

超材料前沿研究一周精选

2025年5月1日-2025年5月4日

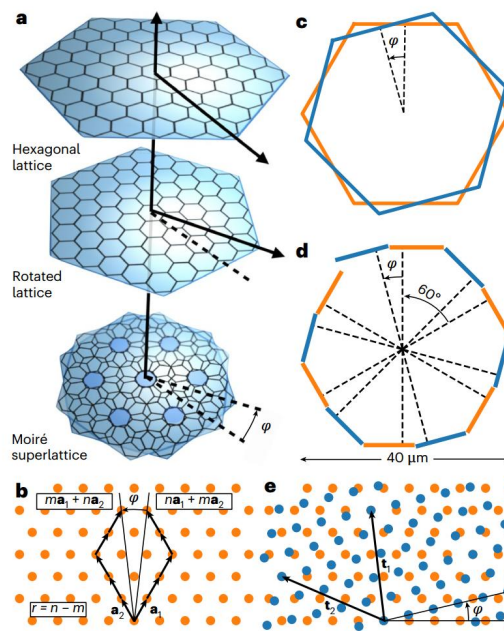
索引:

- 1、等离子体莫尔超晶格中的斯格明子光袋
- 2、从合成维度的时间边界效应中探测体带拓扑
- 3、量子扭转显微镜揭示扭转双层石墨烯中的声子色散与电子-声子耦合机制
- 4、菱形石墨烯超晶格中的可调分数陈绝缘体
- 5、基于莫尔超晶格的高品质因数粘弹性纳米机械谐振器
- 6、形成无缝表面的厚板折纸结构

1、等离子体莫尔超晶格中的斯格明子光袋

近年来,莫尔图案因其独特的几何干涉与拓扑调控能力在凝聚态物理领域引发了广泛关注。此类结构由两个周期性晶格通过相对旋转叠加形成,最初发现于织物叠加产生的干涉条纹,现已成为探索强关联电子态、非常规超导性及分数量子反常霍尔效应等复杂现象的核心平台。以扭转双层石墨烯为例,其莫尔超晶格通过调控层间扭转角可诱导平带拓扑态,为磁性、超导性和电荷密度波等研究提供了新机制。与此同时,斯格明子作为一种具有非平凡拓扑的三维准粒子,在磁性材料、液晶体系及光学系统中展现出丰富的物理行为。尤其在表面等离子体极化激元(SPP)系统中,通过干涉效应可构建斯格明子晶格,但其在光学莫尔超晶格中的拓扑特性与动态调控仍未被系统揭示。如何将扭转电子学的灵活性与斯格明子拓扑相结合,从而在光场中实现可编程的局域拓扑结构,成为光子学与拓扑物理交叉领域的重要挑战。

近日,德国斯图加特大学的Harald Giessen教授课题组,提出了一种名为“等离子体扭转电子学”的创新方法,首次在等离子体系统中实现了斯格明子光袋结构。研究团队通过叠加两个相对扭转的六边形斯格明子晶格,构建了具有周期性超晶格的莫尔结构,并利用时间分辨偏振光电子显微镜(PEEM)技术对其电场分布进行全矢量时空解析。实验结果表明,每个超晶格单元内存在由多个斯格明子组成的拓扑构型——斯格明子袋,其内部包含 N 个拓扑电荷为 $+1$ 的斯格明子,外围则由极性相反的斯格明子边界包裹,整体拓扑电荷为 $N-1$ 。通过调控层间扭转角(如 13.2° 、 16.4° 等)与旋转中心位置,可精确控制斯格明子袋的尺寸与拓扑电荷数。理论模拟与实验结果进一步揭示了此类结构的动力学特性:在一个光学周期内,斯格明子袋的拓扑电荷会经历从 $+(N-1)$ 到 $-(N-1)$ 的周期性反转,其稳定性在扭转角偏差 $\pm 3^\circ$ 范围内仍能保持。此外,研究还将该方法拓展至meron晶格与自旋拓扑结构,证实了多层莫尔超晶格在产生复杂自旋纹理方面的潜力。该技术为光场的局域拓扑操控提供了新范式,在超分辨显微成像、拓扑光子器件及量子信息编码等领域具有重要应用价值。此项研究成果发表于《Nature Physics》。(刘梦洋)

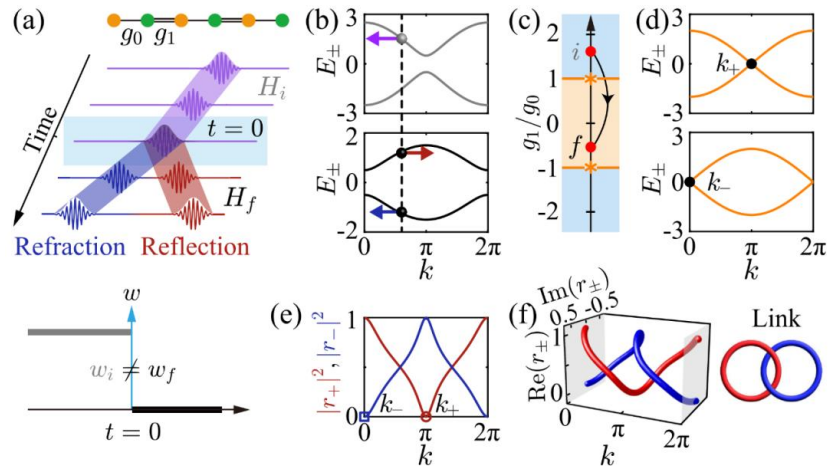


文章链接:<https://doi.org/10.1038/s41567-025-02873-1>

2、从合成维度的时间边界效应中探测体带拓扑

时间界面指系统全局参数在时间维度上突变形成的边界。当电磁波穿越分隔两个空间均匀介质的时间界面时，会发生时间折射与时间反射，遵循由麦克斯韦方程组时空对偶性推导出的时间斯涅尔定律。由于时间（空间）平移对称性，能量（动量）在时间（空间）界面前后分别守恒，因此空间界面上的动量变化对应于时间界面上的能量变化。理想的时间界面要求系统在远短于波动时间尺度内迅速变化，这对材料提出了很高挑战。近年来，随着近零折射率材料、微波系统和声学系统中时间界面的实验实现，时间域操控电磁波的潜力逐渐展现。周期性折射率突变构建了光子时间晶体，孕育出非平凡动量带拓扑及时间拓扑界面态，揭示了时间-边对应关系：体态拓扑不变量决定不同区域间界面态的存在。尽管已有丰富的空间（或时间）拓扑界面态研究，但在空间拓扑不同的系统中引入时间界面所引发的拓扑效应尚未被探索。最近，基于 SSH 链的实验首次实现了超冷原子系统中的时间界面，并验证了时间斯涅尔定律。由此引出：当时间界面分隔空间上具有不同体拓扑的区域时，会出现怎样的拓扑特征？

近日，南开大学金亮教授和上海交通大学袁璐琦教授团队展示了一种适用于时间界面的新型体-边对应关系。在时间界面跨越不同系统的过程中，时间折射或反射将在简并点动量处消失，直接标志着拓扑相变。此外，时间折射与反射系数在布里渊区形成缠绕结构，其连接数等于界面两侧绕数之差。因此，时间界面效应能够探测拓扑相变与体态拓扑，区别于传统直接测量体拓扑不变量或边界态的方法。团队在合成频率晶格中进行了验证，其中频率空间类比于真实空间维度。并特别强调，隐藏在时间界面效应中的拓扑特性具有很强的鲁棒性。本工作为拓扑光子学中利用时间界面探测与操控拓扑现象提供了新的可能。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



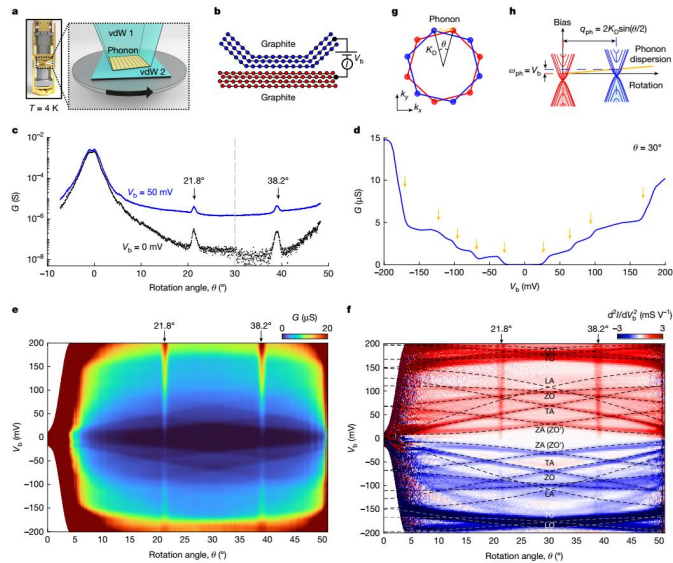
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.163801>

3、量子扭转显微镜揭示扭转双层石墨烯中的声子色散与电子-声子耦合机制

合机制

在量子材料领域，电子与声子的耦合（EPC）是决定材料电学、热学，甚至超导性质的核心物理机制之一。在单层石墨烯中，电子-声子耦合极弱，造就了其超高的载流子迁移率和长程弹道输运特性。然而在扭转双层石墨烯（TBG）这类莫尔超晶格系统中，电子与声子的相互作用却变得复杂而重要。近年来的理论工作指出，在魔角 TBG 中，强电子-声子耦合可能驱动非常规超导或“奇异金属”行为，其中“phason”（层间反对称声子模）等低能模式被认为是关键因子。然而，实验上想要同时获得声子色散关系和模式分辨的耦合强度，却长期受限于测量手段的分辨率和灵敏度，尤其是在低能区域。传统方法如拉曼散射、电子能量损失谱等，要么缺乏动量分辨率，要么无法在低温下直接探测声子发射过程，从而难以对 EPC 进行定量和动量分辨分析。

近期以色列雷霍沃特魏茨曼科学研究所的 Ilani 教授团队开发出首个低温“量子扭转显微镜”（Quantum Twisting Microscope, QTM）系统，首次实现了声子色散关系和电子-声子耦合强度的同时动量分辨测量。研究人员将 QTM 平台扩展到 4K 低温环境下，借助自组装的二维扭转界面，实现了动量守恒的不弹性隧穿测量。通过调节扭转角度，他们能够连续调谐电子之间的动量差，进而量化分析不同声子模式的发射行为。具体而言，他们在 6° 以上的 TBG 中，系统测量了多个声子模（包括 LO、TO、TA、ZA 等）的色散曲线和耦合强度，并发现一种随扭角减小而增强的低能“phason”模式，其耦合强度呈现罕见的随动量减小而增强的趋势。这种强烈的电子-层间反对称声子耦合源自于 phason 对层间隧穿幅度的调制，是首次在实验中被直接量化。这项工作不仅为理解 TBG 中超导和奇异金属行为的微观机制提供了有力证据，也开创了一种适用于等离子激元、磁振子、spinon 等多种中性集体激发态的谱学研究方法，为量子材料领域带来一种前所未有的“显微镜”。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）

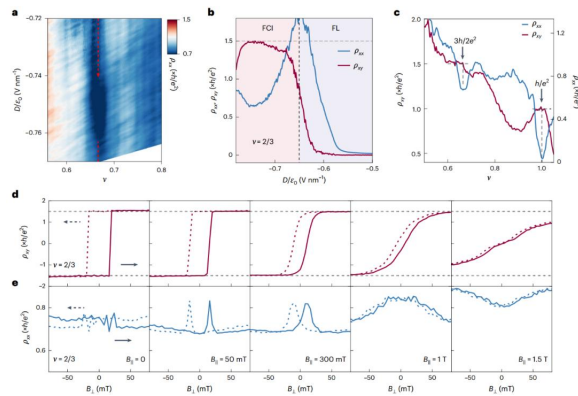


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08881-8>

4、菱形石墨烯超晶格中的可调分数陈绝缘体

近年来,拓扑量子物态的研究为凝聚态物理开辟了新的前沿方向。分数陈绝缘体(Fractional Chern Insulators, FCIs)作为一类无需外加磁场的拓扑量子态,因其分数量子化的霍尔平台和非阿贝尔任意子等特性,被视为实现拓扑量子计算的潜在平台。传统分数量子霍尔效应依赖强磁场下的朗道能级,而分数陈绝缘体通过材料本征的拓扑平带与强电子关联作用,可在零磁场条件下实现类似行为。莫尔超晶格因其可调谐的平带结构和量子几何性质,成为探索分数陈绝缘体的理想体系。此前的研究已在扭曲二碲化钼(MoTe₂)和菱形五层石墨烯/六方氮化硼(hBN)超晶格中观测到分数陈绝缘态,但如何在更广泛的材料体系中实现可调谐的分数陈绝缘体,并揭示其相变机制,仍是领域内的重要挑战。

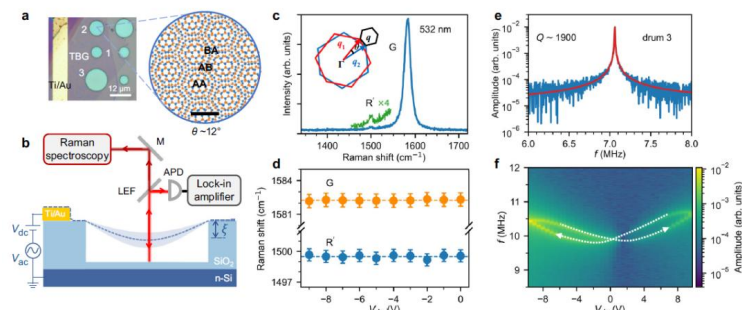
近日,北京大学的卢晓波助理教授课题组与北京科技大学的刘健鹏副教授课题组合作,聚焦于菱形六层石墨烯(RHG)与hBN构成的莫尔超晶格体系,通过实验与理论结合揭示了其整数与分数量子反常霍尔效应的共存及调控规律。研究团队利用双门电压调控载流子密度和位移电场,在零磁场条件下观测到陈数为1的整数量子反常霍尔态(IQAHE),其霍尔电阻 ρ_{xy} 精确量化至 h/e^2 (精度>99.5%),且纵向电阻 ρ_{xx} 趋近于零。进一步通过调节位移电场与垂直磁场,在填充因子 $\nu=2/3$ 处发现了分数量子反常霍尔效应(FQAHE),其霍尔电阻稳定在 $3h/2e^2$,并伴随 ρ_{xx} 的显著下降。尤为重要的是,该分数态在磁场诱导的相变中表现出鲁棒性:当垂直磁场超过临界值时,系统发生霍尔电阻符号反转,但 $\nu=2/3$ 的分数态仍保持量化特性。理论计算表明,莫尔势对拓扑平带的形成至关重要,即使在高位移电场下将电子推离莫尔界面,仍需100%强度的莫尔势才能打开陈绝缘体的能隙。此外,研究通过对比六层与五层石墨烯体系的阈值电场差异,揭示了层数对有效相互作用强度的影响,为设计新型拓扑量子材料提供了关键见解。这一发现不仅扩展了分数陈绝缘体的材料家族,还为通过电场、磁场及莫尔工程调控分数量子态提供了新思路,有望推动分数量子电荷与非阿贝尔统计的实验探测。该成果发表于《Nature Materials》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02225-7>

5、基于莫尔超晶格的高品质因数粘弹性纳米机械谐振器

粘弹性材料显示出非晶态聚合物和人体组织中已知的粘性液体和弹性固体的特性。在机械扰动下，粘弹性材料表现出瞬时弹性响应，随后是随时间变化的机械响应和能量耗散。这种随时间变化的力学行为导致了具有许多有用应用的新材料的发现。粘弹性现象也可能丰富纳米机械谐振器的动力学，其中粘弹性迄今为止尚未发挥作用。一方面，粘弹性可能会增加耗散。另一方面，与直觉相反，它可能会在类似于耗散稀释的过程后降低耗散。将二维单层旋转错位堆叠会产生一个莫尔超晶格，它可以显著改变系统的电子结构。具有“魔角”（MA, $\theta \sim 1.1^\circ$ ）的扭曲双层石墨烯（TBG）的费米能附近的超平坦带的出现是相关电子相位变化的基础。然而，结构光滑的 2-D 界面中滑动和钉扎之间的竞争可能会使具有中等扭转角的 TBG 保留粘弹行为，这可以为开发粘弹纳米机械共振器提供基础。近日，中科院半导体研究所的谭平恒研究员、张昕研究员团队与苏州大学 Joel Moser 教授合作，提出了扭曲双层石墨烯膜中纳米机械振动的可控滞后响应，并将其归因于粘弹性。伴随着这种滞后响应，研究人员测量到非常大的机械品质因数 Q ，在室温下达到了约 1900 的非常高的值。研究人员将 Q 的增强解释为耗散稀释的特征，这是一种最近在量子光机系统中被利用的相当有趣的现象。粘弹性具有“无损”的潜力，克服了波纹配准，并加强了这种耗散稀释。该工作介绍了莫尔超晶格作为一种有前景的系统，用于通过旋转角度进行粘弹性工程和观察新兴的纳米机电耦合。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

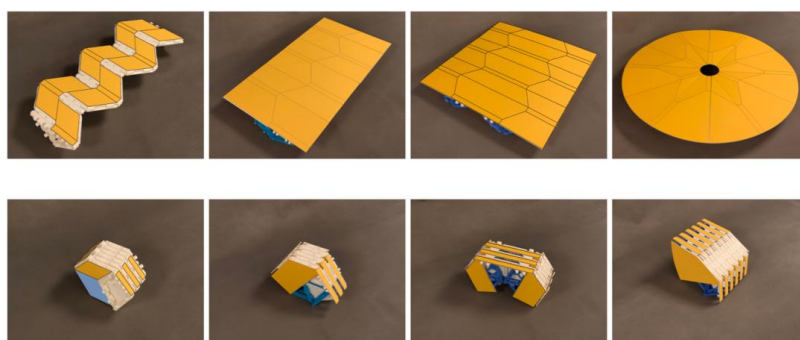


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58981-2>

6、形成无缝表面的厚板折纸结构

折纸是一门古老的艺术。刚性折纸是折纸的一个专门分支，在折叠过程中，纸张的刻面保持刚性，既不弯曲也不拉伸。形状的转变仅沿折痕发生。这种折纸在各个领域都有巨大的应用潜力，包括太空探索、超材料、机器人、旋翼和可部署结构。除了平纸折叠，折纸管是另一个重要的研究领域。这些结构在诸如支架、能量吸收结构、机器人手臂、自锁可展开管状结构等领域都有应用。因此，它们引起了不同学科研究人员的极大兴趣。将折纸应用于特定的实际场景可能非常复杂和具有挑战性，特别是当需要厚材料来确保运动精度和结构鲁棒性时。折叠过程中材料厚度的累积会导致结构干扰，使折叠或展开变得困难。为了克服这些障碍，已经开发了各种厚度适应策略，包括使用柔性接头、偏置面板或接头、分裂折等。这些技术旨在减轻面板干扰，并扩大原创设计在工程应用中的可行性。

近日，新加坡国立大学的 Gregory S. Chirikjian 教授团队提出了一种设计和优化具有无缝顶面的厚板折纸结构的综合方法，以解决先进工程应用的可部署系统中的挑战。该研究从一般的折纸管设计开始，重点修改谷折痕面板并延伸邻近的面板以消除表面凹槽，从而实现无缝且功能性的顶层。推导出几何条件以确保运动兼容性，并执行详细的运动学分析以验证修改。该研究探索了线性轨迹和曲线轨迹折纸结构，展示了镶嵌如何提高折叠展开比。此外，引入了一种用于减少顶板数量的方法，简化了制造，实现了轻量化设计，并提供了用于创建可定制形状的可调节性。旋转接头也可以用柔性铰链代替，以减轻结构的重量。本文中的方法并不局限于平坦的顶部表面，它提供了更大的可调节性。顶层面板的可变厚度将允许创建自由形式的曲面。该研究不仅促进了对厚面板折纸机制的理解，而且还为创建具有无缝表面的可展开结构提供了实用的解决方案，使其适合广泛的工业应用。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-025-59141-2>
(来源：两江科技评论)