

《物理学报》创刊 90 周年

量子材料的弗洛凯调控

鲍昌华¹⁾²⁾ 范本澍¹⁾²⁾ 汤沛哲³⁾⁴⁾ 段文晖¹⁾²⁾⁵⁾ 周树云^{1)2)†}

1) (清华大学物理系, 北京 100084)

2) (清华大学, 低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084)

3) (北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

4) (马克斯-普朗克物质结构与动力学研究所, 汉堡 22761, 德国)

5) (清华大学高等研究院, 北京 100084)

(2023 年 9 月 4 日收到; 2023 年 11 月 8 日收到修改稿)

基于光-物质强相互作用的弗洛凯调控有望在超快时间尺度上驱动量子材料进入非平衡态, 进而调控它们的电子结构和物理特性, 实现平衡态所不具有的新奇物理效应. 近年来, 弗洛凯调控备受研究人员关注, 理论方面已有大量丰富的预言; 实验方面, 拓扑绝缘体、石墨烯、黑磷等几个代表性材料的弗洛凯调控也取得了一些重要的研究进展. 本文简略介绍该领域取得的理论和实验方面的重要进展, 并对研究前景、实验挑战及发展方向进行展望.

关键词: 弗洛凯调控, 光-物质相互作用, 非平衡态, 拓扑材料, 二维材料**PACS:** 42.50.Ct, 05.70.Ln, 03.65.Vf, 73.21.-b**DOI:** 10.7498/aps.72.20231423

1 引言

光-物质相互作用是探究固体材料微观物理机制的重要手段. 例如, 利用材料对 X 光的衍射作用, X 射线衍射^[1] 可用于测量晶格结构; 通过材料对光子能量的改变, 拉曼光谱^[2] 可用于探测晶体的振动模式信息; 吸收光谱^[3] 可用于获得材料中电子能级的跃迁信息; 基于光电效应的角分辨光电子能谱^[4,5] 则可探测微观的电子结构, 即电子能量 (E) 对动量 (k) 的关系 $E(k)$. 近年来, 随着强脉冲激光技术和相关物理的发展, 一个重要的发展趋势是除了将光-物质相互作用作为探测手段外, 还有望将光场作为一种调控量子材料物态及性质的手段 (见文献 [6, 7]). 其中, 由于时间周期性的光场与晶体中电子的相互作用, 晶体材料中可形成一种光子-电子复合态, 我们称之为弗洛凯-布洛赫态

(Floquet-Bloch states), 简称弗洛凯态 (Floquet states). 利用弗洛凯态所产生的能带复制及杂化来改变晶体材料的电子结构是实现量子材料物性调控的重要途径之一^[8-10].

晶体中的电子在周期性光场作用下形成弗洛凯态, 这可类比晶体中电子在实空间周期性势场作用下的布洛赫态. 众所周知, 晶体中的原子排列具有空间周期性, 电子在空间周期性势场中运动, 表现出与自由电子不同的性质. 其中最为显著的特点是空间周期性势场会调制电子运动行为, 使其运动在倒易空间 (动量空间) 出现周期性, 形成以布里渊区 (Brillouin zone) 为重复单元的布洛赫电子态^[11], 如图 1(a) 所示. 与之类比, 如果电子处于一个时间周期性势场 (例如光场) 中, 其运动行为也会被调制. 如果对其能量在时间周期上进行平均, 其均值会在能量维度上出现周期性的复制, 这样的态就是弗洛凯态^[12], 如图 1(b) 所示.

† 通信作者. E-mail: syzhou@mail.tsinghua.edu.cn

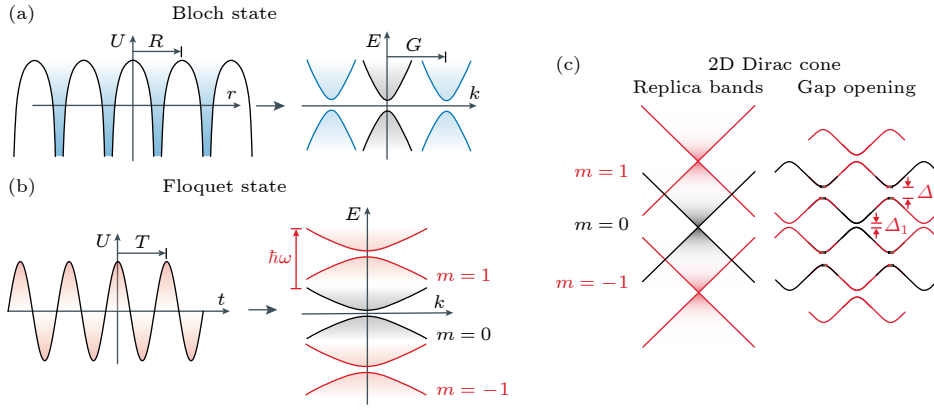


图 1 (a) 实空间周期性导致电子能带在动量空间的复制示意图; (b) 时间周期性导致电子在能量维度的复制示意图; (c) 弗洛凯调控示意图^[7]

Fig. 1. (a) Spatially periodic potential and Bloch bands in the k -space; (b) time-periodic potential and Floquet bands in energy; (c) schematics for Floquet engineering^[7].

除了复制的弗洛凯能带之外,更为重要的是通过光与物质的相互作用,弗洛凯能带可被重整化,表现出与平衡态不同的电子结构,从而实现强光场对晶体中电子结构的有效调控(称为弗洛凯调控).例如,弗洛凯能带可以在弗洛凯布里渊区的边界通过光与物质的相互作用打开能隙,如图 1(c) 所示;还可以通过含时周期势场破坏量子材料中的某些本征对称性,使量子材料中由本征对称性保护的简并能级产生劈裂,从而实现对能带和对称性的调控.作为有望在超快时间尺度上调控量子材料电子结构的有效手段,弗洛凯能带调控近年来受到了研究人员的广泛关注.

2 弗洛凯能带调控的提出及理论预言

为了更直观、清晰地理解弗洛凯能带调控的物理图像,研究人员可以利用微扰论来理解弗洛凯态对于固体材料本征哈密顿量的改变.如果光和物质相互作用带来的影响相比于固体系统本身的能级是一个小量,就可以对弗洛凯哈密顿量进行微扰展开.在这样的处理下,光与物质相互作用将给固体材料的哈密顿量带来额外的作用项;这些额外的作用项依赖光和物质相互作用的强度,可能会破坏本征哈密顿量的对称性,甚至带来额外的拓扑效应,进而诱发拓扑相变.尽管这种基于微扰论的处理不是对于所有的情况都适用,但是它为探索弗洛凯调控提供了各种有趣的效应.21 世纪初,随着拓扑物理学和石墨烯电子学的发展,弗洛凯调控方法被理论物理学家提出,并被用于调制石墨烯的电子结

构.2009 年,Okamoto 和 Aoki^[8]提出,通过圆偏振光破坏二维石墨烯晶格的时间反演对称性,利用光与物质的相互作用诱导出类似霍尔丹(Haldane)模型的效应^[13],实现非平衡态量子反常霍尔效应(quantum anomalous Hall effect)和光致拓扑相变^[8-10].随后,该方法被进一步拓展到其他二维材料和拓扑材料中(见综述文献^[7, 14-16]).除了固体材料体系之外,研究人员还将弗洛凯调控拓展到冷原子体系和光子晶体系统(见综述文献^[17-19]).例如,在冷原子中实现了拓扑霍尔丹模型^[20]和对磁性关联的光学调控^[21],以及在光子晶体体系中实现了弗洛凯拓扑绝缘体^[22]和反常弗洛凯拓扑绝缘体^[23,24].

在固体材料中,利用弗洛凯调控有望驱动量子材料进入非平衡态,诱发拓扑相变,进而实现非平衡态下可调控的拓扑结构^[8-10](详见综述文献^[7, 14-16]).和传统的电调控和应力调控相比,该手段的优势在于可以从普通的量子材料中诱导出新奇的拓扑相,无需改变量子材料本身的晶体结构特征;一旦撤去光场,量子材料可以回复到本征状态.因此,该方法可以拥有皮秒甚至飞秒的超快响应时间.近些年,通过理论计算,研究人员提出在普通绝缘体中利用弗洛凯调控诱导出非平庸拓扑^[10,25,26],例如在 HgTe/CdTe 半导体量子阱中通过光场实现普通绝缘体到拓扑绝缘体的拓扑转变^[10];受面外方向恒定电场影响的硅烯在圆偏振光(CPL)的作用下,将会从普通绝缘体或量子自旋霍尔绝缘体转变为自旋极化的量子反常霍尔绝缘体^[25].利用弗洛凯调控,拓扑绝缘体理论上有望被激光瞬时调控,产生一个外尔半金属(Weyl

semimetal) 相 [27]. 同时, 以外尔半金属为基态, 通过施加圆偏振光打破时间反演对称性, 外尔点将会在布里渊区中移动位置, 有可能在垂直于入射圆偏振光的平面上观察到平衡态下对称性禁戒的反常霍尔效应 [28]. 另外, 含时密度泛函理论计算发现, 圆偏振光有望将狄拉克费米子 (Dirac Fermion) 沿着光的传播方向分裂为两个手性相反的外尔费米子 (Weyl Fermions), 并且它们在动量空间分开的距离有望通过光的强度或传播方向来调节 [29]. 此外, 对于节线半金属, 圆偏振光也有望诱导出外尔半金属 [30-32] 和狄拉克半金属 [33] 态, 甚至有可能产生具有倾斜锥体能带结构的第二类外尔半金属 [34]. 近年来, 弗洛凯调控还被应用于调控非厄密 (non-Hermitian) 系统的拓扑性质 [35,36]. 总之, 在利用弗洛凯光场调控拓扑物态的研究方面, 目前已经有了非常丰富的理论预言 (如图 2(a) 所示).

近年来, 随着转角量子材料的迅猛发展, 理论物理学家进一步将其与弗洛凯调控相融合, 提出了莫尔-弗洛凯调控的概念 [37] (参见综述文献 [38]). 通过对莫尔体系施加具有不同驱动频率、场强及空间振荡周期的光激发, 研究人员期待能够有效地调控莫尔系统中平带 (如图 2(b) 所示)、拓扑性质和谷选择激发 [37,39-41]. 类相比于莫尔超晶格势, 由光场引发的周期势同样可用来诱导平带的形成 [42]. 这

些研究展示了将莫尔-弗洛凯调控引入物理领域的重要性, 并为探索新的光控电子学方法提供了新的视角.

另外, 弗洛凯调控也有望用来调控材料的磁性. 一方面, 利用弗洛凯调控诱导非磁材料产生磁性. 譬如 MoS₂ 中存在光学 E'' 声子修饰的自旋-能谷态, 当 E'' 声子模式被圆偏振光激发时, 其导带电子自旋会在自旋轨道耦合的作用下和声子模式耦合, 进而产生的弗洛凯能谱将携带净的面外磁化 (对于一个声子量子约为 0.024μ_B) [43]. 这种能谷态的二色磁响应在所有 2H 相过渡金属二硫化物中普遍存在, 并可以通过红外相干激光激发进行探测和控制. 另一方面, 弗洛凯调控还有望用来调节低维磁性材料的电子关联强度. 例如, 对海森伯模型 (Heisenberg model) 施加周期性的光驱动, 利用正则变换就会得到一个时间依赖的交换相互作用系数 [44] (如图 2(c) 所示), 可动态地调制量子材料的磁性质. 更进一步地, 研究人员提出通过施加破坏材料某些对称性的光场, 甚至可以诱导一个在静态模型中不存在的磁相互作用项. 例如, 通过施加圆偏振光破坏量子材料的时间反演对称性, 有可能得到一个新的衍生项——标量自旋手征项 [45,46]. 这也为弗洛凯调控开启了实现奇异量子相 (例如, 手征自旋液体相) 的可能性, 如图 2(d) 所示.

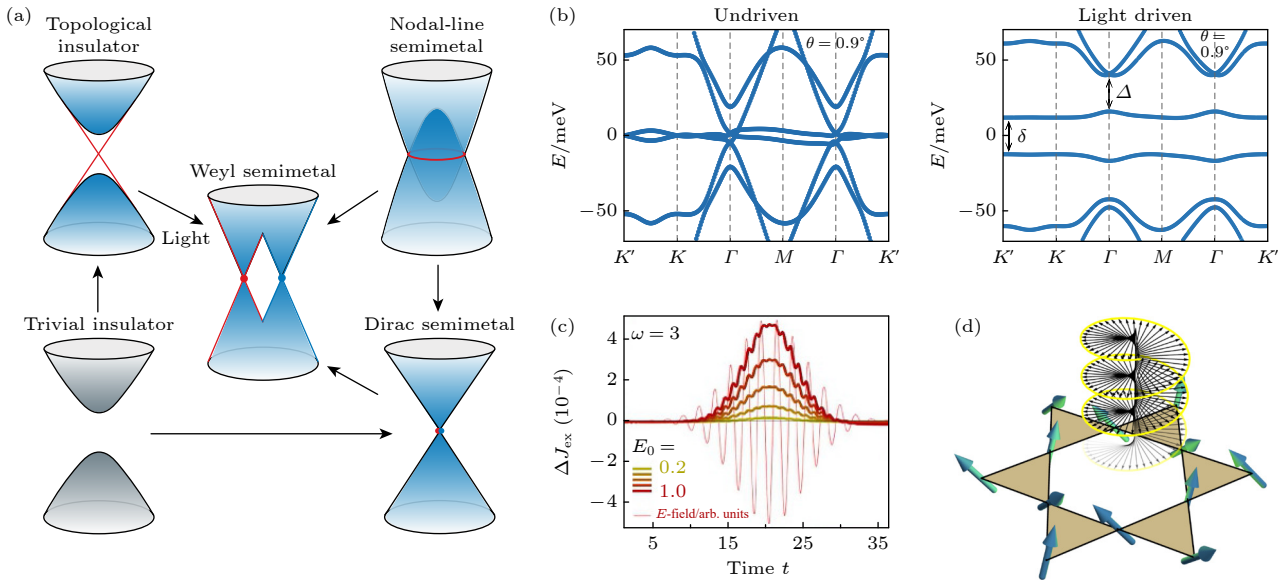


图 2 (a) 弗洛凯调控诱导的拓扑相变 [7]; (b) 在周期光场驱动前后的转角石墨烯平带电子结构 [47]; (c) 交换作用强度变化随时间的演化曲线 [44]; (d) 弗洛凯调控调节材料磁性的示意图 [48]

Fig. 2. (a) Floquet engineering induced topological phase transition [7]; (b) flat band of twisted graphene before and after light driving [47]; (c) the evolution of exchange strength with time [44]; (d) a schematic for manipulating magnetic properties of materials by Floquet engineering [48].

3 弗洛凯能带调控的实验进展

相比于丰富的理论预言, 弗洛凯能带调控的实验研究还处于发展阶段. 在单层 WS_2 中, 研究人员发现利用超快光谱观测到了具有能谷选择性的光学斯塔克 (Stark) 效应. 如图 3(a) 所示, 在略低于能隙的泵浦光激发下 (光子能量 1.82 eV), 研究者观测到探测光的吸收峰发生了蓝移. 这一结果表明在泵浦光激发下, 能隙增大, 可以通过原始能带和弗洛凯能带的相互作用来解释 [49-51]. 更进一步, 通过改变探测光的左右旋圆偏振状态, 发现只有当泵浦和探测光偏振相同时才存在重整化效应, 表明存在着独特的能谷选择性, 从而为弗洛凯调控提供新

的操控自由度. 此外, 近期研究者利用超快非线性光谱手段, 观测到了弗洛凯调控对于非线性光学系数的有效调控作用 [52]. 如图 3(b) 所示, 在光子能量低于能隙的泵浦光的激发下, MnPS_3 中的二次谐波谱显著地被抑制. 进一步的场强和偏振依赖测量结合理论计算, 证明了该效应来源于弗洛凯调控, 展现了弗洛凯调控在调控光学非线性系数方面的独特能力.

除了利用超快光谱手段之外, 研究人员还发展了具有时间分辨能力的超快运输测量技术, 并用于弗洛凯调控研究. 通过结合泵浦光激发和超快光开关探测开展超快运输测量, 研究者在石墨烯中观测到了光诱导的反常霍尔效应 [53] (图 3(c)), 并发现

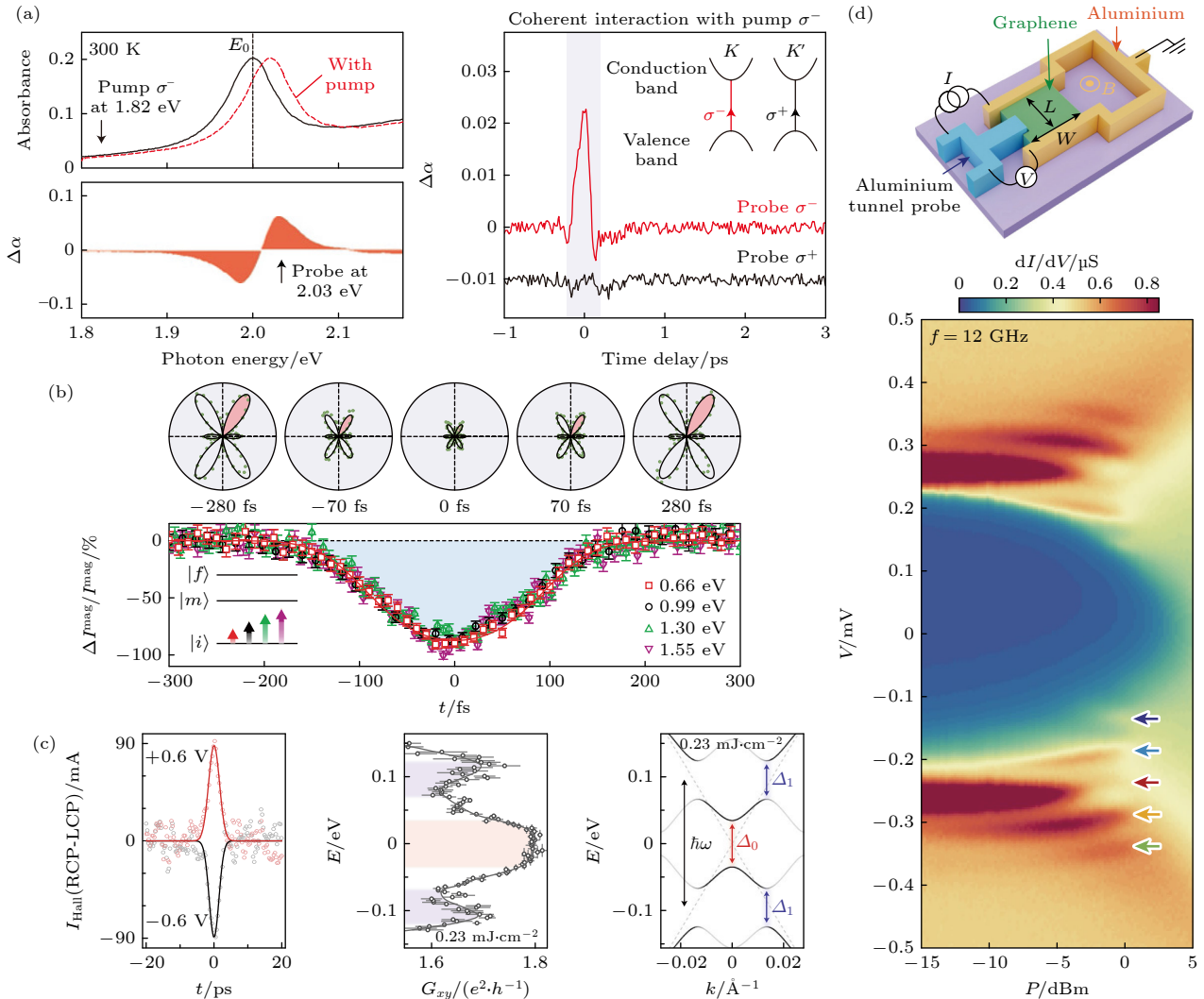


图 3 (a) 单层 WS_2 中观测到的能谷选择的光学斯塔克效应 [49]; (b) MnPS_3 中观测到的弗洛凯调控对于光学非线性系数的调控 [52]; (c) 石墨烯中观测到光诱导的反常霍尔效应 [53]; (d) 石墨烯-铝约瑟夫森结中在微波激发下的复制隧穿谱 [54]

Fig. 3. (a) Observation of valley selective optical stark effect in monolayer WS_2 [49]; (b) manipulation of optical nonlinear coefficients in MnPS_3 by Floquet engineering [52]; (c) observation of light-induced anomalous Hall effect in graphene [53]; (d) replica tunneling spectrum under the excitation of microwaves in graphene-aluminum Josephson junction [54].

霍尔信号随着泵浦光的圆偏振状态改变而反向,符合弗洛凯调控的预期.此外,通过连续调节栅极电压,发现霍尔电导在狄拉克点能隙和杂化能隙处显著增强.此外,在石墨烯-铝构成的约瑟夫森结 (Josephson junction) 的特殊体系中,利用连续微波泵浦,研究者甚至利用输运手段观测到了稳恒弗洛凯态的形成^[54].在约瑟夫森结隧穿谱中,观测到了能量间隔和光子能量相等的分裂谱 (弗洛凯态),并且信号随微波场的增强而不断增强 (图 3(d)).

弗洛凯调控最根本的物理是光场对电子结构的调控,因此作为能够直接探测光场作用下电子结构的强大实验手段,时间分辨角分辨光电子能谱 (TrARPES)^[55-57]对弗洛凯调控研究具有重要意义.研究人员利用时间分辨角分辨光电子能谱对拓扑绝缘体中的狄拉克表面态的弗洛凯调控开展了研究.在拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中观测到圆偏振光诱导的弗洛凯能带调控,包括复制弗洛凯态和能隙打开^[58,59] (如图 4(a) 所示),在实验上首次实现了弗洛凯调控的直接观测.除了对于弗洛凯调控的直接观测,直接的时间分辨能力也为观测弗洛凯态的形成过程提供了可能性.然而,弗洛凯态形成的时间尺度非常快 (百飞秒量级,且通常受限于仪器时间分辨率的限制),研究人员对于弗洛凯态是如何产生和消亡的这一本质问题一直没有明确的答案.近期,研究人员利用一束脉宽极窄 (17 fs) 的探测光在拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 中,观测到了狄拉克表面态的弗洛凯能带在泵浦光场周期内的形成和消亡过程^[60].研究表明,随着光场对电子的带内激发,弗洛凯能带仅仅一个光周期后就逐渐形成了;随后,伴随着电子向拓扑绝缘体的体态能带的散射,弗洛凯边带逐渐消失,如图 4(b) 所示.

除了狄拉克体系之外,在狄拉克体系之外的材料体系 (特别是具有广泛应用前景的半导体材料) 中实现弗洛凯调控,对于进一步弗洛凯调控的未来应用以及寻找弗洛凯拓扑绝缘体具有重要意义.尽管研究人员在单层过渡金属硫族化合物 WSe_2 中观测到了复制的弗洛凯边带^[62],然而,更为关键的效应,即弗洛凯能带调控可能造成的能带重整化,并没有被观测到.最近,半导体的弗洛凯能带调控首次被实现^[61].通过选取具有高载流子迁移率的窄带隙半导体黑磷,并且采用略高于能隙能量的中红外波段飞秒激光激发样品时,通过时间分辨角分辨光电子能谱实验测量,成功观测到弗洛凯边

带和黑磷价带杂化打开的能隙,如图 4(c) 所示.此外,另一个有意思的发现是,这一光诱导的能隙具有强烈的偏振选择性:只有当泵浦光源电场方向沿着扶手椅状方向时,才能观测到光诱导的能隙打开;而当泵浦光源电场方向切换到锯齿状方向时,则没有类似的效应.这一独特的光偏振选择性来源于黑磷的赝自旋自由度 (黑磷的子晶格自由度^[63],可类比自旋自由度) 及相关的选择定则.黑磷导带价带具有相反的赝自旋,分别具有子晶格交换对称和反对称的特性.因此,只有满足子晶格交换反对称性的扶手椅状方向线偏振光才能使导带和价带耦合,从而引入相互作用并打开杂化能隙.这一发现为弗洛凯能带调控增添了新的可操控的量子自由度.更进一步,通过改变泵浦激光的光子能量,可以发现弗洛凯调控诱导的能隙打开效应在接近共振激发附近最显著,说明了近共振激发对于在半导体材料中实现弗洛凯调控诱导的杂化能隙的打开具有关键作用.

由于光与物质的相互作用 ($aeE_0/(\hbar\omega)$) 反比于光子能量 ($\hbar\omega$),降低泵浦光子能量有望增强弗洛凯相互作用强度,减少由直接光学跃迁引起的耗散,从而诱导更显著的能带重整化效应.在前期研究的基础上,近期通过将中红外光子能量推进到更低的能量区间 (~ 160 meV),成功在黑磷中实现了远低于能隙激发诱导的弗洛凯调控,观测到了黑磷价带顶的能带重整化效应^[64].进一步,通过系统性地改变泵浦光子能量 (从远小于带隙到远大于带隙的范围内),发现弗洛凯能带重整化在近共振区域和低能非共振区域具有最显著的效应,为弗洛凯能带调控的研究提供了更加全面的物理图像.该工作表明,降低泵浦光子能量能够有效地增强弗洛凯相互作用强度,即通过低于材料能隙的低能泵浦也能够实现弗洛凯能带调控.这些研究成果为在更多量子材料体系中实现弗洛凯能带调控提供了新的思路.

4 面临的实验挑战

在量子材料的弗洛凯调控领域中,相比于丰富的理论预言,实验方面的进展相对较为有限,因此厘清实验上实现弗洛凯调控的难点和挑战非常重要.笔者认为在固体材料体系中实现弗洛凯调控面临的实验挑战主要有以下几点.

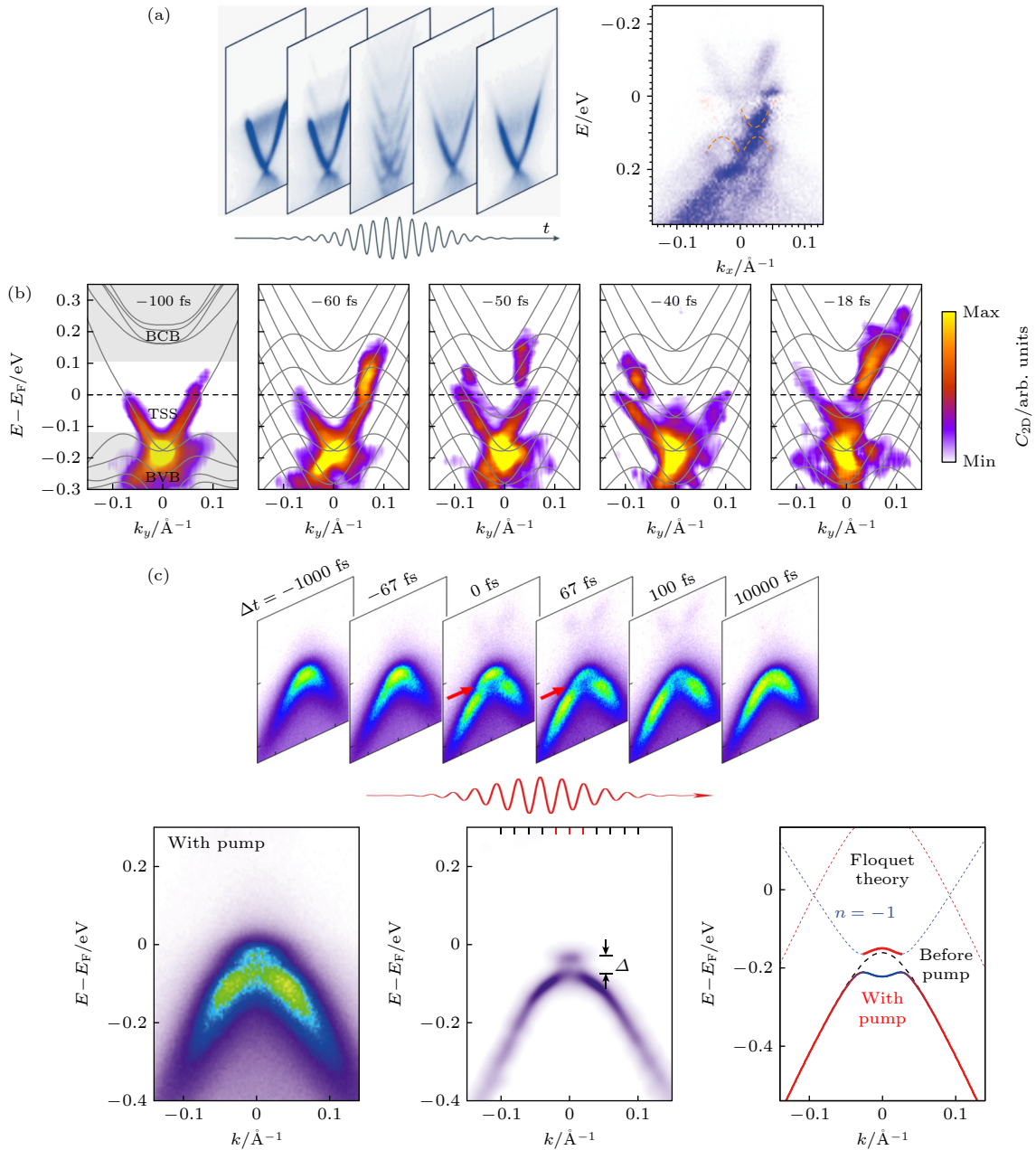


图 4 (a) 拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 的超快电子能谱, 实现弗洛凯能带调控^[58,59]; (b) 拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 的亚周期分辨的超快电子能谱和弗洛凯边带的形成过程^[60]; (c) 半导体黑磷的超快电子能谱, 实现弗洛凯能带调控^[61]

Fig. 4. (a) TrARPES spectra of Floquet engineering in topological insulator Bi_2Se_3 ^[58,59]; (b) sub-cycle resolved TrARPES spectra of topological insulator Bi_2Te_3 to show the formation of Floquet sidebands^[60]; (c) TrARPES spectra of Floquet engineering in a semiconductor black phosphorus^[61].

首先, 弗洛凯调控对于激发光源有着苛刻的要求. 常见的时间分辨角分辨光电子能谱通常采用 800 nm 波长的飞秒激光作为泵浦光源. 然而, 由于在可形成弗洛凯能带的参数空间内弗洛凯相互作用强度和光子能量成反比^[8], 因此利用具有较低光子能量的激发光源有可能获得更有效的弗洛凯调控. 同时, 光子能量也不能过低, 因为需要保证光场周期至少小于材料中的电子散射时间^[62], 以避

免电子在感受到完整时间周期场前被散射而失去量子相干性, 导致无法形成弗洛凯能带. 因此, 现有的弗洛凯相关的实验工作中大多采用了中红外波段的光场来实现弗洛凯调控. 此外, 弗洛凯调控的实现还需要高达 10^7 V/m 的峰值电场强度. 因此, 在实验上需要采用具有足够强光场强度、能量足够低的飞秒脉冲激光来作为泵浦光源.

在探测光源方面, 常规的基于非线性晶体四倍

频的光源 (6.2 eV) 具有其局限性, 仅能探测费米能附近有限的能量和布里渊区中心附近的动量范围. 对于某些材料 (例如, 石墨烯、过渡金属硫族化合物等), 由于狄拉克锥和能谷远离布里渊区中心, 要想实现探测则需要较高的探测光子能量. 在这方面, 基于气体高次谐波的探测光源对于石墨烯和过渡金属硫族化合物的弗洛凯调控研究至关重要. 对于三维材料的弗洛凯调控研究 (例如, 将狄拉克半金属调控为弗洛凯外尔半金属), 由于三维材料的面外动量 (k_z) 的探测需要通过改变探测光子能量来实现, 因此, 还需要发展具有连续可调光子能量的探测光源^[65,66].

此外, 弗洛凯调控对于材料体系的选取也具有苛刻的要求. 首先, 如前所述, 弗洛凯调控需要较低的光子能量, 意味着光场的时间周期较长. 这就对材料的电子散射时间提出了较高的要求, 要求材料质量高、散射时间长. 另一方面, 对于半导体材料, 为了实现中红外波段的共振激发以及比较强的光-物质耦合作用, 则要求材料的带隙与泵浦光子能量匹配 (忽略多光子过程导致的高阶效应), 也就是窄带隙半导体.

5 总结与展望

当前, 随着激光技术和量子材料制备技术的发展和完善, 量子材料的弗洛凯能带调控正处于快速发展的重要阶段, 许多重要的理论预言有待实验的验证, 新物理和新效应期待在该领域中被发现. 笔者认为, 以下几个方向可能会在未来引领该领域的研究, 值得重点关注.

首先, 大量的理论计算表明, 弗洛凯调控有望对量子材料的拓扑性质进行调控, 甚至在拓扑平庸的材料中诱导出非平庸拓扑相. 然而在这一方面, 目前的实验进展是在石墨烯中观测到光诱导的反常霍尔效应^[53], 而且尚未实现量子化, 关于其反常霍尔电导是否直接来源于非平衡态的拓扑性质也存在争议^[67-69]. 因此, 在实验上, 在量子材料中 (例如: 石墨烯、拓扑半金属和拓扑平庸绝缘体) 利用弗洛凯调控实现拓扑性质的调控将是未来重要研究方向之一.

其次, 作为一种对光与物质相互作用相对简化的描述方法, 弗洛凯理论在清晰地给出了明确的物理图像的同时, 也忽略了很多重要的细节. 例如,

在非平衡物态的形成过程中, 电子-电子散射和电子-声子散射等导致的电子态弛豫是至关重要的, 它与驱动光场之间的竞争决定了非平衡物态的性质. 但是在传统的弗洛凯理论中, 电子态的弛豫并没有被有效地刻画和描述. 因此, 亟需引入新的理论方法处理这类问题, 例如, 含时密度泛函理论, 作为基态密度泛函理论的推广, 引入了时间依赖的电子密度, 在密度泛函理论的框架下处理实际量子材料系统的动力学演化过程. 目前, 该方法已在弱场和强场驱动条件下的原子、分子、周期性固体中成功应用; 或者利用非平衡格林 (Green) 函数方法, 从非微扰的框架出发处理强场下的量子体系的动力学演化行为, 该方法能够自然地处理激发的量子系统和热库的耦合, 为研究强场物理过程提供了一种有力工具, 有望在理论和计算领域取得重要突破; 另外, 弗洛凯态演化时, 需要系统地研究在不同弛豫通道影响下的形成和消亡的过程, 这个过程是开放量子系统在环境中的含时演化, 适合利用含时林德布拉德 (Lindblad) 方程来处理. 该方法基于密度矩阵, 通过构建唯像模型或者细致研究微观散射机制来构建弛豫算符, 求解基于密度矩阵的演化方程并获得体系的动力学性质. 研究人员可以通过构建弗洛凯基组, 将含时林德布拉德方程得到的波函数投影在弗洛凯基组上, 得到弗洛凯能级占据数的信息, 进而研究弗洛凯态是如何形成, 以及如何消亡的. 另一方面, 未来的研究还可以依靠对微观散射机制的理解, 将林德布拉德方程与密度泛函理论相结合, 从实际材料的电子结构和微观散射机制出发, 更准确地描述量子材料系统的演化过程.

此外, 尽管理论上预言很多量子材料中都可以被弗洛凯调控, 但是目前的实验发现局限在少数几种量子材料中. 这种局限性的原因目前尚不清楚, 很可能与量子材料中电子态的散射机制有关, 因此从实验上观察非平衡过程中电子态的散射过程对于深刻理解弗洛凯调控的微观机制有重要研究意义. 通过对微观机制的深刻细致的理解, 研究人员有可能将弗洛凯调控拓展到更多的量子材料体系, 特别是寻找弗洛凯拓扑绝缘体系统.

综上所述, 量子材料中的弗洛凯调控是一个充满挑战但是同时也有希望取得重大研究突破的重要研究方向之一. 该领域的研究有望为量子材料的物态调控提供新的手段, 并且蕴含着发现新物理、新物态和新效应的机遇.

参考文献

- [1] Warren B E 1990 *X-Ray Diffraction*(Courier Corporation)
- [2] Long D A 1977 *Raman Spectroscopy* (New York and London: McGraw-Hill)
- [3] Henderson B, Imbusch G F 2006 *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids* (Cambridge: Oxford University Press)
- [4] Damascelli A, Hussain Z, Shen Z X 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 473
- [5] Hüfner S 2013 *Photoelectron Spectroscopy: Principles and Applications* (Springer Science & Business Media)
- [6] Basov D N, Averitt R D, Hsieh D 2017 *Nat. Mater.* **16** 1077
- [7] Bao C H, Tang P Z, Sun D, Zhou S Y 2021 *Nat. Rev. Phys.* **4** 33
- [8] Oka T, Aoki H 2009 *Phys. Rev. B* **79** 081406(R)
- [9] Kitagawa T, Oka T, Brataas A, Fu L, Demler E 2011 *Phys. Rev. B* **84** 235108
- [10] Lindner N H, Refael G, Galitski V 2011 *Nat. Phys.* **7** 490
- [11] Ashcroft N W, Mermin N D 1976 *Solid State Physics* (Philadelphia: Saunders College)
- [12] Sambe H 1973 *Phys. Rev. A* **7** 2203
- [13] Haldane F D M 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2015
- [14] Oka T, Kitamura S 2019 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **10** 387
- [15] Rudner M S, Lindner N H 2020 *Nat. Rev. Phys.* **2** 229
- [16] de la Torre A, Kennes D M, Claassen M, Gerber S, McIver J W, Sentef M A 2021 *Rev. Mod. Phys.* **93** 041002
- [17] Eckardt A 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 011004
- [18] Cooper N R, Dalibard J, Spielman I B 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 015005
- [19] Ozawa T, Price H M, Amo A, Goldman N, Hafezi M, Lu L, Rechtsman M C, Schuster D, Simon J, Zilberberg O, Carusotto I 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 015006
- [20] Jotzu G, Messer M, Desbuquois R, Lebrat M, Uehlinger T, Greif D, Esslinger T 2014 *Nature* **515** 237
- [21] Görg F, Messer M, Sandholzer K, Jotzu G, Desbuquois R, Esslinger T 2018 *Nature* **553** 481
- [22] Rechtsman M C, Zeuner J M, Plotnik Y, et al. 2013 *Nature* **496** 196
- [23] Maczewsky L J, Zeuner J M, Nolte S, Szameit A 2017 *Nat. Commun.* **8** 13756
- [24] Mukherjee S, Spracklen A, Valiente M, Andersson E, Öhberg P, Goldman N, Thomson R R 2017 *Nat. Commun.* **8** 13918
- [25] Ezawa M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 026603
- [26] Claassen M, Jia C, Moritz B, Devereaux T P 2016 *Nat. Commun.* **7** 13074
- [27] Wang R, Wang B G, Shen R, Sheng L, Xing D Y 2014 *EPL* **105** 17004
- [28] Chan C K, Lee P A, Burch K S, Han J H, Ran Y 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 026805
- [29] Hübener H, Sentef M A, De Giovannini U, Kemper A F, Rubio A 2017 *Nat. Commun.* **8** 13940
- [30] Yan Z B, Wang Z 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 087402
- [31] Ezawa M 2017 *Phys. Rev. B* **96** 041205(R)
- [32] Deng T W, Zheng B B, Zhan F Y, Fan J, Wu X Z, Wang R 2020 *Phys. Rev. B* **102** 201105
- [33] Liu H, Sun J T, Cheng C, Liu F, Meng S 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 237403
- [34] Chan C K, Oh Y T, Han J H, Lee P A 2016 *Phys. Rev. B* **94** 121106(R)
- [35] Zhou L W, Gong J B 2018 *Phys. Rev. B* **98** 205417
- [36] Wu H, An J H 2022 *Phys. Rev. B* **105** L121113
- [37] Topp G E, Jotzu G, McIver J W, Xian L, Rubio A, Sentef M A 2019 *Phys. Rev. Res.* **1** 023031
- [38] Rodriguez-Vega M, Vogl M, Fiete G A 2021 *Ann. Phys.* **435** 168434
- [39] Li Y, Fertig H A, Seradjeh B 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 043275
- [40] Vogl M, Rodriguez-Vega M, Fiete G A 2020 *Phys. Rev. B* **101** 235411
- [41] Vogl M, Rodriguez-Vega M, Fiete G A 2020 *Phys. Rev. B* **101** 241408(R)
- [42] Kim H, Dehghani H, Aoki H, Martin I, Hafezi M 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 043004
- [43] Shin D, Hübener H, De Giovannini U, Jin H, Rubio A, Park N 2018 *Nat. Commun.* **9** 638
- [44] Mentink J H, Balzer K, Eckstein M 2015 *Nat. Commun.* **6** 6708
- [45] Kitamura S, Oka T, Aoki H 2017 *Phys. Rev. B* **96** 014406
- [46] Claassen M, Jiang H C, Moritz B, Devereaux T P 2017 *Nat. Commun.* **8** 1192
- [47] Katz O, Refael G, Lindner N H 2020 *Phys. Rev. B* **102** 155123
- [48] Morimoto T, Kitamura S, Nagaosa N 2023 *J. Phys. Soc. Jpn.* **92** 072001
- [49] Sie E J, McIver J W, Lee Y H, Fu L, Kong J, Gedik N 2015 *Nat. Mater.* **14** 290
- [50] Kim J, Hong X, Jin C, Shi S F, Chang C Y, Chiu M H, Li L J, Wang F 2014 *Science* **346** 1205
- [51] Sie E J, Lui C H, Lee Y H, Fu L, Kong J, Gedik N 2017 *Science* **355** 1066
- [52] Shan J Y, Ye M, Chu H, Lee S, Park J G, Balents L, Hsieh D 2021 *Nature* **600** 235
- [53] McIver J W, Schulte B, Stein F U, Matsuyama T, Jotzu G, Meier G, Cavalleri A 2020 *Nat. Phys.* **16** 38
- [54] Park S, Lee W, Jang S, Choi Y B, Park J, Jung W, Watanabe K, Taniguchi T, Cho G Y, Lee G H 2022 *Nature* **603** 421
- [55] Smallwood C L, Kaindl R A, Lanzara A 2016 *EPL* **115** 27001
- [56] Sobota J A, He Y, Shen Z X 2021 *Rev. Mod. Phys.* **93** 025006
- [57] Zhang H, Pincelli T, Jozwiak C, Kondo T, Ernstorfer R, Sato T, Zhou S 2022 *Nat. Rev. Methods Primers* **2** 1
- [58] Wang Y H, Steinberg H, Jarillo-Herrero P, Gedik N 2013 *Science* **342** 453
- [59] Mahmood F, Chan C-K, Alpichshev Z, Gardner D, Lee Y, Lee P A, Gedik N 2016 *Nat. Phys.* **12** 306
- [60] Ito S, Schüler M, Meierhofer M, et al. 2023 *Nature* **616** 696
- [61] Zhou S H, Bao C H, Fan B S, et al. 2023 *Nature* **614** 75
- [62] Aeschlimann S, Sato S A, Krause R, Chávez-Cervantes M, De Giovannini U, Hübener H, Forti S, Coletti C, Hanff K, Rossnagel K, Rubio A, Gierz I 2021 *Nano Lett.* **21** 5028
- [63] Jung S W, Ryu S H, Shin W J, Sohn Y, Huh M, Koch R J, Jozwiak C, Rotenberg E, Bostwick A, Kim K S 2020 *Nat. Mater.* **19** 277
- [64] Zhou S H, Bao C H, Fan B S, Wang F, Zhong H Y, Zhang H Y, Tang P Z, Duan W H, Zhou S Y 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 116401
- [65] Bao C H, Zhong H Y, Zhou S H, Feng R, Wang Y H, Zhou S Y 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 013902
- [66] Bao C H, Li Q, Xu S, et al. 2022 *Nano Lett.* **22** 1138
- [67] Sato S A, McIver J W, Nuske M, Tang P Z, Jotzu G, Schulte B, Hübener H, De Giovannini U, Mathey L, Sentef M A, Cavalleri A, Rubio A 2019 *Phys. Rev. B* **99** 214302
- [68] Sato S A, Tang P Z, Sentef M A, Giovannini U D, Hübener H, Rubio A 2019 *New J. Phys.* **21** 093005
- [69] Nuske M, Broers L, Schulte B, Jotzu G, Sato S A, Cavalleri A, Rubio A, McIver J W, Mathey L 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 043408

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Floquet engineering in quantum materials

Bao Chang-Hua¹⁾²⁾ Fan Ben-Shu¹⁾²⁾ Tang Pei-Zhe³⁾⁴⁾

Duan Wen-Hui¹⁾²⁾⁵⁾ Zhou Shu-Yun^{1)2)†}

1) (*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*State Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

4) (*Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, Hamburg 22761, Germany*)

5) (*Institute for Advanced Study, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 4 September 2023; revised manuscript received 8 November 2023)

Abstract

Floquet engineering based on the strong light-matter interaction is expected to drive quantum materials into nonequilibrium states on an ultrafast timescale, thereby engineering their electronic structure and physical properties, and achieving novel physical effects which have no counterpart in equilibrium states. In recent years, Floquet engineering has attracted a lot of research interest, and there have been numerous rich theoretical predictions. In addition, important experimental research progress has also been made in several representative materials such as topological insulators, graphene, and black phosphorus. Herein, we briefly introduce the important theoretical and experimental progress in this field, and prospect the research future, experimental challenges, and development directions.

Keywords: Floquet engineering, light-matter interaction, nonequilibrium states, topological materials, two-dimensional materials

PACS: 42.50.Ct, 05.70.Ln, 03.65.Vf, 73.21.-b

DOI: [10.7498/aps.72.20231423](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231423)

† Corresponding author. E-mail: syzhou@mail.tsinghua.edu.cn



量子材料的弗洛凯调控

鲍昌华 范本澍 汤沛哲 段文晖 周树云

Floquet engineering in quantum materials

Bao Chang-Hua Fan Ben-Shu Tang Pei-Zhe Duan Wen-Hui Zhou Shu-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 234202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231423

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231423>

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

低维材料物性的非均匀应变调控

Engineering of properties of low-dimensional materials via inhomogeneous strain

物理学报. 2022, 71(12): 127307 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220085>

二维磁性材料的物性研究及性能调控

Study on physical properties and magnetism controlling of two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2021, 70(12): 127801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202146>

金属纳米颗粒与二维材料异质结构的界面调控和物理性质

Interface modulation and physical properties of heterostructure of metal nanoparticles and two-dimensional materials

物理学报. 2022, 71(6): 066801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211902>

二维材料的转移方法

Methods of transferring two-dimensional materials

物理学报. 2021, 70(2): 028201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201425>

新型机械解理方法在二维材料研究中的应用

Applications of new exfoliation technique in study of two-dimensional materials

物理学报. 2018, 67(21): 218201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181636>

二维过渡金属硫化物二次谐波: 材料表征、信号调控及增强

Second harmonic generation of two-dimensional layered materials: characterization, signal modulation and enhancement

物理学报. 2020, 69(18): 184210 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200452>