

特邀综述

拓扑材料的超快光谱研究*

刘豪 孟建桥†

(中南大学物理学院, 长沙 430083)

(2025年9月26日收到; 2025年11月8日收到修改稿)

拓扑材料因其受对称性保护的狄拉克或外尔能带结构, 在量子输运、自旋电子学及非线性光学等领域具有重要应用潜力. 超快泵浦-探测光谱技术可在飞秒至纳秒时间尺度内直接探测光激发载流子的非平衡动力学过程, 从而揭示电荷、自旋与晶格等自由度之间的耦合机制. 本文系统综述了该技术在拓扑绝缘体、拓扑半金属及磁性拓扑材料中的研究进展, 重点讨论了表面态-体态相互作用、自旋极化动力学、相干声子与磁振子激发以及光诱导拓扑相变的电子机制、晶格机制和磁序相关机制. 最后, 展望了多维谱学联合测量与理论模拟相结合在超快调控拓扑物态领域的应用前景. 本文旨在为拓扑材料非平衡物理研究及其在光电、自旋器件中的应用提供参考.

关键词: 超快光谱, 拓扑材料, 相干声子, 电荷动力学, 光诱导相变

DOI: 10.7498/aps.75.20251330

CSTR: 32037.14.aps.75.20251330

1 引言

拓扑材料的电子结构通常具有由对称性保护的沙漏型狄拉克锥或外尔锥 (Dirac/Weyl cone) 等, 其拓扑边界态对非磁性杂质、结构缺陷及晶格形变等扰动表现出优异的鲁棒性, 为实现稳定的量子输运和低能耗器件提供了理想平台. 随着超快激光技术的迅速发展, 飞秒 (fs) 至纳秒 (ns) 量级的时间分辨能力使得研究者能够深入探索凝聚态体系中的准平衡与非平衡动力学过程, 推动了拓扑物态在时域维度上的测量和动态操控的研究.

极化反转^[1]、晶格-磁序耦合激发^[2]以及光诱导相变^[3]等新奇现象相继被发现, 不仅丰富了拓扑量子物态的物理内涵, 也为实现可编程拓扑量子比特和片上高速、低功耗自旋电子器件开辟了全新的调控路径. 超快光谱技术通过探测光激发载流子的弛豫动力学, 能够揭示电子跃迁、能量传递及多自由度耦合等关键过程. 其中, 电子-电子散射、电子-

声子相互作用等机制往往具有相近的特征能量尺度, 唯有在时域上实现有效分辨与解耦, 方能深入理解拓扑材料的本征动力学行为与拓扑响应机制.

近年来, 超快光谱在拓扑绝缘体、拓扑半金属及磁性拓扑材料等体系中取得了一系列重要进展^[4-6]. 尽管不同材料体系在化学组成和晶体结构上存在差异, 但其共有的拓扑能带特征往往导致相似的超快载流子动力学行为. 鉴于拓扑材料体系庞杂、超快光谱技术发展迅速且应用多样, 无法综述所有研究方向. 本文旨在系统梳理超快光谱技术在拓扑材料研究中的最新进展, 在内容选取上遵循以下三项基本原则: 1) 技术代表性: 聚焦于实验室中最常见的反射式泵浦-探测超快光谱技术和时间分辨磁光克尔技术; 2) 材料典型性: 选取具有明确拓扑特性证据的非磁性/磁性拓扑绝缘体、拓扑金属等; 3) 物理机制清晰性: 围绕超快光脉冲诱导的电子-晶格-自旋多自由度耦合动力学展开. 全文结构安排如下: 首先介绍超快光谱技术的基本原理与实验方法; 随后综述其在典型拓扑材料体系中的研究

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFA1604204) 和湖南省科技创新计划 (批准号: 2022RC3068) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jqmeng@csu.edu.cn

进展; 最后深入探讨光诱导拓扑相变的物理机制, 并对未来发展方向与挑战进行展望。

2 超快光谱技术

超快载流子动力学的研究通常依赖于泵浦-探测技术. 该方法使用一束较强的飞秒激光脉冲 (泵浦光) 将样品激发至非平衡态, 随后在精确可调的时间延迟 t 条件下, 引入另一束较弱的飞秒激光脉冲 (探测光), 以监测样品从激发态弛豫回平衡态的过程. 弛豫行为取决于材料本征性质及泵浦光子能量, 弛豫过程主要包括带间 (interband) 和带内 (intraband) 跃迁等. 在该过程中, 声子、磁振子、电荷密度波、自旋密度波等多种玻色型激发均可能参与, 并发挥关键作用^[5-10].

目前应用最广泛的是光学泵浦-光学探测 (optical pump-optical probe, OPOP) 技术, 其泵浦光与探测光脉冲波长通常位于可见光至近红外范围 (约 400—1000 nm). 通过选择不同的泵浦光与探测光波长, 可以针对性地获取特定非平衡态的信息. 常用的实验模式包括单色 OPOP、双色 OPOP、光学泵浦-连续白光探测, 以及扩展至太赫兹波段的超快泵浦-探测光谱等.

实验中常见的测量参数是样品反射率 $\Delta R/R$ 或透射率 $\Delta T/T$ 的瞬态变化. 如图 1 所示^[11], 超快激光通常由飞秒激光器产生, 泵浦-探测光谱多采用波长约 800 nm 的近红外脉冲光. 脉冲经分束镜

分为泵浦光与探测光, 经过整形后聚焦于样品表面. 泵浦光与探测光之间的光程差通过延迟位移平台精确调节, 实现飞秒时间分辨的信号采集. 为从背景噪声中提取有效信号, 通常使用斩波器与锁相放大器对泵浦光进行调制, 并通过光电探测器测量反射探测光的交流光电流分量, 该信号直接反映了泵浦光激发下样品反射率的瞬态变化.

$\Delta R/R$ 或 $\Delta T/T$ 的变化源于泵浦光对电子分布的扰动. 在体系从激发态向内部与外部热平衡态演化的过程中, 电子分布的改变会引起带间吸收光谱的变化, 从而影响材料的光学响应^[12]. 样品的 $\Delta R/R$ (或 $\Delta T/T$) 可以表示为复介电函数实部 $\Delta\epsilon_1$ 与虚部 $\Delta\epsilon_2$ 变化的线性组合, 并可利用 Kramers-Kronig 关系写成仅依赖于虚部变化 $\Delta\epsilon_2$ 的形式^[13]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2}{\pi} \frac{\partial \ln R}{\partial \epsilon_1} \text{PV} \int_0^\infty d\omega' \frac{\omega' \Delta\epsilon_2(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} + \frac{\partial \ln R}{\partial \epsilon_2} \Delta\epsilon_2, \quad (1)$$

其中, PV 表示取柯西主值积分.

介电函数的变化与电子分布函数的变化直接关联, 需针对具体样品进行分析. 例如在金样品中, 常数矩阵元近似下, 介电函数虚部的变化可由联合态密度与电子分布函数的变化量表示为^[12,13]

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_2(\hbar\omega) &= \frac{1}{(\hbar\omega)^2} \int D(E, \hbar\omega) \Delta\rho(E) dE, \\ D(E, \hbar\omega) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int d^3k \delta[E_c(k) - E_v(k) - \hbar\omega] \\ &\quad \times \delta[E - E_c(k)], \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $D(E, \hbar\omega)$ 为导带能量 E 处的联合态密度,

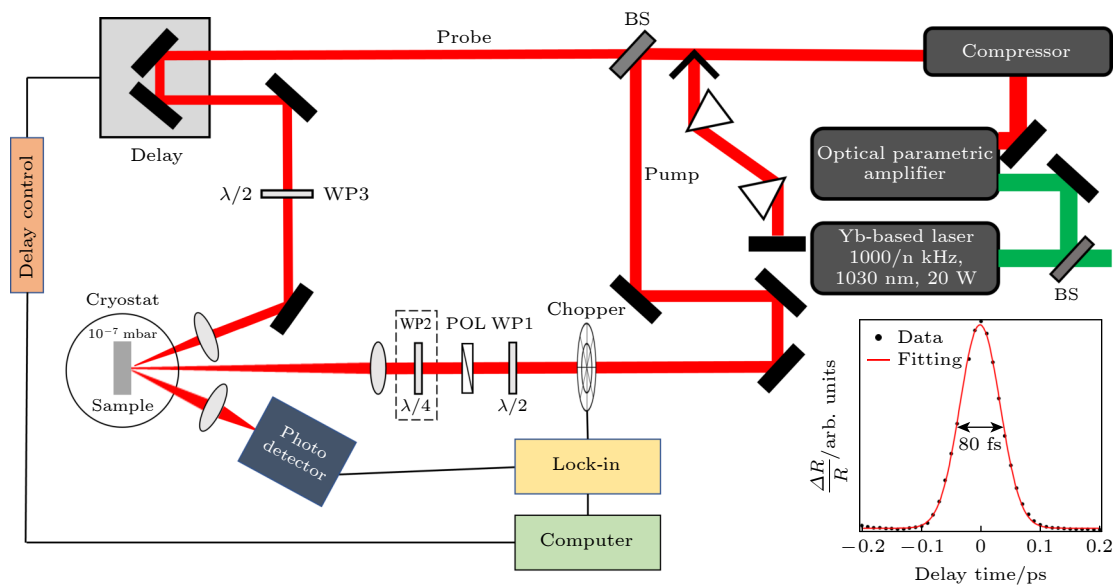


图 1 超快光学泵浦-光学探测技术的实验装置示意图^[11]

Fig. 1. Schematic diagram of a typical ultrafast optical pump-optical probe setup^[11].

通过计算价带与导带之间的吸收跃迁获得. 因此, $\Delta R/R$ 随时间的演化一定程度上由费米面附近的能带结构决定. 在超快泵浦-探测实验中, 飞秒激光脉冲具有极短的时间宽度和宽广的频谱覆盖, 能够同时激发多种元激发并保持良好的相位关系, 从而实现相干声子 (coherent phonons) 和相干磁振子 (coherent magnons) 的选择性激发^[14].

所谓相干声子, 是指晶格振动模式在空间和时间内保持固定相位关系的集体振荡行为, 可分为相干光学声子与相干声学声子两类. 目前已知的相干光学声子主要通过两种机制产生: 冲击受激拉曼散射 (impulsive stimulated Raman scattering, ISRS)^[15] 和位移激发机制 (displacive excitation of coherent phonon, DECP)^[16]. 前者来源于晶体中存在的拉曼活性模式, 后者来自晶体吸收激光能量后原子围绕新的平衡位置发生的相干振动. 两者可通过声子振荡的初始相位加以区分^[17]: ISRS 诱导的信号多表现为余弦型振荡 (初相接近 0), 而 DECP 则常呈现正弦型响应 (初相接近 $\pi/2$). 此外, 相干声学声子主要源于激光加热引发的热弹性应力波、形变势耦合或压电/磁致伸缩效应, 在低频区域广泛存在, 可用于探测界面声子传播与层间耦合动力学^[18-20].

在泵浦光激发后, 材料吸收能量并形成非平衡的光生电子体系. 这些高能电子首先经历电子-电子热化 (electron-electron thermalization) 过程, 使费米面附近的电子占据迅速重新分布; 随后, 它们通过电子-声子或电子-自旋散射等机制, 将能量传递给其他自由度. 在这一框架下, 体系通常被划分为电子、晶格和自旋三个子系统, 并分别赋予有效温度, 从而构建双温度或三温度模型以刻画能量交换动力学^[21-23]. 在高光通量激发条件下, 超快激光还可诱导出具有明确序参数的非热化亚稳态, 甚至触发光致量子相变, 为研究非平衡态凝聚体系提供了新的实验途径.

随着技术手段的不断发展, 形成了多样化的研究路径. 除常规的 $\Delta R/R$ 或 $\Delta T/T$ 测量外, 还可通过探测激光诱导的光学极化变化 (如偏振旋转角与椭圆偏率) 来直接追踪自旋动力学. 这一方法即超快磁光克尔效应 (magneto-optical Kerr effect, MOKE) 技术. 样品的自旋极化可源自本征铁磁性或外磁场诱导的磁化^[24,25], 也可能由泵浦光激发特殊能带结构中电子的手性电荷不守恒^[1], 或圆偏振光诱导的自旋注入效应^[26,27].

除了磁光探测外, 非线性光学过程同样为研究对称性破缺提供了独特手段. 当高强度飞秒激光入射到非中心对称介质时, 非线性极化作用会产生频率为基频两倍的二次谐波信号 (second-harmonic generation, SHG). 根据对称性要求, 二阶非线性过程在理想具有反演对称性的体相中被禁止, 因此 SHG 信号主要来源于表面、界面或局域对称性破缺区域. 近年来, 时间分辨 SHG 已成为探测拓扑材料表面态与对称性演化的高灵敏无损探针^[28]. 在更高能量分辨与动量分辨的探测层面, 时间分辨角分辨光电子能谱 (time-resolved and angle-resolved photoemission spectroscopy, Tr-ARPES) 能够直接描绘光激发电子在动量空间中沿能带弛豫的过程^[29]. 另一方面, 超快太赫兹光谱 (THz spectroscopy) 因其 meV 量级光子能量, 适用于研究低能元激发的动力学特性^[8,30]; 超快二维光谱可揭示元激发间的相干耦合与弛豫行为^[31]; 而时间分辨共振非弹性 X 射线散射 (tr-RIXS) 则进一步提供动量-能量分辨的集体激发信息^[32].

总体而言, 超快光谱技术体系涵盖从电子到自旋、从线性到非线性、从能带到集体激发的多重维度. 不同方法在时间分辨率、能量窗口及探测对象上各具优势, 构成了相互补充的研究框架. 通过这些手段, 研究者得以在原子与电子运动的固有时间尺度上, 揭示复杂量子材料中电子、晶格与自旋自由度的动态耦合及其非平衡演化本质.

3 拓扑绝缘体

3.1 非磁性拓扑绝缘体

拓扑绝缘体是一类独特的量子物质, 其体态具有绝缘特性, 而表面或边缘则存在受时间反演对称性 (\mathcal{T}) 保护的金属态或导电电子态. 这些拓扑边界态表现出线性色散的狄拉克型能带结构, 并具有自旋-动量锁定 (spin-momentum locking) 的特性, 使其在自旋电子学和低功耗器件中具有重要应用前景. 在众多拓扑材料体系中, 三维拓扑绝缘体 $\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{Sb})_3$ 家族因其较大的体能隙、清晰的表面态以及良好的材料稳定性, 成为超快光谱研究的重点体系之一. 超快光谱实验揭示, 在光激发条件下, 拓扑绝缘体中的载流子弛豫动力学不仅受到电子-声子相互作用的显著影响, 还与拓扑表面态的存在密切相关. 超快磁光克尔效应测量进一步捕捉到与

狄拉克表面态耦合的自旋动力学过程, 为理解自旋-轨道耦合体系中的非平衡演化提供了直接证据.

以 Bi_2Se_3 为例, 其费米能级附近的能带结构相对简单, 体能隙约为 0.3 eV, 并在体能隙内存在由拓扑保护的、连接导带与价带的狄拉克表面态. 如图 2(a1) 所示, 在室温下对 Bi_2Se_3 单晶开展的超快光谱测量表明, 光激发载流子经历了由电子-光学声子与电子-声学声子散射主导的弛豫过程, 并伴随相干声子振荡及热扩散 [33–37]. 相干振荡信号来源于 A_{1g}^1 , E_g^2 和 A_{1g}^2 三种光学声子模式 (图 2(a2)), 以及一种低频声学声子模式. 其中, 热化电子主要通过与 A_{1g}^1 声子的散射实现能量耗散. 值得注意的是, 超快光谱提取的电子-声子耦合强度通常高于能谱方法在表面态能带上获得的值. 这一差异表明, 在常规泵浦-探测实验中, 探测的信号主要来源于体态载流子的动力学响应, 而非纯表面态 [36–43]. 这提示我们在解读超快光谱数据, 尤其是在探讨拓扑表面态特异性动力学行为时, 需谨慎区分体态与表面态的贡献.

在非平衡态动力学中, 利用中红外或太赫兹波段光脉冲选择性激发拓扑绝缘体中的特定能带跃迁, 并结合太赫兹探测技术监测低能激发过程, 可有效区分体态与表面态的动力学响应 (如图 2(b) 所示) [44–48]. 该方法得益于太赫兹辐射对载流子电导率的高度敏感性, 尤其适用于探测拓扑表面态中无能隙的狄拉克费米子行为. 此外, 当 Bi_2Se_3 从块体材料减薄为薄膜时, 金属性表面态的相对贡献显著提升, 导致整体载流子弛豫过程加快. 因此, 开展薄膜样品的超快光谱实验, 有助于分离并深入探究狄拉克表面态在光电响应中的独特作用 [49,50]. 中红外超快光谱实验表明, 体态中主要发生由电子-光学声子散射主导的带内热化过程, 以及跨越体能隙的长寿命电子-空穴复合过程 [44,51]. 相比之下, 超快太赫兹光谱结果显示, 在低温下, 仅涉及带内跃迁的表面态电导率变化的弛豫时间显著短于体态 (图 2(c)); 而在高温下, 声子辅助的体-表面耦合通道被开启, 大量体态电子可通过表面态实现快速弛豫, 导致体态与表面态的弛豫行为趋于一致 (图 2(d)) [44,45,52].

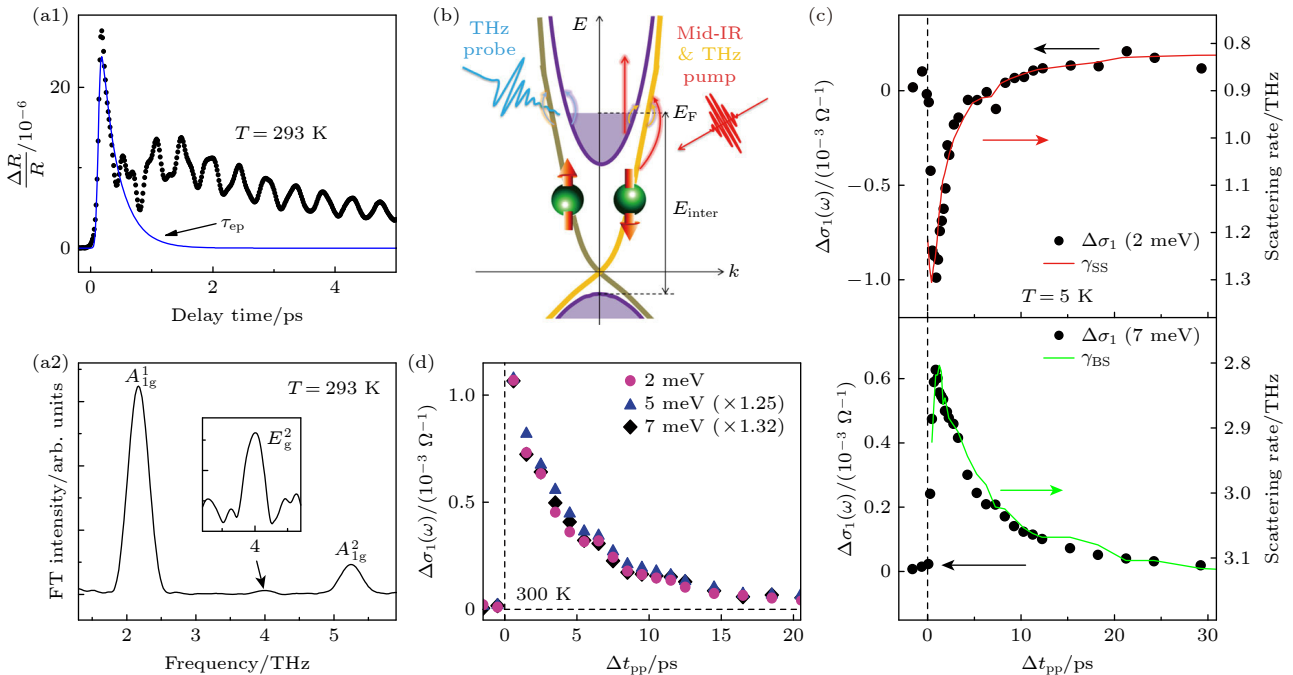


图 2 Bi_2Se_3 的超快动力学过程 (a1), (a2) 在 $h\nu = 1.55$ eV 下测得的瞬态反射率 $\Delta R/R$ 及其相干振荡信号的快速傅里叶变换谱 [26]; (b) 表面态与体态能带结构示意图及中红外/太赫兹泵浦-太赫兹探测方案 [44]; (c), (d) 分别为 5 K 和 300 K 下, 2, 5 和 7 meV 太赫兹探测得到的电导率随时间的变化曲线. 低温下表面态准粒子弛豫快于体态的, 高温下二者耦合增强并表现出相同弛豫时间 [44]

Fig. 2. The ultrafast dynamics in Bi_2Se_3 : (a1), (a2) Transient reflectivity $\Delta R/R$ at $h\nu = 1.55$ eV and the fast Fourier transform spectra of the oscillations [26]; (b) schematic of the surface and bulk band structures and the mid-infrared/terahertz pump-terahertz probe scheme [44]; (c), (d) terahertz conductivity as a function of time at 5 K and 300 K with probe photon energies of 2, 5, and 7 meV. At low temperature, the relaxation of surface-state quasiparticles is faster than that of bulk-state ones; at high temperature, stronger coupling results in identical relaxation times [44].

在自旋动力学方面, 超快磁光克尔效应和对表面态敏感的二次谐波产生光谱技术, 为追踪 Bi_2Se_3 中自旋极化演化提供了有力手段. 由于拓扑表面态具有螺旋形自旋织构, 在圆偏振泵浦光注入自旋极化载流子后, 体态与表面态表现出不同的自旋弛豫行为^[26,27,53,54], 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 表面态电子 (弛豫时间记为 τ_s) 主要受 E_g^2 声子散射影响, 其自旋弛豫速率快于主要受 A_{1g} 声子散射的体态电子 (τ_b) (图 2(a1) 和图 2(a2))^[26]. 这归因于表面态更强的自旋-轨道耦合与动量依赖的散射相位空间差异^[26,27].

综上所述, 表面态在光激发下的电荷和自旋动力学可概括为如图 3(c1)—(c4) 所示的过程^[27,55]: 圆偏振泵浦光首先在体态和表面态中同时激发出自旋极化的载流子群; 在强自旋-轨道耦合作用下, 这些载流子迅速发生自旋去极化; 随后在约 1 ps 时间内, 表面态电子通过电子-电子和电子-声子散射完成带内冷却过程; 最终进入缓慢的电子-空穴

复合和电子-声学声子散射主导的热扩散过程. 值得注意的是, 当高能光子将电子激发至费米能级以上第二套表面态时, 其与费米面附近空穴的复合过程需满足自旋守恒条件, 因此该过程的弛豫时间显著长于单纯的电子-声子耦合冷却过程, 体现出自旋自由度对非平衡载流子寿命的调控作用^[49,50].

在其他 Bi_2Se_3 家族的拓扑绝缘体中, 如 Bi_2Te_3 ^[56–59], $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ ^[40,60–62], $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ ^[47,63] 和 Sb_2Te_3 ^[64–66] 等, 超快光谱研究也观测到了类似的行为, 即以电子-声子耦合为主导的电荷与自旋弛豫, 并伴随明显的相干声子振荡信号.

3.2 磁性拓扑绝缘体

引入磁性原子会破坏体系的时间反演对称性, 从而在表面态狄拉克点处打开磁交换能隙. 将拓扑绝缘体与二维材料 (如过渡金属二硫化物、磁性材料等) 结合形成的范德瓦耳斯异质结构, 不仅为探索拓扑序、电荷序和磁序之间的相互作用提供了平

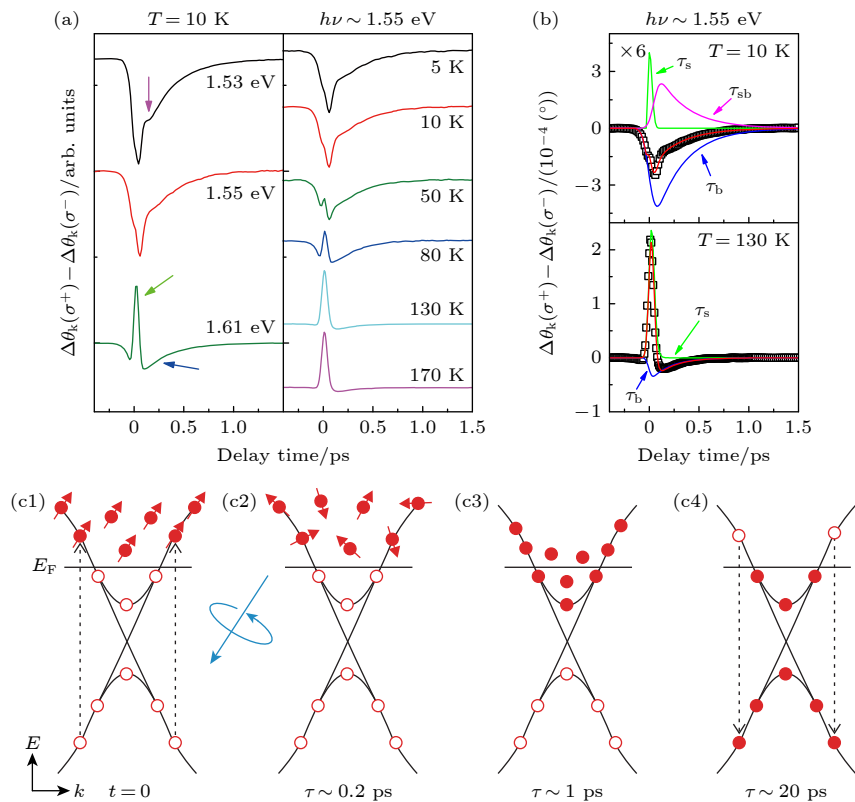


图 3 Bi_2Se_3 的自旋动力学 (a) 不同光子能量与温度下磁光克尔角的时间演化的弛豫过程^[26]; (b) 三指数衰减拟合结果, 分别对应表面态 (τ_s)、体态 (τ_b) 及表面态向体态转移 (τ_{sb}) 的弛豫过程^[26]; (c) 圆偏振光激发下表面电荷与自旋的超快弛豫示意图^[27]

Fig. 3. The spin dynamics in Bi_2Se_3 : (a) Time evolution of the magneto-optical Kerr angle at different photon energies and temperatures^[26]; (b) triple-exponential fits corresponding to relaxation in surface states (τ_s), bulk states (τ_b), and the transfer from the surface states to the bulk states (τ_{sb})^[26]; (c) schematic diagram of ultrafast relaxation of surface charge and spin under circularly polarized excitation^[27].

台, 还为调控狄拉克表面态开辟了新的途径^[67-70]. 例如, 2013年首次在Cr掺杂的(Bi, Sb)₂Te₃薄层中实现了量子反常霍尔效应, 实验条件为30 mK^[71]. 这种极端条件下实现的完美量子化与纵向电阻的消失, 激发了大家对磁性表面态之间耦合方式及强度的深入探讨.

利用超快光谱技术对拓扑绝缘体异质结薄膜的研究发现, 异质结的界面处存在高效的自旋-电荷转换现象^[33,69,72-75]. 具体而言, 超快磁光克尔效应实验揭示, 拓扑表面态与铁磁层之间的轨道杂化能够显著加速超快退磁过程^[76-78]. 太赫兹发射光谱进一步证实, 在SnBi₂Te₄/Co异质结界面上, 超快自旋注入和自旋-电荷转换主要发生在表面, 并由拓扑表面态主导^[74]. Liu等^[79]利用超快磁光克尔技术研究了Cr-(Bi, Sb)₂Te₃/CrSb异质结的超快磁化动力学, 发现与反铁磁CrSb层接触的界面在巡游狄拉克费米子介导的交换耦合作用下, 能够产生具有反平行自旋构型的光诱导瞬态磁相变. 这些结果表明, 磁性拓扑异质结中的表面态与衬底磁性之间存在强烈的耦合相互作用. 值得关注的是, 在反铁磁-拓扑绝缘体异质结MnSe/(Bi, Se)₂Te₃中实现了THz超快脉冲发射, 通过逆自旋霍尔效应和激光诱导瞬态磁矩等实现最优的圆偏振THz发射^[75]. 此外, 通过调节泵浦光的偏振方向, 还可主动调控太赫兹辐射的偏振态, 为发展可编程太赫兹光源提供了新路径^[75]. 这不仅是拓扑材料在光电器件中的成功应用, 也反过来推动了超快太赫兹光谱学的发展.

MnBi_{2n}Te_{3n+1}是一类具有内禀磁性的层状拓扑绝缘体, 其晶格由交替堆叠的MnBi₂Te₄和Bi₂Te₃单元构成, 表现出丰富的磁序与拓扑态共存的物理图像. 该材料家族的薄膜体系已实现量子反常霍尔效应、轴子绝缘体态以及磁场驱动的拓扑相变等新奇量子现象^[80-85]. 例如, 通过设计MnBi₂Te₄基异质结构, 可在多参数空间中精确调控反铁磁量子反常霍尔效应, 进而揭示由自旋构型变化驱动的级联量子相变及面内磁场对量子运输的显著增强^[84]. 自旋与其他微观自由度(如电荷、晶格、轨道)之间的可调耦合, 被认为是实现拓扑量子调控与多功能器件集成的关键物理基础. 尽管诸多角分辨光电子能谱结果认为MnBi₂Te₄块材中表面态能隙与磁序的关系仍存在争议^[86,87], 超快光谱技术在皮秒至纳秒级时间尺度上为揭示其非平衡动力学中的多

体相互作用提供了独立且互补的视角.

在MnBi₂Te₄单晶中, 非平衡载流子的弛豫行为和相干声子响应显著受到反铁磁序的影响($T_N \sim 25$ K), 并且在约10 ps之后还会出现一个长时间的上升过程, 如图4(a)和图4(b)所示. 当温度低于 T_N 时, 弛豫时间 $\tau_1(T)$ 偏离经典的双温度模型预测, 自旋和晶格子系统发生能量交换的弛豫时间 τ_{long} 同样在 T_N 处出现发散行为(图4(c)和图4(d)). 与此同时, A_{1g}^1 相干声子的频率(f_1)在 T_N 以下出现异常硬化(图4(e)和图4(f))^[88]. 在外加磁场下, A_{1g} 声子振幅的变化趋势与反铁磁序的抑制过程高度一致^[89]. 这些实验结果表明, 相干声子能够敏感地反映电荷、晶格等自由度与反铁磁序之间的强耦合关系^[88-90]. 此外, 超快磁光克尔效应和共振软X射线散射实验发现, 在电子-光学声子相互作用的皮秒时间尺度内都存在明显的超快退磁过程, Padmanabhan等^[91]认为较强的交换耦合作用下, 巡游的p型自旋的无序化也会反过来导致局域的3d轨道自旋极化态同时发生退磁过程. 超快光谱技术在飞秒时间尺度上确定了MnBi₂Te₄单晶中电荷、晶格和反铁磁序之间强烈的交换耦合相互作用^[88-92].

理论计算进一步指出, 在双层MnBi₂Te₄或MnSb₂Te₄薄膜中, 通过光激发调控 A_{1g} 拉曼“呼吸”模式的平均位移, 可改变层间交换相互作用的符号, 从而诱导反铁磁态向铁磁态的转变, 并触发拓扑相变^[92]. 实验上, 超快光谱已观测到MnBi₂Te₄薄膜中载流子弛豫与相干声学声子响应对样品厚度的高度敏感性^[2,93,94]. 由于少层薄膜中反铁磁亚晶格的对称性差异, 偶数层薄膜在较低外磁场下即可表现出显著的光学响应变化. 值得关注的是, 近期在二维反铁磁拓扑材料MnBi₂Te₄中, 超快光谱首次捕捉到了动态轴子准粒子(dynamical axion quasiparticle). 其对应的 θ 角(与材料的磁电耦合系数成正比)表现出约44 GHz周期性振荡, 被认为源于由磁振子(magnon)诱导的贝里曲率实空间偶极的超快相干调制^[85].

此外, 当施加面内强磁场时, 偶数层薄膜MnBi₂Te₄系统进入倾斜反铁磁相, 超快光谱成功探测到频率随磁场连续变化的相干磁振子信号, 与理论计算高度吻合^[2]. 而在面外磁场下, 超快磁光克尔信号展现出4个典型特征: 初始阶跃响应对应电子-晶格热化导致的瞬态退磁过程; 随后在晶格-

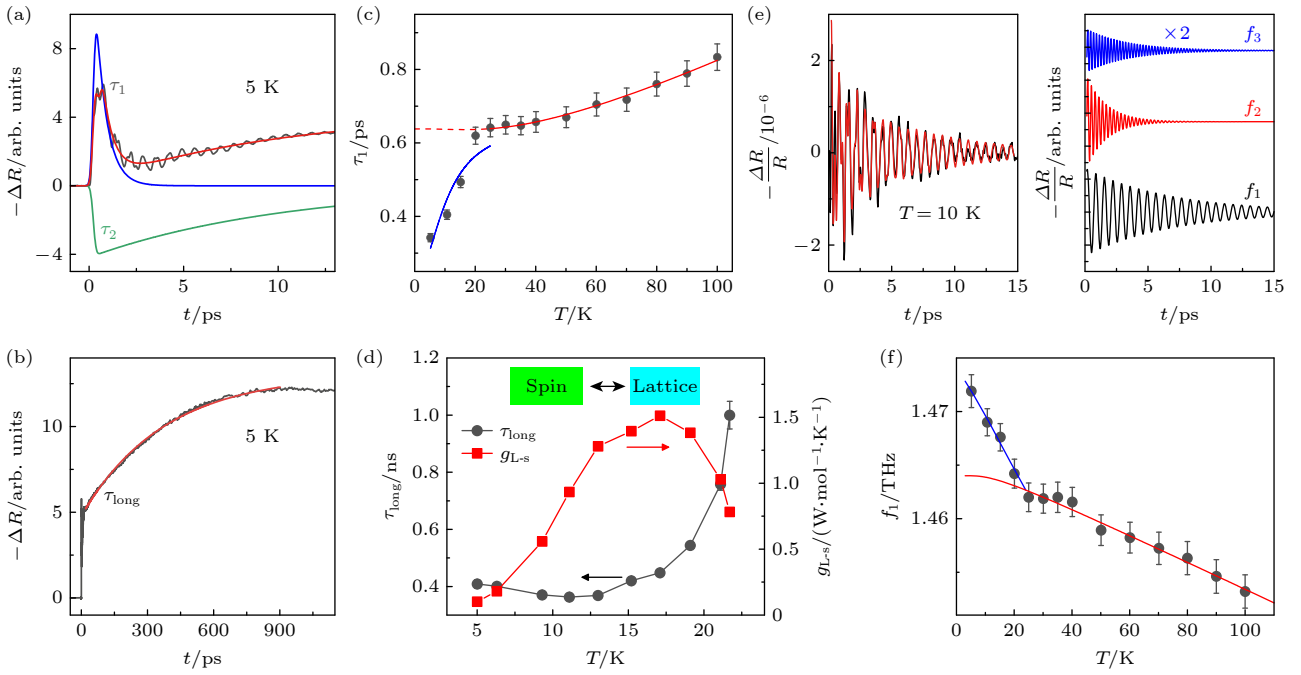


图4 MnBi₂Te₄ 单晶的超快动力学^[88] (a), (b) 瞬态反射率 $\Delta R/R$ 及拟合曲线; (c), (d) 拟合得到的弛豫时间 τ_1 和 τ_{long} ; (e) 在 10 K 下提取的振荡 (黑色) 以及使用阻尼谐振子拟合的曲线 (红色), 右侧为从拟合中得出的不同频率的三个振荡分量; (f) A_{1g}^1 相干声子频率 (f_1) 随温度的变化曲线

Fig. 4. Ultrafast dynamics of MnBi₂Te₄ crystal^[88]: (a), (b) Transient reflectivity $\Delta R/R$ and fits; (c), (d) temperature dependence of relaxation time τ_1 and τ_{long} coherent phonon frequency; (e) extracted oscillation at 10 K (black) and the fitted curve (red) using damped harmonic oscillators, and the three oscillation components with different frequencies derived from the fitting; (f) temperature dependence of A_{1g}^1 coherent phonon frequency (f_1).

自旋相互作用下磁化率在 \sim ns 时间尺度内缓慢减小到热平衡系统下的恰当值; 最后热平衡系统经历热扩散和声子-声子多阶散射等在几纳秒时间尺度上冷却回环境温度, 由于泵浦脉冲的积累效应导致了长达 100 ns 的长寿命背景偏移信号^[2]. 这些结果表明, 磁-声子耦合不仅是理解材料本征动力学的关键, 也为实现磁性拓扑相的超快操控开辟了新途径.

除了 MnBi_{2n}Te_{3n+1} 体系外, 具有强自旋轨道耦合与反铁磁序的钷基拓扑材料 (如 EuIn₂As₂) 同样成为研究磁性与拓扑态耦合的理想平台. 理论预测 EuIn₂As₂ 是一种拓扑不变量 $Z_4 = 2$ 的轴子绝缘体^[95], 角分辨光电子能谱实验发现费米能级附近的体能带反转现象, 并且进入反铁磁相后能带结构出现明显重构^[96]. Liu 等^[97] 利用超快光谱技术揭示了该材料中磁序与拓扑能带之间的强关联特性. 如图 5(a) 所示, 在反铁磁转变温度 T_N 附近, 瞬态反射信号的弛豫振幅发生符号反转, 表明拓扑电荷的超快动力学受到磁序的显著影响. 超快单色泵浦-探测光谱 (图 5(b)) 和磁光克尔技术 (图 5(c)) 都在 T_N 以下观察到温度依赖的相干磁振子激发,

其来源于 Eu²⁺ 离子磁矩的集体自旋进动^[97,98]. 此外, Liu 等^[97] 使用单色 OPOP 实验还发现了一个不能用声学支相干态声子进行解释的极低频相干振荡, 由于该振荡只在反铁磁相出现, 暗示着低温下存在自旋与晶格自由度之间的耦合. Wu 等^[98] 在外加 1.4 T 以上强磁场的超快磁光克尔实验中同样探测到一个频率约为 35 GHz 的相干声子模式 (图 5(d)), 其产生机制与磁光系数的瞬态扰动相关. 这些发现揭示了 EuIn₂As₂ 中拓扑电荷、自旋与晶格自由度之间的复杂相互作用.

4 拓扑半金属

拓扑半金属是一类具有拓扑保护能带结构的量子材料, 其导带与价带在费米能级附近交叉, 形成无能隙的简并点或线. 这类简并态受到时间反演对称性 (\mathcal{T})、空间反演对称性 (\mathcal{P})、镜面对称性或非点群对称性的保护, 因此表现出高度的稳定性^[99-101]. 根据低能有效物理模型, 拓扑半金属可以分为狄拉克半金属、外尔半金属和节点线半金属等几类. 由于狄拉克或外尔节点附近显著增强的贝里曲率

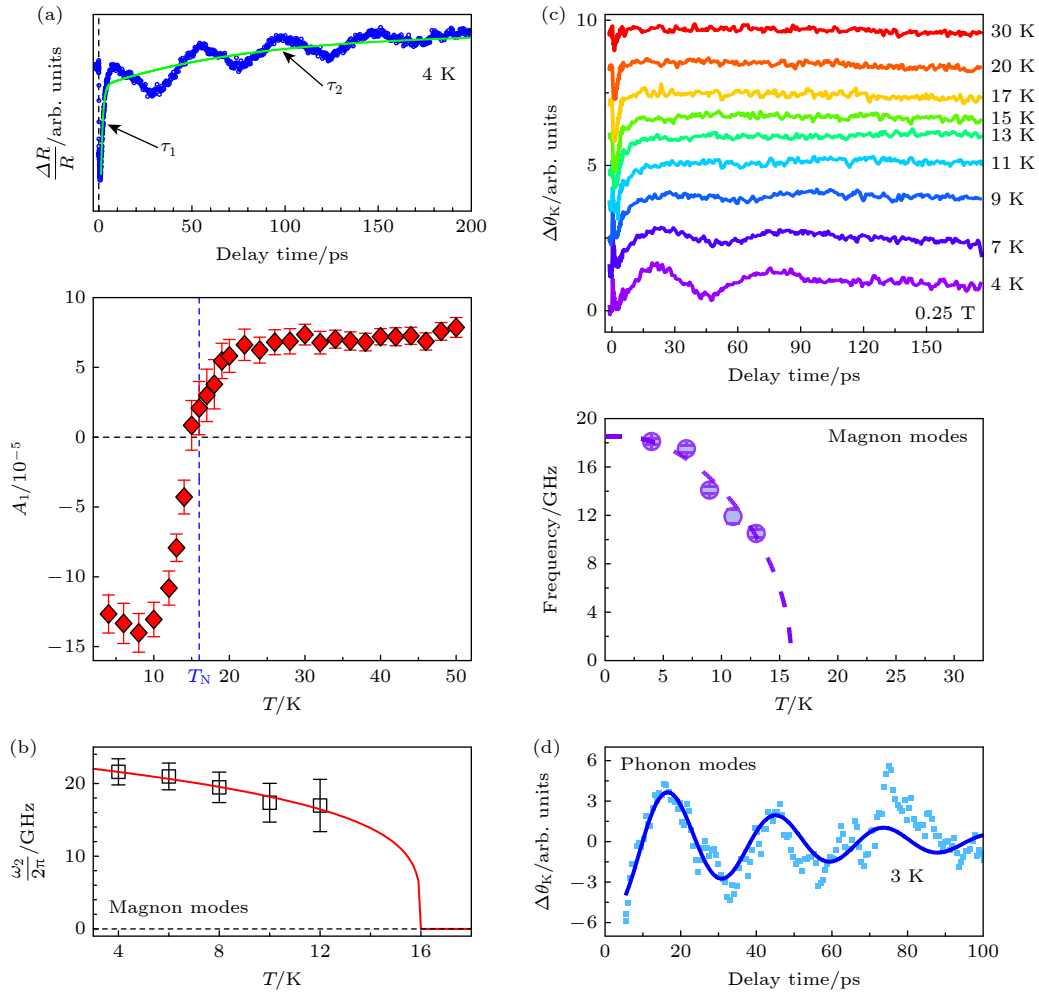


图 5 EuIn_2As_2 的超快动力学 (a) 低温下瞬态反射率 $\Delta R/R$ 随时间变化及振幅 A_1 的温度依赖, 在 T_N 附近发生符号反转^[97]; (b) 反射率实验提取的温度依赖磁振子模式^[97]; (c) 低磁场下不同温度的磁光克尔角曲线及磁振子频率随温度变化^[98]; (d) 在 2 T 磁场下磁光克尔实验探测到的声子模式^[98]

Fig. 5. Ultrafast dynamics in EuIn_2As_2 : (a) Transient reflectivity $\Delta R/R$ at low temperatures and temperature dependence of amplitude A_1 , showing a sign reversal near T_N ^[97]; (b) temperature-dependent magnon modes from reflectivity measurements^[97]; (c) magneto-optical Kerr angle at different temperatures under low magnetic field and magnon frequency versus temperature^[98]; (d) phonon modes detected by magneto-optical Kerr measurements at 2 T^[98].

(Berry curvature), 拓扑半金属展现出一系列新颖的电学与热学输运现象, 如反常霍尔效应、反常能斯特效应以及由手性异常导致的负磁阻和非饱和高磁阻等^[102,103]. 这些特性为探索新奇量子效应和开发低功耗电子器件提供了重要平台.

拓扑半金属中的光激发载流子弛豫过程与拓扑绝缘体有所不同. 尽管它们在某些方面表现出类似金属的行为, 但由于具有独特的能带结构, 拓扑半金属表现出较强的非线性光学响应^[104,105]. 光激发电子经历多个超快弛豫过程, 包括电子-电子散射、电子-声子相互作用、电子-空穴复合以及声子-声子散射过程弛豫到费米面附近, 形成满足费米-狄拉克分布的热电子^[106]. 由于费米能级附近较低

的态密度, 电子-空穴对复合速率受到相空间限制而显著减缓^[105]. 如果电子-空穴复合的时间大于光激发载流子的热化时间, 电子和空穴将在能带节点附近聚集, 形成具有不同化学势的费米-狄拉克分布^[107]. 由此产生的粒子数布居反转 (population inversion) 有可能支持中红外波段之外的宽带激光产生. 特别是在节点处出现能隙时, 相空间阻塞 (phase-space blocking) 和声子瓶颈 (phonon bottleneck) 效应所导致的长寿命粒子数反转布居为研究激子绝缘体态和高次谐波产生提供了理想平台^[105,107-110].

目前, 大多数超快泵浦-探测实验使用 800 nm (相当于 1.55 eV) 的激光, 该光子能量能够激发非狄拉克能带上的电子. 尽管部分光激发载流子会通过

狄拉克能带弛豫,但实验信号往往包含了其他弛豫通道的影响.为了更精确地研究狄拉克/外尔费米子的弛豫动力学,一种改进方式是使用中红外和太赫兹激光选择性地激发狄拉克/外尔能带上的载流子^[44-48].这种方法不仅能够避免非目标能带的干扰,还能揭示拓扑半金属中特有的超快动力学过程.

4.1 狄拉克半金属

狄拉克半金属具有诸多独特的物理特性,如线性能带色散、显著的贝里曲率、费米能级附近接近零的态密度以及对晶体和时间反演对称性的敏感性,这些特性均与其在亚皮秒时间尺度内的光响应密切相关^[104,107].超快激光能够破坏时间反演或空间反演对称性,从而改变狄拉克半金属态^[111].

在石墨烯薄膜中,粒子数反转的持续时间约为100—200 fs,随后是持续数皮秒的电子-空穴复合过程^[108,112].类似地,在三维狄拉克材料 Cd_3As_2 中^[113-119],光激发后首先是持续400—500 fs的载流子热化过程,主要由电子-声子散射主导的带内弛豫引起.随后是持续数 ps 的电子-空穴复合并伴随光学声子发射的过程.由于相空间散射受到限制,导带中出现了光激发载流子的积累,寿命约为3 ps,从而形成了粒子数反转(population inversion)^[117].对 Cd_3As_2 薄膜使用中红外光子(2 μm ,相当于0.62 eV)探测的超快光谱实验发现^[114],在高能量光子(800 nm)泵浦下,最初的几百飞秒内表现出平坦的响应,表明存在非狄拉克电子的热化过程.而在中红外光的简并测量下,观测到狄拉克费米子的快速热化和电子-空穴复合过程.平台响应之后的弛豫曲线重合,表明使用接近狄拉克锥能量的探测波长能有效追踪其动力学过程^[114].

由于块体样品和纳米片样品掺杂浓度的不同,其瞬态反射信号 $\Delta R/R$ 的符号和幅度表现出显著差异.例如,块体样品掺杂浓度高(费米能级在狄拉克点之上约200 meV),而纳米片掺杂低(约38 meV)^[118].因此,块体样品中涉及的光激发载流子跃迁和弛豫过程还包括非狄拉克能带.如图6(a)所示,在低光激发通量下, Cd_3As_2 呈现负的 $\Delta R/R$ 响应,这主要是由狄拉克带之间的跃迁变化引起的(图6(b)中的棕色箭头)^[120].而在高光激发通量下, $\Delta R/R$ 在初始阶段出现非狄拉克带跃迁导致的增强正响应(图6(b)中的绿色箭头),随着高能载流子弛豫回狄拉克带, $\Delta R/R$ 转变为负响应^[120].

在狄拉克半金属中,相干声子不仅参与粒子数布居反转态下的电子-空穴复合过程,还与超快脉冲激光诱导的拓扑相变密切相关^[121].使用800 nm波长的超快泵浦-探测光谱研究 Cd_3As_2 单晶,发现了由螺旋状Cd空位引发的三种相干光学声子模式之间的拍频现象(图6(c)).随着温度升高,除了中心的 A_{1g} 声子模式外,两侧的螺旋空位声子模式的振幅会迅速衰减,这表明晶格结构随温度演化可能影响 Cd_3As_2 的拓扑性质(图6(d)).

狄拉克半金属具有超高迁移率和零带隙.在 Cd_3As_2 薄膜中,激光诱导的非平衡载流子温度梯度可产生皮秒级热电电流和太赫兹辐射^[119,122].此外,在太赫兹场驱动下, Cd_3As_2 中的狄拉克电子分布被强烈拉伸和非对称化,从而产生高次谐波现象^[123].Zhu等^[124]通过时间分辨光学泵浦-太赫兹谐波产生光谱追踪 Cd_3As_2 薄膜中太赫兹三次谐波的产生过程,发现光激发产生的长寿命粒子数布居反转对此现象有显著贡献(图6(e)).结合理论分析表明,当粒子数布居反转态的寿命大于太赫兹脉冲周期(约2.9 ps)时,太赫兹三倍频生成效率显著提升^[124].

第二类狄拉克半金属具有倾斜的狄拉克锥结构,使得费米能级附近电子和空穴口袋共存,有利于光激发载流子和晶格之间的散射.如图7(a)和图7(b)所示,超快泵浦-探测光谱发现 NiTe_2 中同样存在 A_{1g} 声子辅助的电子-空穴复合过程^[125].该过程的弛豫时间 τ_2 和 A_{1g} 声子的频率以及衰减速率在Lifshitz转变温度 T^* 附近出现非单调变化,揭示了由该相变调控的超快载流子-声子耦合机制.

在第二类狄拉克半金属 PtTe_2 中,除了电子-空穴复合过程外,还发现了面内振动的 E_g 模式和面外振动的 A_{1g} 模式相干声子信号^[126,127].值得注意的是,在 PtTe_2 薄膜中,由于光注入的自旋极化电子与晶格的角动量转移,引发了Te原子面内 E_g 模式的非对称位移,导致其振幅和相位随泵浦光的圆偏振方向变化(图7(c)和图7(d))^[128].在 PtTe_2 薄膜的光学泵浦-太赫兹探测实验中,观察到异常的负太赫兹光电导效应,其起源归因于强电子-声子耦合诱导的小极化子(small polaron)形成^[129].具体而言,光激发后由于强的电子-光学声子耦合发生局域晶格畸变,载流子产生自捕获效应,导致系统的迁移率显著降低,从而抑制了整体电导响应,表现为负的光电导行为.

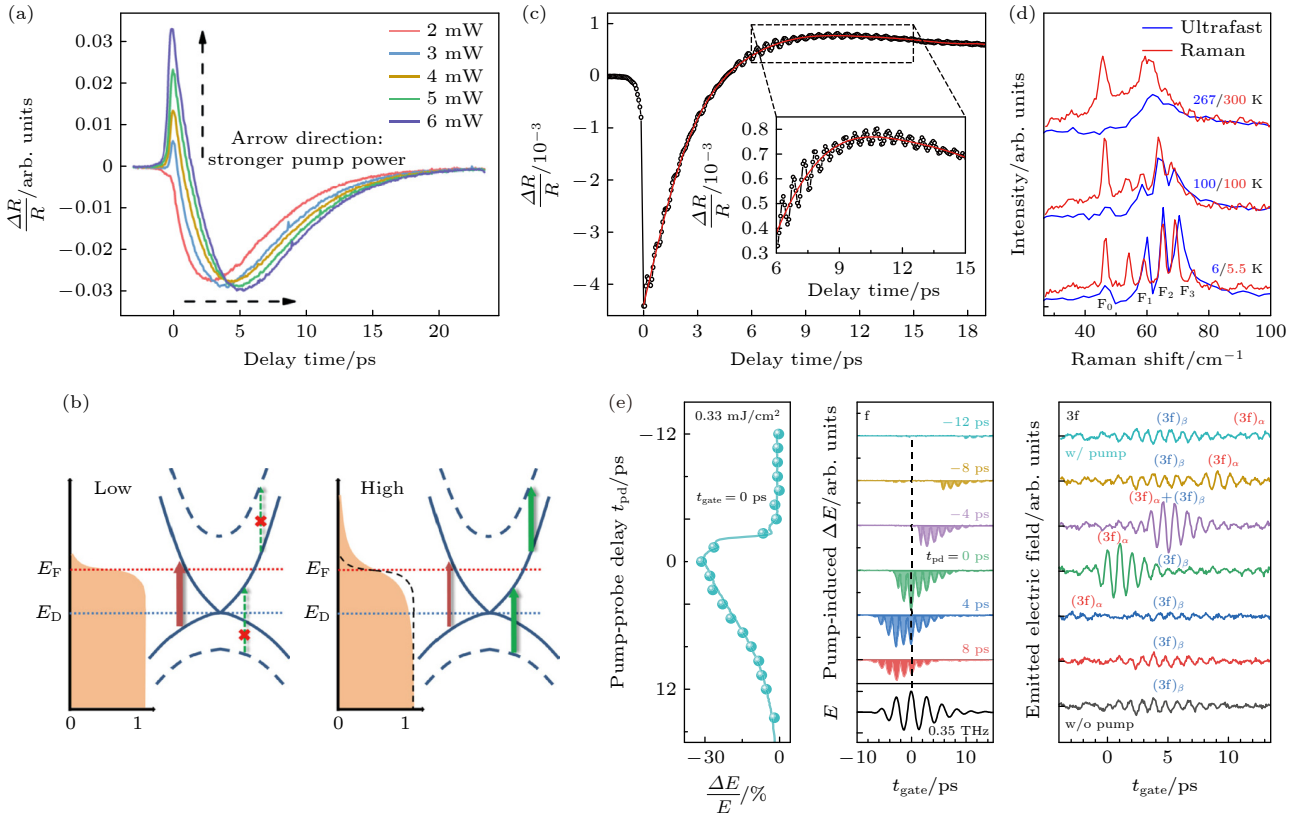


图 6 拓扑半金属 Cd_3As_2 的超快动力学 (a) 800 nm 泵浦-4 μm 探测下, 不同光通量的瞬态反射率变化, 高通量下正响应增强^[120]; (b) 低光通量(左)与高光通量(右)下热化电子的重分布及可能的跃迁通道示意^[120]; (c) 6 K 下 800 nm 泵浦-800 nm 探测的瞬态反射率曲线, 呈现明显振荡信号^[121]; (d) 快速傅里叶变换与拉曼光谱分析得到不同温度下的相干声子模式^[121]; (e) 太赫兹三次谐波强度与光诱导粒子数布居反转的关系^[124]

Fig. 6. Ultrafast dynamics in the topological semimetal Cd_3As_2 : (a) Transient reflectivity under 800 nm pump and 4 μm probe at different fluences, showing enhanced positive response at high fluence^[120]; (b) schematic of thermalized electron redistribution and possible transition channels at low (left) and high (right) fluence^[120]; (c) transient reflectivity at 6 K under 800 nm pump-800 nm probe with pronounced oscillations^[121]; (d) coherent phonon modes at various temperatures from FFT and Raman spectra^[121]; (e) relationship between terahertz third-harmonic generation intensity and photoinduced population inversion^[124].

在其他狄拉克半金属, 如 ZrTe_5 ^[130,131], SrMnSb_2 ^[132] 和 PtSe_2 ^[133], 以及 Kagome 半金属 Fe_3Sn_2 ^[134], GdMn_6Sn_6 ^[135] 和 CsV_3Sb_5 ^[136-139] 等中, 同样存在类似的狄拉克费米子弛豫过程, 并且光激发相干声子模式对拓扑相变有积极的驱动作用. 此外, 在一些磁性狄拉克半金属中, 磁序作为可操控的序参量成为狄拉克点和外尔点转换的开关, 例如 EuAgAs ^[140] 和 MoB_3 ^[141], 相关讨论将在下文进行介绍.

4.2 外尔半金属

与狄拉克半金属类似, 外尔半金属中超快载流子的弛豫也主要由电子-空穴复合过程主导^[105,107]. 然而, 由于外尔费米子具有手性(chirality)自由度, 其非平衡动力学展现出更为丰富的物理图像. 在带内弛豫阶段, 电子-声子散射因外尔点附近极低的态密度而受到显著抑制, 导致部分声子模式寿命显

著延长^[142,143]. 这一特性使得外尔半金属成为研究长寿命非平衡态和相干激发的理想平台.

以 TaAs 为例, 其外尔点附近的能带具有明显的电子-空穴不对称性, 导致光激发后电子与空穴在动量空间中的分布非对称, 从而强烈抑制了电子-空穴复合速率. 超快泵浦-探测光谱实验清晰揭示了这一由能带拓扑结构决定的动力学行为. 如图 8(a) 所示, TaAs 的光激发载流子弛豫表现出明显的探测波长依赖性: 当探测光远离外尔点(525 nm)时, 载流子可通过电子-空穴复合快速弛豫; 而当探测能量接近外尔点(560 nm)时, 复合通道受相空间阻塞限制, 弛豫主要依赖较慢的电子-声子耦合通道, 时间尺度长达 190—250 ps^[143,144]. 类似地, 在 NbP 单晶中, 由于线性吸收系数与外尔节点低态密度的共同作用, 也表现出明显的波长依赖性的色散型响应^[145]. 这些结果表明, 外尔半金属

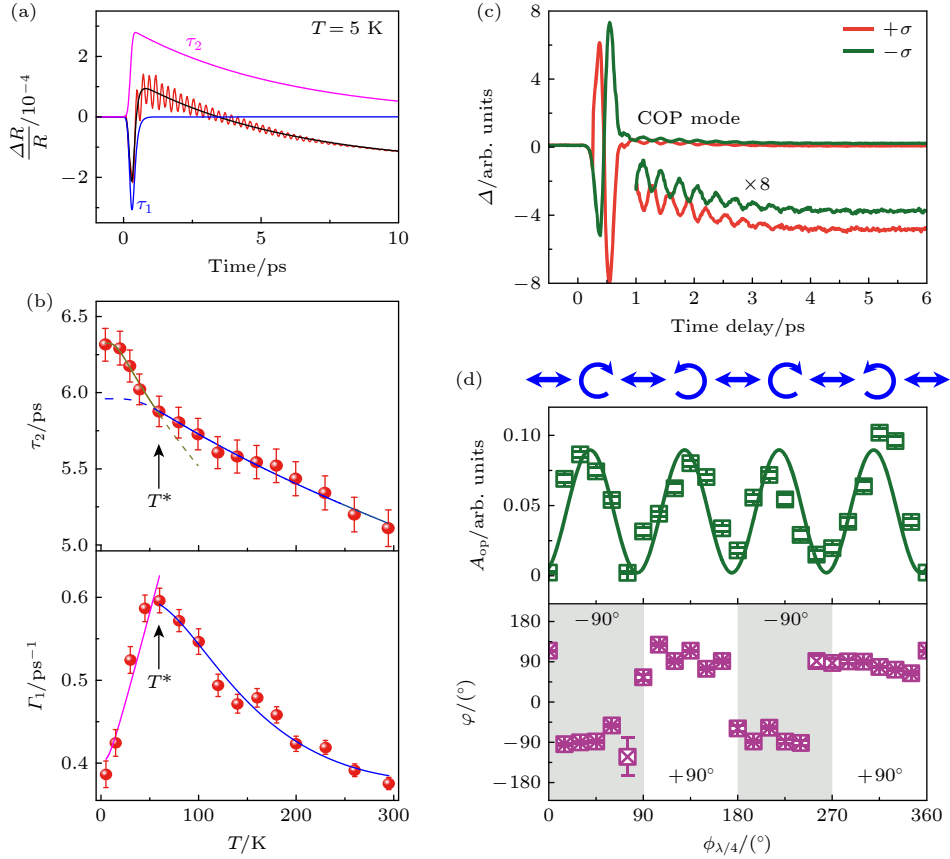


图 7 第二类狄拉克半金属的超快动力学 (a), (b) NiTe₂ 中 800 nm 激光激发下的瞬态反射率变化, 以及电子-空穴复合时间 τ_2 与相干 A_{1g} 声子衰减速率随温度的变化, 在 $T^* = 60$ K 出现突变^[125]; (c), (d) PtTe₂ 薄膜中, 不同圆偏振下的超快差分信号, 相干振荡的振幅与相位随圆偏振方向改变^[128]

Fig. 7. Ultrafast dynamics of Type-II Dirac semimetals: (a), (b) In NiTe₂, transient reflectivity under 800 nm excitation and temperature dependence of electron-hole recombination time τ_2 and the coherent A_{1g} phonon decay rate, with an abrupt change at $T^* = 60$ K^[125]; (c), (d) in PtTe₂ thin films, ultrafast differential signals under different circular polarizations, where the amplitude and phase of coherent oscillations vary with polarization direction^[128].

中可能存在与狄拉克体系类似的粒子数布居反转, 且寿命更长, 为实现拓扑增强的非线性光学效应 (如高次谐波、太赫兹发射) 提供了可能, 值得未来实验进一步验证。

在三维外尔体系中, 圆偏振激光可破坏时间反演对称性, 诱导净手性电荷积累, 即“手性泵浦效应” (chiral pumping effect)^[146]. 当施加平行于太赫兹电场的外磁场时, 这一效应尤为显著. Jadidi 等^[147] 利用太赫兹波 (88.6 μm , 14 meV, 3.4 THz) 的超快泵浦-探测光谱研究 TaAs, 发现在外磁场 \mathbf{B} 平行于太赫兹电场 \mathbf{E} 时, 存在明显的手性电荷泵浦信号. 如图 8(b) 所示, 在无磁场时, 光激发载流子通过电子-声学声子散射进行弛豫, 寿命约为 55 ps; 而施加磁场后, 动量空间中分离的外尔点与手性选择规则共同抑制了复合过程 (图 8(c)), 导致载流子寿命延长至纳秒量级甚至更长^[147].

在第二类外尔半金属中, 例如 WTe₂^[148-152], MoTe₂^[152-154], TaIrTe₄^[155,156] 以及磁性外尔半金属 Mn₃Sn^[157], CeAlSi^[158] 和 Co₃Sn₂S₂^[1,159,160], 其外尔锥高度倾斜, 导致费米面附近电子与空穴口袋共存, 显著增强拓扑响应度, 并对光的轨道角动量表现出特异性敏感, 使这类材料在高速光电探测、自旋光电子学等领域展现出巨大应用潜力。

在 Co₃Sn₂S₂ 中, 时间分辨和自旋分辨的超快光谱观测到和磁序密切相关的外尔点湮灭证据, 并且在自旋极化能隙附近的载流子仍保持外尔费米子的自旋-动量锁定特征, 表现出拓扑驱动的声子瓶颈效应^[160]. 超快磁光克尔光谱同样揭示了磁序与拓扑电子态之间的动态耦合. 如图 9(a) 和图 9(c) 所示, 在铁磁相 ($T < T_C \approx 170$ K) 下, 存在三种典型动力学过程^[1]: ~ 300 fs 的快速退磁 (自旋翻转主导); ~ 6 ps 的慢速退磁 (半金属电子结构

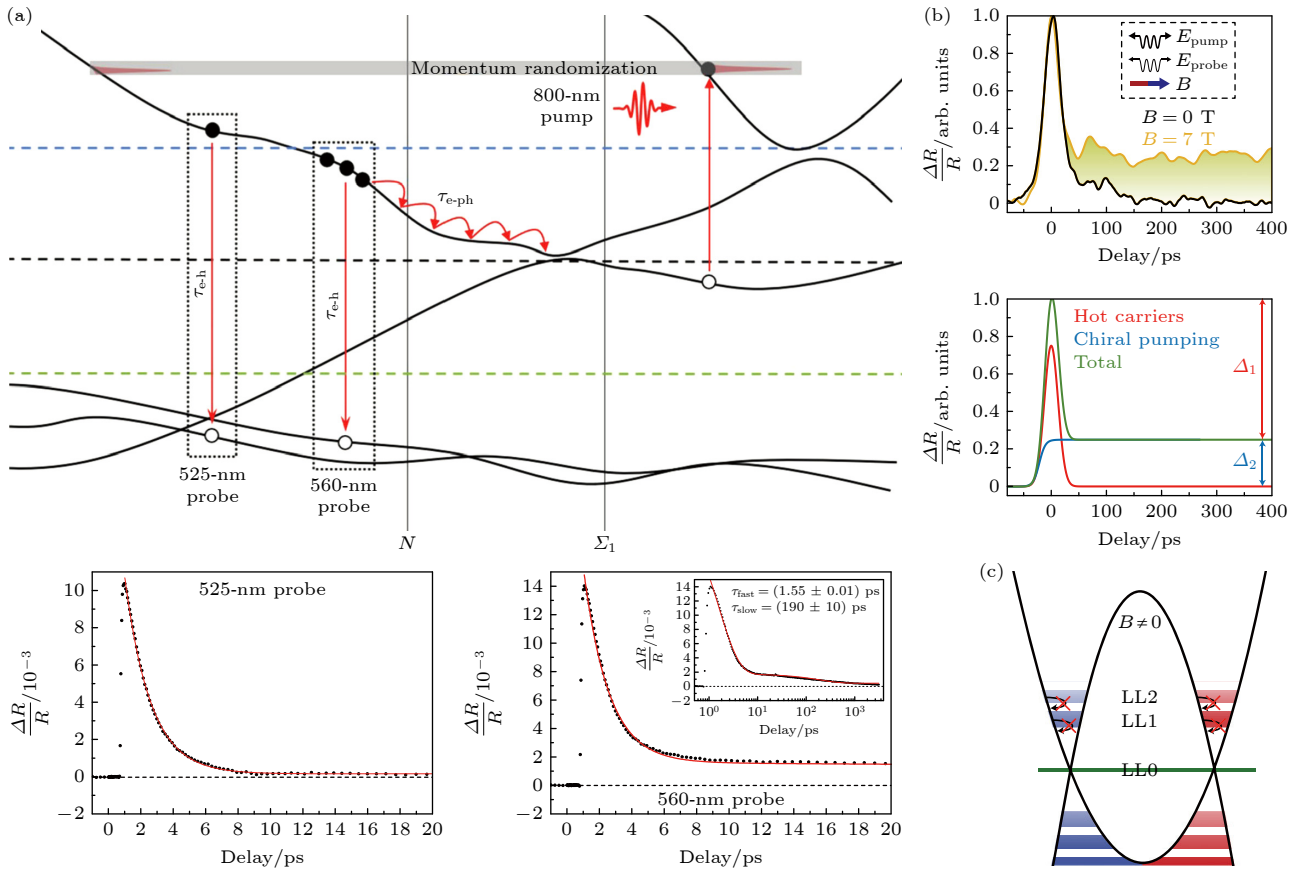


图 8 外尔半金属 TaAs 的超快动力学与手性泵浦效应 (a) 探测波长远离 (525 nm) 和接近 (560 nm) 外尔点时的光激载流子弛豫及对应的瞬态反射率曲线^[143]; (b) 无磁场与外磁场平行太赫兹电场条件下反射太赫兹探测信号的时间演化及模拟结果^[147]; (c) 低朗道能级下载流子-声子散射相空间的强抑制示意图^[147]

Fig. 8. Ultrafast dynamics and chiral pumping effects in the Weyl semimetal TaAs: (a) Carrier relaxation probed at wavelengths away from (525 nm) and near (560 nm) the Weyl points, with corresponding transient reflectivity^[143]; (b) time evolution of reflected terahertz probe signals without a magnetic field and with the magnetic field parallel to the terahertz electric field, along with simulated results^[147]; (c) schematic of strong suppression of phase space for hot carrier-phonon scattering at low Landau levels^[147].

导致); 长达数百皮秒的超快磁化增强 (ultrafast magnetization enhancement) 过程. 随着温度升高, 一对外尔点逐渐靠近并在约 110 K 处湮灭, 形成不断增大的能隙^[160]. 与此同时, 磁化增强效应在该温度附近消失, 慢速退磁过程开始主导^[1]. 当温度超过居里温度 (T_C) 后, 材料失去铁磁性, 不再对超快激光产生磁光响应^[1]. 这一温度依赖性明确表明, 磁化增强源于倾斜外尔能带的自旋滤波效应 (spin-filter effect). 如图 9(d) 所示, 在电子弛豫过程中, 外尔节点的手性选择性允许自旋向上电子更快通过, 形成瞬态极化的电子口袋, 从而增加自旋向上态密度, 导致整体磁矩瞬时增强. 这一现象为实现“光控磁矩”提供了全新机制.

此外, 在 CeAlSi 中, 由于外尔点附近的线性色散, 材料表现出显著的非线性光学二极管效应^[158]. 当沿相反方向传播的超快激光入射时, 所产

生的二次谐波强度相差达 6 倍, 且该非互易响应受磁化方向调控. 这表明外尔半金属不仅可用于高效光电转换, 还可作为实现拓扑非互易光学器件的基础材料.

不同于狄拉克半金属和外尔半金属在动量空间中存在孤立的零维能带交点, 节线型拓扑半金属的导带与价带沿一条闭合曲线连续交叉, 形成受拓扑保护的一维节点线. 这类材料包括 ZrSiS^[161,162], ZrSiTe^[163], ZrSiSe^[164], LaBi^[165] 和 PtSn₄^[166] 等. 超快光谱实验表明, 该类材料光生载流子弛豫行为呈现出类狄拉克费米子的特征. 尤其值得关注的是, 由于较强的电子-声子耦合与相干声子激发, 实验中观察到明显的光诱导拓扑 Lifshitz 转变迹象^[163]. 这些结果凸显了超快激光作为“非热”控制手段在调控拓扑性和探索非平衡量子现象中的巨大潜力.

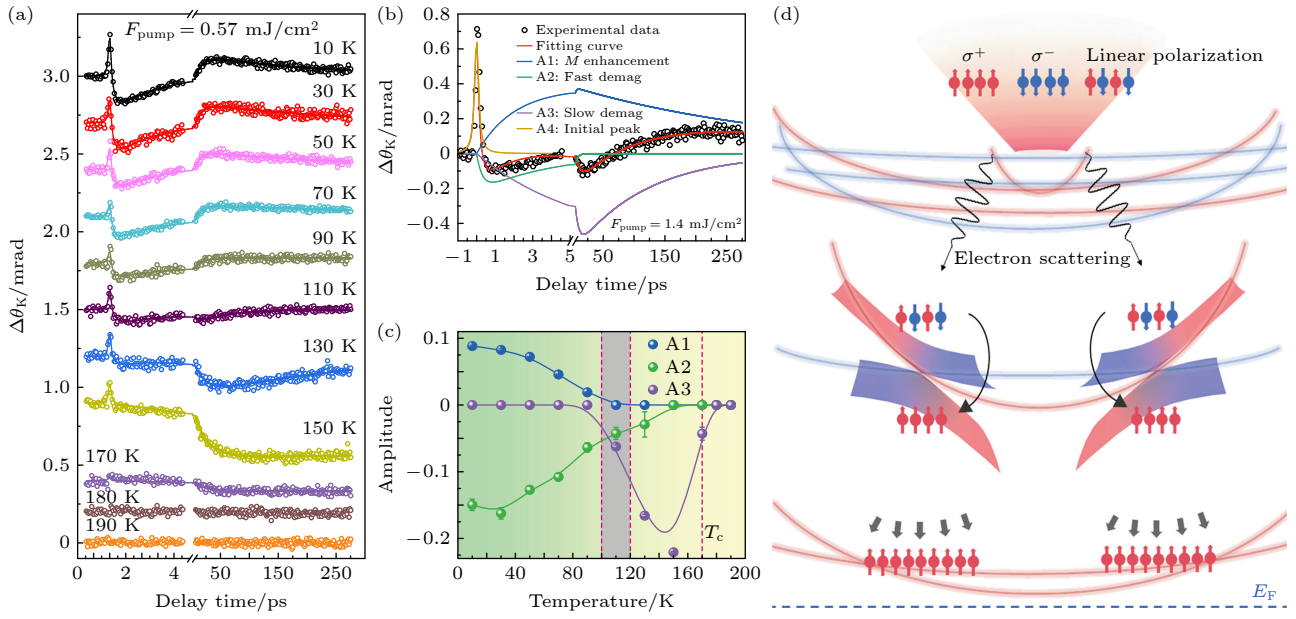


图9 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 中的超快磁化增强^[1] (a) 不同温度下磁光克尔角的时间变化; (b) 指数模型拟合结果; (c) 拟合得到的弛豫振幅随温度的变化; (d) 倾斜外尔能带结构的自旋滤波效应示意图

Fig. 9. Ultrafast magnetization enhancement in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ^[1]: (a) Time evolution of the magneto-optical Kerr angle at different temperatures; (b) fits using an exponential model; (c) temperature dependence of the relaxation amplitude from fits; (d) schematic of the spin-filtering effect in tilted Weyl band structures.

上述研究表明, 尽管狄拉克与外尔半金属在能带结构上具有相似性, 但其超快动力学过程在细节上存在显著差异. 两者在光激发后, 载流子最终均需通过电子-空穴复合回到基态, 但由于外尔体系引入了手性自由度与磁序可调性, 其非平衡演化展现出更丰富的物理内涵, 包括手性泵浦、长寿命载流子、磁化增强和非互易非线性响应等. 这些特性不仅深化了我们对拓扑量子物态非平衡行为的理解, 也为开发基于拓扑半金属的超快光电探测器、手性光源与低功耗自旋器件提供了理论与实验基础.

5 光诱导相变

超快光谱技术不仅能够电荷、自旋与晶格等自由度相互作用的固有时间尺度上探测拓扑材料的非平衡动力学过程, 还可利用强场飞秒激光脉冲主动调控其能带拓扑结构, 实现对量子态的超快“写入”与“擦除”. 例如, 通过光场诱导对称性破缺, 可将受对称性保护的狄拉克节点分裂为一对外尔点, 或在狄拉克点处打开拓扑非平庸能隙, 从而实现从拓扑半金属到外尔半金属、拓扑绝缘体乃至轴子绝缘体等不同拓扑相之间的瞬态切换.

目前, 光诱导拓扑相变的调控途径主要可分为三类: 电子机制、晶格机制和磁序相关机制. 这三

类机制分别对应于光场对电子分布的直接重构、通过相干声子激发实现的晶格结构相干操控, 以及对磁性序参量的超快调制. 脉冲激光可通过其瞬时电场直接作用于电子和自旋自由度, 引发弗洛凯能带工程或非热电子分布; 也可通过共振激发特定声子模式, 诱导晶格发生定向畸变, 从而改变能带拓扑; 此外, 在磁性拓扑材料中, 光激发还可调控磁序的取向或强度, 进而影响拓扑保护态的存续或转变. 下文将结合典型材料体系, 具体阐述这三种调控路径的物理机制与实验进展.

5.1 电子机制

在超快激光作用下, 电子从价带跃迁到导带, 导致费米面附近电子占据数发生非平衡重构. 这种瞬态电子分布的改变不仅影响载流子动力学, 还可通过多体相互作用反馈至能带结构本身, 从而实现拓扑电子态的主动调控. 其中, 最为典型的机制是弗洛凯工程 (Floquet engineering)——利用周期性光场将静态哈密顿量推广至时间维度扩展的“弗洛凯希尔伯特空间”, 在能量空间出现能带结构的周期性复制, 并通过电子与周期势场的相互作用对材料的对称性及拓扑性质进行调控, 实现拓扑相的动态切换.

以拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 为例, 能量低于体带隙的超强中红外激光照射下, 表面态与光场耦合形成弗洛凯-布洛赫能带 (Floquet-Bloch bands)^[167,168]. 理论与实验研究表明, 光子修饰的表面能带在特定动量点的交叉行为高度依赖于泵浦光的偏振态, 其中圆偏振光激发下, 光场打破时间反演对称性, 在狄拉克点处诱导产生额外带隙^[167,168].

进一步地, 理论预测表明, 超快激光还可通过重塑材料的势能面来驱动结构-拓扑协同演化. 例如, 在拓扑晶体绝缘体 SnSe 中, 光激发可瞬时恢复被热扰动破坏的四重旋转对称性 (C_4), 使系统在电子-空穴复合过程中无势垒地弛豫至受该对称性保护的拓扑晶体绝缘体相^[169]. 这种“光致对称性恢复”机制拓展了传统相变路径, 展示了光场不仅可破坏对称性, 亦可重建对称性的双重调控能力.

在拓扑半金属中, 圆偏振光可通过打破时间反演或空间反演对称性, 将简并的狄拉克点退简并为一对手性相反的外尔点. 外尔点的数量、动量位置及其手性电荷可通过激光的偏振、强度与频率进行调控^[146,170-172]. 例如, 在三维狄拉克半金属 Na_3Bi 中, 圆偏振光可诱导有效磁场, 驱动系统在狄拉克半金属、外尔半金属与瞬态拓扑绝缘体之间切换, 展现出丰富的光控拓扑相图^[171]. 理论计算结果表明, 在外尔半金属 TaAs 中, 光激发可在飞秒时间尺度内通过诱导能带结构重整化, 引起外尔节点位置的显著变化^[173].

由于外尔半金属具有手性相反的外尔型电子结构, 其对超短脉冲的二阶非线性响应表现为手性选择性直流光电流. 这种光生电流引起的电子极化不对称性会瞬时破坏系统的时间反演与空间反演对称性, 从而诱导出非热拓扑相变. 研究者利用飞秒激光在 TaAs 中产生了瞬态的位移光电流, 进而在皮秒时间尺度上改变了材料的时间和空间反演对称性, 且没有伴随结构相变, 表明其完全源于电子过程^[174-176]. 此外, 在具有 Te 空位梯度的 PtTe_2 薄膜中, 由于结构中心对称性被缺陷打破, 贝里曲率偶极子驱动的圆偏振光电流被显著增强, 并诱导出螺旋度依赖的太赫兹辐射^[177]. 这一结果不仅展示了光场对拓扑响应的非互易调控能力, 也为实现零磁场自旋极化与拓扑光电探测提供了新思路.

5.2 晶格机制

超快激光可以通过共振特定对称轴或平面上

的声子模式, 引发晶体中原子位置的变化, 进而调控能带结构和拓扑相变 (图 10(a)). 在 ZrSiS 中, 超快激光通过方向性泵浦 A_{1g}^2 声子模式, 实现了相位从 0 到 π 的调控, 导致狄拉克能带发生亚皮秒量级的能量移动, 从而引发 Lifshitz 转变^[162]. 类似地, 在狄拉克半金属 SrMnSb_2 中, 理论计算表明, A_{1g} 模式的原子位移能够周期性地开启和关闭狄拉克点处的能隙^[132]. 在外尔半金属 $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ 中, 脉冲激光激发实现了极化子和电荷密度波的非热熔化, 从而连续调控了从极化子态到轴子绝缘体态, 再到隐藏外尔相的相变^[156].

在狄拉克半金属 ZrTe_5 中, 通过 800 nm 光子的激发, 可以诱导 Te 原子沿 c 轴方向的位移, 从而实现从拓扑绝缘体到狄拉克半金属的瞬态转变^[178]. 当使用近单周期太赫兹泵浦脉冲光激发拉曼活性 A_{1g} 模式声子时, 在超过临界阈值时出现了长寿命的亚稳态. 理论计算模拟 A_{1g} 模式激发后的原子位移变化发现, ZrTe_5 单晶会经历从强拓扑绝缘体到狄拉克半金属再到弱拓扑绝缘态的转变 (图 10(b))^[130]. 此外, 超快光泵浦-太赫兹探测光谱还发现, 当 B_{1u} 声子模式被相干激发后, ZrTe_5 可以从狄拉克半金属转变为瞬态外尔半金属^[131].

光诱导晶格畸变的另一种方式是激光电场直接作用于材料的自由能形貌 (free-energy landscape). 光电场将电子从价带顶移开, 形成层间反键轨道, 从而改变层间的耦合强度. 层间剪切运动使材料达到一个新的平衡位置, 从而实现拓扑相变. 例如, 在 TaAs ^[173,179], NbIrTe_4 ^[180], WTe_2 ^[148,150,181,182] 和 MoTe_2 ^[3,153,154,183] 等材料中, 均观察到了类似的效应. 其中, WTe_2 和 MoTe_2 可以通过太赫兹光脉冲诱导的层间剪切应变, 从 T_d 相外尔半金属态转变为 $1T'$ 相平庸半金属. 在特定光子能量下, WTe_2 还可以通过轨道选择性激发电子来实现对外尔点的调控^[150].

5.3 磁序相关机制

在磁性拓扑材料中, 与拓扑态密切相关的对称性由晶格和磁性结构共同决定. 光诱导的晶格畸变和瞬态磁矩均可实现对拓扑相变的调控. 通过超快激光脉冲, 可以精确操控这些对称性, 从而实现从反铁磁到铁磁态的转换, 或从拓扑绝缘体到外尔半金属等不同拓扑相之间的动态切换.

在二维反铁磁拓扑绝缘体 MnBi_2Te_4 和 MnSb_2Te_4 中, 理论计算发现剪切和呼吸拉曼模式的激发

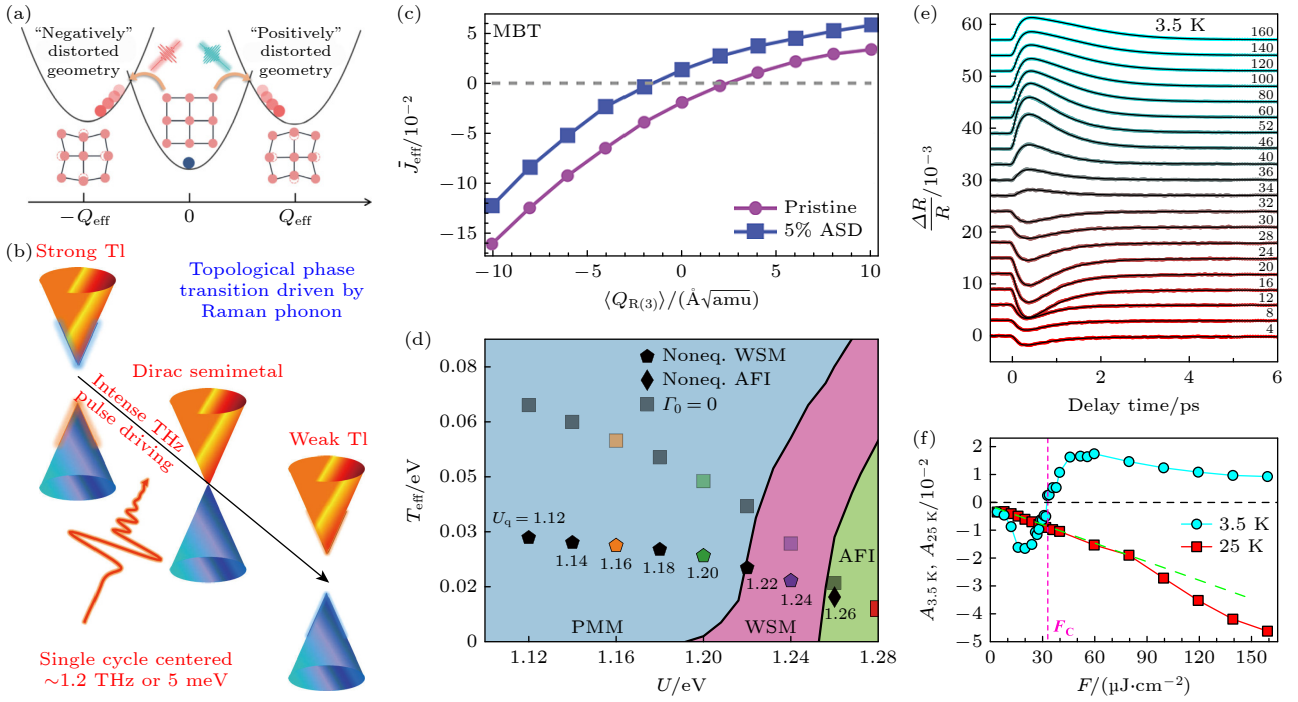


图 10 晶格机制与磁序相关的拓扑相变 (a) 相干声子位移激发实现光诱导晶格几何的相干控制示意^[162]; (b) 太赫兹相干激发驱动 ZrTe₅ 中狄拉克半金属拓扑态切换示意图^[130]; (c) MnBi₂Te₄ 中有效平均层间交换相互作用随平均呼吸模式 $\langle Q_{R(3)} \rangle$ 的变化, ASD 代表反位缺陷^[92]; (d) 平衡相图随温度与哈伯德 U 值的变化^[184]; (e), (f) 低温下 EuAgAs 的瞬态反射率表现出光通量依赖行为^[140]

Fig. 10. Lattice and magnetic-order-related topological phase transitions: (a) Schematic of coherent control of photoinduced lattice geometry via coherent phonon displacement^[162]; (b) schematic of terahertz coherent excitation driving topological state switching in ZrTe₅^[130]; (c) effective average interlayer exchange interaction in MnBi₂Te₄ as a function of the average breathing mode $\langle Q_{R(3)} \rangle$, with ASD denoting anti-site defects^[92]; (d) equilibrium phase diagram as a function of temperature and Hubbard U ^[184]; (e), (f) fluence-dependent ultrafast reflectivity of EuAgAs at low temperature^[140].

可导致层间交换相互作用符号的变化 (图 10(c)), 从而使反铁磁序向铁磁序转变, 有望实现超快激光对拓扑相变的调控^[92]. 然而, 目前对 MnBi₂Te₄ 薄层的超快实验均在外加磁场下进行. 超快磁光克尔光谱和反射率光谱已被证明能准确追踪磁性状态的转变, 并发现了与倾斜反铁磁序相关的相干磁振子模式^[2]. 尽管这种转变是由外磁场调节的, 但未来仍需要更多超快光谱实验来研究与磁性序密切相关的超快相变过程.

在反铁磁拓扑材料中, 光激发电子的屏蔽作用会降低磁化强度, 由磁空间对称性保护的拓扑态随之改变, 使材料从磁性狄拉克半金属态退简并为外尔半金属或平庸拓扑态. 通过超快激光脉冲改变有效电子-电子相互作用, 可动态调制哈伯德 U 值, 从而实现光诱导拓扑结构变化. 如图 10(d) 所示, 理论计算发现, 激光或淬火诱导的激发会导致磁序的动态减少, 进而使焦绿石铋酸盐实现从反铁磁绝缘体到外尔半金属的相变^[184]. 在单层 MoB₃ 中, 持续数百飞秒的超快退磁过程能够触发从狄拉克节

点线半金属态到金属态的转变^[141]. 这种超快退磁机制不仅揭示了光场对磁性序参量的瞬态调控能力, 还为开发新型自旋电子器件提供了新思路.

除了超快退磁过程, 在反铁磁狄拉克半金属中, 奈尔 (Néel) 矢量的超快旋转可控制狄拉克点处能隙的大小. 当磁矩极化时, 将引发拓扑相变^[140,185]. Liu 等^[140] 在 EuAgAs 材料中发现了可能的由超快激光实现的亚皮秒级拓扑相变. 该相变与材料的磁性结构密切相关. 超快反射率信号在 T_N 处发生明显变化, 表明反铁磁序对光激发载流子弛豫有显著影响 (图 10(e) 和图 10(f)). 在低温反铁磁相下, 超快信号表现出明显的光通量依赖行为. 在高泵浦光通量下, EuAgAs 从反铁磁狄拉克半金属态转变为可能的瞬态外尔半金属态.

6 总结和展望

超快光谱技术凭借飞秒至纳秒的高时间分辨率和宽波长可调性, 为研究拓扑材料中载流子、声

子与自旋等自由度的非平衡动力学过程提供了独特手段. 现有研究已在拓扑绝缘体、拓扑半金属及磁性拓扑材料中取得重要进展, 深入揭示了表面态-体态相互作用、自旋极化动力学、相干声子与磁振子激发等关键现象, 并总结出光诱导拓扑相变的三类核心机制: 电子分布重构驱动的电子机制、相干晶格畸变驱动的晶格机制, 以及磁序调控驱动的磁序相关机制. 这些成果不仅加深了对拓扑量子态非平衡行为的理解, 也为光控拓扑相变及其器件化应用奠定了基础.

随着超快光谱技术在拓扑材料研究中的不断深入, 同时也面临着新的挑战 and 机遇. 当前技术存在动量分辨率不足和泵浦波长及强度调节范围有限的问题. 为解决这些问题并推动拓扑材料研究的进一步发展, 未来的工作需关注以下方向: 1) 多维谱学联合表征——结合时间分辨角分辨光电子能谱、超快 X 射线散射、太赫兹时域光谱以及原位高压超快动力学测量技术^[186,187]等手段, 实现对电子、声子、自旋等多自由度的协同追踪; 2) 强场与低温条件下的非线性动力学——探索高次谐波、手性泵浦效应等极端条件下的拓扑响应; 3) 可控材料体系设计——通过掺杂、应变、层数调节或异质结构构筑, 实现对拓扑能带与相变通道的可编程调控; 4) 理论模拟与实验的深度结合——发展多体非平衡理论与第一性原理动力学计算, 解释并预测光控拓扑态的新现象. 通过上述方向的深入研究, 有望实现对拓扑量子态的精准、可逆和高速操控, 推动其在高速低功耗信息处理、自旋电子学以及量子计算等领域的实际应用.

孟建桥, 2004 年湖南师范大学学士, 2009 年获得中国科学院物理研究所博士学位. 2009 年—2011 年在加州大学圣克鲁兹分校, 2011 年—2013 年在洛斯阿拉莫斯国家实验室从事博士后研究. 2014 年回国加入中南大学, 任特聘教授, 现任中南大学先进材料超微结构与超快过程研究所所长. 长期从事高温超导体、重费米子超导体、拓扑量子材料等强关联体系的电子结构与超快动力学研究. 在 *Nature*, *Phys. Rev. Lett.*, *Phys. Rev. B* 等国际知名期刊发表学术论文 80 余篇. *Phys. Rev. Lett.*, *Nat. Phys.*, *Nat. Commun.*, *Sci. Adv.*, *J. Am. Chem. Soc.* 等杂志审稿人.

参考文献

- [1] Lu X, Lin Z, Pi H, Zhang T, Li G, Gong Y, Yan Y, Ruan X, Li Y, Zhang H, Li L, He L, Wu J, Zhang R, Weng H, Zeng C, Xu Y 2024 *Nat. Commun.* **15** 2410
- [2] Bartram F M, Li M, Liu L, Xu Z, Wang Y, Che M, Li H, Wu Y, Xu Y, Zhang J, Yang S, Yang L 2023 *Sci. Bull.* **68** 2734
- [3] Ning H, Mehio O, Lian C, Li X, Zoghlin E, Zhou P, Cheng B, Wilson S D, Wong B M, Hsieh D 2022 *Phys. Rev. B* **106** 205118
- [4] Mitra S, Avazpour L, Knezevic I 2025 *J. Phys.-Condens. Matter* **37** 133005
- [5] Dong T, Zhang S J, Wang N L 2023 *Adv. Mater.* **35** 2110068
- [6] de la Torre A, Kennes D M, Claassen M, Gerber S, McIver J W, Sentef M A 2021 *Rev. Mod. Phys.* **93** 041002
- [7] Zhao J, Bragas A V, Lockwood D J, Merlin R 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107203
- [8] Qi J B 2021 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **51** 41 (in Chinese) [齐静波 2021 中国科学: 物理学 力学 天文学 **51** 41]
- [9] Wu Q Y, Meng J Q 2023 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **53** 127408 (in Chinese) [吴旗帜, 孟建桥 2023 中国科学: 物理学 力学 天文学 **53** 127408]
- [10] Hasaien J, Wu Y, Shi M, Zhai Y, Wu Q, Liu Z, Zhou Y, Chen X, Zhao J 2025 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **122** e2406464122
- [11] Zhang C, Wu Q Y, Hong W S, Liu H, Zhu S X, Song J J, Zhao Y Z, Wu F Y, Liu Z T, Liu S Y, Yuan Y H, Huang H, He J, Li S L, Liu H Y, Duan Y X, Luo H Q, Meng J Q 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 237411
- [12] Sun C K, Vall é e F, Acioli L H, Ippen E P, Fujimoto J G 1994 *Phys. Rev. B* **50** 15337
- [13] Heilpern T, Manjare M, Govorov A O, Wiederrecht G P, Gray S K, Harutyunyan H 2018 *Nat. Commun.* **9** 1853
- [14] Zhao J M 2011 *Physics* **40** 184 (in Chinese) [赵继民 2011 物理 **40** 184]
- [15] Shen Y R, Bloembergen N 1964 *Phys. Rev.* **137** A1787
- [16] Zeiger H J, Vidal J, Cheng T K, Ippen E P, Dresselhaus G, Dresselhaus M S 1992 *Phys. Rev. B* **45** 768
- [17] Zhai Y, Gong P, Hasaien J, Zhou F, Zhao J 2024 *Prog. Surf. Sci.* **99** 100761
- [18] Lim D, Averitt R D, Demsar J, Taylor A J, Hur N, Cheong S W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4800
- [19] Gusev V, Picart P, Mounier D, Breteau J M 2002 *Opt. Commun.* **204** 229
- [20] Parpiiev T, Hillion A, Vlasov V, Gusev V, Dumesnil K, Hauet T, Andrieu S, Anane A, Pezeril T 2021 *Phys. Rev. B* **104** 224426
- [21] Sundaram S K, Mazur E 2002 *Nat. Mater.* **1** 217
- [22] Zhang Y, Dai J, Zhong X, Zhang D, Zhong G, Li J 2021 *Adv. Sci.* **8** 2102488
- [23] Allen P B 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 1460
- [24] Beaupaire E, Merle J C, Daunois A, Bigot J Y 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4250
- [25] Tengdin P, You W, Chen C, Shi X, Zusin D, Zhang Y, Gentry C, Blonsky A, Keller M, Oppeneer P M, Kapteyn H C, Tao Z, Murnane M M 2018 *Sci. Adv.* **4** eaap9744
- [26] Wang M C, Qiao S, Jiang Z, Luo S N, Qi J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 036601
- [27] Hsieh D, Mahmood F, McIver J W, Gardner D R, Lee Y S, Gedik N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 077401
- [28] Nowakowski P J, Woods D A, Bain C D, Verlet J R R 2015 *J. Chem. Phys.* **142** 084201
- [29] Boschini F, Zonno M, Damascelli A 2024 *Rev. Mod. Phys.* **96** 015003
- [30] Wang H T, Zhao H H, Wen L G, Wu X J, Nie T X, Zhao W

- S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 200704 (in Chinese) [王航天, 赵海慧, 温良恭, 吴晓君, 聂天晓, 赵巍胜 2020 物理学报 **69** 200704]
- [31] Fresch E, Camargo F V A, Shen Q, Bellora C C, Pullerits T, Engel G S, Cerullo G, Collini E 2023 *Nat. Rev. Methods Primers* **3** 84
- [32] Mitrano M, Wang Y 2020 *Commun. Phys.* **3** 184
- [33] Chen H J, Wu K H, Luo C W, Uen T M, Juang J Y, Lin J Y, Kobayashi T, Yang H D, Sankar R, Chou F C, Berger H, Liu J M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 121912
- [34] Hu J, Igarashi K, Sasagawa T, Nakamura K G, Misochko O V 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 031901
- [35] Qi J, Chen X, Yu W, Cadden-Zimansky P, Smirnov D, Tolks N H, Miotkowski I, Cao H, Chen Y P, Wu Y, Qiao S, Jiang Z 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 182102
- [36] Kumar N, Ruzicka B A, Butch N P, Syers P, Kirshenbaum K, Paglione J, Zhao H 2011 *Phys. Rev. B* **83** 235306
- [37] Lai Y, Chen H, Wu K, Liu J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 232110
- [38] Sobota J A, Yang S, Analytis J G, Chen Y L, Fisher I R, Kirchmann P S, Shen Z X 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 117403
- [39] Wang Y H, Hsieh D, Sie E J, Steinberg H, Gardner D R, Lee Y S, Jarillo-Herrero P, Gedik N 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 127401
- [40] Cheng L, La-o-vorakiat C, Tang C S, Nair S K, Xia B, Wang L, Zhu J, Chia E E M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 211906
- [41] Pan Z H, Fedorov A V, Gardner D, Lee Y S, Chu S, Valla T 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 187001
- [42] Hatch R C, Bianchi M, Guan D, Bao S, Mi J, Iversen B B, Nilsson L, Hornekær L, Hofmann P 2011 *Phys. Rev. B* **83** 241303(R)
- [43] Zhu X, Santos L, Howard C, Sankar R, Chou F C, Chamon C, El-Batanouny M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 185501
- [44] Luo L, Yang X, Liu X, Liu Z, Vaswani C, Cheng D, Mootz M, Zhao X, Yao Y, Wang C Z, Ho K M, Perakis I E, Dobrowolska M, Furdyna J K, Wang J 2019 *Nat. Commun.* **10** 607
- [45] Valdés Aguilar R, Qi J, Brahlek M, Bansal N, Azad A, Bowlan J, Oh S, Taylor A J, Prasankumar R P, Yarotski D A 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 011901
- [46] Lee B, In C, Moon J, Kim T H, Oh S, Noh T W, Choi H 2022 *Phys. Rev. B* **105** 045307
- [47] Iyer V, Chen Y P, Xu X 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 026807
- [48] Reinhofer C, Mukai Y, Germanskiy S, Bliesener A, Lippertz G, Uday A, Taskin A A, Ando Y, Wang Z, van Loosdrecht P H M 2020 *Phys. Rev. Mater.* **4** 124201
- [49] Glinka Y D, Babakiray S, Johnson T A, Bristow A D, Holcomb M B, Lederman D 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 151903
- [50] Glinka Y D, Babakiray S, Johnson T A, Holcomb M B, Lederman D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 171905
- [51] Jnawali G, Linser S, Shojaei I A, Pournia S, Jackson H E, Smith L M, Need R F, Wilson S D 2018 *Nano Lett.* **18** 5875
- [52] Sim S, Brahlek M, Koirala N, Cha S, Oh S, Choi H 2014 *Phys. Rev. B* **89** 165137
- [53] Hsieh D, McIver J W, Torchinsky D H, Gardner D R, Lee Y S, Gedik N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 057401
- [54] Liu X, Sinova J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 166801
- [55] Xiang T, Cheng L, Qi J B 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 227202 (in Chinese) [向天, 程亮, 齐静波 2019 物理学报 **68** 227202]
- [56] Wu A Q, Xu X, Venkatasubramanian R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 011108
- [57] Boschini F, Mansurova M, Mussler G, Kampmeier J, Grützmacher D, Braum L, Katmis F, Moodera J S, Dallera C, Carpenne E, Franz C, Czerner M, Heiliger C, Kampfrath T, Münzenberg M 2015 *Sci. Rep.* **5** 15304
- [58] Pandey A, Sharma A, Vashistha N, Kumar S, Yadav R, Kaur M, Kumar M, Husale S 2022 *Opt. Mater.* **128** 112294
- [59] Mithun K P, Kumar A, Kundu S, Ravishankar N, Sood A K 2022 *Phys. Rev. B* **105** 144302
- [60] Onishi Y, Ren Z, Segawa K, Kaszub W, Lorenc M, Ando Y, Tanaka K 2015 *Phys. Rev. B* **91** 085306
- [61] Choi Y G, Zhung C J, Park S, Park J, Kim J S, Kim S, Park J, Lee J S 2018 *Phys. Rev. B* **97** 075307
- [62] Kovalev S, Tielrooij K J, Deinert J C, Ilyakov I, Awari N, Chen M, Ponomaryov A, Bawatna M, de Oliveira T V A G, Eng L M, Kuznetsov K A, Safronenkov D A, Kitaeva G K, Kuznetsov P I, Hafez H A, Turchinovich D, Gensch M 2021 *npj Quantum Mater.* **6** 84
- [63] Mukhopadhyay U, Chaudhuri D, Sarkar J, Singh S, Gopal R K, Tammu S, Upadhyay P C, Mitra C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 241106
- [64] Li S, Huang H, Zhu W, Wang W, Chen K, Yao D, Wang Y, Lai T, Wu Y, Gan F 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 053523
- [65] Li Y, Stoica V A, Endicott L, Wang G, Uher C, Clarke R 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 171908
- [66] Bragaglia V, Ramsteiner M, Schick D, Boschker J E, Mitzner R, Calarco R, Holldack K 2020 *Sci. Rep.* **10** 12962
- [67] Xu J, Phelan W A, Chien C 2019 *Nano Lett.* **19** 8250
- [68] He K, Wang Y, Xue Q 2018 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **9** 329
- [69] Qiu G, Yang H, Chong S K, Cheng Y, Tai L, Wang K L 2023 *Nanomaterials* **13** 2655
- [70] Tokura Y, Yasuda K, Tsukazaki A 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 126
- [71] Chang C, Zhang J, Feng X, Shen J, Zhang Z, Guo M, Li K, Ou Y, Wei P, Wang L, Ji Z, Feng Y, Ji S, Chen X, Jia J, Dai X, Fang Z, Zhang S, He K, Wang Y, Lu L, Ma X, Xue Q 2013 *Science* **340** 167
- [72] Glinka Y D, Babakiray S, Holcomb M B, Lederman D 2016 *J. Phys.-Condes. Matter* **28** 165601
- [73] Sharma P, Sharma R, Pandey A, Husale S, Narayanan T N, Kumar M 2023 *J. Phys. Chem. C* **127** 5958
- [74] Rongione E, Fragkos S, Baringthon L, Hawecker J, Xenogiannopoulou E, Tsipas P, Song C, Mićica M, Mangeney J, Tignon J, Boulier T, Reyren N, Lebrun R, George J M, Le Fèvre P, Dhillon S, Dimoulas A, Jaffrès H 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102061
- [75] Cheng Y, Zhou F, Teng J, Li P, Jiang L, Gong P, Li Y, Wu X, Kärtner F X, Zhao J 2025 *Nat. Commun.* **16** 5656
- [76] Mukhopadhyay S, Pal P K, Manna S, Mitra C, Barman A 2024 *Phys. Rev. B* **109** 024437
- [77] Li N, Sun Y, Sun R, Yang X, Zhang W, Xie Z, Liu J, Li Y, Li Y, Gong Z, Zhang X, He W, Cheng Z 2022 *Phys. Rev. B* **105** 144415
- [78] Liu J, Xue H, Deng Z, Yang Q, Li X, Bai X, Yang X, Yang P, Gao Y, He W, Zhang X, Cheng Z 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 236204
- [79] Liu P, Eckberg C, Pan L, Zhang P, Wang K L, Lüpke G 2022 *Sci. Rep.* **12** 12117
- [80] Deng Y, Yu Y, Shi M Z, Guo Z, Xu Z, Wang J, Chen X H, Zhang Y 2020 *Science* **367** 895
- [81] Liu C, Wang Y, Li H, Wu Y, Li Y, Li J, He K, Xu Y, Zhang J, Wang Y 2020 *Nat. Mater.* **19** 522
- [82] Zhang D, Shi M, Zhu T, Xing D, Zhang H, Wang J 2019

- Phys. Rev. Lett.* **122** 206401
- [83] Pancholi A, Kumar A, Roychowdhury S 2025 *Small* **21** 2411464
- [84] Lian Z, Wang Y, Wang Y, Dong W, Feng Y, Dong Z, Ma M, Yang S, Xu L, Li Y, Fu B, Li Y, Jiang W, Xu Y, Liu C, Zhang J, Wang Y 2025 *Nature* **641** 70
- [85] Qiu J, Ghosh B, Schütte-Engel J, et al. 2025 *Nature* **641** 62
- [86] Otrokov M M, Klimovskikh I I, Bentmann H, et al. 2019 *Nature* **576** 416
- [87] Hao Y, Liu P, Feng Y, Ma X, Schwier E F, Arita M, Kumar S, Hu C, Lu R E, Zeng M, Wang Y, Hao Z, Sun H, Zhang K, Mei J, Ni N, Wu L, Shimada K, Chen C, Liu Q, Liu C 2019 *Phys. Rev. X* **9** 041038
- [88] Cheng L, Xiang T, Qi J 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 023073
- [89] Padmanabhan H, Poore M, Kim P K, Koocher N Z, Stoica V A, Puggioni D, Hugo Wang H, Shen X, Reid A H, Gu M, Wetherington M, Lee S H, Schaller R D, Mao Z, Lindenberg A M, Wang X, Rondinelli J M, Averitt R D, Gopalan V 2022 *Nat. Commun.* **13** 1929
- [90] Hu L L, Yang M, Wu Y L, Wu Q, Zhao H, Sun F, Wang W, He R, He S L, Zhang H, Huang R J, Li L F, Shi Y G, Zhao J 2019 *Phys. Rev. B* **99** 094307
- [91] Padmanabhan H, Stoica V A, Kim P K, Poore M, Yang T, Shen X, Reid A H, Lin M F, Park S, Yang J, Wang H H, Koocher N Z, Puggioni D, Georgescu A B, Min L, Lee S H, Mao Z, Rondinelli J M, Lindenberg A M, Chen L Q, Wang X, Averitt R D, Freeland J W, Gopalan V 2022 *Adv. Mater.* **34** 2202841
- [92] Rodriguez-Vega M, Lin Z, Leonardo A, Ernst A, Vergniory M G, Fiete G A 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 4152
- [93] Bartram F M, Leng Y, Wang Y, Liu L, Chen X, Peng H, Li H, Yu P, Wu Y, Lin M, Zhang J, Tan P, Yang L 2022 *npj Quantum Mater.* **7** 1
- [94] Fonseca J, Diederich G M, Ovchinnikov D, Yan J, Xiao D, Xu X 2024 *Nano Lett.* **24** 10562
- [95] Xu Y, Song Z, Wang Z, Weng H, Dai X 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 256402
- [96] Sato T, Wang Z, Takane D, Souma S, Cui C, Li Y, Nakayama K, Kawakami T, Kubota Y, Cacho C, Kim T K, Arab A, Strocov V N, Yao Y, Takahashi T 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 033342
- [97] Liu H, Wu Q Y, Zhang C, Pang J, Chen B, Song J J, Duan Y X, Yuan Y H, Liu H Y, Shu C C, Xu Y F, Shi Y G, Meng J Q 2024 *Phys. Rev. B* **110** 195104
- [98] Wu Q, Hu T, Wu D, Li R, Yue L, Zhang S, Xu S, Liu Q, Dong T, Wang N L 2023 *Phys. Rev. B* **107** 174411
- [99] Fu B B, Yi C J, Zhang T T, Caputo M, Ma J Z, Gao X, Lv B Q, Kong L Y, Huang Y B, Richard P, Shi M, Strocov V N, Fang C, Weng H M, Shi Y G, Qian T, Ding H 2019 *Sci. Adv.* **5** eaau6459
- [100] Feng X, Yue C, Song Z, Wu Q, Wen B 2018 *Phys. Rev. Mater.* **2** 014202
- [101] Fang C, Weng H, Dai X, Fang Z 2016 *Chin. Phys. B* **25** 117106
- [102] Armitage N P, Mele E J, Vishwanath A 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015001
- [103] Wang S, Lin B, Wang A, Yu D, Liao Z 2017 *Adv. Phys.* **X 2** 518
- [104] Wu L, Patankar S, Morimoto T, Nair N L, Thewalt E, Little A, Analytis J G, Moore J E, Orenstein J 2017 *Nat. Phys.* **13** 350
- [105] Weber C P, Berggren B S, Masten M G, Ogloza T C, Deckoff-Jones S, Madéo J, Man M K L, Dani K M, Zhao L, Chen G, Liu J, Mao Z, Schoop L M, Lotsch B V, Parkin S S P, Ali M 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 223102
- [106] Hao W J, Zhai Y N, Dai Z J, Zhang H, Zhao J M 2024 *Chin. Sci. Bull.* **69** 3177 (in Chinese) [郝文杰, 翟燕妮, 代卓君, 张红, 赵继民 2024 *科学通报* **69** 3177]
- [107] Weber C P 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 070901
- [108] Gierz I, Mitrano M, Petersen J C, Cacho C, Edmond Turcu I C, Springate E, Stöhr A, Köhler A, Starke U, Cavalleri A 2015 *J. Phys. Condes. Matter* **27** 164204
- [109] Triola C, Pertsova A, Markiewicz R S, Balatsky A V 2017 *Phys. Rev. B* **95** 205410
- [110] Pertsova A, Balatsky A V 2020 *Ann. Phys.* **532** 1900549
- [111] Ong N P, Liang S 2021 *Nat. Rev. Phys.* **3** 394
- [112] Breusing M, Ropers C, Elsaesser T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 086809
- [113] Weber C P, Arushanov E, Berggren B S, Hosseini T, Kouklin N, Nateprov A 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 231904
- [114] Zhu C, Yuan X, Xiu F, Zhang C, Xu Y, Zhang R, Shi Y, Wang F 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 091101
- [115] Kubakaddi S S, Biswas T 2018 *J. Phys. Condes. Matter* **30** 265303
- [116] Liang G, Zhai G, Ma J, Wang H, Zhao J, Wu X, Zhang X 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 8783
- [117] Bao C, Li Q, Xu S, Zhou S, Zeng X, Zhong H, Gao Q, Luo L, Sun D, Xia T, Zhou S 2022 *Nano Lett.* **22** 1138
- [118] Lu W, Ge S, Liu X, Lu H, Li C, Lai J, Zhao C, Liao Z, Jia S, Sun D 2017 *Phys. Rev. B* **95** 024303
- [119] Zhang W, Yang Y, Suo P, Zhao W, Guo J, Lu Q, Lin X, Jin Z, Wang L, Chen G, Xiu F, Liu W, Zhang C, Ma G 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 221102
- [120] Zhai G, Ma C, Xiang J, Ye J, Li T, Li Y, Sun P, Chen G, Wu X, Zhang X 2020 *Phys. Rev. B* **101** 174310
- [121] Sun F, Wu Q, Wu Y L, Zhao H, Yi C J, Tian Y C, Liu H W, Shi Y G, Ding H, Dai X, Richard P, Zhao J 2017 *Phys. Rev. B* **95** 235108
- [122] Lu W, Fan Z, Yang Y, Ma J, Lai J, Song X, Zhuo X, Xu Z, Liu J, Hu X, Zhou S, Xiu F, Cheng J, Sun D 2022 *Nat. Commun.* **13** 1623
- [123] Kovalev S, Dantas R M A, Germanskiy S, Deinert J, Green B, Ilyakov I, Awari N, Chen M, Bawatna M, Ling J, Xiu F, van Loosdrecht P H M, Surówka P, Oka T, Wang Z 2020 *Nat. Commun.* **11** 2451
- [124] Zhu C, Pilch P, Dantas R M A, Reinold A, Yang Y, Xiu F, Bedoya-Pinto A, Parkin S S P, Moessner R, Wang Z 2024 *Phys. Rev. B* **109** L201111
- [125] Cheng L, Fei F C, Hu H, Dai Y M, Song F Q, Qi J 2022 *Phys. Rev. B* **106** 104308
- [126] Liu S Y, Zhu S X, Wu Q Y, Zhang C, Song P B, Shi Y G, Liu H, Liu Z T, Song J J, Wu F Y, Zhao Y Z, Tang X F, Yuan Y H, Huang H, He J, Liu H Y, Duan Y X, Meng J Q 2021 *Results Phys.* **30** 104816
- [127] Suo P, Yan S, Pu R, Zhang W, Li D, Chen J, Fu J, Lin X, Miao F, Liang S, Liu W, Ma G 2022 *Photonics Research* **10** 653
- [128] Li Z, Chen Y, Song A, Zhang J, Zhang R, Zhang Z, Wang X 2024 *Light: Science Applications* **13** 181
- [129] Suo P, Zhang H, Yan S, Zhang W, Fu J, Lin X, Hao S, Jin Z, Zhang Y, Zhang C, Miao F, Liang S, Ma G 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 227402
- [130] Vaswani C, Wang L L, Mudiyansele D H, Li Q, Lozano P M, Gu G D, Cheng D, Song B, Luo L, Kim R H J, Huang C, Liu Z, Mootz M, Perakis I E, Yao Y, Ho K M, Wang J 2020 *Phys. Rev. X* **10** 021013

- [131] Luo L, Cheng D, Song B, Wang L, Vaswani C, Lozano P M, Gu G, Huang C, Kim R H J, Liu Z, Park J, Yao Y, Ho K, Perakis I E, Li Q, Wang J 2021 *Nat. Mater.* **20** 329
- [132] Weber C P, Masten M G, Ogloza T C, Berggren B S, Man M K L, Dani K M, Liu J, Mao Z, Klug D D, Adeleke A A, Yao Y 2018 *Phys. Rev. B* **98** 155115
- [133] Yang J, Xie J, Jiang S, Zhang K, Li Q, Wang Y, Wang T, Su F 2024 *J. Phys. Chem. Lett.* **15** 4276
- [134] Gonçalves-Faria M V, Pashkin A, Wang Q, Lei H C, Winnerl S, Tsirlin A A, Helm M, Uykur E 2024 *npj Quantum Mater.* **9** 31
- [135] Liu Y, Han Y, Yu J, Zhang H, Yin Q, Lei H, Hu J, Zhang D 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 251901
- [136] Tang R, Boi F, Cheng Y 2023 *npj Quantum Mater.* **8** 78
- [137] Wu Q, Wang Z X, Liu Q M, Li R S, Xu S X, Yin Q W, Gong C S, Tu Z J, Lei H C, Dong T, Wang N L 2022 *Phys. Rev. B* **106** 205109
- [138] Ratchiff N, Hallett L, Ortiz B R, Wilson S D, Harter J W 2021 *Phys. Rev. Mater.* **5** L111801
- [139] Wang Z X, Wu Q, Yin Q W, Gong C S, Tu Z J, Lin T, Liu Q M, Shi L Y, Zhang S J, Wu D, Lei H C, Dong T, Wang N L 2021 *Phys. Rev. B* **104** 165110
- [140] Liu H, Zhang C, Wu Q Y, Jin Y H, Zhu Z M, Song J J, Cui S T, Sun Z, Wang H H, Chen B, He J, Liu H Y, Duan Y X, Oppeneer P M, Meng J Q 2025 *Phys. Rev. B* **111** L121113
- [141] Gao Z, Ma F, Zhu Z, Zhang Q, Liu Y, Jiao Y, Du A 2024 *Nano Lett.* **24** 10964
- [142] Komori Y, Saito Y, Fons P, Hase M 2021 *New J. Phys.* **23** 023034
- [143] Liu J, Cheng L, Zhao D, Chen X, Sun H, Zhu J, Li Z, Wang X, Chia E E M 2020 *Phys. Rev. B* **102** 064307
- [144] Wu Q, Sun F, Zhang Q, Zhao L X, Chen G F, Zhao J 2020 *Phys. Rev. Mater.* **4** 064201
- [145] Tilmann B, Pandeya A K, Grinblat G, Menezes L D S, Li Y, Shekhar C, Felser C, Parkin S S P, Bedoya Pinto A, Maier S A 2022 *Adv. Mater.* **34** 2106733
- [146] Ebihara S, Fukushima K, Oka T 2016 *Phys. Rev. B* **93** 155107
- [147] Jadidi M M, Kargarian M, Mittendorff M, Aytac Y, Shen B, König-Otto J C, Winnerl S, Ni N, Gaeta A L, Murphy T E, Drew H D 2020 *Phys. Rev. B* **102** 245123
- [148] Sie E J, Nyby C M, Pemmaraju C D, et al. 2019 *Nature* **565** 61
- [149] Hein P, Jauernik S, Erk H, Yang L, Qi Y, Sun Y, Felser C, Bauer M 2020 *Nat. Commun.* **11** 2613
- [150] Guan M, Wang E, You P, Sun J, Meng S 2021 *Nat. Commun.* **12** 1885
- [151] de Quesada F A, Muscher P K, Krakovsky E S, et al. 2025 *Adv. Sci.* **12** 2411344
- [152] Wang Q, Li J, Besbas J, Hsu C H, Cai K, Yang L, Cheng S, Wu Y, Zhang W, Wang K, Chang T R, Lin H, Chang H, Yang H 2018 *Adv. Sci.* **5** 1700912
- [153] Zhang M Y, Wang Z X, Li Y N, Shi L Y, Wu D, Lin T, Zhang S J, Liu Y Q, Liu Q M, Wang J, Dong T, Wang N L 2019 *Phys. Rev. X* **9** 021036
- [154] Fukuda T, Makino K, Saito Y, Fons P, Kolobov A V, Ueno K, Hase M 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 093103
- [155] Schaefer H, Koerber M, Tomeljak A, Biljaković K, Berger H, Demsar J 2013 *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **222** 1005
- [156] Cheng B, Cheng D, Jiang T, Xia W, Song B, Mootz M, Luo L, Perakis I E, Yao Y, Guo Y, Wang J 2024 *Nat. Commun.* **15** 785
- [157] Matsuda T, Higo T, Koretsune T, Kanda N, Hirai Y, Peng H, Matsuo T, Yoshikawa N, Shimano R, Nakatsuji S, Matsunaga R 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 126302
- [158] Tzschaschel C, Qiu J, Gao X, Li H, Guo C, Yang H, Zhang C, Xie Y, Liu Y, Gao A, Bérubé D, Dinh T, Ho S, Fang Y, Huang F, Nordlander J, Ma Q, Tafti F, Moll P J W, Law K T, Xu S 2024 *Nat. Commun.* **15** 3017
- [159] Yoshikawa N, Okumura S, Hirai Y, Ogawa K, Fujiwara K, Ikeda J, Ozawa A, Koretsune T, Arita R, Mitra A, Tsukazaki A, Oka T, Shimano R 2025 *Phys. Rev. B* **111** 245104
- [160] Sun F, Zhang T, Yi C J, Wu Y L, Zhao H, Wu Q, Shi Y G, Weng H, Zhao J 2021 *Phys. Rev. B* **104** L100301
- [161] Weber C P, Schoop L M, Parkin S S P, Newby R C, Nateprov A, Lotsch B, Marislerla B M K, Kim J M, Dani K M, Bechtel H A, Arushanov E, Ali M 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 221906
- [162] Wang C, Chen D, Wang Y, Meng S 2025 *Phys. Rev. X* **15** 021053
- [163] Kirby R J, Muechler L, Klemenz S, Weinberg C, Ferrenti A, Oudah M, Fausti D, Scholes G D, Schoop L M 2021 *Phys. Rev. B* **103** 205138
- [164] Gatti G, Crepaldi A, Puppini M, Tancogne-Dejean N, Xian L, De Giovannini U, Roth S, Polishchuk S, Bugnon P, Magrez A, Berger H, Frassetto F, Poletto L, Moreschini L, Moser S, Bostwick A, Rotenberg E, Rubio A, Chergui M, Grioni M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 076401
- [165] Yu B H, Tian Z Y, Sun F, Peets D C, Bai X D, Feng D L, Zhao J 2020 *Opt. Express* **28** 15855
- [166] Lin T, Ju Y, Zhong H, Zeng X, Dong X, Bao C, Zhang H, Xia T, Tang P, Zhou S 2024 *Nano Lett.* **24** 6278
- [167] Wang Y H, Steinberg H, Jarillo-Herrero P, Gedik N 2013 *Science* **342** 453
- [168] Mahmood F, Chan C, Alpichshev Z, Gardner D, Lee Y, Lee P A, Gedik N 2016 *Nat. Phys.* **12** 306
- [169] Mocatti S, Marini G, Calandra M 2023 *J. Phys. Chem. Lett.* **14** 9329
- [170] Bucciantini L, Roy S, Kitamura S, Oka T 2017 *Phys. Rev. B* **96** 041126
- [171] Hübener H, Sentef M A, De Giovannini U, Kemper A F, Rubio A 2017 *Nat. Commun.* **8** 13940
- [172] Kibis O V, Dini K, Iorsh I V, Shelykh I A 2017 *Phys. Rev. B* **95** 125401
- [173] Šebesta J, Grånäs O 2025 *npj Comput. Mater.* **11** 219
- [174] Sirica N, Orth P P, Scheurer M S, et al. 2022 *Nat. Mater.* **21** 62
- [175] Sirica N, Tobey R I, Zhao L X, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 197401
- [176] Gao Y, Kaushik S, Philip E J, Li Z, Qin Y, Liu Y P, Zhang W L, Su Y L, Chen X, Weng H, Kharzeev D E, Liu M K, Qi J 2020 *Nat. Commun.* **11** 720
- [177] Chen Z, Qiu H, Cheng X, Cui J, Jin Z, Tian D, Zhang X, Xu K, Liu R, Niu W, Zhou L, Qiu T, Chen Y, Zhang C, Xi X, Song F, Yu R, Zhai X, Jin B, Zhang R, Wang X 2024 *Nat. Commun.* **15** 2605
- [178] Konstantinova T, Wu L, Yin W G, Tao J, Gu G D, Wang X J, Yang J, Zaliznyak I A, Zhu Y 2020 *npj Quantum Mater.* **5** 80
- [179] Lee M, Sirica N, Teitelbaum S W, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 155301
- [180] Sun K, Liu X, Wang C, Lin X, Suo P, Guo Y, Ma G 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** 2401990
- [181] Ji S, Grånäs O, Weissenrieder J 2021 *ACS Nano* **15** 8826
- [182] Soranzio D, Savoini M, Beaud P, et al. 2022 *npj 2D Mater.*

- Appl.* **6** 71
- [183] Peng B, Zhang H, Chen W, Hou B, Qiu Z, Shao H, Zhu H, Monserrat B, Fu D, Weng H, Soukoulis C M 2020 *npj 2D Mater. Appl.* **4** 14
- [184] Topp G E, Tancogne-Dejean N, Kemper A F, Rubio A, Sentef M A 2018 *Nat. Commun.* **9** 4452
- [185] Ono A, Ishihara S 2021 *npj Comput. Mater.* **7** 1
- [186] Hasaien J, Shan P F, Zhou F R, Zhao J 2025 *Rev. Sci. Instrum.* **96** 013004
- [187] Wu Y L, Yu X H, Hasaien J, Hong Fang, Shan P F, Tian Z Y, Zhai Y N, Hu J P, Cheng J G, Zhao J 2024 *Nat. Commun.* **15** 9683

INVITED REVIEW

Research on topological materials using ultrafast spectroscopy*

LIU Hao MENG Jianqiao[†]

(School of Physics, Central South University, Changsha 430083, China)

(Received 26 September 2025; revised manuscript received 8 November 2025)

Abstract

Topological materials, characterized by symmetry-protected nontrivial band structures such as Dirac cones and Weyl nodes, exhibit a rich variety of quantum states and novel physical phenomena. These materials hold great promise for applications in quantum transport, spintronics, and nonlinear optics. In recent years, ultrafast pump-probe spectroscopy has become a powerful tool for studying nonequilibrium dynamics in quantum materials. With femtosecond temporal resolution, this technique enables direct observation of charge, spin, orbital, and lattice interactions on their intrinsic timescales, offering new insights into the coupling mechanisms in topological systems. This review summarizes the latest research progress of applying ultrafast spectroscopy to topological insulators, topological semimetals, and magnetic topological materials. We first discuss the different relaxation pathways of surface and bulk electronic states after photoexcitation, focusing on electron-phonon scattering, surface-bulk charge transfer, and ultrafast spin conversion. We then describe population inversion phenomena in Dirac and Weyl semimetals, spin polarization dynamics induced by tilted Weyl bands, and the influence of magnetic order on topological states, including coherent phonon and magnon excitations, magnetically driven topological transitions, and terahertz pulse generation. Furthermore, we review photoinduced topological phase transitions driven by electronic correlations, lattice distortions, and magnetic order under strong optical fields, highlighting the potential for nonthermal optical control of quantum phases. Finally, we discuss future research directions, emphasizing the integration of multidimensional ultrafast spectroscopic techniques—spanning temporal, energy, momentum, and spin resolution—with advanced theoretical simulations to construct a comprehensive picture of nonequilibrium topological states. This work aims to serve as a reference for studies on the ultrafast dynamics of topological quantum materials and to promote their practical applications in high-speed, low-power information processing, spintronics, and quantum computation.

Keywords: ultrafast spectroscopy, topological materials, coherent phonons, charge dynamics, photoinduced phase transition

DOI: [10.7498/aps.75.20251330](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251330)CSTR: [32037.14.aps.75.20251330](https://cstr.net/urn:cnki:aps.75.20251330)

* Project supported by the National Key Basic Research Program of China (Grant No. 2022YFA1604204) and the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province, China (Grant No. 2022RC3068).

[†] Corresponding author. E-mail: jqmeng@csu.edu.cn

拓扑材料的超快光谱研究

刘豪 孟建桥

Research on topological materials using ultrafast spectroscopy

LIU Hao MENG Jianqiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040703 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251330

CSTR: 32037.14.aps.75.20251330

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251330>

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

拓扑半金属及磁性拓扑材料的单晶生长

Single crystal growth of topological semimetals and magnetic topological materials

物理学报. 2023, 72(3): 038103 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221574>

基于拓扑/二维量子材料的自旋电子器件

Spintronic devices based on topological and two-dimensional materials

物理学报. 2024, 73(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231166>

拓扑材料中的平面霍尔效应

Planar Hall effect in topological materials

物理学报. 2023, 72(20): 207201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230905>

量子材料的弗洛凯调控

Floquet engineering in quantum materials

物理学报. 2023, 72(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231423>

阿秒瞬态吸收光谱: 揭示电子动力学的超快光学探针

Attosecond transient absorption spectroscopy: an ultrafast optical probe for revealing electron dynamics

物理学报. 2025, 74(15): 153302 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250546>

拓扑材料BaMnSb₂的红外光谱学研究

Infrared spectroscopic study of topological material BaMnSb₂

物理学报. 2022, 71(10): 107201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220011>