

专题: 应用磁学

交错磁研究进展: 材料物性与交叉应用*

张瀚琦^{1) #} 赵骁驿^{1) #} 王晶凯¹⁾ 徐泽东^{2) †} 吴勇¹⁾孟康康¹⁾ 徐晓光^{1) ‡} 姜勇^{1) 2)}

1) (北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

2) (天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387)

(2025 年 11 月 30 日收到; 2025 年 12 月 31 日收到修改稿)

交错磁作为反铁磁材料的一个新兴研究分支, 凭借其独特的对称性特征和非相对论性自旋劈裂, 在实现 Néel 矢量的高效调控方面展现出显著优势, 为自旋电子学器件的设计提供了新途径. 本文基于自旋群对称性理论, 首先阐释交错磁区别于传统反铁磁材料的电子结构特性; 随后以 MnTe 和 CrSb 等典型材料体系为例, 系统地综述了交错磁的制备方法及表征手段; 接着梳理了利用电流脉冲、晶格应变和热激发等外场调控手段实现 Néel 矢量翻转与自旋-轨道力矩调制的机制与进展; 并在此基础上对交错磁在磁随机存取存储器、拓扑自旋器件及磁子学、光-自旋耦合等多学科交叉领域的应用潜力进行了讨论; 最后总结当前交错磁在材料体系拓展与对称性精确调控等方面面临的挑战, 并对与其相关的界面工程等研究方向提出展望.

关键词: 交错磁材料, 磁对称性, Néel 矢量调控, 反铁磁自旋电子学**DOI:** 10.7498/aps.75.20251637**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251637

1 引言

自旋电子学作为新一代信息技术的重要发展领域, 凭借其器件高速读写、低功耗及非易失性等优势, 被视为突破传统电子学性能瓶颈的关键路径之一. 自 1988 年巨磁电阻效应的发现以来, 基于自旋-转移力矩 (spin-transfer torque, STT) 和自旋-轨道力矩 (spin-orbit torque, SOT) 等机理的多代自旋电子器件已逐步实现了数据的读写功能. 然而, 铁磁材料固有的杂散场等问题难以彻底解决, 制约了器件性能的进一步提升. 为克服上述限制, 反铁磁自旋电子学应运而生, 并逐渐成为研究热点. 反铁磁材料因其零净磁矩和强交换耦合等特性, 展现出优异的抗磁场干扰能力和太赫兹频段超

快自旋动力学潜力. 然而, 如何实现对反铁磁序的有效操控与精确探测, 仍是该领域亟待解决的关键问题. 近年来, 交错磁 (altomagnet) 这一新型磁性体系的提出, 为解决上述难题提供了新思路, 也为自旋电子学的发展注入了新的动力.

磁性材料通常依据磁矩的排布方式被划分为铁磁、亚铁磁和反铁磁等类型. 然而, 这种传统分类主要关注磁矩的宏观排列方式, 而忽略了微观上磁矩所处晶体场环境的影响. 交错磁虽在整体上表现为零净磁矩, 在传统分类中被归入反铁磁范畴, 但其不同磁子晶格间的磁矩并不满足平移对称操作, 而是由旋转或其他点群对称操作相联系. 这种独特的磁对称性赋予了交错磁区别于常规反铁磁的电子结构和输运特性, 引发出一系列新颖的物理响应. 理论研究表明^[1], 在适当的对称性破缺

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1402602) 和国家自然科学基金 (批准号: U24A6001, U24A6002, U23A20548) 资助的课题.

同等贡献作者.

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

‡ 通信作者. E-mail: xgxu@ustb.edu.cn

和自旋-轨道耦合条件下, 动量依赖的贝里曲率可诱导出反常霍尔效应, 并能引发显著的磁光效应. 即使在非相对论极限下, 交错磁仍可产生自旋极化电流, 从而在零净磁矩体系中实现高效的自旋输运, 有望呈现与铁磁体系相似的巨磁电阻 (giant magnetoresistance, GMR) 和隧穿磁电阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 等效应, 为自旋电子学器件的设计提供了新的物理载体与调控机制.

本文旨在系统地梳理交错磁的基本理论框架、实验研究进展与应用潜力. 全文结构安排如下: 第 2 节剖析交错磁对称性结构与输运性质, 揭示非相对论性自旋劈裂等核心物理机制; 第 3 节聚焦材料制备与表征技术, 讨论当前实验面临的挑战与可能的解决路径; 第 4 节进一步探讨通过电流、应变及热调制等手段对交错磁序的调控策略; 第 5 节分别介绍多种不同类型的交错磁材料; 第 6 节阐述其在新型自旋电子存储器、拓扑器件及多学科交叉领域的应用前景; 最后在第 7 节对全文进行总结.

2 结构与性质

2.1 对称性描述

磁性材料的对称性结构通常可由磁空间群 (magnetic space group) 进行描述. 然而, 磁空间群的理论框架建立在考虑相对论性自旋-轨道耦合的

基础上, 其核心假设是自旋与轨道角动量处于锁定状态, 即二者具备一致的对称性. 在自旋-轨道耦合较弱的体系中, 轨道角动量对自旋取向的约束显著降低, 此时传统的磁空间群理论不再适用. 交错磁正是此类情形的一个典型代表. Šmejkal 等^[2] 首先注意到这一关键差异, 据此引入了自旋群 (spin group) 理论, 为磁性结构的对称性分类提出了新的理论框架.

自旋群的元素通常可表示为符号组合 $[R_i || R_j]$; 其中左侧部分 $[R_i]$ 表示自旋空间中的对称操作, 右侧部分 $[R_j]$ 则对应实空间的对称操作. 借助该符号体系, 能够有效区分不同类型的磁有序结构 (此处仅讨论共线磁序情形), 如图 1 所示^[3]: 对于铁磁结构而言, 由于所有自旋方向一致且晶格具有平移对称性, 因此不涉及自旋子晶格之间的对称操作; 反铁磁结构中, 相邻子晶格的自旋方向相反, 但晶格仍保持反演对称或平移对称, 其对称性常可表达为 $[C_2 || \bar{E}]$ 或 $[C_2 || t]$, 其中 C_2 表示二次旋转操作, \bar{E} 为反演操作, t 为平移操作; 而交错磁结构虽然同样具有自旋方向相反的子晶格, 但其相邻子晶格之间的对称关系由旋转或非真旋转操作所实现, 可记为 $[C_2 || A]$, 其中 A 为旋转或非真旋转操作, 但不能为反演操作. 这种分类方式突显了交错磁结构在对称性上与传统反铁磁结构之间的本质区别.

在一般情况下, 时间反演操作 \mathcal{T} 、空间反演操作 \mathcal{P} 分别要求体系能量满足 $E(\mathbf{k}, s) = E(-\mathbf{k}, -s)$,

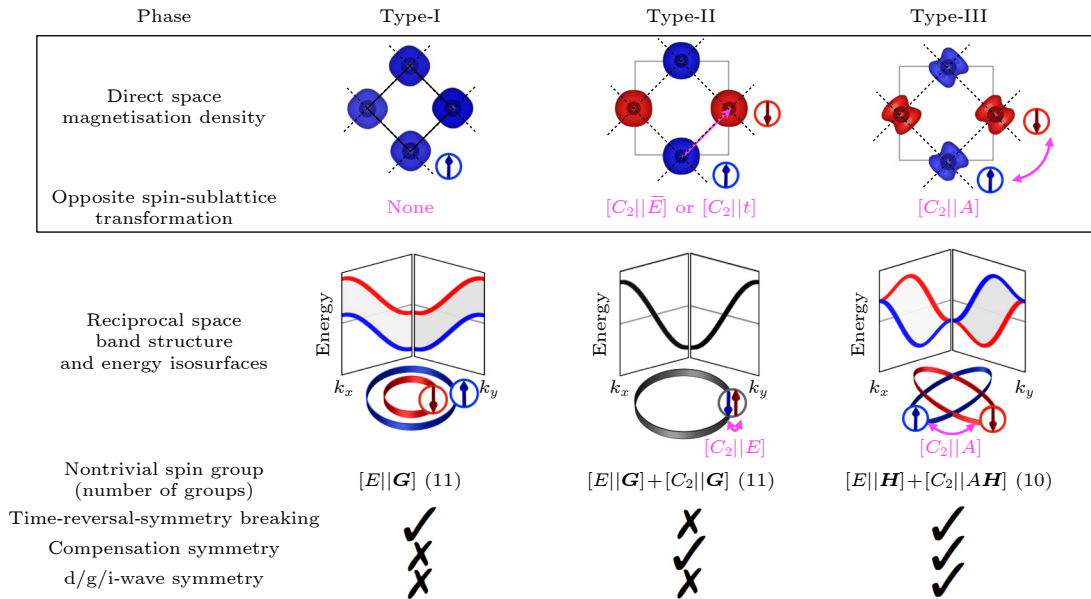


图 1 三种非相对论共线磁相的示意图^[3]

Fig. 1. Illustration of the three nonrelativistic collinear magnetic phases^[3].

$E(\mathbf{k}, s) = E(-\mathbf{k}, s)$, 其中 \mathbf{k} 为波矢, s 为自旋. 当体系同时具有 \mathcal{PT} 对称性时, 体系有 $E(\mathbf{k}, s) = E(-\mathbf{k}, -s) = E(\mathbf{k}, -s)$, 即在每个波矢 \mathbf{k} 处均存在自旋简并, 该现象称为 Kramers 简并. 交错磁连接子晶格的操作 A 破坏了与 \mathcal{T} 的兼容性, 但 \mathcal{P} 仍然得以保持, 于是 $E(\mathbf{k}, s) \neq E(\mathbf{k}, -s)$, Kramers 简并得以被解除, 从而产生了非相对论性自旋能带劈裂, 表现出与常规的反铁磁 (如 NiO, IrMn 等) 截然不同的性质.

2.2 输运性质

在自旋电子学与磁学领域中, 铁磁与反铁磁构成磁输运研究的两个基本体系. 铁磁材料的核心特征在于其 \mathcal{T} 对称性的破缺, 在交换相互作用下, 自旋简并能带发生整体性劈裂, 从而产生高度自旋极化的电流. 这一极化特性使铁磁材料表现出显著的输运现象, 例如反常霍尔效应与巨磁电阻效应, 因而在实验中能够便捷地实现磁态的读取与调控. 然而, 铁磁在器件应用中存在两个固有限制: 一是宏观磁矩引发的杂散场会导致相邻单元之间的磁干扰, 制约存储器件集成密度的提升; 二是其自旋动力学频率通常限于 GHz 量级, 难以满足未来高速信息处理的需求.

相比之下, 反铁磁由于子晶格磁矩相互抵消, 宏观上净磁矩为零. 这一磁结构赋予其固有的抗外场干扰能力与零杂散场特性, 并且其自旋动力学由强交换作用主导, 可拓展至 THz 频段. 然而, 反铁磁的输运性质长期面临表征困境: 受 \mathcal{PT} 对称性的保护, 传统反铁磁的能带在动量空间中通常保持自旋简并, 因而难以产生如铁磁中那样显著的电输运信号, 传统磁阻读取机制在该体系中效率很低.

反铁磁材料的特性与其可读性之间的权衡, 促使学术界对磁序分类体系进行重新审视. 铁磁具备易检测的自旋劈裂能带, 但存在杂散场限制; 反铁磁具有优越的动力学特性与无杂散场优势, 却缺乏显著的自旋极化输运. 在此背景下, 交错磁作为第三种磁序范式应运而生. 交错磁在实空间呈现净磁矩为零的反铁磁序, 但在动量空间打破了 Kramers 简并, 表现出强烈的动量依赖自旋劈裂. 这种独特的对称性破缺机制, 使其在保持反铁磁所具有的高频动力学与无杂散场优点的同时, 兼具铁磁的高效自旋极化输运特性, 从而有望弥合传统磁性材料在高频运作与可靠读写性能之间的鸿沟.

如图 2 所示, 交错磁的 Fermi 面可近似描述为两组形状相同、通过旋转操作相关联的结构. 当电流沿其中一组结构的主轴方向施加时, 系统会沿该方向产生自旋极化的电流. 通过合理的实验设计, 理论上可基于该机制构建具有巨磁电阻和隧道磁电阻效应的器件, 实现零净磁矩状态下的信息存储. 而当电流沿能带交叉方向施加时, 体系在垂直于电流的方向上产生纯自旋流, 该现象被称为自旋劈裂效应 (spin splitting effect, SSE), 产生的力矩被称为自旋劈裂力矩 (spin splitting torque, SST). Bai 等^[4] 的研究表明, 由 SST 产生的自旋流极化方向总与 Néel 矢量 \mathbf{L} 保持平行, 这使得对 SST 方向的调控成为了可能, 在低功耗自旋逻辑器件方面具有潜在的应用前景.

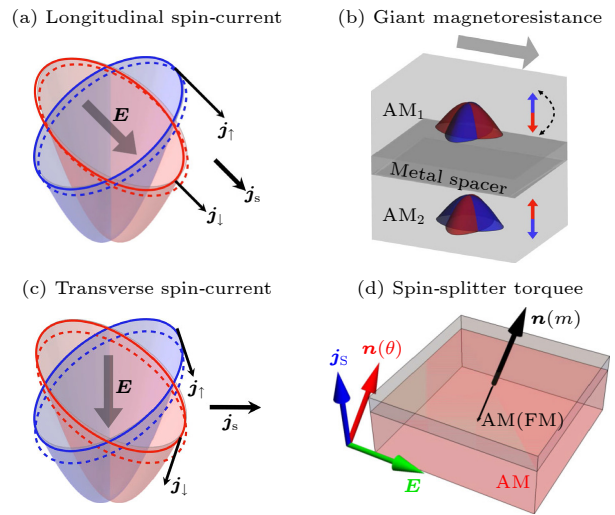


图 2 d-波交错磁中的自旋流与相关器件 (a), (c) 电场沿主轴/交叉方向施加时产生的自旋流^[2]; (b) 基于交错磁的巨磁电阻效应^[2]; (d) 自旋劈裂力矩的调控^[2]

Fig. 2. Spin current and related devices in d-wave altermagnets: (a), (c) Spin currents under electric fields applied along the principal and diagonal axes^[2]; (b) giant magnetoresistance based on altermagnetism^[2]; (d) manipulation of spin splitting torque^[2].

交错磁对 \mathcal{T} 的破缺, 破坏了波矢 \mathbf{k} 与 $-\mathbf{k}$ 处贝里曲率 (Berry curvature) 之间的反对称关系, 使得原本相互抵消的贝里曲率在动量空间中产生非零的净分布, 进而诱发出可观测的横向输运响应, 典型表现包括反常霍尔效应 (anomalous Hall effect, AHE) 和反常能斯特效应 (anomalous Nernst effect, ANE). 由于这类效应的起源与晶格对称性密切相关, 反铁磁中的 AHE 与 ANE 曾被统称为“晶格霍尔/能斯特效应” (crystal Hall/Nernst

effect). 随着交错磁概念的提出及其对称性内涵的逐步澄清, 这两类输运现象才被重新理解为在交错磁序作用下, 由贝里曲率所主导的同一物理机制在不同能量尺度与温度区间的表现.

3 制备与表征

交错磁的研究进展目前在很大程度上受制于制备与表征技术, 主要体现在以下三个方面.

1) 材料体系稀缺. 目前已获实验验证的典型交错磁主要集中在 MnTe 和 CrSb 等少数几种化合物中, 可供探索的材料体系仍较为有限. 许多理论预测的候选材料由于自旋劈裂能较小或 Néel 温度较低, 在室温或常规实验条件下难以观测到稳定的物理信号, 从而限制了其物性研究与实际应用. 2) 样品制备与取向控制困难. 由于交错磁的关键物理性质多为对晶格对称性敏感的体效应, 通常需要借助高质量单晶外延薄膜、精心的对称性设计与应变工程, 才能实现有效且可重复的物性调控. 这对样品生长与结构控制提出了较高要求. 3) 表征技术局限. 如角分辨光电子能谱、自旋分辨光电子能谱和 X 射线磁二色性等表征手段, 对设备分辨率、样品质量及测试环境的稳定性均有严格要求, 且与常规电输运测量流程存在较大差异, 因而在广泛应用方面仍面临挑战.

3.1 制备方法

为满足交错磁研究对样品质量的严格要求, 研究人员已发展出多种各具特色的材料制备策略. Lee 等^[5] 采用分子束外延 (molecular-beam epitaxy, MBE) 技术, 成功制备了高质量的 MnTe 薄膜, 其 Néel 温度达到 267 K. Reimers 等^[6] 使用直流磁控溅射法 (magnetron sputtering) 在 GaAs(110) 衬底上生长出 30 nm 厚的 CrSb(100) 薄膜. Urata 等^[7] 通过锡-熔盐法 (flux method) 合成了杆状六方结构 CrSb 单晶; Vita 等^[8] 则通过化学气相输运法 (chemical vapour deposition, CVD) 获得了尺寸约为 5 mm×5 mm×0.1 mm 大小的 $\text{Co}_{1/4}\text{NbSe}_2$ 外延层. 上述工作体现了交错磁材料在生长方法上的多样性, 反映出该领域在材料制备方面的广泛探索. 这些方法的不断优化与创新, 是未来获得新型、高质量交错磁材料, 进而推动相关基础研究与应用的重要基础.

3.2 表征手段

3.2.1 角分辨光电子能谱

角分辨光电子能谱 (angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES) 是解析交错磁能带结构最直接的实验技术. ARPES 通过直接探测 k 空间中电子的色散关系, 能够清晰揭示能带的自旋劈裂行为及其对称性. 软 X 射线光电子能谱 (soft X-ray APRES, SX-ARPES) 因采用更高的光子能量, 在探测体相电子结构方面具有独特优势. 自旋角分辨光电子能谱 (spin and angle-resolved PES, SARPES) 则可同时获取电子的动量与自旋信息, 从而直接分辨自旋向上与向下的能带分支, 并揭示其自旋纹理结构. 除上述方法外, ARPES 技术亦发展出多种扩展形式. 在实际研究中, ARPES 表征通常需结合第一性原理计算, 以实现材料电子结构的综合解析.

Osumi 等^[9] 通过结合光子能量可调的 (photon-energy-tunable) ARPES 与第一性原理计算, 在 MnTe 的非高对称性 k 点处观测到高达 0.8 eV 的能带劈裂, 该数值显著高于自旋-轨道耦合所贡献的约 0.3 eV 能量. Reimers 等^[6] 结合自旋-积分 (spin-integrated) SX-ARPES 与第一性原理计算 (如图 3 所示), 测量了 CrSb 在费米面附近的能带结构, 同样观察到约 0.6 eV 的能带劈裂. 此外, Jiang 等^[10] 利用 SARPES 在 $\text{KV}_2\text{Se}_2\text{O}$ 中观测到 d-波的自旋动量锁定行为, 以及高度各向异性的自旋极化 Fermi 面和自旋密度波序的存在. 这些结果支持了交错磁中存在的时间反演对称性破缺, 为理论模型提供了关键的实验证据.

3.2.2 光发射电子显微镜

光发射电子显微镜 (photoemission electron microscopy, PEEM) 是一种基于光电效应的表面分析技术, 当其与 X 射线磁二色性结合时, 可用于表征材料的局域磁序. 其中, X 射线磁线性二色性 (X-ray magnetic linear dichroism, XMLD) 对 Néel 矢量的取向具有敏感性, 但无法辨别其正负方向; X 射线磁圆二色性 (X-ray magnetic circular dichroism, XMCD) 则依赖于时间反演对称性破缺, 在特定晶体场环境与轨道占据条件下, 可进一步判断 Néel 矢量的具体指向.

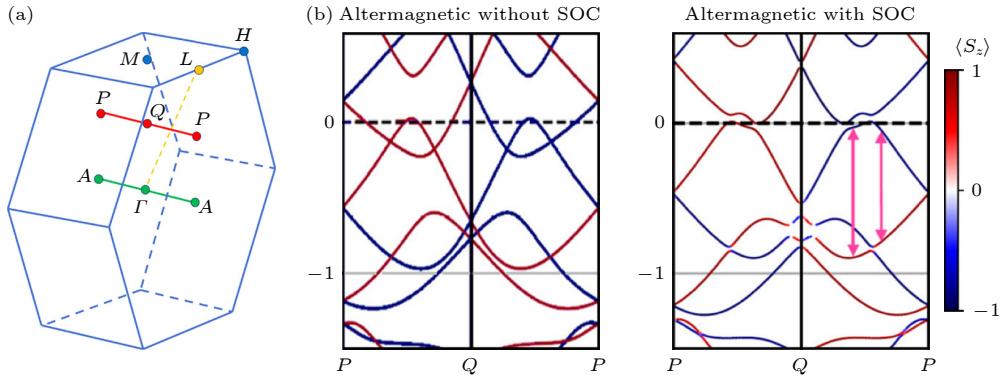


图 3 CrSb 的电子能带结构 (a) 布里渊区与高对称路径^[6]; (b) 有/无自旋-轨道耦合 (SOC) 时沿 P - Q - P 路径的能带结构^[6]
 Fig. 3. Electronic band structure of CrSb: (a) The first Brillouin zone and the high-symmetry path^[6]; (b) band structures along the P - Q - P path with and without spin-orbit coupling (SOC)^[6].

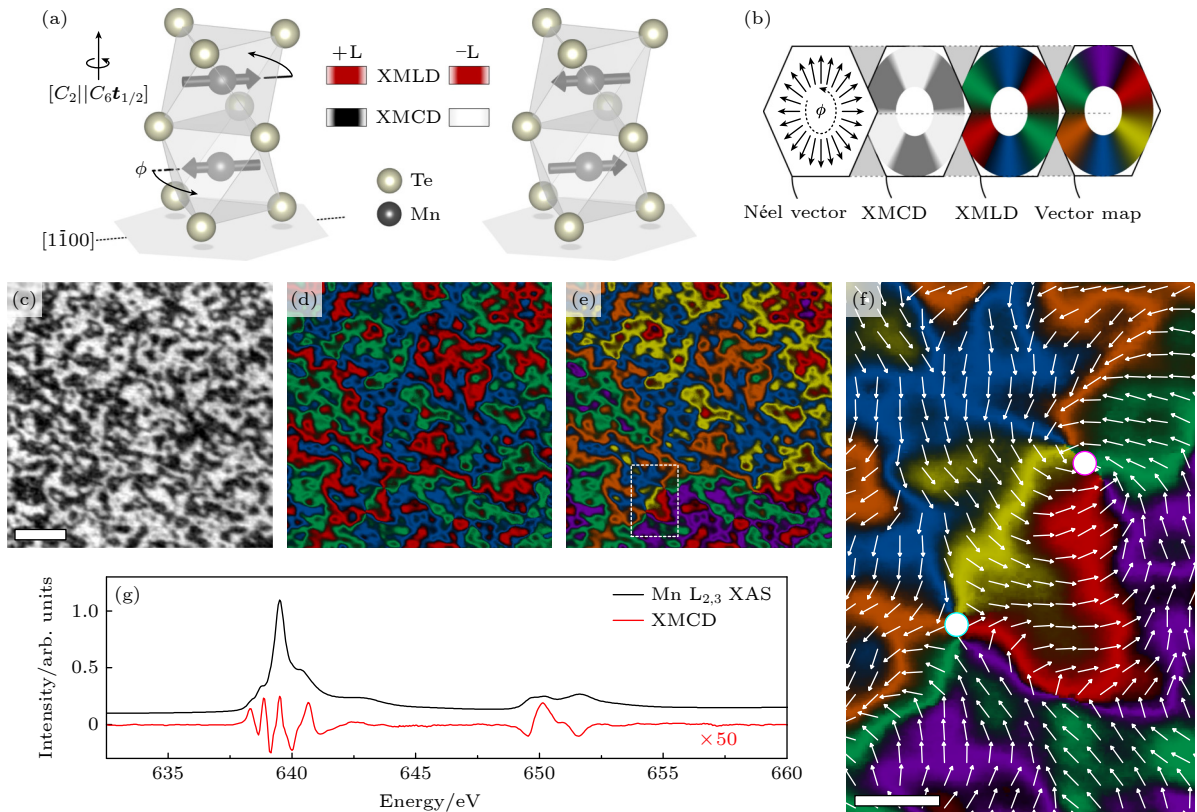


图 4 α -MnTe 磁结构的表征 (a) 晶胞结构^[11]; (b) Néel 矢量映射原理^[11]; (c)–(e) 磁畴的 XMCD-PEEM, XMLD-PEEM 及合成矢量图^[11]; (f) 涡旋-反涡旋对局部放大图^[11]; (g) Mn 的 XAS 与 XMCD 谱^[11]
 Fig. 4. Magnetic texture characterization of α -MnTe: (a) Representative crystal structure^[11]; (b) principle of Néel vector mapping^[11]; (c)–(e) direct observation of magnetic domains via XMCD-PEEM, XMLD-PEEM, and the reconstructed vector map^[11]; (f) enlarged view of a vortex–antivortex pair^[11]; (g) XAS and XMCD spectra at the Mn L-edge^[11].

Amin 等^[11] 通过整合 XMLD-PEEM 与 XMCD-PEEM 两种技术, 建立矢量叠加方法, 将磁序与六种不同颜色相映射, 从而实现了 MnTe 材料中 Néel 矢量及其 Néel 型磁畴涡旋结构的有效观测。图 4 清晰地展示了这一过程。

3.2.3 其他表征手段

对于材料体相磁序的表征, 中子散射 (neutron

scattering) 通过测量自旋波的色散关系, 能够直接测定磁结构的周期性以及自旋的空间取向; 而 μ 子自旋/弛豫/共振技术 (muon spin rotation/relaxation/resonance, μ SR) 则凭借对极微弱局域磁场 (包括静态与动态分量) 的高灵敏度, 在时间尺度上展现出优异的分辨能力, 因而被广泛用于探究磁有序现象的微观起源及其动态涨落行为。这些探测手段

与 ARPES 及 XMCD 等技术相结合, 构成多技术互补的研究框架, 为交错磁结构的多尺度表征奠定了基础. 基于当前的实验进展, 我们在表 1 中明确列出了目前已通过 ARPES 初步或充分证实的交错磁材料, 以供读者参考.

表 1 已明确经过 ARPES 证实的交错磁材料
Table 1. Altermagnet materials confirmed by ARPES.

材料体系	空间群	核心制备方法	实验证据
CrSb ^[6,12]	$P6_3/mmc$	磁控溅射; 分子束外延	SARPES
α -MnTe ^[9]	$P6_3/mmc$	化学气相运输	ARPES
KV ₂ Se ₂ O ^[10]	$P4/mmm$	助熔剂法	SARPES
RbV ₂ Te ₂ O ^[13]	$P4/mmm$	助熔剂法	SARPES
CoNb ₄ Se ₈ ^[14]	$P6_3/mmc$	化学气相运输	ARPES
MnTe ₂ ^[15]	$Pa-3$	助熔剂法	SARPES

4 调控

正如前文所述, 交错磁兼具铁磁和反铁磁二者的优势, 展现出丁对称性破缺、无杂散场以及太赫兹动力学特性等突出优势, 能够产生一系列新颖的磁输运现象. 对交错磁进行有效调控, 例如实现 Néel 矢量的翻转, 可为信息存储与操控提供新的潜在解决方案, 同时也有望推动高密度存储器件的发展, 拓展相关研究方向. 目前, 已有多个科研团队通过电流脉冲、应变工程、热调制等手段, 在交错磁的调控方面开展了广泛探索.

4.1 电调控

理论研究表明, 在较小外磁场辅助下施加特定方向的电流脉冲, 可有效地降低 Néel 矢量翻转所需的能量势垒. 例如, Godinho 等^[16] 在反铁磁中通过改变写入电流的方向, 利用二次谐波法确认了 Néel 矢量的翻转; Cogulu 等^[17] 和 Reimers 等^[18] 也借助 XMLD 与 ARPES 技术, 分别在 α -Fe₂O₃ 和 Mn₂Au 中直接观测到 Néel 矢量随电流方向的变化, 相关实验结果如图 5 所示. 上述实验虽在材料体系与探测手段上有所不同, 但其核心机制均基于 SOT 的作用: 通过非平衡电流诱导的自旋积累, 在反铁磁序参量上施加有力矩, 从而实现对 Néel 矢量的电控翻转.

Han 等^[19] 借鉴反铁磁中调控 Néel 矢量的思路, 在 Mn₅Si₃ 中开展了实验验证. 通过构建 Mn₅Si₃/Pt 异质结, 研究团队利用电流脉冲诱导的 SOT,

成功实现了 Mn₅Si₃ 中 Néel 矢量的翻转, 并借助反常霍尔效应信号对该状态进行读取, 在器件层面完成了稳定的写入与读取循环. Zhang 等^[20] 同样利用电流脉冲, 实现了对交错磁 RuO₂ 中 Néel 矢量的调控, 如图 6 所示. 区别于反铁磁, 交错磁其特有的 SST 为调控 Néel 序参量提供了一种无需借助 SOT 的替代机制, 这不仅证明了电流调控在交错磁体系中的高效性与可重复性, 也为发展可控的自旋电子存储器件提供了重要实验依据.

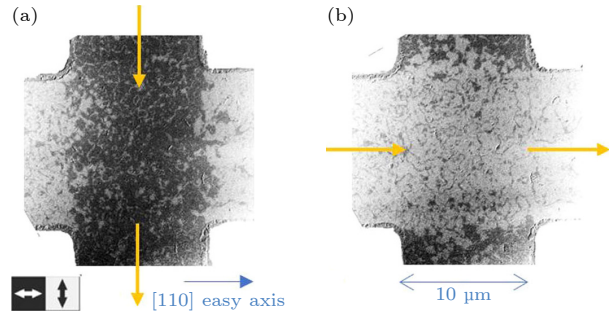


图 5 不同电流构型下 Néel 矢量的翻转 (a) 纵向^[18]; (b) 横向^[18]

Fig. 5. Switching of the Néel vector under different current configurations: (a) Longitudinal^[18]; (b) transverse^[18].

4.2 应变调控

应变调控是研究晶体对称性及其关联磁序的有效实验手段, 在交错磁领域具有重要意义. 研究表明, 尽管块材 ReO₂ 具有单斜结构并表现出反铁磁性, 但在薄膜形态下, 随着厚度减小, 面内压缩应变可诱导单斜晶相向金红石晶相的结构转变, 进而形成交错磁序. Chakraborty 等^[21] 在金红石结构的 ReO₂ 薄膜中进行了 SARPES 测试, 从电子结构层面直接证实了这一应变诱导的磁序转变.

另一方面, 功能材料通常需以薄膜形式外延生长于衬底上, 当薄膜与衬底之间存在晶格失配时, 将不可避免地引入应变. 基于该机制, Sim 等^[22] 发现, 在中心对称的交错磁材料中, 应变可诱导产生空间调制的 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI), 从而激发整体弱铁磁性. 这一效应为实现外场对 Néel 矢量的定向调控提供了新途径.

Zhou 等^[23] 则通过调控 CrSb 的晶体对称性, 实现了对 DMI 矢量的有效操控, 从而探索了不同条件下对 CrSb 的 Néel 矢量进行电控翻转的可行性. 该研究设计了不同构型的 CrSb 异质结, 分别

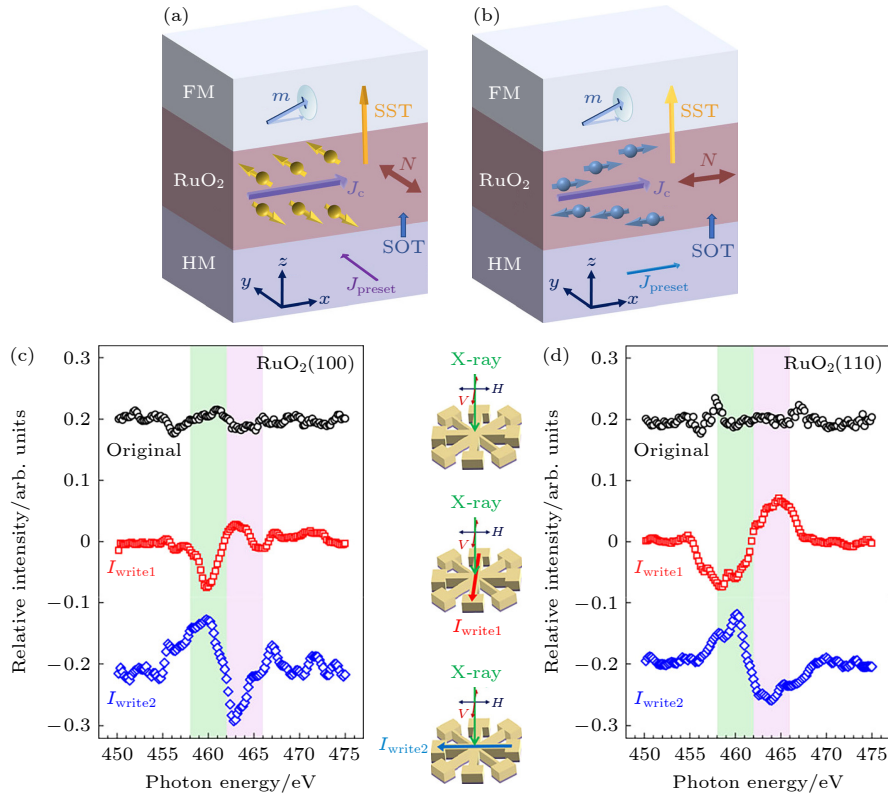


图 6 沿 y 方向 (a) 与 x 方向 (b) 的电流对 RuO_2 的自旋劈裂力矩的调控^[20]; (c) RuO_2 (100) 和 (d) RuO_2 (110) 的 XMLD 谱^[20]
 Fig. 6. Modulation of spin splitting torque in RuO_2 by current along the y -direction (a) and the x -direction (b)^[20]; (c) XMLD spectra of RuO_2 (100) and (d) RuO_2 (110)^[20].

实现了场辅助翻转与无场翻转两种电控模式, 其实验结果与其提出的理论预期高度吻合.

4.3 热调控

Dai 等^[24]在对 $\text{Mn}_5\text{Si}_3/\text{Pt}$ 的研究中发现, 该体系的 SOT 翻转行为与传统的纯 SOT 机制存在显著差异. 研究指出, 该现象可能源于焦耳热效应与交错磁本征自旋劈裂能带的协同作用. 这一发现不仅揭示了热-自旋耦合在磁性调控中的作用, 也为交错磁材料的进一步应用探索提供了新的研究方向.

5 材料探索

5.1 金属交错磁材料

早期发现的 MnTe 等材料多呈现半导体特性; 与之相比, 具有高电导率特性的金属交错磁, 不仅可直接通过电场实现对自旋流的有效调控, 也为探索与低能准粒子激发相关的新奇物理现象提供了重要载体. 近年来, 金属交错磁在室温稳定性与自旋调控方面取得了一系列突破性进展. Jiang 等^[10]

通过 SARPES 证实了 $\text{KV}_2\text{Se}_2\text{O}$ 是一种具有 d-波自旋-动量锁定特性的室温金属交错磁, 其自旋劈裂能高达 1.6 eV, 为目前已知交错磁材料中的最高值之一. 更为重要的是, 该研究在 $\text{KV}_2\text{Se}_2\text{O}$ 中观察到了由 Fermi 面嵌套诱导的自旋密度波 (spin density wave, SDW) 序, 这一发现展示了金属交错磁中高导电性、自旋劈裂与复杂多体效应的共存, 为在室温下直接通过电场操控自旋电流, 以及探索非传统超导与交错磁序的相互作用提供了理想的实验平台.

5.2 二维交错磁材料

二维材料的发展为在低维极限下研究交错磁与超导的交叉现象提供了帮助. 通过精确控制层间堆垛, 可构筑高质量的交错磁/超导异质结构, 从而在原子级平整且界面洁净的体系中探索由对称性破缺、强自旋-轨道耦合等效应所诱发的新颖量子现象. 例如, Liu 等^[25]通过调控二维磁性 van der Waals 双层结构的扭转角度, 成功诱导出体系的交错磁序, 并进一步指出: 通过选取具有特定晶格对称性的单层 van der Waals 材料 (如 VOBr),

该方法可灵活构建如 d-波, g-波乃至 i-波的交错磁结构. 这一发现不仅为探索交错磁提供了一个通用、稳定且高度可调的平台, 同时也为自旋流的产生与调控开辟了新途径.

5.3 能谷交错磁材料

如何打破能谷简并, 实现可控的高效能谷极化是当前谷自旋电子学的研究重心. 近期的一系列研究通过结构对称性工程与多物理场协同调控, 为交错磁半导体中的能谷操纵提供了系统的解决方案.

在结构设计路径上, 针对 Janus 单层 V_2STeO 的研究^[26] 利用结构自发破缺的镜像对称性, 诱导出了独特的“多重压电效应”(multipiezo effect). 该工作证实, 通过应力工程可以同时能对能谷极化、自旋劈裂及磁性进行协同调控, 赋予了材料多维度的逻辑操作功能.

外场调控方面, 当前研究则侧重于多场协同带来的非线性增强效应. 针对单层 $Mg(FeN)_2$ 交错磁半导体, Wang 等^[27] 提出了一种由垂直电场与面内单轴应力构成的“协调调控策略”. 他们强调, 该方法能够将能谷极化度提升至单一场作用下的 1.5 至 2.9 倍, 克服了传统单一手段极化效率低、不可逆转的瓶颈, 实现了对能谷态的精确锁相与快速切换.

在层状化合物 $Rb_{1-\delta}V_2Te_2O$ 中, Zhang 等^[13] 通过实验观测到由晶体对称性所配对的自旋-谷锁定 (spin-valley locking, SVL) 现象. 借助 SARPES 与准粒子干涉技术, 该研究不仅直接揭示了相邻能谷具有相反的自旋极化, 而且证实了遵循自旋选择定则的谷间散射受到显著抑制. 该材料的 Néel 温度约为 307 K, 其剥离能密度与 MoS_2 相近, 因而具备制备单层或超薄样品的天然优势. 这些特性使得在二维极限下调控交错磁序及相应的自旋极化谷态成为可能, 为开发高集成度、低功耗的二维自旋电子学与谷电子学器件奠定了基础.

5.4 铁电交错磁材料

Duan 等^[28] 在铁电交错磁材料的探索中, 提出了“反铁电交错磁”(antiferroelectric altermagnets, AFEAM) 这一全新物理概念, 旨在攻克交错磁序电学调控困难的技术瓶颈. 在技术路径上, 他们提出了一种基于对称性的普适化设计原则, 通过有效模型分析与第一性原理计算, 在 van der Waals 金

属硫代磷酸盐及钙钛矿氧化物等体系中成功地验证了 AFEAM 的实现方案. 研究指出, 利用材料内部的反铁电畸变与交错磁序的本征耦合, 仅需微弱外电场诱导反铁电-铁电相变, 即可实现对自旋劈裂能带及自旋极化方向的翻转操控. 该研究的核心价值在于填补了反铁电性与交错磁序耦合研究的空白, 提出了一种无需翻转磁矩即可调控自旋输运性质的新模型, 挑战了传统多铁材料中磁电控制灵敏度的局限. 这一成果不仅深化了对非传统磁序对称性破缺的物理理解, 也为后续开发兼具高速与低功耗特性的多铁自旋电子器件提供了关键的理论依据.

近期, Zhu 等^[29] 提出的交错磁近邻效应 (altermagnetic proximity effect, AMPE) 进一步拓展了交错磁在多铁等领域的应用边界. 该效应通过界面耦合, 将交错磁特有的动量结构传递至相邻非磁性层, 这一过程被称为“交错磁化”. 在 van der Waals 异质结中, AMPE 表现出高度的可设计性——自旋劈裂强度与自旋织构可通过层间距、晶格取向以及应变等手段实现精确调控. 相较于传统铁磁近邻效应, AMPE 可在不引入杂散场的前提下诱导显著的自旋劈裂, 从而为化解多铁材料中铁电绝缘性与金属导电性之间的固有矛盾提供了新途径. 通过将多铁性交错磁序引入石墨烯等高导电通道, 该团队进一步在理论上构建了交错磁电自旋场效应晶体管^[30], 实现了对自旋输运的全电学调控, 为发展低功耗自旋逻辑器件奠定了基础.

5.5 超导交错磁材料

超导与磁有序的传统对立关系因交错磁的发现而被重新审视. 交错磁独特的自旋结构使其不仅与超导性兼容, 更可能成为调控甚至诱导新奇超导态 (如伊辛配对、拓扑超导) 的关键要素. Sun 等^[31] 和 Papaj^[32] 对超导/交错磁系的理论计算表明, 界面质量以及 Fermi 面的相对取向对电荷电导和自旋电导等输运性质具有显著的影响. 进一步地, Ouassou 等^[33] 在 Josephson 结中的计算研究指出, 若将结中间层替换为交错磁, 体系将出现 $0-\pi$ 振荡行为, 其衰减程度与振荡周期强烈依赖于超导与交错磁之间的晶格取向关系.

Brekke 等^[34] 建立了一个包含最近邻与次近邻跳跃的二维晶格模型, 该模型成功在不引入净磁化强度的情况下, 通过破坏时间反演对称性与晶体旋

转对称性, 模拟了交错磁特有的动量依赖自旋劈裂 (d -波形式). 这种方法为理解交错磁与常规 s -波超导体结合时的电子配对机制提供了坚实的理论基础, 填补了传统铁磁/超导界面理论在交错磁体系中的空白.

Zhang 等^[35]的研究指出, 当常规 s -波超导体与交错磁 (如 RuO_2 , MnTe 或 KRu_4O_8) 形成异质结时, 交错磁内部独特的自旋劈裂场会诱导库珀对获得有限的质心动量. 与传统铁磁材料需要强外磁场不同, 该效应完全源于材料本征的各向异性自旋劈裂. 这种有限动量配对在技术上表现为超导序参量随空间位置的振荡, 进而导致 Josephson 结中出现可调控的 $0-\pi$ 转变.

综上所述, 当前研究通过结合紧束缚模型计算与 Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程模拟, 证实了交错磁材料在无需净磁化和外磁场条件下, 即可诱导产生类似于 Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 态的奇异超导相. 这不仅挑战了有限动量配对必须依赖强磁场的传统观点, 也为未来基于 RuO_2 等材料的超导量子器件开发指明了方向.

6 应用及前景展望

6.1 磁存储器

磁阻随机存取存储器 (magnetoresistive random-access memory, MRAM) 是未来存储器技术的重要发展方向. 与动态随机存取存储器 (DRAM) 相比, MRAM 具备断电后数据不丢失的优势; 而与闪存 (Flash) 相比, 其写入速度可达纳秒量级, 且可承受超过 10^{14} 次的写入擦除循环, 因此在嵌入式系统、高速缓存, 以及物联网、汽车电子等高可靠性应用场景中展现出重要的应用潜力.

当前, 对 MRAM 的研究主要致力于突破其在产业化进程中所面临的关键技术难题, 以前沿的 SOT-MRAM 为例: 铁磁基 MRAM 存在可扩展性受限、写入功耗较高以及写入干扰显著等问题; 反铁磁基 MRAM 则在结构复杂度、集成密度、工艺成熟度及制造成本等方面存在明显瓶颈. 在这种背景下, 基于交错磁的 MRAM 有望凭借其独特的电子结构, 为 SOT-MRAM 的发展提供新的思路. 例如, Li 等^[36]借助 RuO_2 的能带劈裂, 在 $\text{RuO}_2(101)/[\text{Co}/\text{Pt}]_2/\text{Ta}$ 结构中实现了稳定可靠的 100% 无场 SOT 翻转, 即使在外加宽范围磁场

环境下仍能保持优异的抗干扰性能, 为提升 SOT-MRAM 以及其他自旋电子存储器与逻辑器件的能效及可扩展性提供了有前景的解决方案.

6.2 学科交叉

交错磁独特的序参量, 为光学、磁子学和拓扑物态等新兴交叉领域展现出深刻的理论价值和广阔的应用潜力.

交错磁与光学的交叉研究核心在于探测与调控. 一方面, 光学手段不仅能够用于探测交错磁中的 Néel 矢量, 还可实现对其主动调控; 另一方面, 光诱导过程可以激发自旋极化. Kimel 等^[37]基于对磁光法拉第效应的理论分析指出, 即使在净磁化近似为零且具有反铁磁序的材料中, 仍可观测到磁光法拉第旋转, 这一现象可被视为交错磁的一种光学特性. 基于相同理论框架, 该研究进一步扩展了对光生有效磁场对称性的分析, 指出此类磁场可有效地激发交错磁中的自旋动力学行为. 例如在外加磁场 H 下, 沿 FeBO_3 主轴入射的圆偏振光泵浦脉冲可以有效诱导自旋进动, 示意图如图 7 所示.

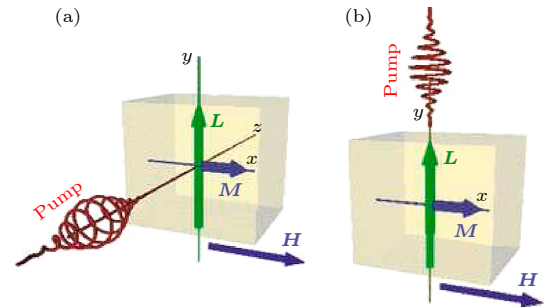


图 7 (a) z 轴和 (b) y 轴传播的圆偏振光泵浦脉冲在 FeBO_3 中激发的自旋进动^[37]

Fig. 7. Spin precession excited in FeBO_3 by circularly polarized pump pulses propagating along (a) z -axis and (b) y -axis^[37].

Farajollahpour 等^[38]在具有 C_4K 对称性的系统中, 证明了通过光场可诱导产生直流霍尔效应, 其过程如图 8 所示. 该效应源于系统贝里曲率四极子在 C_4K 组合对称性保护下, 对静电场与光频电场共同作用的非线性响应. 研究显示, 所诱导的电流具备自旋极化特性, 且电荷流与自旋流对光偏振的依赖关系显著不同: 电荷流依赖于光的偏振状态, 线偏振或椭圆偏振光可激发电荷流, 而圆偏振光不产生净电荷输运; 自旋流则与偏振态无关, 在任何偏振条件下均可维持. 这一特性为光调控自旋电子学器件提供了新的思路, 例如通过圆偏振光可

产生纯自旋流, 在低功耗自旋器件中具有重要应用潜力.

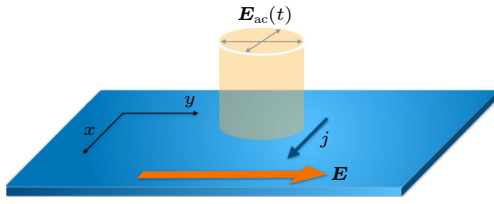


图 8 光诱导霍尔效应的过程示意图^[38]

Fig. 8. Schematic illustration of the light-induced Hall effect^[38].

磁子是磁性材料中电子自旋集体激发所产生的准粒子. 交错磁的自旋劈裂特性有望与具有不同手性的磁子模式相耦合, 为构筑新型磁子学器件开辟了研究方向. 例如, Šmejkal 等^[39]在 RuO₂ 中观测到太赫兹频段的磁子谱带呈现交错手性劈裂, 其行为与电子能带的交错自旋劈裂高度相似, 并在 Γ 点附近展现出线性的色散关系. Liu 等^[40]则通过非弹性中子散射在 α -MnTe 中直接证实了磁子能带劈裂及其 g -波各向异性, 为交错磁序提供了自旋激发层面的关键证据. 这些研究不仅证实了理论预言, 更揭示了交错磁中磁子可能具有的非平庸拓扑特性, 为利用磁子进行量子信息处理提供了全新的材料平台与物理原理.

由于交错磁可实现 PT 对称性的破缺, 因而成为研究 Weyl 半金属等新奇物态的理想平台. Lu 等^[41]结合第一性原理计算和 ARPES, 在 CrSb 中清晰地观测到能带的自旋劈裂结构, 并在其 (100) 面上观测到了可能源自 Weyl 点的拓扑表面态的特征信号, 为该材料体态具有非平庸拓扑能带结构提供了有力证据. 该研究不仅确认了 CrSb 的非平庸拓扑性质, 也突显了交错磁作为实现和探索磁性拓扑物态 (如 Weyl 半金属) 的重要材料体系的潜力.

6.3 展望

综上所述, 交错磁材料凭借其独特的反铁磁序、强自旋-轨道耦合效应, 以及对电流、应力、光场等多种外场的高度敏感性, 正持续拓展自旋电子学的研究维度. 该体系材料有望在以下领域取得突破进展.

在信息操控方面, 进一步探索对交错磁更高效的电调控与读写机制至关重要. 交错磁在电流诱导自旋极化及 Néel 矢量翻转方面展现出显著优势,

未来研究应聚焦于降低翻转电流密度、提升信号读出灵敏度, 并致力于实现室温下低功耗的稳定调控. 相关进展将有力推动交错磁在自旋逻辑器件与高密度磁性存储器中的应用.

材料体系的拓展与异质结构设计也是关键发展方向. 当前研究多集中于 MnTe 等典型材料, 而其他潜在交错磁材料的探索仍较为有限. 未来可关注二维材料、拓扑结构以及强关联体系中的交错磁行为, 并借助界面工程、应变工程及 van der Waals 异质结等手段, 增强其自旋响应特性, 进而实现如电场可调的拓扑物态、界面自旋霍尔效应等新功能.

为实现交错磁材料的实际应用, 还需加强其在集成化与可靠性方面的研究. 目前, 交错磁材料在 CMOS 工艺兼容性、环境稳定性以及大规模可控制备等方面仍面临挑战. 随着材料生长与微纳加工技术的不断进步, 基于交错磁的存储与逻辑器件有望助力磁电子器件的商业化进程.

7 结论

交错磁作为自旋电子学领域的前沿研究方向, 凭借其独特的电子结构与自旋输运特性, 不仅拓展了人们对磁性材料的理解, 也为新一代自旋电子器件与量子材料的设计提供了新的方向. 随着理论与实验手段的不断进步, 更多具有奇异物性的交错磁体系正逐渐被揭示, 推动该领域从基础物性研究迈向功能导向的器件探索. 展望未来, 交错磁所展现的自旋对称性破缺机制及其跨学科融合潜力, 有望成为引领信息技术与量子科技发展的关键推动力之一, 持续激发基础研究与应用创新.

参考文献

- [1] Mazin I, The PRX Editors 2022 *Phys. Rev. X* **12** 040002
- [2] Šmejkal L, Sinova J, Jungwirth T 2022 *Phys. Rev. X* **12** 040501
- [3] Šmejkal L, Sinova J, Jungwirth T 2022 *Phys. Rev. X* **12** 031042
- [4] Bai H, Han L, Feng X Y, Zhou Y J, Su R X, Wang Q, Liao L Y, Zhu W X, Chen X Z, Pan F, Fan X L, Song C 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 197202
- [5] Lee S, Lee S, Jung S, Jung J, Kim D, Lee Y, Seok B, Kim J, Park B G, Šmejkal L, Kang C J, Kim C 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 036702
- [6] Reimers S, Odenbreit L, Šmejkal L, Strocov V N, Constantinou P, Hellenes A B, Jaeschke Ubierno R, Campos W H, Bharadwaj V K, Chakraborty A, Denneulin T, Shi W, Dumin-Borkowski R E, Das S, Kläui M, Sinova J, Jourdan M

- 2024 *Nat. Commun.* **15** 2116
- [7] Urata T, Hattori W, Ikuta H 2024 *Phys. Rev. Mater.* **8** 084412
- [8] Vita A D, Bigi C, Romanin D, Watson M D, Polewczyk V, Zonno M, Bertran F, Petersen M B, Motti F, Vinai G, Tuniz M, Cilento F, Cuoco M, Andersen B M, Kreisel A, D'Onofrio L J, Clark O J, Edmonds M T, Candelora C, Xu M, Cheng S, LaFleur A, Antonelli T, Sangiovanni G, Re L D, Vobornik I, Fujii J, Granozio F M, Sambri A, Gennaro E D, Jacobsen J B, Jacobsen H, Ernstorfer R, Zeljkovic I, Hwang Y, Calandra M, Miwa J A, Mazzola F 2025 [arXiv: 2502.20010 \[cond-mat.str-el\]](#)
- [9] Osumi T, Souma S, Aoyama T, Yamauchi K, Honma A, Nakayama K, Takahashi T, Ohgushi K, Sato T 2024 *Phys. Rev. B* **109** 115102
- [10] Jiang B, Hu M, Bai J, Song Z, Mu C, Qu G, Li W, Zhu W, Pi H, Wei Z, Sun Y J, Huang Y, Zheng X, Peng Y, He L, Li S, Luo J, Li Z, Chen G, Li H, Weng H, Qian T 2025 *Nat. Phys.* **21** 754
- [11] Amin O J, Dal Din A, Golias E, Niu Y, Zakharov A, Fromage S C, Fields C J B, Heywood S L, Cousins R B, Maccherozzi F, Krempaský J, Dil J H, Kriegner D, Kiraly B, Campion R P, Rushforth A W, Edmonds K W, Dhesi S S, Šmejkal L, Jungwirth T, Wadley P 2024 *Nature* **636** 348
- [12] Santhosh S, Corbae P, Yanez-Parreno W J, Ghosh S, Jensen C J, Fedorov A V, Hashimoto M, Lu D, Borchers J A, Grutter A J, Charlton T R, Islam S, Richardella A, Mkhoyan K A, Palmstrøm C J, Ou Y, Samarth N 2025 [arXiv: 2505.00239 \[astro-ph.CO\]](#)
- [13] Zhang F, Cheng X, Yin Z, Liu C, Deng L, Qiao Y, Shi Z, Zhang S, Lin J, Liu Z, Ye M, Huang Y, Meng X, Zhang C, Okuda T, Shimada K, Cui S, Zhao Y, Cao GH, Qiao S, Liu J, Chen C 2025 *Nat. Phys.* **21** 760
- [14] Sakhya A P, Mondal M I, Sprague M, Regmi R B, Kumay A K, Sheokand H, Mazin I I, Ghimire N J, Neupane M 2025 [arXiv: 2503.16670 \[cond-mat.mes-hall\]](#)
- [15] Zhu Y P, Chen X, Liu X R, Liu Y, Liu P, Zha H, Qu G, Hong C, Li J, Jiang Z, Ma X M, Hao Y J, Zhu M Y, Liu W, Zeng M, Jayaram S, Lenger M, Ding J, Mo S, Tanaka K, Arita M, Liu Z, Ye M, Shen D, Wrachtrup J, Huang Y, He R H, Qiao S, Liu Q, Liu C 2024 *Nature* **626** 523
- [16] Godinho J, Reichlová H, Kriegner D, Novák V, Olejník K, Kašpar Z, Šobáň Z, Wadley P, Campion R P, Otxoa R M, Roy P E, Železný J, Jungwirth T, Wunderlich J 2018 *Nat. Commun.* **9** 4686
- [17] Cogulu E, Statuto N N, Cheng Y, Yang F, Chopdekar R V, Ohldag H, Kent A D 2021 *Phys. Rev. B* **103** L100405
- [18] Reimers S, Lytvynenko Y, Niu Y R, Golias E, Sarpi B, Veiga L S I, Denneulin T, Kovács A, Dunin-Borkowski R E, Bläßer J, Kläui M, Jourdan M 2023 *Nat. Commun.* **14** 1861
- [19] 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** eadm0479
- [20] Zhang Y, Bai H, Dai J, Han L, Chen C, Liang S, Cao Y, Zhang Y, Wang Q, Zhu W, Pan F, Song C 2025 *Nat. Commun.* **16** 5646
- [21] Chakraborty A, González Hernández R, Šmejkal L, Sinova J 2024 *Phys. Rev. B* **109** 144421
- [22] Sim J H, Kang C J, Je S G 2025 *Phys. B: Condens. Matter* **714** 417475
- [23] Zhou Z, Cheng X, Hu M, Chu R, Bai H, Han L, Liu J, Pan F, Song C 2025 *Nature* **638** 645
- [24] Dai J K, Han L, He W Q, Zhu Y X, Bai H, Zhu W X, Liang S X, Zhang Y C, Cao Y Z, Liu J W, Pan F, Song C 2024 *Phys. Rev. Mater.* **8** 074406
- [25] Liu Y, Yu J, Liu C C 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 206702
- [26] Chang Y, Wu Y, Deng L, Yin X, Zhang X 2025 *Materials* **18** 527
- [27] Wang Q, Deng L, Wu Y, Tong J, Yin X, Zhang X 2025 *Inorg. Chem.* **64** 17785
- [28] Duan X, Zhang J, Zhu Z, Liu Y, Zhang Z, Žutić I, Zhou T 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 106801
- [29] Zhu Z, Huang R, Chen X, Duan X, Zhang J, Zutić I, Zhou T 2025 [arXiv: 2509.06790 \[cond-mat.mtrl-sci\]](#)
- [30] Zhu Z, Chen X, Duan X, Cui Z, Zhang J, Zutić I, Zhou T 2025 [arXiv: 2512.02974 \[cond-mat.mtrl-sci\]](#)
- [31] Sun C, Brataas A, Linder J 2023 *Phys. Rev. B* **108** 054511
- [32] Papaj M 2023 *Phys. Rev. B* **108** L060508
- [33] Ouassou J A, Brataas A, Linder J 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 076003
- [34] Brekke B, Brataas A, Sudbø A 2023 *Phys. Rev. B* **108** 224421
- [35] Zhang S B, Hu L H, Neupert T 2024 *Nat. Commun.* **15** 1801
- [36] Li Z, Zhang Z, Chen Y, Hu S, Ji Y, Yan Y, Du J, Li Y, He L, Wang X, Wu J, Zhang R, Xu Y, Lu X 2025 *Adv. Mater.* **37** 2416712
- [37] Kimel A V, Rasing Th, Ivanov B A 2024 *J. Magn. Magn. Mater.* **598** 172039
- [38] Farajollahpour T, Ganesh R, Samokhin K V 2025 *Npj Quantum Mater.* **10** 29
- [39] Šmejkal L, Marmodoro A, Ahn K-H, González-Hernández R, Turek I, Mankovsky S, Ebert H, D'Souza S W, Šipr O, Sinova J, Jungwirth T 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 256703
- [40] Liu Z, Ozeki M, Asai S, Itoh S, Masuda T 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 156702
- [41] Lu W, Feng S, Wang Y, Chen D, Lin Z, Liang X, Liu S, Feng W, Yamagami K, Liu J, Felser C, Wu Q, Ma J 2025 *Nano Lett.* **25** 7343

SPECIAL TOPIC — Applied magnetism

Recent advances in altermagnetism research: Material properties and cross applications*

ZHANG Hanqi^{1)#} ZHAO Xiaoyi^{1)#} WANG Jingkai¹⁾ XU Zedong^{2)†}
WU Yong¹⁾ MENG Kangkang¹⁾ XU Xiaoguang^{1)‡} JIANG Yong¹⁾²⁾

1) (*School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

2) (*School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China*)

(Received 30 November 2025; revised manuscript received 31 December 2025)

Abstract

As an emerging magnetic phase distinct from traditional ferromagnetism and antiferromagnetism, altermagnetism has garnered significant attention due to its combining zero net magnetization with momentum-dependent spin splitting. This paper provides a comprehensive analysis of the field based on spin-group symmetry theory to elucidate the unique electronic structure in which time-reversal symmetry breaking and crystal rotation operations occur, rather than translation or inverse, enhancing Kramer degeneracy without the need for relativistic spin-orbit coupling. The experimental aspects are surveyed using representative systems such as MnTe, CrSb, and RuO₂. The progress of growing high-quality films through molecular beam epitaxy (MBE) and magnetron sputtering is described in detail, as well as the direct visualization of giant band splitting and domain textures by using angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) and photoemission electron microscopy (PEEM). Furthermore, the mechanism for manipulating Néel vector is systematically examined, with a focus on strategies involving current-induced spin-splitting torque (SST), lattice strain engineering, and thermal modulation, enabling efficient readout and writing of magnetic states. In addition to the basic properties, the discussion extends to the frontier of material exploration, including metal, two-dimensional and superconducting altermagnets, and evaluation of their transformative potential in high-density magnetic random-access memory (MRAM), topological spintronics, and ultrafast magnonics. The review ultimately identifies the current challenges in material expansion and interface engineering, outlining a roadmap for transitioning altermagnets from fundamental discoveries to practical applications in the next-generation information technology.

Keywords: altermagnets, magnetic symmetry, Néel-vector control, antiferromagnetic spintronics

DOI: [10.7498/aps.75.20251637](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251637)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251637](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251637)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1402602) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U24A6001, U24A6002, U23A20548).

These authors contributed equally.

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

‡ Corresponding author. E-mail: xgxu@ustb.edu.cn

交错磁研究进展：材料物性与交叉应用

张瀚琦 赵骁驿 王晶凯 徐泽东 吴勇 孟康康 徐晓光 姜勇

Recent advances in altermagnetism research: Material properties and cross applications

ZHANG Hanqi ZHAO Xiaoyi WANG Jingkai XU Zedong WU Yong MENG Kangkang XU Xiaoguang
JIANG Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060704 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251637

CSTR: 32037.14.aps.75.20251637

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251637>

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): 060704 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251455>

磁性二维材料的近期研究进展

Recent research advances in two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2022, 71(12): 127504 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220301>

手性磁子的物理机制与研究进展

Chiral magnons: Mechanisms and research progress

物理学报. 2026, 75(5): 127504 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251645>

基于单层交错磁体实现巨大的谷极化效应

Realizing giant valley polarization effect based on monolayer altermagnets

物理学报. 2025, 74(22): 227502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251066>

磁序与拓扑的耦合：从基础物理到拓扑磁电子学

Coupling between magnetism and topology: From fundamental physics to topological magneto-electronics

物理学报. 2024, 73(1): 017103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231711>

有机阳离子插层调控二维反铁磁 MPX_3 磁性能

Tuning magnetic properties of two-dimensional antiferromagnetic MPX_3 by organic cations intercalation

物理学报. 2024, 73(5): 057501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20232010>