

超材料前沿研究一周精选

2025 年 8 月 18 日-2025 年 8 月 24 日

索引:

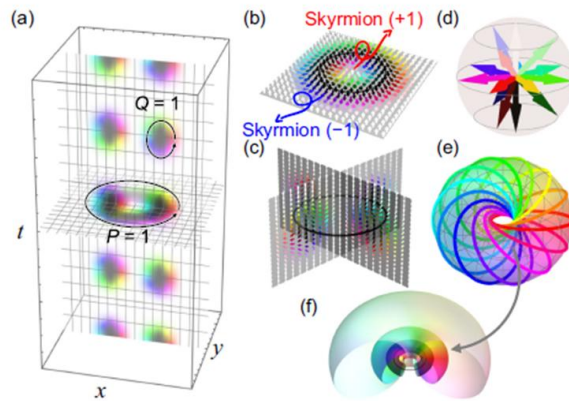
- 1、时空光学霍普夫子晶体
- 2、微观齿轮超机器
- 3、动量偏置高阶拓扑轨道杂化实现光子自旋锁定
- 4、非互易呼吸孤子
- 5、非厄米多模非线性系统中的非互易频率转换
- 6、狄拉克费米子与声子耦合在拓扑半金属 TaSb_2 中实现巨能斯特热电性能
- 7、Kagome 反铁磁体中的强磁子-声子耦合
- 8、用于局部电子热管理的 Mg_3Bi_2 微型热电冷却器

1、时空光学霍普夫子晶体

近年来,类粒子的拓扑自旋织构逐渐被认为是固体磁性材料和结构化光场中的潜在信息载体。作为二维自旋织构家族的一员,斯格明子及其晶体结构已经被广泛研究,并展现出在高密度拓扑数据存储方面的应用前景。与此相比,霍普夫子则具有三维环面状的结拓扑结构,可以被视为闭合且扭缠的斯格明子弦,揭示了更高维度拓扑稳定性的特征。然而,现有方法仅能生成孤立的霍普夫子,对于如何构筑霍普夫子的晶体结构仍缺乏有效途径。相比孤立结构,周期性阵列能够在边界条件下更清晰地定义拓扑不变量,同时也为材料操控与精密探测提供了更广阔的应用前景。

近日,东京科学大学的林文博助理教授、南洋理工大学申艺杰助理教授与东京大学 Satoshi Iwamoto 教授团队合作,展示了时空光场可用于构筑霍普夫子晶体。这类光场近年来已被应用于斯格明子和标量涡环的构建。霍普夫子织构由双频光场中定义的偏振赝自旋所形成。研究人员首先给出了一种塑造光场的方法,从而构建出一维时间方向上的霍普夫子晶格。不同于近期研究中通过磁体中时间编织的斯格明子来实现霍普夫子拓扑的方式,在此提出了一类由电磁场的时间包络完全约束的时空光学霍普夫子,它们可被视为进一步弯曲和扭结的斯格明子管,形成环面状的构型。随后,研究人员将模型扩展到同时具备空间周期性的三维霍普夫子晶体,为高维拓扑信息传输提供了一种全新的研究平台。

相关工作发表在《Physical Review Letters》上。(刘帅)



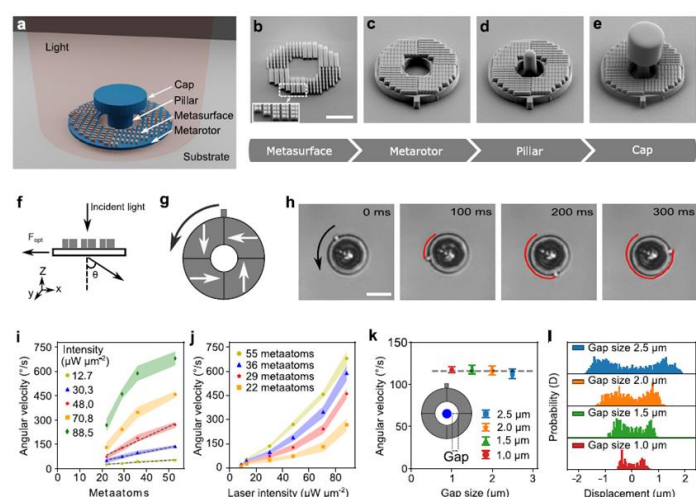
文章链接: <https://doi.org/10.1103/hh5s-cprt>

2、微观齿轮超机器

齿轮机构作为人类科技发展的重要象征，从古代水车、风车到现代汽车、航空航天与机器人应用，始终推动着机械工程的进步。当前研究的重点在于将齿轮微型化至微米尺度，这不仅有助于提升材料利用效率、降低能耗，还为探索摩擦、表面相互作用等微观物理机制提供了新工具，并推动高性能微流控器件和可重构光学等前沿应用。然而，将微电机整合为具备功能性的微观齿轮机构仍面临挑战。传统静电驱动受制于连接器体积，限制了系统缩小与并行化；交流电场、磁场及光场虽能进一步缩小单个电机，却难以实现多电机片上集成，且常伴随材料依赖性、干扰或灵活性不足等问题。近年来，基于超表面的新方法展现出前景，通过非聚焦光诱导的定向散射力可驱动微型结构实现平移与旋转，甚至借助偏振与多波长光实现二维可控运动。这为突破现有局限、构建可扩展的微观齿轮超机器提供了新的途径。

近日，哥德堡大学的 Giovanni Volpe 团队，提出了一种新的方法，利用光学超表面实现对微观机器的局域驱动。这些器件可通过标准光刻工艺制造，并可无缝集成于芯片之上，其尺寸可缩小至几十微米，同时实现亚微米精度的运动。作为原理验证，作者展示了由单个带有超表面的驱动齿轮（在平面光波激发下工作）驱动的微型齿轮传动系统。此外，作者还研制了一种多功能的齿轮—齿条微机器，能够实现旋转运动向平动的转化、周期性运动，以及对微型反射镜的操控以实现光的偏转。该片上制造工艺使并行化与集成过程更加简便。借助光这一普遍存在且易于调控的能量来源，这些微型化的超机器实现了精确的控制与运动，为微纳尺度系统开辟了新的可能性。相关工作发表在《Nature Communications》上。

（刘帅）

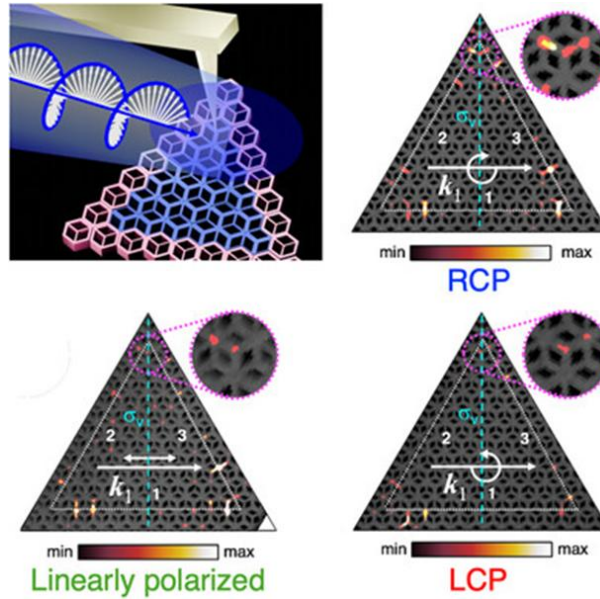


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62869-6>

3、动量偏置高阶拓扑轨道杂化实现光子自旋锁定

高阶拓扑绝缘体作为一种新颖的物质相，近年来在电子学、声学 and 光子学领域引起了广泛研究。与传统拓扑相不同，高阶拓扑绝缘体具有更高维度的体边对应关系，例如二维高阶拓扑绝缘体中可出现受拓扑保护的一维边缘态和零维角态，这些态对无序和扰动具有一定鲁棒性，因此在激光发射、可控热传输和自旋轨道耦合等方面展现出广阔的应用前景。轨道自由度作为调控固态材料中电子动力学的重要工具，近年来被拓展至光子与声子系统，为理解高阶拓扑态的形成和调控提供了新视角。尤其是对于具有偶极特征的 II 型高阶拓扑态，轨道杂化不可避免，不仅可解除简并，还显著增强了轨道自由度的可操作性，为光场调控提供了新途径，然而其潜力尚未被充分挖掘。

近日，美国纽约城市大学的 Andrea Alù 教授研究团队，理论提出并实验验证了在 Kagome 三角晶格中通过倾斜入射引入面内动量偏置，实现 II 型高阶拓扑态的轨道杂化与自旋锁定。动量偏置不仅打破了晶格的对称性，还为拓扑角态引入轨道动量，使得杂化轨道具备可调控的空间相位。当该相位差接近 $\pm 90^\circ$ 时，可触发强自旋轨道耦合，从而实现与圆偏振光自旋状态锁定的选择性激发。通过散射型扫描近场光学显微镜，在中等红外波段 Kagome 光子晶体中直接观测到动量方向依赖的角态激发行为：当动量方向与角态极化方向一致时，仅特定手性的圆偏振光可激发角态；而当动量方向与之垂直时，角态失去自旋锁定特性，可被任意偏振光激发。该现象源于动量偏置导致的对称性降低和轨道相位调制，进一步证实了自旋轨道耦合的拓朴起源。该研究实现了对光子轨道自由度的主动调控，为拓朴光子器件中近场-远场相互作用、偏振合成、空间光调制、手性量子光源控制等应用提供了新方案。相关文章发表于《Advanced Materials》（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202511084>

4、非互易呼吸孤子

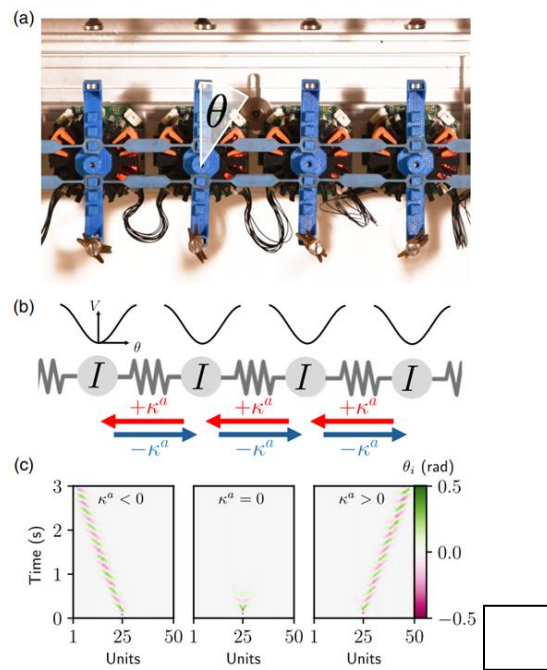
复杂系统中，打破相互作用的对称性十分常见，如捕食者-猎物系统、神经网络以及人类行为。近年来，这一思想在物理学中迅速发展。非互易性已在量子与自旋系统中被理论提出，并在光学器件、等离子纳米颗粒及超材料中实验验证。其核心是通过引入动量或能量，打破控制动力学的对称性或厄米性，使输入与输出的传输特性不再对称，从而导致单向或手性放大，并推动系统进入非线性主导的动力学区间，导致非线性激发（如孤子）。

近年来，非线性非互易动力学已在拓扑缺陷、激波、湍流及拓扑边缘态等方面得到研究，但局域的非拓扑型非线性激发（如孤子）仍缺乏探索。非拓扑孤子是稳定的局域弱非线性激发，常存在于远离平衡态的体系中，即所谓耗散孤子。它们需在损耗与增益间保持平衡，同时在色散与非线性间再度平衡，这对其寿命和动力学提出了严格限制。由此引出关键问题：在弱非线性的非互易材料中会产生何种孤子？其动力学机制又如何？

近日，荷兰阿姆斯特丹大学 Corentin Coullais 教授团队通过呼吸孤子的研究回答了这些问题。呼吸孤子由局域非线性激发与载波调制构成，可静止（即振荡子），也可传播，用于传输能量与信息。前者已在光学腔、纳米等离子颗粒阵列、驱动颗粒介质及流体等耗散体系中观察到；但在强耗散体系中，传播型呼吸孤子长期未被实验发现。仅在纳米等离子颗粒阵列中，数值模拟显示了类呼吸子的传播模式，但缺乏实验和理论的支撑。

团队发现传播型呼吸孤子可在非互易介质中自发涌现。通过有源超材料实验、数值模拟与微扰理论分析，团队揭示了初始条件、非互易增益和阻尼之间的微妙平衡是其生成的关键。该平衡决定了初始扰动后系统会演化为辐射、单个或多个呼吸子，或者形成 kink-antikink 对。同时，孤子的类型还取决于初始幅度与速度。尤为重要的是，非互易性不仅能使耗散呼吸子实现单向传播，还扩大了其存在区间，与恒定驱动下的呼吸子截然不同。这一结果确立了有源超材料作为研究单向耗散孤子与非互易非线性激发的重要平台。相关内容发表于《PHYSICAL

REVIEW X》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/nrv2-9h8z>

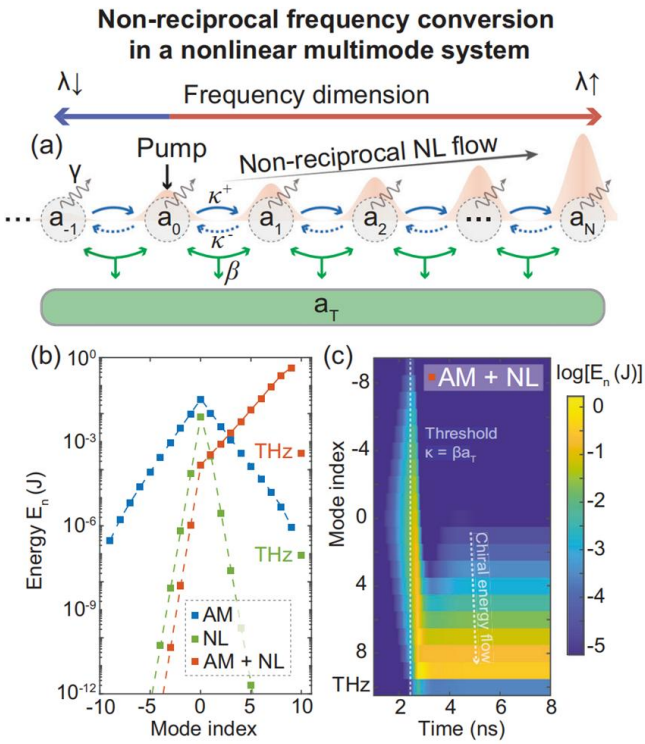
5、非厄米多模非线性系统中的非互易频率转换

非线性光学系统长期以来作为先进光子学的基石，支撑了从频率转换、高速通信到量子信息处理等广泛应用。近年来，研究重点逐渐转向多模非线性系统，它们能够通过复杂的非线性过程展现更为丰富的相互作用。然而，传统非线性光学受制于材料固有特性，非线性效应通常较弱且遵循互易性。这不仅限制了频率转换效率，也使得非线性能量传输难以灵活调控。若能在多模系统中实现对非线性相互作用的有效控制，将有望突破常规效率极限，并在真实与合成频率维度中实现新的拓扑现象。

尽管这些应用前景广阔，但由于多模非线性过程的高维性与复杂性，有效调控一直是挑战。近年来，非厄米的引入为光与物质相互作用提供了新途径，使能量在真实与合成维度的传输获得前所未有的自由度。这类系统展现了传统厄米系统所不具备的现象，如例外点、非互易性、PT 对称性破缺及非厄米趋肤效应。已有研究表明，在合成频率维度打破互易性可实现非厄米哈密顿量及能带拓扑缠绕。然而，非互易性与非线性频率转换的结合尚未被探索，尽管在光机耦合和具有 Kerr 非线性非厄米 Hatano - Nelson 系统中已有相关进展。总体而言，空间维度上的非互易性研究较为充分，但在多模非线性系统中结合光学非线性与非厄米耦合仍存在明显缺口。

近日，麻省理工学院的 Sahil Pontula 教授和 Yannick Salamin 教授团队提出并研究了一个结合厄米与非厄米相互作用的多模非线性腔体，以增强对非线性能量传输的控制。该系统的多个频率模式通过公共闲置模式发生非线性耦合，形成级联上、下转换过程并生成频率梳。团队揭示了非线性耦合、耗散与反厄米幅度调制的相互作用如何塑造非线性频率转换，实现频率维度的非互易能量流与手性模

式中的能量增强。这不仅显著提升了手性与闲置模式的转换效率，突破了互易性所设下的极限，还能通过系统参数调节生成任意不对称的频率梳，并保持对缺陷和无序的鲁棒性。此外，该研究识别了系统平均场动力学中的不同相，演示了稳定的多模极限环，展示其在时域复用和多频泵浦-探测中的潜力。相关内容发表于《Nature Communications》上。（金梦成）

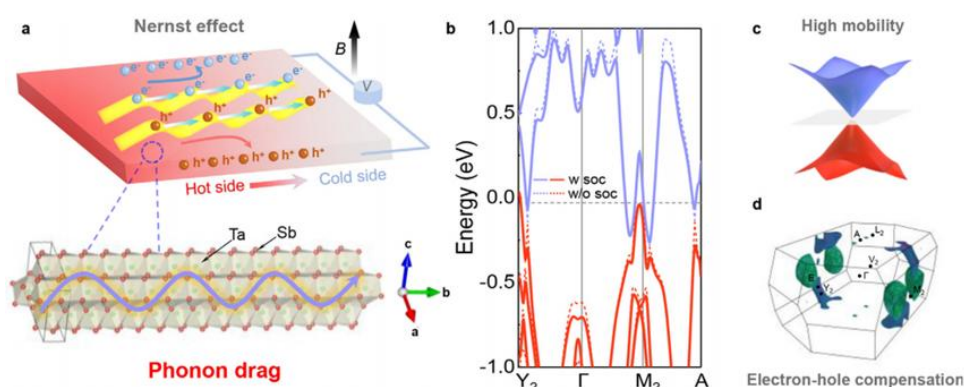


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62853-0>

6、狄拉克费米子与声子耦合在拓扑半金属 TaSb₂ 中实现巨能斯特热电性能

在能源转化与热管理技术的前沿研究中，热电材料一直被视为实现绿色能源与高效制冷的重要途径。传统热电效应主要依赖于塞贝克效应（Seebeck effect），但由于电子与声子的输运强烈耦合，往往难以同时实现低热导率与高电导率，从而限制了性能提升。近年来，随着拓扑半金属的兴起，横向能斯特热电效应（Nernst effect）受到越来越多关注。这种效应利用电子和空穴在磁场下的协同贡献，可以避免传统热电器件中 p 型与 n 型材料匹配的难题，同时在理论上突破了塞贝克热电功率因子的上限。因此，能斯特效应不仅为低温固态制冷提供了新的候选方案，也为材料物理提出了新的研究方向。然而，尽管许多拓扑半金属表现出接近完美的电子-空穴补偿和超高迁移率，其能斯特响应却差异巨大，从几十到数千微伏每开尔文不等，这表明仅靠能带结构与载流子补偿并不足以解释能斯特效应的增强机理。近年来有学者注意到，声子拖曳效应（phonon drag）可能在其中扮演关键角色，它通过与载流子的相互作用放大电子与空穴的塞贝克系数差异，从而显著增强能斯特响应。但这一机理在拓扑半金属中的定量证据仍然稀缺，因此寻找典型体系加以验证，成为该领域亟待解决的问题。

针对这一科学难题，重庆大学潘瑜教授、王国玉教授和周小元教授以典型的拓扑半金属 TaSb₂ 单晶为研究对象，首次在实验和理论上揭示了狄拉克费米子与声子耦合对巨大能斯特效应的决定性作用。研究团队通过化学气相传输法成功制备高质量 TaSb₂ 单晶，并在 25 K、9 T 条件下测得高达 1200 $\mu\text{V/K}$ 的能斯特热电势和 8300 $\mu\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-2}$ 的横向功率因子，均创下 X₂Pn₂ (X = Ta, Nb; Pn = As, Sb) 家族中的最高纪录。进一步的输运分析显示，能斯特热电势的峰值与热导率中声子拖曳峰高度一致，定量拟合亦证实声子拖曳效应是增强能斯特响应的主导机制。该成果不仅突破了传统对高迁移率和电子-空穴补偿的理解框架，而且为设计新型高性能横向热电材料提供了新的物理思路。在低温条件下，TaSb₂ 的无冷媒固态制冷潜力尤为突出，有望应用于量子器件散热、深冷探测器以及航天低温环境的热管理。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）



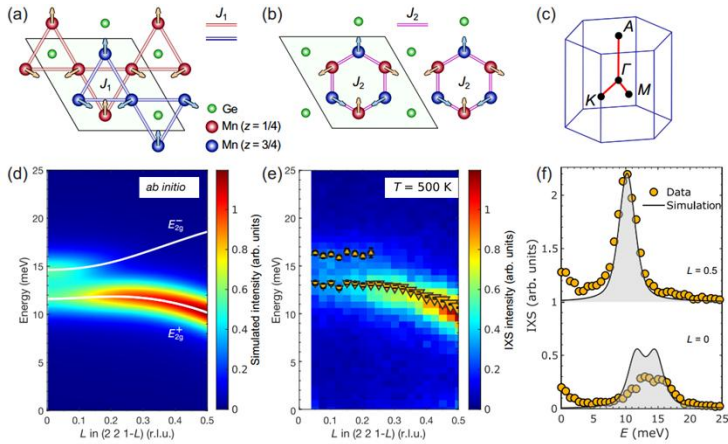
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202508627>

7、Kagome 反铁磁体中的强磁子-声子耦合

在有序材料中，磁子与声子的杂化是一种关键现象，对自旋电子学、磁子学及量子材料研究具有深远意义。尤其在高对称性、受抑制的强磁非共线反铁磁体中，由于缺乏全局自旋量子化轴，磁子与声子之间可能出现线性耦合，从而形成磁子极化激元等混合激发态。此类耦合不仅可能导致反常自旋塞贝克效应、拓扑磁子极化激元等新奇物性，还为自旋与晶格自由度之间的相干转换提供了可能，因此在信息存储、神经形态计算等前沿技术中具备潜在应用价值。然而，由于多数三角晶格反铁磁体的晶格振动模式复杂，且单位晶胞中常含多种非磁性离子，使得理论与实验之间对杂化模式的理解存在较大差距。因此，寻找结构简单、以磁性离子为主的模型体系，成为揭示磁子-声子耦合机制的关键。

近日，德国奥格斯堡大学的 A. S. Sukhanov 和韩国基础科学研究所的 O. I. Utesov 研究团队合作，以 Kagome 反铁磁体 Mn₃Ge 为研究对象，通过非弹性 X 射线散射实验与第一性原理计算相结合，揭示了其平面自旋涨落与横向光学声子之间的强耦合行为。实验发现在 Γ 点附近存在能量约为 13 meV 和 17 meV 的两个 E_{2g} 声子模式，它们在低温下与磁子发生显著杂化，形成约 2 meV 的杂化能隙，并在动量空间中出现清晰的避免交叉现象。理论分析进一步表明，该耦合主要由层间海森堡交换作用驱动，并通过对称性分析和有效模型构建，明确了仅 E_{2g} 对称性的声子模式能够与磁子发生线性耦合。Mn₃Ge 结构中磁性离子占主导，晶格振动与自旋激发均由锰原子承担，这一特性极大简化了杂化模式的识别与解析，

使其成为研究磁子-声子相互作用的理想平台。该研究不仅为理解受抑制磁体中自旋-晶格耦合提供了微观机制，也为今后设计具有可调磁弹性特性的材料指明了方向。本研究成果发表于《Physical Review Letters》（刘梦洋）。



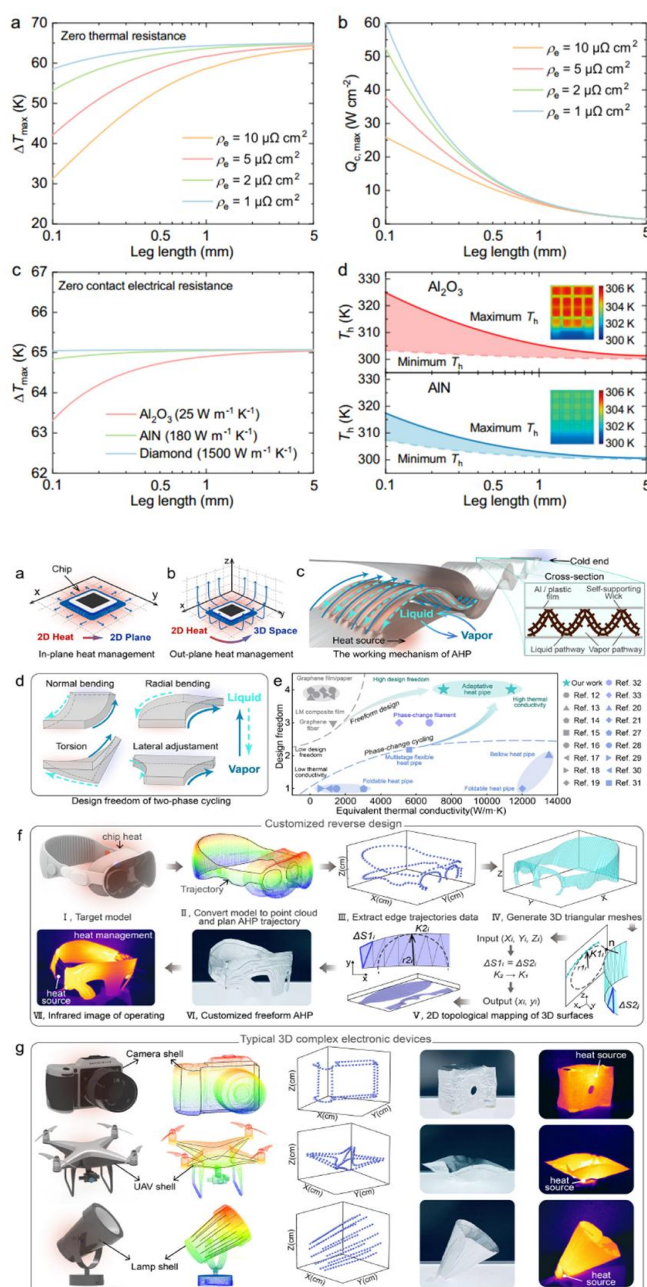
文章链接: <https://doi.org/10.1103/gymx-jklg>

8、用于局部电子热管理的 Mg_3Bi_2 微型热电冷却器

在当今信息化和智能化高速发展的时代，微电子、光电子以及高密度集成电路系统正以前所未有的速度进入我们的生产生活。然而，伴随着芯片算力的持续提升和集成度的不断加深，器件在运行过程中产生的热量急剧增加，散热与热管理难题逐渐成为限制电子器件进一步发展的关键瓶颈。传统的散热方式，如风冷或液冷系统，虽然在大型服务器或高功率设备中发挥了重要作用，但其体积庞大、噪音明显、响应速度慢等缺点，使其难以适配于微米甚至更小尺度的芯片级应用。这些传统方案在面对微型化电子器件的局部高热流密度热点时，往往显得力不从心。近年来，热电制冷技术因其完全固态化、无噪音、响应快和高可靠性而受到广泛关注。这一技术基于佩尔帖效应，通过电流驱动实现热量的定向输运，可以在极小的空间内实现精准的温度控制，被视为微型散热器件的理想解决方案。自20世纪50年代 Bi_2Te_3 合金被发现以来，商用热电制冷器几乎都基于该类材料。然而，随着研究的深入，科研人员逐渐意识到 Bi_2Te_3 体系在成本、可持续性和性能上的局限性，这推动了新一代室温热电材料的探索与开发。其中，n型 Mg_3Bi_2 基合金因其较高的热电优值 (zT)、原料低廉、环境友好，逐渐成为学界关注的焦点。尽管如此，要在微型化器件中真正实现高效散热，还需要解决热电腿几何尺寸缩小导致的接触电阻增加、界面热阻显著以及整体冷却性能下降等挑战。因此，如何实现 Mg_3Bi_2 基材料在器件尺度上的优化设计与可规模化制备，成为该领域的重要科学问题和工程难题。这一背景下，围绕微型热电制冷器的设计原理、界面调控与器件稳定性展开的研究，不仅具有前沿科学意义，更对下一代高性能电子器件的散热管理具有现实价值。

在这一国际前沿问题上，哈尔滨工业大学（深圳）毛俊教授、张倩教授团队成功设计并制备出一种基于 Mg_3Bi_2 的新型微型热电制冷器。研究人员通过系统优化热电腿几何尺寸、界面电接触电阻、陶瓷基底的热导率以及接触层设计，显著提升了器件的综合性能。具体而言，他们在 n 型热电腿中引入 $\text{Cu/Mg}_2\text{Ni/Mg}_3(\text{Bi}, \text{Sb})_2$ 复合结构，有效降低了界面电阻至 $1 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，并选择 AlN 作为基底材料以最小化热阻。在 300 K 环境下，该微型制冷器实现了高达 59 K 的最大

温差、约 $5.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的冷却功率密度以及 $65 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷却速率，性能全面超越了以往报道的同类 Mg_3Bi_2 基器件。更为重要的是，器件在经历 3000 次循环电流测试后仍能保持 98% 以上的性能稳定性，显示出优异的可靠性。在实际应用层面，该团队将器件成功应用于微控制器 CPU 的局部冷却，通过红外热成像验证了其在仅 2.4 W 功耗下即可将 CPU 温度从 300 K 降至 273 K 的能力。这项工作不仅展示了 Mg_3Bi_2 基微型热电制冷器在本征性能和结构设计上的双重突破，也为未来电子器件的片上散热和局部热管理提供了全新的解决方案。研究成果发表在《Nature Communications》上(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63174-y>
(来源: 两江科技评论)