

超材料前沿研究一周精选

2024 年 12 月 9 日-2024 年 12 月 15 日

索引:

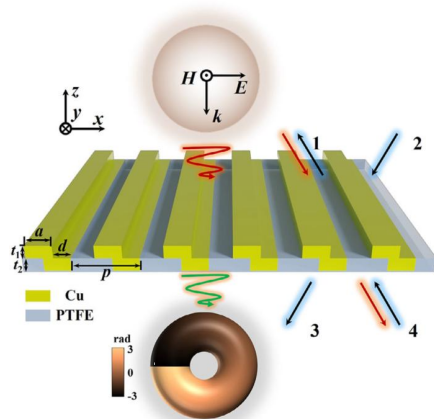
- 1 位错双层金属光栅连续介质中的准束缚态用于时空涡旋脉冲生成
- 2 拓扑表面态中 Berry 相效应的探究
- 3 具有五边形性质的磷烯纳米带中的一维平带
- 4 聚合物接枝纳米粒子熔体中的超扩散热传输
- 5 用于微波范围内平面电磁波控制的可编程超材料

1 位错双层金属光栅连续介质中的准束缚态用于时空涡旋脉冲生成

光波的轨道角动量 (OAM) 通常以光学涡旋为特征,在经典光学和量子光学中都引起了相当大的研究兴趣。近年来,携带横向 OAM 的光因其奇异的波前而备受关注,这可能在许多核心领域带来不同的应用,包括光操控/捕获、量子光结构、模拟光学计算、亚光速/超光速脉冲传播和大容量通信。然而,由于平面波的场分量与波矢正交的性质,生成横向 OAM 在技术上比生成纵向 OAM 要麻烦得多。2005 年,通过探索时空域,在非线性介质中预测了具有横向 OAM 的涡旋光束。在 2016 年,这通过自聚焦介质中的光脉冲崩塌和停滞在实验中实现了。然而,使用非线性效应的能量效率相当低。为了解决这个问题,最近有人提出了一种想法,即利用 4-f 脉冲整形器在空间频率域中雕刻光脉冲,以在线性范围内产生横向 OAM。这种方法已被证明非常高效,并且还扩展到了声学领域。然而,所实施的系统通常由单独的笨重而复杂的光学元件组成,例如光栅、透镜和空间光调制器。这实际上使其很难与其他操作组件或设施集成。因此,在高效紧凑的系统中生成复杂的时空涡旋脉冲仍然是一个挑战。

近日,浙江大学的马云贵教授团队,提出了一种超紧凑超表面方法,通过将自由空间平面波与连续体中的准束缚态(quasi-BIC)耦合来有效地生成时空涡旋脉

冲。该方法利用  点 quasi-BIC 的外部激发,通过稍微错位两个子层光栅来破坏镜像对称性。此操作将入射波转换为单向表面模式并引起 Fano 共振,从而在频率动量域中产生时空涡旋脉冲。该方法通过超光栅实验演示,以高保真度产生拓扑电荷为 $l = -1$ 的电磁(EM)时空涡旋脉冲,并使用该装置揭示近场时空涡旋脉冲迄今未探索的衍射和色散特性。只需缩放超表面,即可将本研究从微波扩展到可见光范围,并允许通过级联元件产生高阶 OAM,从而为构建超紧凑时空涡旋脉冲多路复用设备以供未来应用铺平了道路。本文发表在《Laser & Photonics Reviews》上。(刘帅)



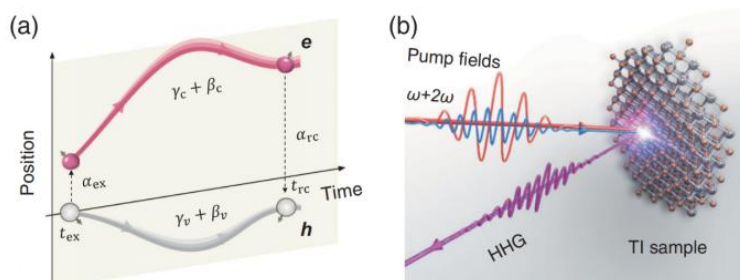
文章链接: <https://doi.org/10.1002/lpor.202401391>

2 拓扑表面态中 Berry 相效应的探究

Berry 相和 Bloch 波函数的拓扑性源于晶体电子内部量子属性之间的相互作用，在新型量子相态分类和功能开发方面具有重要意义。在时间或空间反演对称性破缺的量子材料中，Bloch 电子的循环运动会携带几何相位，这一相位定义了拓扑态并引发多种量子效应和非线性霍尔效应。通常，Berry 相的研究局限于具有清晰费米面的系统，此时电子带间不存在非绝热隧穿。

强激光场能够在光学周期的极短时间内引发 Bloch 电子快速演化，其在瞬态光学响应（如高次谐波生成和高阶边带生成）中体现波函数信息。对亚周期时间尺度上的电子动力学深入研究，为操控量子态的非线性响应提供了有效手段。当 Bloch 电子暴露于强激光场时，其能量和动量都会显著增加，同时记录下晶体对称性和电子几何的特征。由此展现的动量-能量相关性，为研究电子能带结构、Bloch 波函数、Berry 曲率及能带拓扑提供了重要见解。谐波的相干发射揭示了多种令人着迷的量子现象，包括无需精细环境控制即可观察到的量子相干性和相关性，如带间耦合、量子路径干涉以及多体库仑相互作用。然而，由于 Berry 相嵌入在跨越多个能带的复杂演化路径中，基于几何特性在量子水平上控制亚周期电子动力学的尝试仍然面临显著挑战。

近日，中国科学院上海光学精密机械研究所的李儒新院士，刘灿东研究员和刘鹏研究员团队，通过双色高次谐波光谱观察到了拓扑表面态（TSS）中与能带间相干性相关的 Berry 相。该 Berry 相沿着强场驱动的电子-空穴准粒子在强自旋轨道耦合电子带中的演化路径累积。通过引入次级弱场，扰动了 TSS 中 Dirac 费米子的演化，从而揭示了 Berry 相。光谱干涉图显示出偶次谐波振荡相位的显著变化。研究表明，这种调制特征与 TSS 非线性动力学中的几何相位密切相关。此外，Berry 相效应能够显著改变电子-空穴对的量子路径，进而增强在强自旋轨道耦合量子材料中利用光波操控电子自旋的能力。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。（金梦成）

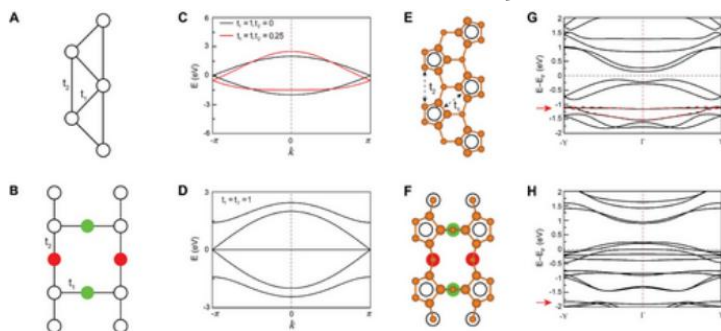


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.243801>

3 具有五边形性质的磷烯纳米带中的一维平带

平带在动量空间中无色散, 表现为宏观简并的本征态和消失的群速度。这一特性使其对任何相关微扰极为敏感, 即便是微弱的扰动也能解除简并, 从而引发多种强关联现象和奇异拓扑相, 如高温超导性、分数量子霍尔效应以及异常朗道能级等。平带所展现的独特物理性质长期以来备受关注, 大量实验工作致力于验证其存在。然而, 目前的实验研究主要集中在工程化材料中, 包括莫尔系统和人工系统。莫尔系统中较大的晶胞尺寸通常导致电子密度较低, 从而限制了高电子密度下的物理现象。因此, 在非莫尔固体材料中构建平带, 并进一步探索其相关的量子态, 已成为一个重要且紧迫的研究方向。平带通常可以分为两种类型: 局域态和平带因破坏性干涉而产生的延展态。后者因其波函数局限于特定区域形成紧凑的局域态而备受关注。通常需要严格的对称性和耦合条件才能引发破坏性干涉, 这也使得平带系统在固体材料中极为罕见。基于破坏性干涉构建平带包括通常只考虑最近邻耦合的 Kagome 晶格和 Lieb 晶格。虽然多种 Kagome 和 Lieb 纳米结构已被成功合成, 但复杂的多维电子跳跃导致其对应的电子平带仍未被观测到。而通过将二维材料降维制成的一维系统可以有效控制耦合自由度, 有利于理想平带的形成。

近日, 新加坡国立大学的吕炯和陈伟, 中国科学院大学的冯宝杰, 东南大学的张嘉霖联合团队采用表面直接合成方法, 在 Ag(110) 基底上构建了两种具有独特结构的磷烯纳米带 (PNRs): penta-hexa-PNRs 和 penta-dodeca-PNRs。这两种纳米带可以近似描述为电子一维锯齿晶格和 Lieb 晶格, 分别展现出独特的一维平带。一维 PNRs 的特定对称性是平带形成的关键因素。通过结合键分辨扫描隧道显微镜、扫描隧道谱、角分辨光电子能谱、紧束缚模型和第一性原理密度泛函理论计算, 精确揭示了 PNRs 的原子分辨结构及其对应的平带特性。相关内容发表于《Advanced Materials》上。(金梦成)

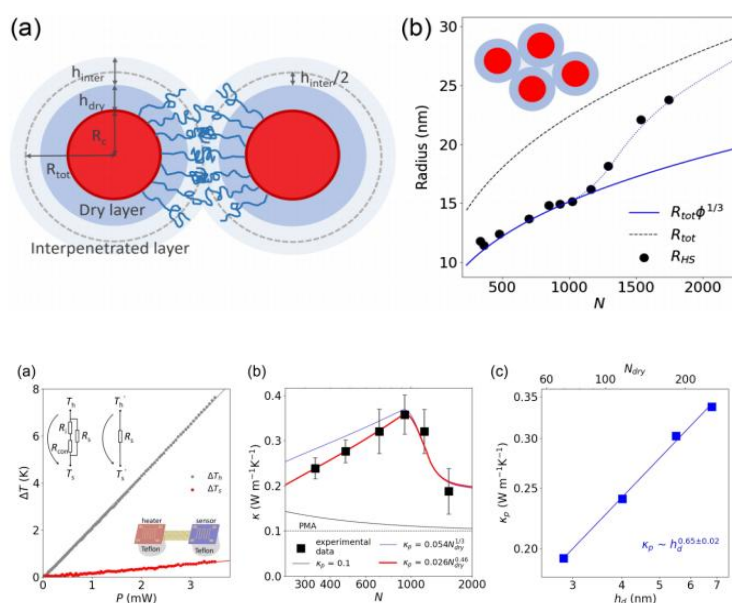


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202411182>

4 聚合物接枝纳米粒子熔体中的超扩散热传输

傅里叶定律一直以来可以很好地描述热传导这一自然界基本的能量传输方式。当样本大小超过声子平均自由程时， κ 对样品大小和几何形状的变化具有鲁棒性。然而，随着低维材料的发现，声子热导率是否仍然是材料固有的还有待验证，传统的傅里叶定律不再适用，其热传导行为表现出不同于常规扩散的特点。例如，在几乎一维和二维系统中，热导率 κ 可能随系统长度 L 呈现非线性增长，这种现象被称为“超扩散热传导”，与纳米材料的特殊结构、尺寸效应及能量输运机制密切相关。理论上已预测某些低维系统中热导率与长度 $\kappa \sim L^\alpha$ 呈幂次关系 ($0 < \alpha < 1$)，且实验证实了 NbSe₃ 纳米线的 $\alpha = 1/3$ 。但对具有远程相互作用的聚合物，只有分子动力学(MD)模拟预测了 $\alpha > 1/3$ ，并没有直接的实验证据。

针对这一科学问题，同济大学徐象繁教授课题组联合哥伦比亚大学、南卡罗来纳大学、德国马普所等，围绕高分子接枝纳米颗粒 (polymer-grafted spherical nanoparticles, GNPs) 熔体的热传导特性开展了深入研究。在这一体系中，研究团队通过系统调控高分子链的长度 (N) 和接枝密度，揭示了热导率的非平常变化规律，并在实验上首次观测到指数 $\alpha = 1/2$ 的超扩散热传导行为。具体而言，研究发现，当高分子链较长 ($N > 945$) 时，热导率 κ 随链长增加而减小，体现出分子链从扩展态向高斯状构象转变的特性。然而，对于较短的链长 ($N < 945$)，热导率出人意料地随着 N 增大而升高，并在 $N \approx 945$ 时达到峰值。这一现象表明，在较高接枝密度 ($\sigma = 0.47 \text{ chains/nm}^2$) 下，分子链间的扩展自由能起到了主导作用。更重要的是，该研究通过热导率的实验测量，发现 $\kappa \sim N^{0.46 \pm 0.02}$ ，这一结果为超扩散指数 $\alpha = 1/2$ 的理论预测提供了直接实验支持。这不仅是超扩散热传导的首次实验验证，也为未来低维材料的热管理设计提供了新思路。该工作明确了插植密度、链长及纳米颗粒半径对系统热导性能的协同作用。研究成果为设计具有高效热管理性能的新型复合材料提供了理论基础，并推动了低维材料热传导领域的发展。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)

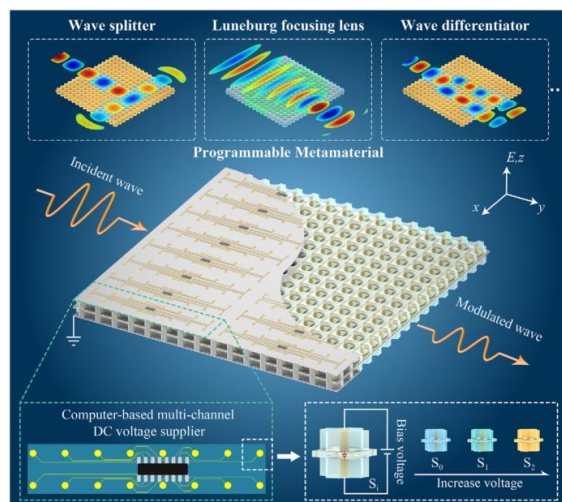


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.248101>

5 用于微波范围内平面电磁波控制的可编程超材料

电磁超材料是一种人工结构，由于其独特的性质，引起了广泛关注，并被广泛用于实现创新应用，例如负折射、隐形斗篷和高效吸收器。特别是，通过将活性元素纳入其结构中，可以通过施加外部刺激（包括热场、电场和磁场）来改变电磁超材料的行为。对平面内波的控制至关重要，在现代电磁和光学工程中有着广泛的应用。例如，通过一组板载组件和互连可以实现高效的数据处理。值得注意的是，人工智能（AI）光学芯片和信号处理器被视为开发下一代信息技术的关键组件。为此，二维可重构全波设备是实现深度学习和光学计算集成系统的首选。然而，传统的系统集成方式是将所有分离的设备/组件直接组装在一起。这种方法不仅需要单个设备的繁重设计工作，而且还限制了整个系统的全局调整。当今的AI启发式系统非常需要适用于可调和可重构全波应用的平面硬件架构的小型化设计，即可编程模块。然而，这种强大模块的实现尚未实现。

近日，浙大城市学院的彭亮教授和香港大学的张霜教授以及浙江大学的叶德信教授团队合作，提出了一种新的可编程超材料（PMM）架构，它为平面波控制提供了解决方案，并且可以方便地集成到板上。所提出的 PMM 由金属棒和变容二极管组合而成，两者都嵌入通过标准印刷电路板光刻创建的垂直孔（通孔）中。通过调整单个变容二极管的控制电压，可以改变相应 PMM 单元的有效参数。PMM 单元的响应可以调整为类似空气、类似电介质和类似完美电导体。因此，可以通过正确编程所有偏置电压来控制由 PMM 单元阵列组成的块体模块的功能。作为概念验证，单个 PMM 模块实现了三种功能 - 波分裂、Luneburg 聚焦和波分化。实验测量结果与模拟结果一致，验证了该设计。所提出的 PMM 是多功能、可集成和高速的，在实践中开启了可编程平面电磁波控制的范式。本文发表在《Laser & Photonics Reviews》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/lpor.202401472>

（来源：两江科技评论）