

# 超材料前沿研究一周精选

2025年2月24日-2025年2月28日

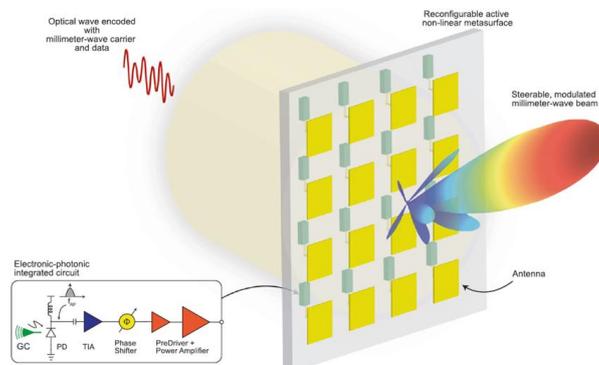
## 索引:

1. 一种用于相干波下转换的可重构非线性有源超表面
2. 用于增强现实显示的消色差超表面波导
3. 非衍射波包的时空折射
4. 量子几何矩编码莫尔物质的堆叠顺序
5. 拓扑绝缘体  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  实现高热电优值的磁热电效应
6. 二维半导体中电子跃迁与铁电序的耦合
7. 太赫兹时域光谱研究亚稳态多铁材料的磁电特征及其温度调控
8. 适用于复杂形状电子设备的自适应两相热循环系统

## 1 一种用于相干波下转换的可重构非线性有源超表面

超表面是二维平面结构,这些工程结构经常被用来以引人注目的方式操纵电磁波,从而促进光学、通信、计算和其他各种不同领域的创新。这些结构可以通过场增强和局部化效应或通过嵌入非线性元件来表现出强烈的非线性。这种多功能性使超表面吸引了各种应用,从频率转换和谐波产生到非线性成像、全息图、非线性传感和量子系统。

近日,宾夕法尼亚大学的 Firooz Aflatouni 教授团队展示了一种非线性有源电子光子超表面,它将信息从入射光波传输到毫米波束。概念验证超表面被设计为在用 193 THz 的光波照射时辐射可操纵的 28 GHz 光束,并由光学同步电子光子芯片组成,这些芯片平铺在包含微带贴片天线阵列的印刷电路板上。用数据编码的毫米波载波调制的光通过微透镜耦合到电子光子芯片中。在每个芯片内,毫米波信号被检测、相位调整、放大并路由到片外天线。研究人员演示了在  $60^\circ$  仰角和方位角范围内的光束控制以及通过光纤无线链路以 2 Gb/s 的速度传输数据。该工作所提出的非线性可重构有源超表面由光学同步的电子光子元件组成,有利于数据传输和毫米波光束整形,同时与高度可扩展的架构兼容,并有可能为下一代通信、计算、传感和量子系统实现节能、紧凑且复杂度降低的链路。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)



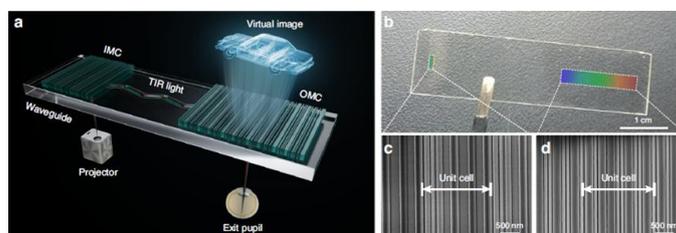
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57132-x>

## 2 用于增强现实显示的消色差超表面波导

增强现实因其彻底改变我们感知和与数字世界互动的方式的潜力而不断受到关注。它为各种前沿领域带来了新的机遇，例如元宇宙、智能工业、智能医疗、智能旅游等。AR 技术不断向超紧凑外形和轻量化设计发展，增强了用户体验。衍射波导组合器因其类似眼镜的外观、最小的重量、高吞吐量 and 大规模生产能力而成为商用 AR 设备的首选。波导解决方案采用集成了衍射输入和输出耦合器的超薄平面玻璃。载有图像的光线通过输入耦合器进入波导，通过全内反射传播，并由输出耦合器提取到用户的眼睛。在此显示过程中，这些耦合器是决定成像质量的关键组件。在开发基于超表面的波导 AR 显示器方面，先驱者们已经在扩大角带宽、提高效率、扩大视场和波长复用方面取得了显著进展。关于波导 AR 显示器中的色差校正，虽然色散补偿波导提供了一种解决方案，但它导致视场有限且出射光瞳固定较小。值得一提的是，迄今为止开发的大多数消色差超表面耦合器都依赖于复杂的多层纳米结构来增强设计灵活性并实现所需的色散控制。然而，这种方法带来了具有挑战性的制造过程。此外，耦合器固有的强烈角度扩展不可避免地会导致色彩和角度均匀性的下降。

近日，南方科技大学的孙小卫教授团队展示了一种超表面波导 AR 显示器，它将输入和输出超表面耦合器以及高折射率波导结合在一个紧凑的形状因子中。与传统的衍射波导相比，超表面波导设计具有单层结构，可显著实现设备小型化，并有效抑制波导色散。波导系统实现了卓越的色彩和角度均匀性，满足了 AR 应用的严格要求。这一突破实现了无需多导对准的全彩色显示，同时确保了最佳的调制传递函数和降低的制造成本。这种卓越的性能是通过基于伴随方法的逆向设计的超表面耦合器实现的。该方法有助于自动化开发具有超越经典超表面的独特功能的复杂结构。在这里提出的超表面波导以单层方式赋予了具有高均匀性和颜色精度的全色显示，为 AR 眼镜的用户友好佩戴体验铺平了道路。

相关工作发表在《Light: Science & Applications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01761-w>

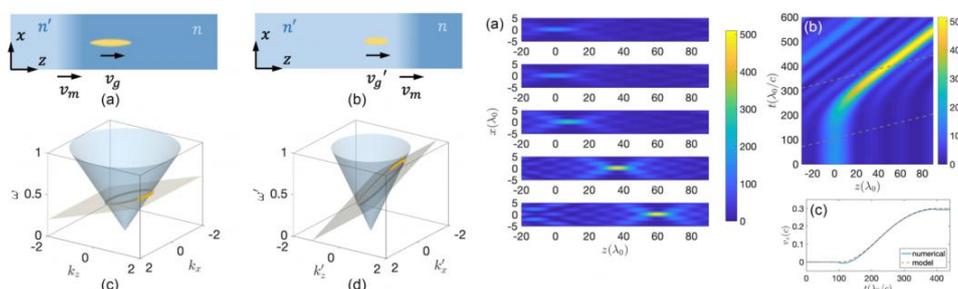
### 3 非衍射波包的时空折射

控制电磁波的传播具有重要意义，通常是通过设计空间结构来实现的，范围从宏观的光学元件到微观工程化的超材料。时间维度为控制电磁波提供了另一个自由度。时间变化的介质可以展示出新颖的现象，如光子时间晶体、绝热频率转换、时间反射和时间反转以及动态 Casimir 效应。空间和时间结构的结合产生了时空变化的介质，使得材料的属性随着空间和时间的变化而变化，最终发展为时空超材料。这些时空介质已实现了包括太赫兹波生成、光学非互易性和超快波前塑形等一系列新效应。

此外，电磁波的传播动力学也可以通过设计场的结构来控制。近年来，一种具有独特传播动力学的电磁波类型——时空无衍射波包（即光子弹）引起了广泛关注。光子弹的群速度可以是亚光速的或超光速的，并且在传播过程中保持脉冲形状不

变。由于其独特的特性，光子弹的产生、动力学控制以及它与各种介质的相互作用成为研究热点。大部分前期研究集中在光子弹与空间结构化介质的相互作用上。然而，鉴于光子弹在其场中展现出的独特时空相关性，探索光子弹与时空结构化介质的相互作用则显得尤为有趣。

近日，斯坦福大学 Haiwen Wang 教授和范汕洄教授团队研究了在时空变化介质中时空无衍射波包的动力学。团队展示了通过时空折射，单色聚焦光束可以转化为以特定速度传播的光子弹。进一步，设计时空边界的折射率轮廓可以实现对光子弹群速度与传播方向的可编程调控。这些效果无法通过空间或时间边界实现，唯有时空边界才能达到。这些发现为在时空中调控电磁波包的动力学提供了全新的思路。具有工程化时空轨迹的波包可能在材料属性或粒子的时空控制中找到潜在应用，或作为模拟实验室中相对论物理的新平台。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



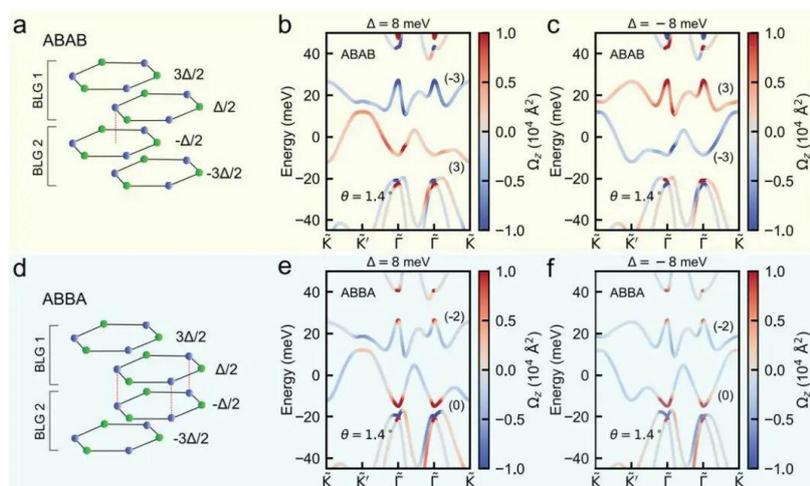
文章链接：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.073803>

## 4 量子几何矩编码莫尔物质的堆叠顺序

近年来，凝聚态物理领域对电子能带拓扑特性的研究不断深入，其中莫尔材料因其独特的平坦能带结构和电可调性成为重要研究对象。这类材料通过层间扭转形成超晶格结构，可在打破时间反演或反演对称性时产生贝里曲率热点。理论研究表明，不同的堆叠顺序会显著改变平坦能带中贝里曲率的分布，进而影响其拓扑特性。然而，实验上关于堆叠顺序对量子几何量的调控作用仍缺乏系统性探索。以  $1.4^\circ$  扭转双层石墨烯 (TDBG) 为例，其两种堆叠构型 (AB-AB 与 AB-BA) 可形成反演对称性破缺的莫尔超晶格，但现有研究尚未明确揭示堆叠顺序如何通过量子几何量 (如贝里曲率偶极子, BCD) 影响宏观输运行为。这一问题的解决对理解拓扑关联相的形成机制及开发新型量子器件具有重要意义。

近日，印度塔塔基础科学研究所的 Mandar M. Deshmukh 教授课题组和印度理工学院的 Amit Agarwal 教授、德国美茵茨大学的 Atasi Chakraborty 等研究者合作，通过结合非线性霍尔效应测量与理论计算，系统分析了 AB-AB 和 AB-BA 两种堆叠构型中量子几何特性的差异。实验发现，在 AB-AB 堆叠的 TDBG 中，垂直电场极性反转会导致 BCD 符号发生翻转，而 AB-BA 堆叠的 BCD 则保持符号不变。这种差异源于两种堆叠的谷陈数对电场的非对称响应：AB-AB 堆叠的贝里曲率分布随电场极性变化呈现反演对称破缺特征，而 AB-BA 堆叠则保持对称性。研究进一步通过双层石墨烯的对比实验验证了这一规律——AB 堆叠双层石墨烯的 BCD 同样表现出电场极性依赖的符号反转，而 AA 堆叠体系未观测到类似现象。理论计算表明，这种差异与堆叠顺序引起的能带拓扑转变密切相关。该成果不仅建立了堆叠构型与量子几何量的直接关联，还为通过电场调控实现拓扑态的动态切换提

供了实验依据,为莫尔超晶格器件的设计开辟了新路径。该研究发表于《Advanced Materials》。(刘梦洋)

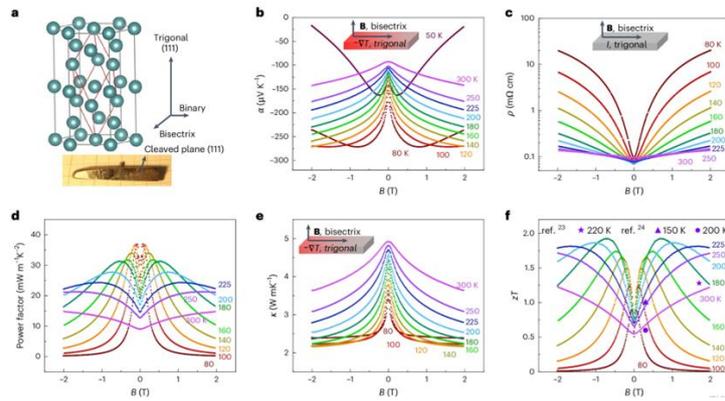


文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202417682>

## 5 拓扑绝缘体 $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ 实现高热电优值的磁热电效应

高热电性能通常通过协同优化两个甚至三个相互矛盾的热电参数来实现。在此,我们展示了磁热电关联作为一种策略,在拓扑材料中同时实现塞贝克系数增强和热导率降低。我们报道了单晶  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  拓扑绝缘体在 180K 和 0.7 T 条件下表现出显著的磁塞贝克效应和高达  $1.7 \pm 0.2$  的磁热电优值。这一结果填补了 300 K 以下高性能热电材料的空白,并为低温热电应用提供了前景。显著的磁塞贝克响应归因于超高的载流子迁移率和狄拉克能带色散。利用低磁场实现高热电性能的策略可扩展到具有类似特征的拓扑材料中,因为这些材料能够协同优化热电参数,且其研究正在迅速兴起。

近期,德国马克斯·普朗克固体化学物理研究所 Claudia Felser 教授研究团队和重庆大学潘瑜教授研究团队合作,对高质量单晶  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  拓扑绝缘体的磁热电输运特性进行了系统研究。由于超高的载流子迁移率和线性能带色散,观察到了显著的磁塞贝克效应,这导致在低至 1T 的磁场下实现了磁热电优值(magneto-zT)的提升。结合磁热导率的降低,在 180K 和 0.7T 条件下实现了约  $1.7 \pm 0.2$  的高 zT 值。很少有材料能够表现出如此高的 zT,尤其是在 300 K 以下;磁热电关联作为一种有效策略,对于协同调控热电参数具有重要意义。相关研究成果以“A magneto-thermoelectric with a high figure of merit in topological insulator  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ ”为题发表在《Nature Materials》上。(郑佳慧)

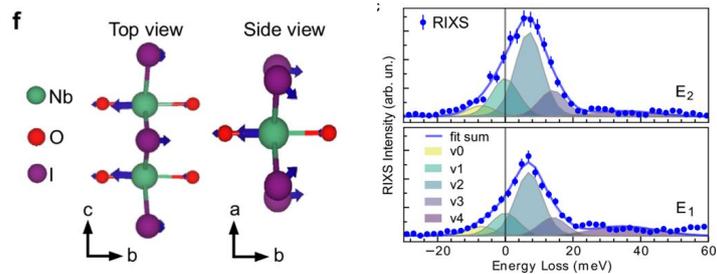


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-024-02059-9>

## 6 二维半导体中电子跃迁与铁电序的耦合

传统极性半导体中, 载流子与晶格的相互作用主要由纵向光学 (LO) 声子主导, 这种电子-声子耦合被称为 Fröhlich 相互作用, 是载流子与 LO 声子模式有效偶极子之间的长程相互作用。而横向光学 (TO) 声子模式由于缺乏宏观极化, 其与载流子间的库仑相互作用很弱, 对长波长电场的影响可以忽略不计。然而, 铁电和顺电材料中的软横向光学 (TO) 声子因其双势阱特性, 可能引发新的电-声耦合机制。目前, 已有研究证明载流子与双势阱中极化涨落形成的极性纳米畴的散射决定了氧化物钙钛矿中载流子的迁移率。同时, 也有理论提出软 TO 声子可通过铁电极化子模型调控载流子输运, 进而影响材料的光电性能, 如铅卤化物钙钛矿 (LHPs) 的缺陷容忍度和长载流子寿命。此外, 载流子与软 TO 模式之间的强相互作用也被认为是导致一类铁电超导体中电荷配对的原因。二维范德华铁电半导体材料, 其二维层状结构使得面内的库仑相互作用大于面外范德华力, 是研究 TO 声子与载流子相互作用的良好材料。但对该材料的研究多基于计算模拟或间接实验证据, 载流子与 TO 声子的直接耦合机制仍缺乏实验观测, 尤其是电子跃迁与声子模式的动态关联尚未明确。如何在高空间/时间分辨下揭示此类耦合的微观过程, 成为理解铁电半导体光电特性的关键挑战。

近日, 哥伦比亚大学的 David R. Reichman 教授团队实验研究了二维范德华铁电半导体 NbOI<sub>2</sub> 中声子与电子跃迁之间的耦合。泵浦-探测瞬态反射率变化信号中单频振荡的特性, 证明电子跃迁仅与一个频率为 3.1 THz 的声子模式耦合, 该声子模式被太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 证明为 TO。同时, 该团队还利用密度泛函理论 (DFT), 揭示了这一振动模式对应导致材料铁电序的 Nb-O 极性键的伸缩。并进一步利用共振非弹性 X 射线散射 (RIXS) 光谱学, 确认了该电子-声子耦合作用仅涉及带隙能量以上的电子, 是不同于价带电子-声子耦合的全新物理模型。该工作不仅对于理解二维铁电半导体的电子性质具有重要意义, 也为未来开发具有可调谐极化场的铁电器件提供了新的思路。相关工作发表在《Nature Communications》上。(侯玥盈)

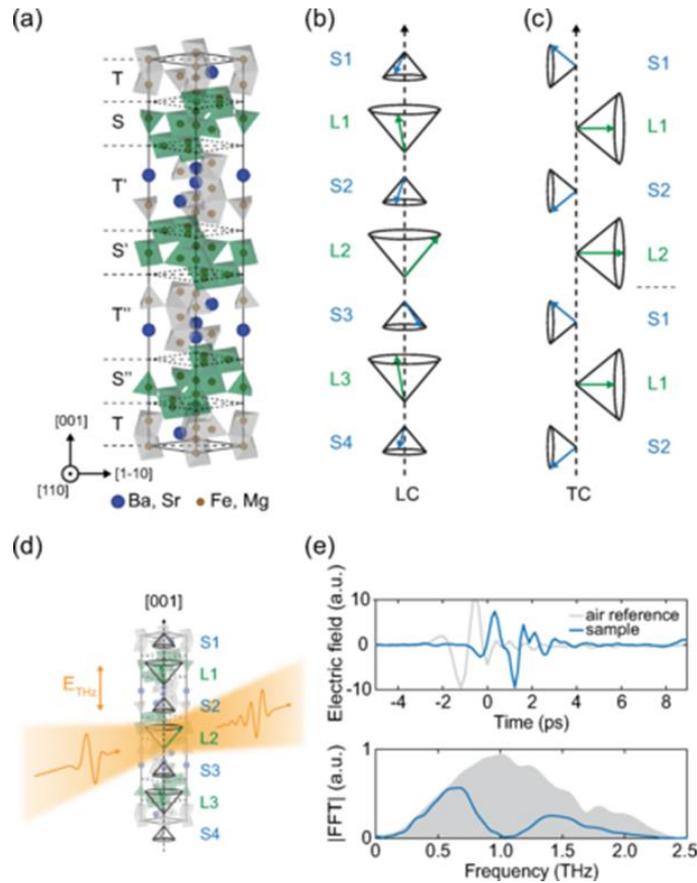


文章链接: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-57061-9>

## 7 太赫兹时域光谱研究亚稳态多铁材料的磁电特征及其温度调控

磁电多铁材料，尤其是 II 型多铁材料（其中铁电极化源于磁序），因其在同时控制磁性和电性方面的潜力而备受关注。尽管许多具有强磁电耦合的多铁性材料已经被发现，但很少有材料在室温下表现出磁电效应，如何在复杂的磁电耦合和热涨落环境中稳定多铁基态仍然是一个未解决的问题。在此背景下，亚稳态多铁性材料因其持久性和对热扰动的抗性而成为研究磁电耦合与热动力学涨落之间复杂相互作用的独特平台。

近期，麻省理工学院（MIT）的 Keith A. Nelson 团队通过太赫兹时域磁谱学（THz-TDMS）技术，结合磁场变化和温度变化，揭示了 Y 型六方铁氧体中磁场诱导的亚稳态多铁性的光谱特征及其与热力学的相互作用。研究团队以  $\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$  (BSMFO,  $x = 1.6$ ) 为模型体系，利用太赫兹时域磁谱学探测了不同磁相中的电磁激发。实验结果显示，在外加磁场作用下，BSMFO 从顺电（paraelectric）的纵向锥形（LC）态转变为铁电（ferroelectric）的横向锥形（TC）态，且 TC 态在低温下表现出显著的亚稳态特性。通过监测电磁激发模式随磁场和温度的变化，研究团队发现 TC 态在低于 30 K 时保持稳定，而热涨落是在 40 K 以上使 BSMFO 恢复到 LC 态的关键因素。此外，通过激光脉冲加热样品，研究团队进一步揭示了热能足以克服 TC 态和 LC 态之间的能量壁垒，从而实现相变。外加磁场可以提高能量壁垒，从而稳定 TC 态。该研究不仅揭示了六方铁氧体中亚稳态多铁性的磁电耦合特征，还展示了其与热力学的复杂相互作用，为理解亚稳态多铁性及其在高温下的稳定性提供了重要见解。这一发现为设计和合成高温多铁材料提供了理论基础，并展示了在新兴能源与信息技术领域中应用多铁性材料的巨大潜力。同时，实验方法为发现磁性量子材料中的其他特殊相提供了一个先进的平台。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（赵泓远）



文章链接:

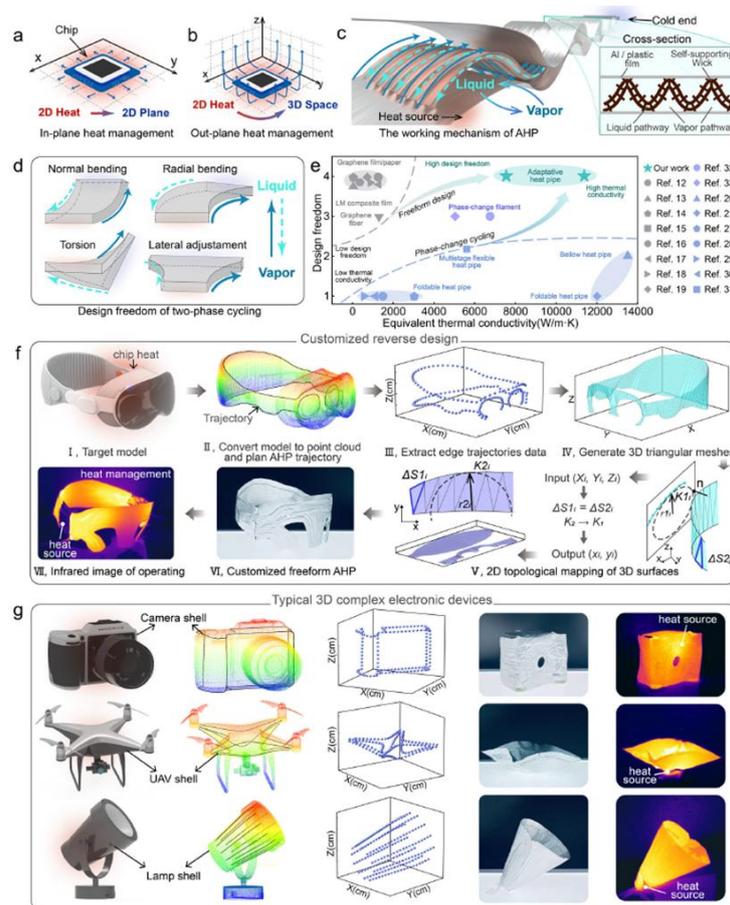
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.086706>

## 8 适用于复杂形状电子设备的自适应两相热循环系统

随着电子设备向小型化和高集成度发展，芯片功耗密度不断提升，散热问题成为制约设备性能和寿命的关键因素。研究表明，电子设备的寿命与其工作温度密切相关，每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，其故障率可能增加一倍。因此，高效的热管理技术对于保障电子设备的稳定性和可靠性至关重要。目前，主流的散热技术包括风冷、液冷、微通道散热等，但这些方法在紧凑型电子设备中存在体积大、功耗高、散热器形态受限等问题。例如，智能手机、可穿戴设备、增强现实（AR）和虚拟现实（VR）设备等，由于内部空间有限，难以安装传统散热组件。此外，传统单相热导材料（如石墨烯薄膜、热界面材料）在长距离热传输过程中存在热衰减问题，难以满足高热流密度环境下的散热需求。相比之下，两相换热系统，如微热管和蒸汽腔，利用工质的相变传热，能够实现极高的热导率。然而，现有的微热管和蒸汽腔通常采用焊接或压制工艺制造，难以适应复杂形状的电子设备，使得热管理仍然局限于二维平面。如何突破传统散热器的形态限制，实现适用于任意形状电子设备的高效热管理系统，成为该领域的重要研究方向。

近日，厦门大学周伟教授和凌伟淞助理教授等人，提出了一种自适应三维两相热循环系统（Adaptative Heat Pipe, AHP），突破了传统散热器形态的限制，为复杂结构电子设备提供了一种高效的热管理方案。该研究团队利用逆向工程技术与数据驱动的三维热键合工艺，设计并制造了一种能够自由弯曲、扭转、适应各

种形状的热管，从而在电子设备的有限空间内，实现高效的两相换热循环。实验结果显示，该系统的最大热导率高达  $11,363 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，远超传统单相导热材料，如石墨烯薄膜和柔性散热膜。AHP 能够在三维空间内灵活传输热量，不仅可用于传统电子设备，还适用于形态复杂的 AR/VR 设备、摄像头、无人机等新兴电子产品，实现高效散热。研究人员利用数字光处理（DLP）3D 打印技术制备复杂形状的热管结构，该系统由铝塑膜外壳和三维铜网芯体组成。铝塑膜外壳通过热键合技术进行封装，形成封闭的两相换热系统，而铜网芯体则提供毛细作用，使冷凝液能够回流至蒸发区域，保持稳定的相变循环。实验表明，与传统平面热管相比，AHP 在三维复杂形状设备中的散热效率提升了 44.4%，有效降低了设备热负荷，提高了热管理系统的可靠性。该研究的突破性在于，AHP 不仅是一种散热组件，还可作为设备的结构支撑部分，甚至可以集成到设备外壳中。在 VR 头显的应用测试中，AHP 作为头戴结构的一部分，成功将芯片温度从  $100^\circ \text{C}$  降至  $47.8^\circ \text{C}$ ，相比传统热管和石墨烯薄膜散热方案，分别降低了 48.6% 和 38.6%。此外，AHP 还能应用于无人机、相机等对散热要求较高但结构复杂的电子设备，为下一代高效热管理系统提供了一种集成式、智能化的解决方案。研究成果发表在《Nature Communications》上(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56960-1>  
 (来源: 两江科技评论)