q, Chen X, Yang L, Zhang Y, Song C, Liu J, Pan F 2024 *Sci. Adv.* **10** eadn0479
- [70] Zhou Z, Cheng X, Hu M, Chu R, Bai H, Han L, Liu J, Pan F, Song C 2025 *Nature* **638** 645
- [71] Lee K J, Lee S, Liu X, Dobrowolska M, Furdyna J K 2024 *Phys. Rev. B* **110** 134425
- [72] Tan W, Jin H, Fan R, Ran K, Zhang S 2024 *Phys. Rev. B* **109** L220402
- [73] Niu H, Kwon H Y, Ma T, Cheng Z, Ophus C, Miao B, Sun L, Wu Y, Liu K, Parkin S S P, Won C, Schmid A K, Ding H, Chen G 2024 *Nat. Commun.* **15** 10199

- [74] Liu J, Zha X, Lu Q, Liang L, Wang W, Hu Z, Guo Z, Wang Z, Liu M 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 49966
- [75] Fan H, Shao Z, Wang J, Jin M, Wu B, Feng Z, Wei M, Yu C, Wen J, Li H, Chen T, Liu B, Li W, Zhou T 2023 *Phys. Rev. B* **108** 224409
- [76] Zhang X, Chen A, Zhang Y, Zeng Z, Guo Y, Zheng D, Cui B, Wu C, Song W, Yang S, Luo Z, Li J, Gubbiotti G, Han X, Zhao J, Yan P, Kou X, Zhang X, Wu H 2025 *Adv. Electron. Mater.* **11** 2500022
- [77] Kuepferling M, Casiraghi A, Soares G, Durin G, Garcia-Sanchez F, Chen L, Back C H, Marrows C H, Tacchi S, Carloti G 2023 *Rev. Mod. Phys.* **95** 015003
- [78] Belmeguenai M, Adam J P, Roussigné Y, Eimer S, Devolder T, Kim J V, Cherif S M, Stashkevich A, Thiaville A 2015 *Phys. Rev. B* **91** 180405
- [79] Xia J, Wang Y, Lan G, Ou J, Wu W, Feng J, Wan C, Du G, Rizwan S, Han X, Yu G 2026 *Chin. Phys. Lett.* **43** 010710
- [80] Yang H, Thiaville A, Rohart S, Fert A, Chshiev M 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 267210
- [81] Yang H, Liang J, Cui Q 2023 *Nat. Rev. Phys.* **5** 43
- [82] Garello K, Yasin F, Couet S, Souriau L, Swerts J, Rao S, Van Beek S, Kim W, Liu E, Kundu S, Tsvetanova D, Croes K, Jossart N, Grimaldi E, Baumgartner M, Crotti D, Fumémont A, Gambardella P, Kar G 2018 2018 *IEEE Symposium on VLSI Circuits Honolulu, HI, USA, June 18–22, 2018* p81
- [83] Han X, Wang X, Wan C, Yu G, Lv X 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 120502
- [84] Zhu L 2023 *Adv. Mater.* **35** 2300853
- [85] Hirsch J E 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1834
- [86] Zhang S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 393
- [87] Dresselhaus G 1955 *Phys. Rev.* **100** 580
- [88] Edelstein V 1990 *Solid State Commun.* **73** 233
- [89] Manchon A, Železný J, Miron I M, Jungwirth T, Sinova J, Thiaville A, Garello K, Gambardella P 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 035004
- [90] Shi S, Liang S, Zhu Z, Cai K, Pollard S D, Wang Y, Wang J, Wang Q, He P, Yu J, Eda G, Liang G, Yang H 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 945
- [91] Cui Y, Li Z, Chen H, Wu Y, Chen Y, Pei K, Wu T, Xie N, Che R, Qiu X, Liu Y, Yuan Z, Wu Y 2024 *Sci. Bull.* **69** 2362
- [92] Slonczewski J 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **159** L1
- [93] Zhang S, Li Z 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 127204
- [94] Liu L, Lee O J, Gudmundsen T J, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 096602
- [95] 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
- [96] Avci C O, Garello K, Nistor C, Godey S, Ballesteros B, Mugarza A, Barla A, Valvidares M, Pellegrin E, Ghosh A, Miron I M, Boule O, Auffret S, Gaudin G, Gambardella P 2014 *Phys. Rev. B* **89** 214419
- [97] Wu H, Zhang P, Deng P, Lan Q, Pan Q, Razavi S A, Che X, Huang L, Dai B, Wong K, Han X, Wang K L 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 207205
- [98] Yang Y, Wang P, Chen J, Zhang D, Pan C, Hu S, Wang T, Yue W, Chen C, Jiang W, Zhu L, Qiu X, Yao Y, Li Y, Wang W, Jiang Y 2024 *Nat. Commun.* **15** 8645
- [99] Zheng D, Fang Y W, Wen Y, Song K, Li Y, Fang B, Zhang C, Chen A, Liu C, Algaidi H, Tang M, Ma Y, Li P, Zhang X 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2312746
- [100] Liang S, Chen A, Han L, Bai H, Chen C, Huang L, Ma M, Pan F, Zhang X, Song C 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2417731
- [101] Cao Y, Sheng Y, Edmonds K W, Ji Y, Zheng H, Wang K 2020 *Adv. Mater.* **32** 1907929
- [102] Wu H, Nance J, Razavi S A, Lujan D, Dai B, Liu Y, He H, Cui B, Wu D, Wong K, Sobotkiewich K, Li X, Carman G P, Wang K L 2021 *Nano Lett.* **21** 515
- [103] Dai M, Hu J M 2020 *npj Comput. Mater.* **6** 78
- [104] He W, Wan C, Zheng C, Wang Y, Wang X, Ma T, Wang Y, Guo C, Luo X, Stebliy M E, Yu G, Liu Y, Ognev A V, Samardak A S, Han X 2022 *Nano Lett.* **22** 6857
- [105] Huang Y H, Huang C C, Liao W B, Chen T Y, Pai C F 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 034046
- [106] Liu Q, Liu L, Xing G, Zhu L 2024 *Nat. Commun.* **15** 2978
- [107] Wang M, Zhou R, Wang H, Chang S 2025 *J. Magn. Magn. Mater.* **614** 172748
- [108] Lin C Y, Wang P C, Huang Y H, Liao W B, Song M Y, Bao X, Pai C F 2024 *ACS Mater. Lett.* **6** 400
- [109] Wang G C, Du W, Guo L, Su H, Tang X L 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 072402
- [110] Chen R, Cui Q, Liao L, Zhu Y, Zhang R, Bai H, Zhou Y, Xing G, Pan F, Yang H, Song C 2021 *Nat. Commun.* **12** 3113
- [111] Bai R, Yang Q, Fan H, Feng Z, Wei M, Shu X, Han X, Jin M, Liu B, Zhou T 2025 *Nano Lett.* **25** 16725
- [112] Wang Z, Li P, Fattouhi M, Yao Y, Van Hees Y L, Schippers C F, Zhang X, Lavrijsen R, Garcia-Sanchez F, Martinez E, Fert A, Zhao W, Koopmans B 2023 *Cell Rep. Phys. Sci.* **4** 101334
- [113] Husain S, Prestes N F, Fayet O, Collin S, Godel F, Jacquet E, Denneulin T, Dumin-Borkowski R E, Thiaville A, Bibes M, Jaffrès H, Reyren N, Fert A, George J M 2024 *Nano Lett.* **24** 2743
- [114] Bai H, Li J, Ke J, Guo Q, Zhu Z, Guo Y, Deng X, Liu D, Cai J, Zhu T 2024 *Adv. Electron. Mater.* **10** 2300785
- [115] Avci C O, Quindeau A, Pai C F, Mann M, Caretta L, Tang A S, Onbasli M C, Ross C A, Beach G S D 2017 *Nat. Mater.* **16** 309
- [116] Liu L, Song Y, Zhao X, Liu W, Zhang Z 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2200328
- [117] Guo Y, Zhang J, Balakrishnan P P, Grutter A J, Yang B, Fitzsimmons M R, Charlton T R, Ambaye H, Zhang X, Huang H, Huang Z, Chen J, Guo C, Han X, Wang K L, Wu H 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** 014045
- [118] Parkin S S P, Hayashi M, Thomas L 2008 *Science* **320** 190
- [119] Parkin S, Yang S H 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 195
- [120] Yang S H, Ryu K S, Parkin S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 221
- [121] Yoshimura Y, Kim K J, Taniguchi T, Tono T, Ueda K, Hiramatsu R, Moriyama T, Yamada K, Nakatani Y, Ono T 2016 *Nat. Phys.* **12** 157
- [122] Du J, Li M, Lu J 2021 *Phys. Rev. B* **103** 144429
- [123] Beaulieu G, Luo Z, Raposo V, Heyderman L J, Gambardella P, Martínez E, Hrabec A 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 142401
- [124] Ștețco E M, Petrișor T J, Pop O A, Belmeguenai M, Miron I M, Gabor M S 2024 *Nano Lett.* **24** 13991
- [125] Jeon J C, Migliorini A, Fischer L, Yoon J, Parkin S S P 2024 *ACS Nano* **18** 14507
- [126] Umetsu N, Quinsat M, Hashimoto S, Kondo T, Kado M 2025 *J. Magn. Magn. Mater.* **614** 172738
- [127] Wang G, Guo L, Su H, Zhang H, Tang X 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 052402
- [128] Masuda H, Yamane Y, Dohi T, Yamazaki T, Modak R, Uchida K i, Ieda J, Kläui M, Takanashi K, Seki T 2025 *Adv. Sci.* **12** e14598
- [129] Li S, Lin X, Li P, Zhao S, Si Z, Wei G, Koopmans B, Lavrijsen R, Zhao W 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15**

- 39946
- [130] Xu Z, Zhou Y, Zhang X, Qiao Y, Xu Z, Shao D, Zhu Z 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 072402
- [131] Allwood D A, Xiong G, Faulkner C C, Atkinson D, Petit D, Cowburn R P 2005 *Science* **309** 1688
- [132] Wang W, Sheng Y, Zheng Y, Ji Y, Wang K 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2200412
- [133] Luo Z, Hrabec A, Dao T P, Sala G, Finizio S, Feng J, Mayr S, Raabe J, Gambardella P, Heyderman L J 2020 *Nature* **579** 214
- [134] Han S U, Kim W, Kim S K, Je S G 2024 *Phys. Rev. B* **109** 014404
- [135] Nie H, Li Z, Wang X, Wang Z 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 132402
- [136] Yu G, Upadhyaya P, Shao Q, Wu H, Yin G, Li X, He C, Jiang W, Han X, Amiri P K, Wang K L 2017 *Nano Lett.* **17** 261
- [137] Fert A, Cros V, Sampaio J 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 152
- [138] He Z, Li Z, Chen Z, Wang Z, Shen J, Wang S, Song C, Zhao T, Cai J, Lin S Z, Zhang Y, Shen B 2024 *Nat. Mater.* **23** 1048
- [139] Jiang W, Upadhyaya P, Zhang W, Yu G, Jungfleisch M B, Fradin F Y, Pearson J E, Tserkovnyak Y, Wang K L, Heinonen O, te Velthuis S G E, Hoffmann A 2015 *Science* **349** 283
- [140] Chen Z, He X, Cai X, Qiu Y, Zhu M, Yu G, Zhou H 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 142401
- [141] Wang S, Qiu L, Shen K 2025 *Commun. Phys.* **8** 43
- [142] Jiang W, Zhang X, Yu G, Zhang W, Wang X, Benjamin Jungfleisch, M, Pearson J E, Cheng X, Heinonen O, Wang, Kang L, Zhou Y, Hoffmann A, te Velthuis S G E 2017 *Nat. Phys.* **13** 162
- [143] Zhang G, Luo Q, Wen X, Wu H, Yang L, Jin W, Li L, Zhang J, Zhang W, Shu H, Chang H 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 117501
- [144] Dohi T, DuttaGupta S, Fukami S, Ohno H 2019 *Nat. Commun.* **10** 5153
- [145] Li S, Ezawa M, Zhou Y 2023 *Phys. Rev. B* **107** 174409
- [146] Yagan R, Cheghabouri A M, Onbasli M C 2023 *Nanoscale Adv.* **5** 4470
- [147] Qiu S, Zhang T, Han X, Liu J, Fang L, Cheng Y 2025 *Magnetochemistry* **11** 90
- [148] Cui B, Yu D, Shao Z, Liu Y, Wu H, Nan P, Zhu Z, Wu C, Guo T, Chen P, Zhou H A, Xi L, Jiang W, Wang H, Liang S, Du H, Wang K L, Wang W, Wu K, Han X, Zhang G, Yang H, Yu G 2021 *Adv. Mater.* **33** 2006924
- [149] Cheng C, Yan Z, Dong J, Liu Y, Xia Z, Li L, Han X 2021 *Phys. Rev. B* **104** 174409
- [150] Zhu H, Xiang G, Feng Y, Zhang X 2024 *Nanomaterials* **14** 312
- [151] Liu Z, Li S, Zhu Q, Shi X, Wang R, Wang J, Zhang H, Gong P, Lian R, Jin C 2025 *Phys. Rev. B* **111** 134426
- [152] Fragkos S, Pappas P, Symeonidou E, Panayiotatos Y, Dimoulas A 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 182402
- [153] Zhang K X, Cheon S, Kim H, Park P, An Y, Son S, Cui J, Keum J, Choi J, Jo Y, Ju H, Lee J S, Lee Y, Avdeev M, Kleibert A, Lee H W, Park J G 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 176701
- [154] Song K M, Jeong J S, Pan B, Zhang X, Xia J, Cha S, Park T E, Kim K, Finizio S, Raabe J, Chang J, Zhou Y, Zhao W, Kang W, Ju H, Woo S 2020 *Nat. Electron.* **3** 148
- [155] Yu D, Yang H, Chshiev M, Fert A 2022 *Natl. Sci. Rev.* **9** nwa021
- [156] Garcia V, Bibes M, Bocher L, Valencia S, Kronast F, Crassous A, Moya X, Enouz-Vedrenne S, Gloter A, Imhoff D, Deranlot C, Mathur N D, Fusil S, Bouzehouane K, Barthélémy A 2010 *Science* **327** 1106
- [157] Spaldin N, Ramesh R 2019 *Nat. Mater.* **18** 203
- [158] Wang J, Neaton J B, Zheng H, Nagarajan V, Ogale S B, Liu B, Viehland D, Vaithyanathan V, Schlom D G, Waghmare U V, Spaldin N A, Rabe K M, Wuttig M, Ramesh R 2003 *Science* **299** 1719
- [159] Zhang W, Zhong H, Zang R, Zhang Y, Yu S, Han G, Liu G L, Yan S S, Kang S, Mei L M 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 122406
- [160] Kasagawa M, Miki S, Hashimoto K T, Shimmura A, Ishikawa R, Shiota Y, Goto M, Nomura H, Suzuki Y 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 122407
- [161] Ba Y, Zhuang S, Zhang Y, et al. 2021 *Nat. Commun.* **12** 322
- [162] Hou Z, Wang Y, Lan X, Li S, Wan X, Meng F, Hu Y, Fan Z, Feng C, Qin M, Zeng M, Zhang X, Liu X, Fu X, Yu G, Zhou G, Zhou Y, Zhao W, Gao X, Liu J m 2022 *Adv. Mater.* **34** 2107908
- [163] Balan C, Peña Garcia J, Fassatoui A, Vogel J, de Souza Chaves D, Bonfim M, Rueff J P, Ranno L, Pizzini S 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 034065
- [164] Zhao H, Yang C, Liu Y, Wang Q, Wu Y, Mu Q, Hou F, Min T, Li T 2025 *Adv. Mater.* **37** 2500534
- [165] Sun W, Wang W, Zang J, Li H, Zhang G, Wang J, Cheng Z 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2104452
- [166] Zhou Y, Mansell R, van Dijken S 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 172409
- [167] Wang L, Ga Y, Li P, Yu D, Jiang J, Liang J, Wang S, Yang H 2023 *Phys. Rev. B* **108** 054440
- [168] Dai B, Wu D, Razavi S A, Xu S, He H, Shu Q, Jackson M, Mahfouzi F, Huang H, Pan Q, Cheng Y, Qu T, Wang T, Tai L, Wong K, Kioussis N, Wang K L 2023 *Sci. Adv.* **9** eade6836
- [169] Ga Y, Yu D, Li Y, Jiang J, Wang L, Li P, Liang J, Feng H, Shi Y, Yang H 2024 *Phys. Rev. B* **109** L060402
- [170] Kang J, Yu D, Li Y, Jia C 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 012403
- [171] Xu C, Chen P, Tan H, Yang Y, Xiang H, Bellaiche L 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 037203
- [172] Shen Z, Dong S, Yao X 2023 *Phys. Rev. B* **108** L140412
- [173] Han M G, Thomsen J D, Philbin J P, Mun J, Park E, Camino F, Děkanovský L, Liu C, Sofer Z, Narang P, Ross F M, Zhu Y 2025 *Nano Lett.* **25** 5174
- [174] Huang M, Hasan M U, Klyukin K, Zhang D, Lyu D, Gargiani P, Valvidares M, Sheffels S, Churikova A, Büttner F, Zehner J, Caretta L, Lee K Y, Chang J, Wang J P, Leistner K, Yildiz B, Beach G S D 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 981
- [175] Wang L, Feng Q, Kim Y, Kim R, Lee K H, Pollard S D, Shin Y J, Zhou H, Peng W, Lee D, Meng W, Yang H, Han J H, Kim M, Lu Q, Noh T W 2018 *Nat. Mater.* **17** 1087
- [176] Nikitchenko A I, Pertsev N A 2023 *Phys. Rev. B* **108** 224432
- [177] Cai N, Liu Y 2024 *J. Phys. Chem. Lett.* **15** 7775
- [178] Wang H, Wang L, Ma X, Pan C, Wang Y, Wang J, Wang S, Chang K, Xiang B, Yang H, Zheng G, Tian M 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 143103
- [179] Ma C, Jin K J, Guo E J, Ge C, Wang C, Xu X L 2024 *Phys. Rev. B* **110** 094418
- [180] Hou J, Hu S, You L 2025 *Nano Lett.* **25** 3565
- [181] Shao Z, Liang J, Cui Q, Chshiev M, Fert A, Zhou T, Yang H 2022 *Phys. Rev. B* **105** 174404
- [182] Pang J, Niu X, Zhang M, Tang Y, Zhang Y, Bellaiche L 2023 *Phys. Rev. B* **108** 134430

Magnetic dynamics driven by Dzyaloshinskii-Moriya interaction*

LU Shiyu¹⁾ ZENG Yan¹⁾ LIU Min¹⁾ WANG Guanlin¹⁾ LI Yaojin²⁾
 JIA Chenglong¹⁾ YU Dongxing^{1)†}

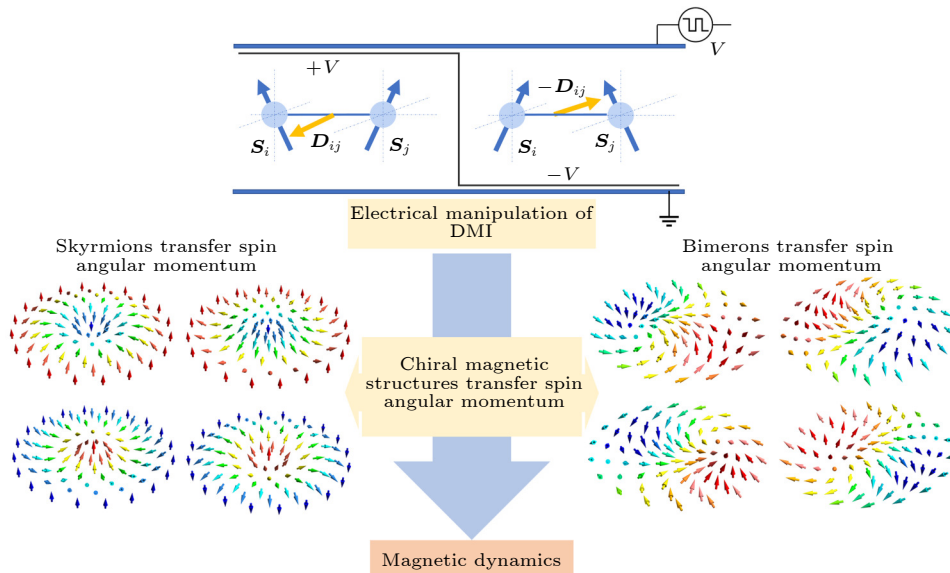
¹⁾ (*Key Laboratory of Magnetism and Magnetic Functional Materials of MoE, School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

²⁾ (*School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

(Received 30 November 2025; revised manuscript received 6 January 2026)

Abstract

The Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI), as an antisymmetric exchange interaction, is one of the key mechanisms for stabilizing noncollinear chiral magnetic structures. It plays an important role in the multi-field control of magnetic dynamics and provides a new pathway for designing and developing high-density, low-power, non-volatile spintronic devices. This study focuses on the manipulation of magnetic dynamics driven by DMI, reviewing theoretical studies and frontier technological explorations on DMI-assisted current-driven magnetic dynamics and DMI-based electric field control of magnetic dynamics. Since Dzyaloshinskii first proposed this kind of antisymmetric exchange interaction in 1957, the research on DMI has developed from fundamental physical research to practical device application exploration. The DMI theoretical framework has been progressively refined through the developments by Moriya, Fert, and Levy. Moreover, DMI materials have also expanded from B20-type compounds to heterostructures and two-dimensional materials. The study of DMI-driven magnetic dynamics has opened a new way for the next-generation spintronic devices. DMI-assisted current-driven magnetic dynamics include deterministic magnetization switching under zero magnetic field



* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12574123, 12204497, 12474114, 12304126, 12174164) and the Talent Scientific Fund of Lanzhou University, China.

† Corresponding author. E-mail: yudx@lzu.edu.cn

through the synergistic effect of DMI and spin-orbit torques, as well as low-power current-driven dynamics achieved through effective coupling between spin current and chiral magnetic texture. Electric control of magnetic dynamics based on DMI includes various physical mechanisms for electric field control of DMI, electric field manipulation strategies for DMI-dominated topological magnetic states, and all-electric DMI torque-driven magnetic dynamics that transfer spin angular momentum through topological magnetic structures. In recent advances, the critical current density for field-free magnetization switching has been reduced to 10^5 A/cm², and skyrmion velocities have reached the km/s range. A variety of methods for electric-field control of DMI, mechanisms for manipulating topological magnetic structures through electric fields, and all-electric device design schemes are proposed. These advances reflect significant progress of DMI-driven magnetic dynamics. However, there are still substantial challenges in the fields of magnetic dynamics theory, DMI material development, and device applications. Addressing these challenges will continue to promote breakthroughs in DMI-related theoretical innovations, material design, and device applications, contributing to the development of the next-generation low-power, high-performance spintronic devices.

Keywords: Dzyaloshinskii-Moriya interaction, electrical manipulation of magnetism, magnetic dynamics, spintronics

DOI: [10.7498/aps.75.20251635](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251635)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251635](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251635)



Dzyaloshinskii–Moriya相互作用驱动的铁动力学

陆世余 曾严 刘敏 王冠霖 李耀进 贾成龙 于东星

Magnetic dynamics driven by Dzyaloshinskii–Moriya interaction

LU Shiyu ZENG Yan LIU Min WANG Guanlin LI Yaojin JIA Chenglong YU Dongxing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060707 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251635

CSTR: 32037.14.aps.75.20251635

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251635>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稀土–过渡金属亚铁磁材料中的Dzyaloshinskii–Moriya相互作用与自旋电子学应用

Dzyaloshinskii–Moriya interaction in rare–earth transition metal ferrimagnetic materials and spintronic applications

物理学报. 2026, 75(1): 060707 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251455>

正弦微波磁场驱动亚铁磁畴壁动力学

Dynamics of ferrimagnetic domain walls driven by sinusoidal microwave magnetic field

物理学报. 2023, 72(20): 208502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230913>

振荡磁场驱动亚铁磁畴壁动力学研究

Dynamics of ferrimagnetic domain wall driven by oscillating magnetic field

物理学报. 2025, 74(3): 038502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241033>

激光诱导自旋阀结构的超快自旋动力学研究

Research on ultrafast spin dynamics of laser–induced spin valve structures

物理学报. 2025, 74(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241744>

三角形结构中磁涡旋自旋波模式的研究

Study of magnetic vortex spin wave mode in triangular structures

物理学报. 2022, 71(19): 194703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221128>

广义布洛赫条件下二维晶格的磁交换作用

Magnetic exchange interaction in two–dimensional lattice under generalized Bloch condition

物理学报. 2022, 71(1): 017105 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211317>