超材料前沿研究一周精选

2025 年 3 月 17 日-2025 年 3 月 23 日

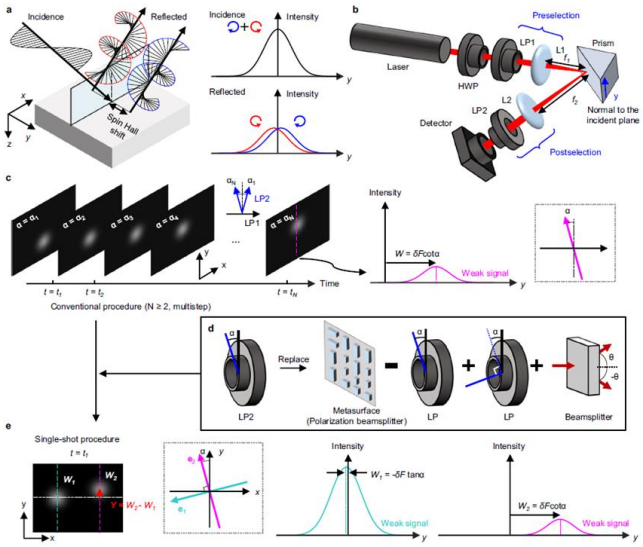
索引：

1、使用超表面单次弱测量实时观察光的自旋霍尔效应
2、准晶波导阵列边缘的光局域化观测
3、通过六方氮化硼中的双曲声子极化激元实现跨固体界面的超快倏逝传热
4、Berry 偶极子声子晶体中取向依赖的 Landau 能级和螺旋零模
5、基于 MoSe2PdSe2 范德华异质结构的非致冷红外长波偏振敏感光电探测器
6、分数陈绝缘体中的铁磁性与高次平带拓扑
7、合成维度集成等离子体拓扑 Harper 纳米链的近场成像研究
8、推动室温磁性半导体发展的有机自由基电荷转移共晶研究

1　使用超表面单次弱测量实时观察光的自旋霍尔效应

光的自旋霍尔效应(SHEL)是指光在光学界面上的折射和反射过程中发生的微观、横向和自旋相关的位移，这些位移会改变其传播方向。这种微观效应是由光的横向性和三维空间中矢量旋转产生的几何相位驱动的。SHEL 的一个显著例子是将倾斜入射的线偏振光分成两个圆偏振，即左圆偏振和右圆偏振（分别为 LCP 和 RCP）。由于位移量或自旋霍尔位移通常远小于波长，因此分裂的光束在空间上重叠，无法通过直接观察来区分。因此，人们对通过使用人工设计的界面（如超材料和超表面）来增强自旋霍尔位移进行了深入的研究。当光的自旋霍尔效应(SHEL)与弱测量的信号放大技术结合时，可以对未知界面进行高精度、无损检测。然而，由于其多步过程，其在动力学检测中的应用受到限制。

近日，光州科学技术院的 Minkyung Kim 团队将该过程压缩为一个步骤，通过用偏振分束超表面代替传统装置的一个组件，实现了 SHEL 的免校准、单次测量。该方法允许即时评估 SHEL，即使原始光束位置有波动。作为概念的证明，将超表面辅助的弱测量应用于静态和动态场景，其中从单个捕获图像获得的实验结果证明了与理论的良好一致。这种对 SHEL 的实时观测突出了其对动态过程进行高精度监测的潜力，如生物医学传感和化学分析。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

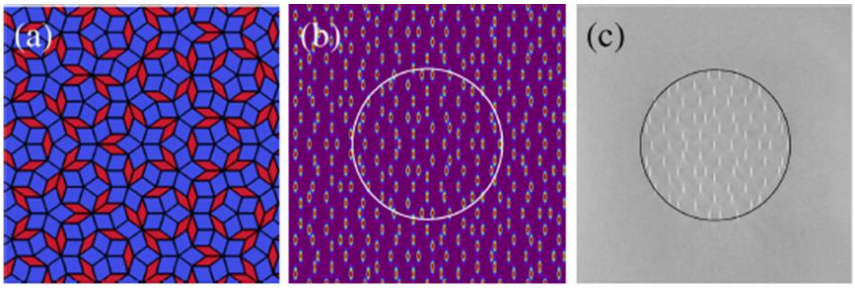


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-56728-7

2　准晶波导阵列边缘的光局域化观测

准周期晶体，或简称为准晶，表现出长程有序性，但缺乏平移对称性。与只能具有某些旋转对称性的严格周期性晶体相比，准晶可以具有任何离散的旋转对称性，并具有有序和无序介质的特性，这使得它们变得复杂并具有研究吸引力。准晶结构的一个关键方面是它们对波的演化、局域化和非平凡拓扑的影响。例如，已经表明，光可以局限在由两个扭曲的周期性子晶格形成的非周期性莫尔晶格中。最近的实验表明，光的线性局域化可以发生在准晶体的块体中。此外，准晶体的非平凡几何形状与光子系统的非线性响应相结合，导致了许多令人着迷的光动力学现象和准晶体块体中的孤子形成。尽管如此，虽然光在准晶体块体中的线性和非线性传播得到了充分研究，但在准晶体边缘的传播仍然很大程度上未被探索。考虑到周期性结构的边缘会排斥光，而在无序晶格中可以实现近表面局域化，截断准晶体可能会导致全新的近表面局域化场景。除了光子系统之外，这些效应还可能对微腔、非周期拓扑系统和低维系统中的激子极化产生影响。此外，目前对非周期光学晶格（包括莫尔晶格和准晶体）内非线性原子系统的兴趣表明，这些发现也可能与原子物理学高度相关。

近日，巴伦西亚大学的 S. K. Ivanov 团队报道了在准周期结构边缘不寻常的线性和非线性光局域化性质。作者使用激光制造的波导阵列，放置在彭罗斯拼贴的顶点。然后使用圆形掩模截断该阵列，仅留下中心在半径为 r 的圆内的波导。对于某些半径，系统呈现出位于阵列边缘的线性本征模，而对于其他半径，这种边缘局部化不会发生。这一特性通过在熔融石英样品中制造的准晶阵列中边缘模式的直接激发得到了实验证明。为了解释这一现象，提供了分析证据，表明这种效应来自于角带的平坦度，这可能代表了准周期系统中边缘局域化的一种独特机制。由于克尔型聚焦非线性，这种边缘局域模经历非线性分叉，产生无阈值边缘孤子族。它们表现出源于线性光谱离散性的独特性质，这是阵列非周期性的结果。这种相互作用导致了非线性区域中有趣的光行为。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）

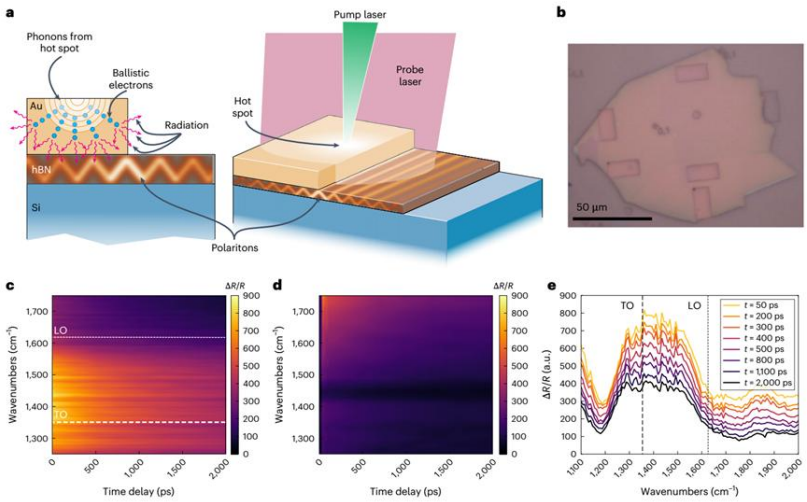


文章链接：https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.113803

3　通过六方氮化硼中的双曲声子极化激元实现跨固体界面的超快倏逝传热

在高性能电子器件、光子芯片和纳米级热管理系统中，热传输的效率直接影响着器件的稳定性和能耗。然而，在固体-固体界面上，由于晶格振动（声子）的不匹配，热流通常会受到极大阻碍，这一现象被称为热边界电导受限问题。在传统的热传输机制中，热量主要通过声子-声子散射的方式在材料界面间传播。然而，由于声子的群速度有限，尤其是光学声子，其传输热量的能力远低于声速较高的声学声子，因此界面热传输效率受到极大限制。这种限制对于高功率电子元件而言尤为关键，因为局部热积累可能导致性能下降，甚至器件失效。近年来，科学家发现了一种新的热传输机制，即利用声子-极化激元（phonon-polariton，PhP）来促进界面热传输。声子-极化激元是一种由光和物质的相互作用产生的混合准粒子，能够在特定频率范围内以极快的速度在材料界面间传播。尤其是在六方氮化硼（h-BN）等超材料中，声子-极化激元可以形成超快、超局域的双曲模式（hyperbolic phonon-polariton，HPhP），从而突破传统声子介导的热传输限制，为高效热管理提供新的可能性。然而，目前这一机制仍然缺乏直接的实验验证，尤其是在全固态界面上的应用尚未深入研究。

近日，美国弗吉尼亚大学的 Patrick E. Hopkins 教授团队和维尔范德比尔特大学 Joshua D. Caldwell 教授团队成功利用六方氮化硼（h-BN）中的超材料声子-极化激元模式（HPhP），实现了超快的固体界面热传输，突破了传统声子热传输的速度极限。研究团队采用了飞秒泵浦-探测热反射测量技术（pump-probe thermoreflectance），通过中红外波段的可调谐探测脉冲，实时观测了 h-BN 材料内部的 HPhP 模式。他们设计了一种特殊的实验装置，其中一层金（Au）薄膜作为热源，被飞秒激光加热后，其高能电子在金-h-BN 界面辐射出 HPhP 模式，使热量能够以远超传统声子热传输的速率跨越界面。实验结果表明，相较于普通的声子-声子散射传输方式，该机制能够将界面热传输速率提升数个数量级，达到接近光速的水平，实现了前所未有的超快热管理能力。进一步的光谱分析和数值模拟显示，HPhP 通过近场辐射机制（near-field radiative heat transfer, NFRHT）有效地从金膜传递至 h-BN 内部，并在整个界面上形成强烈的热传输增强效应。这一发现证明了 HPhP 模式不仅能够提升固体界面间的热传输效率，而且能够远距离传播热量，为未来的高功率电子器件和光子学系统提供了一种全新的热管理策略。首次在实验上验证了双曲声子-极化激元在固体界面上的超快热传输能力，并为突破传统声子传输的限制提供了直接的实验依据。相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）

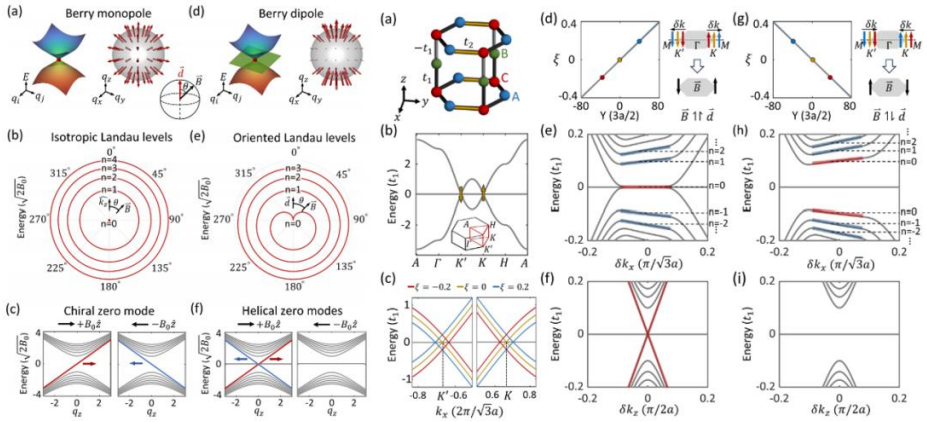


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41563-025-02154-5

4 Berry 偶极子声子晶体中取向依赖的 Landau 能级和螺旋零模

能带交叉在凝聚态物理中扮演着至关重要的角色，是多种拓扑半金属与绝缘体形成的基础。其中的典型例子是 Weyl 点，它可被视为动量空间中 Berry 曲率场的源或汇，并以整数 Chern 数进行拓扑表征。Berry 单极-反单极对的存在引发了诸多奇异的拓扑现象，如 Fermi 弧面态、手性反常以及量子霍尔效应。由于 Berry 单极的曲率在动量空间中呈各向同性分布，相关拓扑响应也体现出各向同性特征。例如，Weyl 点在磁场作用下，所形成的 Landau 能级与磁场方向无关，同时沿磁场方向总存在单向传播的手性零模。然而，近期理论研究提出了一种超越上述范式的新型能带交叉结构，即 Berry 偶极子。这种结构具有偶极型的 Berry 曲率分布，尽管整体 Chern 数为零，却携带非零 Berry 偶极矩，能够诱导异常霍尔导电性和轨道磁化强度等独特的量子几何效应。更重要的是，Berry 偶极子也被视为从平庸绝缘体向三维 Hopf 拓扑绝缘体转变的临界点，拓展了传统“十重分类”框架之外的拓扑物态理论。最近的理论进一步预测：当 Berry 偶极子在外磁场的作用下，将产生明显依赖磁场方向的 Landau 能级。然而，这一现象此前从未在实验中被证实。

近日，香港大学路翠翠教授和张霜教授团队合作通过构建非均匀耦合的三维声子晶体实现 Berry 偶极点，并通过耦合强度的空间调制引入赝磁场，从而在实验中首次观察到了取向依赖的 Landau 能级与螺旋零模。团队发现，当赝磁场方向与 Berry 极矩方向平行时，系统中出现一对沿赝磁场方向正反传播的螺旋零模；而当磁场方向反转时，这些零模随之消失，Landau 能级则演化为具有能隙的谱结构。这一现象可类比为一种“由磁场方向控制开关状态”的拓扑晶体管。值得强调的是，这种取向依赖的 Landau 能级完全来源于 Berry 曲率的几何特性，属于纯粹的量子几何效应，无法通过传统的半经典量子化方法捕捉。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（金梦成）



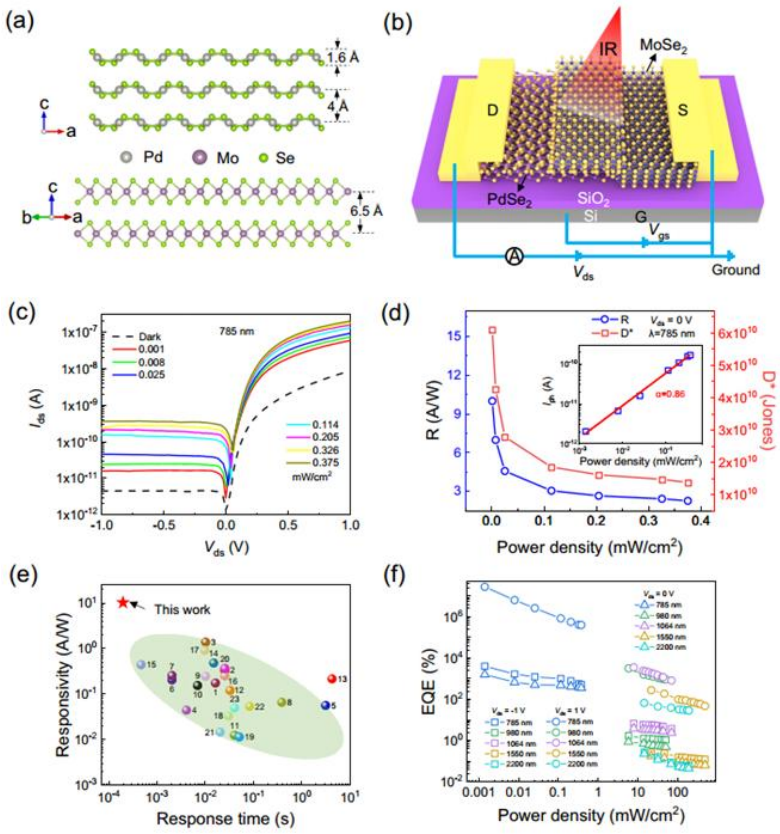
文章链接：https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.116604

5　基于 MoSe2PdSe2 范德华异质结构的非致冷红外长波偏振敏感光电探测器

红外偏振探测技术在夜视成像、遥感监测、天文学观测以及军事侦察等领域具有广泛的应用前景。然而，传统的红外光电探测器通常依赖 III-V 族化合物（如 InGaAs、InSb）或窄带隙半导体（如 HgCdTe），这些材料不仅制造工艺复杂、与 CMOS 工艺兼容性差，而且需要低温冷却以抑制暗电流，因此功耗高、成本昂贵。此外，现有的偏振探测能力往往依赖于外部偏振光学元件（如偏振片、波片等），这不仅增加了器件尺寸，还限制了应用场景的拓展。近年来，二维（2D）材料因其独特的光电特性、高度可集成性以及本征的面内各向异性，成为解决上述挑战的重要研究方向。例如，黑磷（BP）和砷化黑磷（b-AsP_2 ）等二维材料因其较高的偏振灵敏度而受到关注。然而，这些材料普遍存在空气稳定性差的问题，难以满足实际应用需求。相比之下，$PdSe_2$ 作为一种稳定的二维贵金属硫族化合物，具有可调节的带隙（单层时约 1.3 eV，块体时降至 0.03 eV），同时具备超高的室温载流子迁移率（>1000 $cm^2/V\cdot s$）。其正交晶体结构和独特的五边形原子排列赋予了材料优异的光学各向异性，使其成为宽波段偏振探测的理想候选者。然而，由于 $PdSe_2$ 的高载流子密度，传统基于 $PdSe_2$ 的光电探测器通常存在较大的暗电流、较高的功耗以及有限的偏振灵敏度（偏振比通常<2），这些因素严重限制了其在高性能红外探测器中的应用。

针对上述挑战，中科院长春光机所李绍娟研究员团队，开发了一种基于 $MoSe_2$/$PdSe_2$ 范德华异质结的新型红外偏振光电探测器，实现了从近红外（NIR）到长波红外（LWIR）的超宽光谱响应，并成功突破了高暗电流、高功耗和低偏振比等技术瓶颈。研究团队构建的三结隧道结构（tunneling-dominant triple-junction）异质结，通过光栅调制辅助隧道效应（photogating-assisted tunneling），有效抑制了 $PdSe_2$ 的本征暗电流，使得器件在零偏压（self-powered）条件下依然具备高探测能力。实验数据显示，该探测器在近红外波段（785 nm）下的光响应度高达 8×10^4 A/W，响应速度快至 590 ns。在长波红外（10.6 μm）范围内，器件仍然保持了 0.47 A/W 的光响应度，探测度（D*）高达 1.53×10^9 Jones，在室温条件下实现了超宽光谱的高灵敏度探测。该探测器表现出可调谐的偏振探测能力，在近红外至中红外（NIR-MIR）波段，

偏振比（polarization ratio, PR）可达 14.7，远超传统 2D 材料偏振探测器（一般 PR < 10）。这一现象源于 $PdSe_2$ 的独特五边形晶格结构，该结构赋予了材料显著的面内各向异性，并在异质结界面处形成偏压可调的光电响应。研究人员通过傅里叶变换红外光谱（FTIR）、角分辨拉曼光谱（ARP-Raman）和第一性原理计算，系统揭示了 $MoSe_2$ /$PdSe_2$ 异质结的电子结构特性，并证明了该结构在不同偏压下能够实现光响应调控，从而满足多种应用需求。为了验证其实际应用潜力，研究团队进一步开展了偏振成像实验。在 4.5 μm 偏振光照射下，该探测器能够清晰区分不同偏振角度的目标，实现了高分辨率的偏振图像采集。相较于传统探测器依赖外部偏振元件，该研究提出的 $MoSe_2$ /$PdSe_2$ 结构能够在器件内部实现偏振调制，为未来的红外成像、目标识别以及小型化光谱分析提供了全新的技术方案。研究成果发表在《Nature Communications》上。(张琰炯)

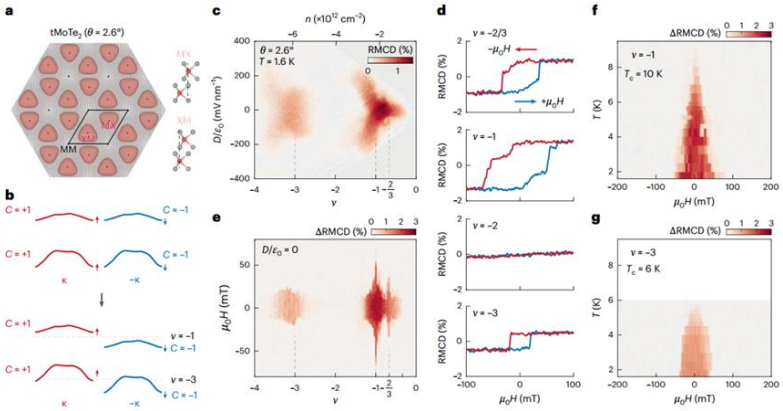


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-58155-0

6 分数陈绝缘体中的铁磁性与高次平带拓扑

近年来，分数陈绝缘体（Fractional Chern Insulator, FCI）作为凝聚态物理领域的前沿课题，因其在零磁场条件下模拟分数量子霍尔效应的独特性质而备受关注。与传统分数量子霍尔系统依赖强磁场不同，FCI 通过晶格结构中的拓扑平带实现分数化激发，不仅为探索拓扑量子物态提供了新途径，更因其潜在的高温稳定性与非阿贝尔任意子特性，成为拓扑量子计算的核心候选体系。然而，现有研究多聚焦于最低陈能带，其行为与最低朗道能级（LLL）类似，而高阶陈能带的相互作用、拓扑特性及磁性调控机制仍存在显著空白。尤其在高陈能带中实现非阿贝尔态需突破能带拓扑设计与强关联效应的协同控制，这一挑战亟待实验与

理论的深度融合。
近日，美国华盛顿大学的许晓栋教授课题组和肖迪教授课题组合作，聚焦于扭转双层二碲化钼（tMoTe2）的第二平带，系统探究了其铁磁性、拓扑特性及磁场调控机制。通过反射磁圆二色性（RMCD）和电输运测量，发现当第二平带半填充（填充因子ν = -3）时，体系呈现自发铁磁序和初现陈绝缘态特征。进一步分析不同扭转角度（2.6° 至 3.8° ）下的陈数符号发现：当角度大于 3.1° 时，第一与第二平带陈数符号相反（+1, -1）；而在 2.6° 附近，两能带陈数符号相同（+1, +1）。理论计算表明，扭转角度通过调控层间哈特里势分布，引发能带拓扑翻转。在 2.6° 器件中，磁场诱导的能带交叉导致拓扑相变，最终形成陈数为-2 的绝缘态。此外，研究还发现第二能带半填充时电荷有序态优先于分数量子态出现，揭示了强关联与拓扑竞争的新机制。这些结果不仅验证了高陈能带中拓扑与磁性的耦合规律，还为设计非阿贝尔分数陈绝缘体提供了关键实验依据。该研究发表于《Nature Physics》。（刘梦洋）

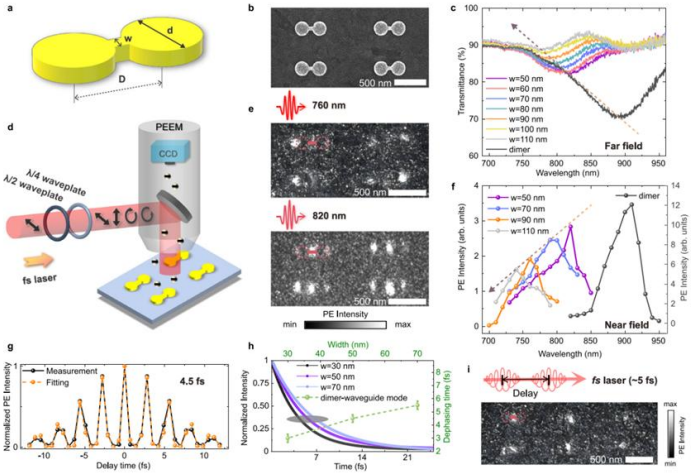


文章链接：https://doi.org/10.1038/s41567-025-02804-0

7 合成维度集成等离子体拓扑 Harper 纳米链的近场成像研究

拓扑光子学为集成光子器件与信息处理芯片的发展提供了全新的自由度与物理基础，其核心在于利用拓扑态实现光场调控与信息传输的鲁棒性。Aubry－André－Harper（AAH）模型作为研究准周期系统中拓扑现象的重要理论框架，近年来在光子学领域展现出广阔前景。然而，基于等离子体纳米结构的片上集成 AAH 拓扑绝缘体仍面临两大挑战：一是纳米结构间耦合参数的超高精度制备要求，二是等离子体纳米间隙中热点的强局域场增强效应阻碍了近场测量的直接实施。传统方法通过调控纳米结构间距调节耦合强度，但微小间隙导致的场增强效应限制了器件的设计与性能优化，使得近场光学表征长期处于空白状态。如何突破这些瓶颈，实现高集成度、可调控的等离子体拓扑器件，并揭示其近场动力学特性，成为该领域亟待解决的关键问题。
近日，北京大学胡小永教授课题组与龚旗煌院士等研究者合作，提出了一种基于金纳米盘与连接波导的集成策略，成功构建了超紧凑片上等离子体 AAH 拓扑绝缘体，并利用光电子发射显微镜（PEEM）首次实现了拓扑态近场分布的直接观测。通过设计宽度可调的短金波导连接相邻纳米盘，在固定纳米间隙（50 nm）条件下实现了耦合强度的精确调控，有效抑制了纳米间隙的场增强效应。实验表明，连接波导宽度的增加会导致等离子体共振峰蓝移，且近场与远场光谱的峰位偏移趋势一致，验证了波导宽度对耦合强度的线性调制能力。进一步，研究团队构造

了具有准周期调制特性的 AAH 纳米链，观察到随着链长增加，边界模式从对称到非对称的转变，这一现象与 AAH 模型参数 Φ 的变化直接关联。此外，通过引入交错排列的波导结构，该研究实现了拓扑平庸纳米链的偏振复用控制：左旋圆偏振光激发偶数位纳米盘，右旋圆偏振光激发奇数位纳米盘，为多维度光场调控提供了新思路。基于上述成果，研究团队进一步展示了二维集成 AAH 纳米链与交错纳米链的拓扑边缘态偏振复用成像，成功在同一结构中实现“L”与“R”图案的偏振依赖显现。这些发现不仅为片上拓扑光子器件的设计与表征建立了新范式，还为合成维度调控、高灵敏度传感及拓扑量子计算等应用奠定了实验基础。相关研究发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



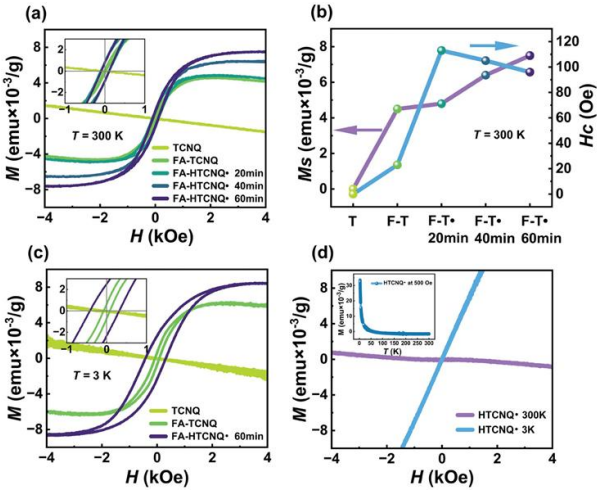
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-025-57747-0

8　推动室温磁性半导体发展的有机自由基电荷转移共晶研究

开发纯有机室温磁性半导体一直是材料科学界追求的重要目标，旨在实现对自旋与电荷的同步调控。有机共晶材料以其结构可调性与多功能性著称，是构建这类磁电耦合器件的理想候选体系。然而，由于共晶结构的复杂性，有机室温磁性半导体共晶少有报道，其作用机制亦缺乏深入理解。本文提出一种新策略：通过向有机共晶中引入自由基，可在维持共晶结构的同时显著增强其磁性与导电性。基于简单、快速、环保的溶液处理法，研究团队成功构筑了荧蒽-7,7,8,8-四氰基喹啉二甲烷自由基共晶（FA-HTCNQ•）。该导电材料展现出优异的室温铁磁性，矫顽力达 96 Oe，居里温度接近 400 K，性能显著优于未掺杂的同类结构材料。同时，导电 FA-HTCNQ•中首次实现了室温磁电耦合效应。研究发现，共晶中增强的铁磁性与导电性源于自由基诱导的电荷转移（CT）相互作用强化，而非仅依赖自由基间的自旋交换作用。该工作揭示了有机共晶中铁磁性的起源，并为开发纯有机室温磁性半导体材料提供了一种简易策略，为未来集成化磁电器件开辟了新路径。

近期，天津大学胡文平教授、张小涛教授、丁帅帅副教授研究团队通过构建结构相同的 FA-TCNQ 与 FA-HTCNQ•体系，发现导电性 FA-HTCNQ•在室温下表现出铁磁性，其矫顽力达 96 Oe，居里温度接近 400 K，性能显著优于绝缘性的 FA-TCNQ。此外，导电性 FA-HTCNQ•在小场范围内展现出优异的室温磁电响应。相关研究成果以“Advancing room-temperature magnetic semiconductors with organic radical charge transfer cocrystals”为题发表在《Advanced Materials》上。

（郑佳慧）



文章链接：DOI: 10.1002/adma.202414719

（来源：两江科技评论）