

超材料前沿研究一周精选

2025 年 5 月 26 日-2025 年 6 月 2 日

索引:

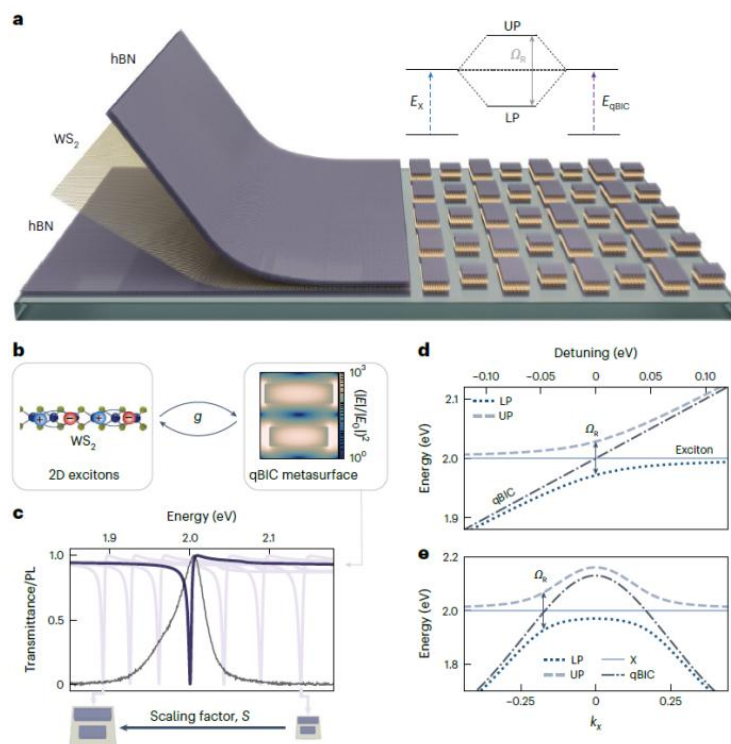
- 1、范德华异质结构超表面中超薄光腔的原子层组装
- 2、用于多模偏振操纵的可调微米级近场耦合超薄扭曲双层光子晶体
- 3、ENZ 导电氧化物薄膜中超快热电子动力学的控制
- 4、具有竞争磁序和莫尔不均匀性的超导魔角扭转三层石墨烯

1、范德华异质结构超表面中超薄光腔的原子层组装

光学超表面的进步彻底改变了光子学,为平面光学元件的设计和工程带来了新的机遇。同样,层状二维材料通过垂直异质结构的确定性组装,实现了物理学的突破,从而可以精确控制每层的原子组成。然而,将二维材料与传统介电或等离子超表面集成时,仍面临耦合效率不足、光损耗大等挑战。近年来,基于 hBN 的高 Q 值准束缚态超表面,实现了可见光波段的强光场约束与高效激子耦合,为超薄光子器件提供了崭新设计平台,展现出巨大潜力。

近日,慕尼黑大学的 Luca Sortino、Andreas Tittl 团队,展示了范德华异质结构超表面的概念,其中超薄多层范德华材料堆叠被塑造成精确设计的谐振纳米结构,以增强光与物质的相互作用。利用连续介质物理中的准束缚态,作者创建了源自封装在厚度低于 130 纳米的六方氮化硼中的 WS₂ 单层的本征高品质因子共振,实现了室温强耦合和极化子光致发光。此外,超表面耦合的激子-极化子表现出强非线性,导致强耦合区在 $<1 \text{ nJ cm}^{-2}$ 的超低通量下达到饱和,比以往基于二维材料的腔系统低三个数量级。该方法将超表面和范德华材料单片集成,并可扩展到现有的大量二维材料库,为在原子级精度和控制下实现超薄极化子器件的常规环境下运行开辟了新的途径。

相关工作发表在《Nature Photonics》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01675-4>

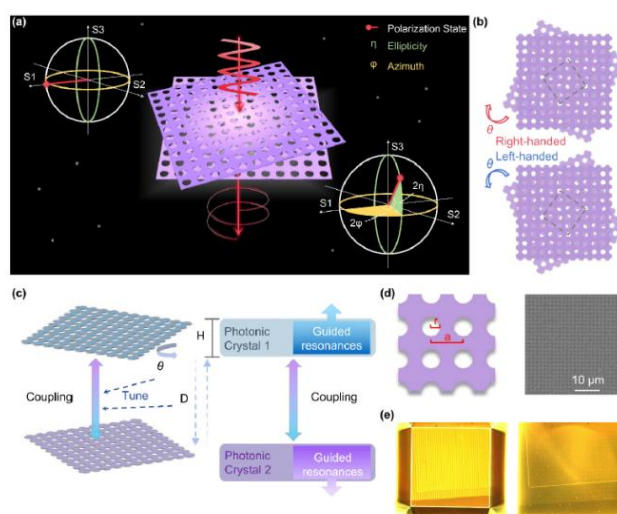
2、用于多模偏振操纵的可调微米级近场耦合超薄扭曲双层光子晶体

手性超表面是一种人工设计的亚波长尺度结构,通过破坏结构对称性来诱导光学手性。它们与圆偏振光的差异相互作用可以产生手性响应,例如旋光性 (OR) 和圆二向色性 (CD),它们分别表示左圆偏振光 (LCP) 和右圆偏振光 (RCP) 之间的相位差和透射率差。目前已报道了包括平带、局域态和莫尔非线性效应在内的重大发现。莫尔现象源于两个周期性晶格相对扭转时形成的超周期(或准周期)结构,新的波矢分布导致莫尔散射。值得注意的是,由于莫尔条纹和引导共振对扭转的强烈依赖性,莫尔光子结构的光学性质可以通过调节扭转角度来主动调谐。此外,层间扭转破坏了系统的镜像对称性,产生可调谐的莫尔手性光学响应。与以往的手性超表面相比,莫尔手性超表面无需严格的层间对准,提供了更大的自由度。此外,无需外部激励,只需改变扭转方向即可实现手性反转。然而,早期对莫尔光子结构的研究主要依赖于固定构型,缺乏现场可调性。此外,由于光子晶体厚度的限制,层间距离只能在数百纳米范围内调节,阻碍了长距离层间耦合的实现,进一步限制了系统的灵活性。

近日,国防科技大学徐威博士与刘肯教授团队制备了一种扭转双层光子晶体 (TBPhC),并通过实验证明了其能够原位控制透射光的偏振。它由两层相同的超薄非手性氮化硅光子晶体薄膜堆叠而成,薄膜之间设有气隙。TBPhC 通过面内旋转打破镜像对称性,形成莫尔条纹和手性共振。这些共振可以通过改变扭转角度进行主动调谐。此外,TBPhC 支持层间耦合,可以用耦合振子模型来描述。理论和仿真结果表明,通过改变扭转角度 (θ) 和层间距离 (D),可以有效控制层间耦合,从而实现在多种模式下对共振手性的调控。与之前的研究相比,超薄单层光子晶体厚度仅为 50 纳米。厚度的显著降低有利于光子集成,并

增强了 TBPhC 的可调谐性。因此, TBPhC 可以在更大的几何参数变化范围内工作, 从而在控制其光学特性方面具有更大的灵活性。这种有源超薄偏振转换器对于通信和信号处理应用具有潜在的重要意义。

相关工作发表在《Nano Letters》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c01724>

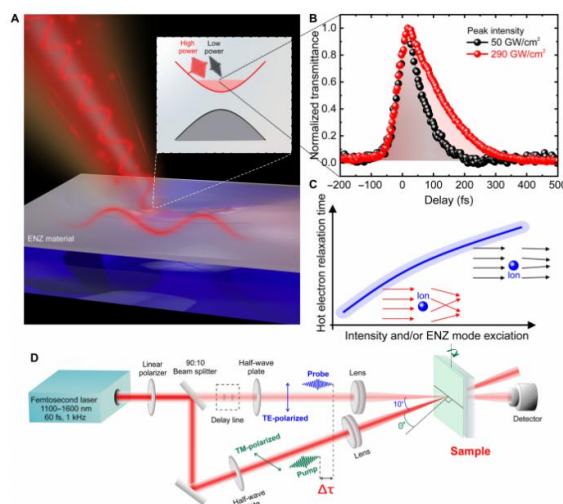
3、ENZ 导电氧化物薄膜中超快热电子动力学的控制

在光子学飞速发展的今天, 如何在纳米尺度下实现对光信号的快速调控, 成为构建下一代光通信和量子计算器件的关键难题。其中, 具有“零介电常数”特性的透明导电氧化物 (TCO) 材料因其在近红外波段表现出独特的非线性光学行为, 受到广泛关注。特别是, 当材料的介电常数实部趋近于零 (即 epsilon-near-zero, ENZ 状态) 时, 会引发电场强烈增强、光束压缩和超强非线性响应等奇异现象, 使其成为理想的超快光学平台。以铝掺杂氧化锌 (AZO) 和铟锡氧化物 (ITO) 为代表的 ENZ 薄膜, 因其高损伤阈值、低自由载流子密度以及对极端强场的适应能力, 已在高次谐波产生、超连续谱扩展、光克尔效应等前沿研究中扮演了重要角色。然而, 尽管近年来关于 ENZ 材料非线性行为的研究不断深入, 关于其“热电子”的超快动力学机制, 尤其是在飞秒激光强光照射下电子如何升温、冷却以及如何受 ENZ 模式激发影响的机制, 仍缺乏系统认识。传统的“两温模型” (TTM) 由于忽略了非热电子的瞬态行为, 已难以准确描述 ENZ 体系中电子-电子 (EEC) 与电子-声子 (EPC) 散射耦合下的复杂非线性过程。因此, 建立更具物理精度的理论模型, 并结合实验证实不同调控参数 (如激光峰值强度、入射角、激发波长) 对热电子弛豫时间的影响, 成为理解和操控 ENZ 非线性响应的核心科学问题。

针对这一挑战, 加州大学 Sudip Gurung, Ho Wai Howard Lee 等, 系统开展了对 ENZ 导电氧化物薄膜中热电子超快动力学的实验和理论研究。该研究以 AZO 和 ITO 薄膜为代表样本, 基于自研的非微扰流体力学模型 (HDM), 首次量化描述了激光脉冲强度与 ENZ 模场增强 (Field Intensity Enhancement, FIE) 对热电子弛豫时间的协同调控机制。实验方面, 团队构建了飞秒分辨的简并泵浦-探针系统, 实测结果表明, 当激光峰值强度从 20 提升至 200 GW/cm^2 时, AZO 与 ITO 样品的热电子弛豫时间分别增长了近三倍; 而 ENZ 模式激发则可额外延长弛豫时间超过

40%。理论模型显示，这一现象源于高能电子在极短时间内受限于 EPC 过程的抑制与热速度提升，导致散射几率降低、热化速率下降，进而放缓电子对晶格的能量转移。此外，该团队还提出了一个包含波长与角度双参数的规范指标“慢化因子” ($\zeta(\theta, \lambda)$)，可有效预测不同入射条件下 ENZ 模激发对弛豫时间的影响趋势。相较传统金属如金的热电子弛豫时间，AZO 和 ITO 短薄膜的响应快了 20 倍以上，展现出极高的应用潜力。本项工作不仅深化了对 ENZ 非线性机制的理解，更为开发超快光学开关、动态脉冲整形器和全光调制器等高性能器件奠定了坚实基础，具有重要的科研和产业前景。

相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）



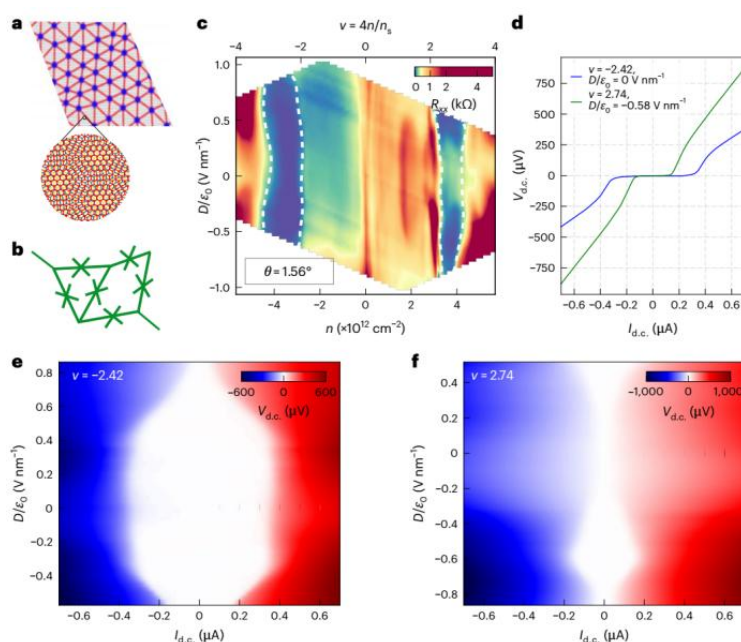
文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adu8850>

4、具有竞争磁序和莫尔不均匀性的超导魔角扭转三层石墨烯

近年来，扭转多层石墨烯，尤其是“魔角”扭转双层或三层石墨烯（magic-angle twisted bilayer/trilayer graphene, MATBG/MATTG），成为凝聚态物理最前沿的研究热点之一。在这些体系中，不同石墨烯层间以特定小角度堆叠，会形成摩尔（moiré）超晶格，从而导致能带极度平坦，电子之间的库伦相互作用被显著增强，进而催生出一系列强关联电子态，如莫特绝缘态、超导态、奇异金属态等。这些现象不仅挑战了传统超导理论，也为探索高温超导和重费米子行为提供了新的二维平台。相比扭转双层石墨烯，MATTG 在实验上展现出更丰富的相图结构，既包含狄拉克能带，也存在由摩尔调制形成的扁平能带，甚至还观测到了违反泡利极限的行为，引发了学界关于其潜在非常规超导机制的广泛讨论。然而，尽管已有理论预言摩尔超导中存在磁序竞争态的可能性，实验上直接揭示其具体机制与物理图像仍面临诸多难点。如何在纳米尺度下准确捕捉这些错综复杂的电子态相互作用，成为当前研究的核心瓶颈之一。

近日，印度塔塔基础研究所 Ayshi Mukherjee, Surat Layek, Subhajit Sinha, Mandar M. Deshmukh 等首次在“魔角”扭转三层石墨烯（MATTG）中，实验揭示了超导态与面内磁序之间的竞争关系，并系统分析了由晶格松弛诱发的摩尔非均匀性对超导行为的深远影响。研究团队通过构建高质量的 MATTG 器件，利用双栅极结构精准调控载流子浓度与垂直电场，实现了对超导区及其邻近“正常相”区域的细致剖析。他们提出一种创新的开关电流统计测量方法，以“统计学”视角

探测约万个超导-常态跃迁事件，揭示了超导电流随温度和面内磁场变化的非单调行为。这种“异常”响应恰恰说明系统中存在与超导态竞争的有序态，很可能来源于面内磁性。更令人瞩目的是，通过开关电流的磁场扫描，首次观察到明显的磁滞与方向依赖特征，结合邻近区域线性正磁阻的实验数据，进一步强化了面内磁序存在的证据。这种磁序不仅打破了时间反演对称性，还可能与自旋-谷自由度强耦合，赋予 MATTG 类“重费米子”材料的物理行为。此外，研究人员还首次在 MATTG 中观测到超导二极管效应（superconducting diode effect），进一步验证了体系中时间反演对称性被破缺，暗示存在复合态的竞争机制。除了磁序之外，该研究还系统刻画了 MATTG 体系中的摩尔不均匀性，明确指出不同局域扭角区域（twistons 与 solitons）构成了弱连接的超导岛链网，可视作约瑟夫森结（Josephson junctions）阵列，其量子跃迁过程可分为热激活与量子隧穿两个机制。研究还通过电流-电压非线性拟合估算了超流刚度（superfluid stiffness），证实 MATTG 中存在显著展宽的 BKT（Berezinskii-Kosterlitz-Thouless）跃迁，进一步反映出体系的强不均匀性与低维相干态的独特耦合。该成果不仅为理解非常规超导提供了关键实验证据，也在更宏观的角度上揭示出二维量子材料中，磁性与超导性之间的复杂竞合关系。相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02252-4>

（来源：两江科技评论）