

# 超材料前沿研究一周精选

2025年6月9日-2025年6月15日

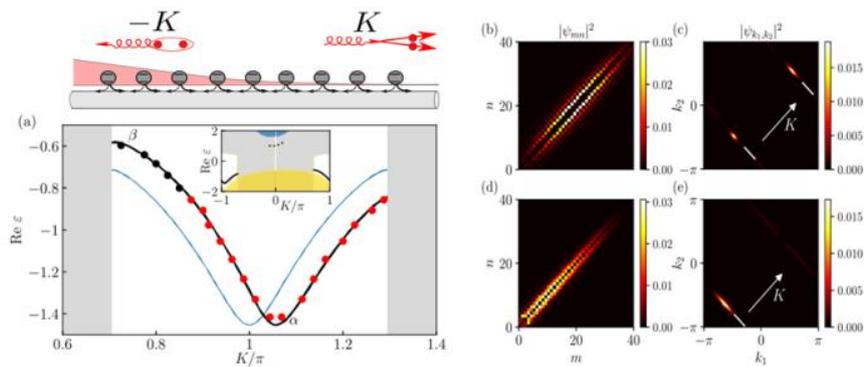
## 索引:

- 1、非厄米趋肤效应中束缚光子对的手性解离
- 2、时变无序介质中波传输的因果关系与不稳定性
- 3、等温过程中因果约束宽带吸声
- 4、声音的形态发生创造声学彩虹
- 5、电子显微镜探测界面上的声子输运动力学
- 6、双层氧化物铁电体中 Néel 型斯格明子的观测
- 7、用于无损纳米电子电路成像和检测的自然范德化渠化透镜
- 8、云层启发的白色与灰色等离子激元超表面用于伪装热管理

## 1、非厄米趋肤效应中束缚光子对的手性解离

非厄米趋肤效应 (NHSE) 是近年来在光学与凝聚态物理中广泛关注的重要拓扑现象。其典型特征在于: 当系统的能谱  $\varepsilon(k)$  随动量  $k$  在复平面中形成闭合环路时, 有限结构在开边界条件下的大量本征态将异常局域在系统边缘。这一行为通常由局域增益/损耗或非对称跃迁 (如前后跳跃幅度不等) 引发。而非局域的损耗机制, 例如源自集体自发发射的辐射损耗, 也可引入非厄米性, 进一步丰富了 NHSE 的物理图景。近期, NHSE 的研究逐步拓展至具有粒子间相互作用的量子体系。尤其令人关注的是, 有研究指出, 即便系统保持厄米性和时间反演对称性, 两个不同质量的相互作用粒子仍可在边界发生局域化。这些结果暗示, 在相互作用系统中可能存在此前未被探索的 NHSE 机制。

近日, 以色列魏茨曼科学研究所的 Jiaming Shi 和 Alexander N. Poddubny 研究了一维波导中、通过手性方式与原子阵列耦合的束缚光子对, 揭示出这些复合粒子可在无任何外加损耗或增益的条件下, 因其自身的“手性解离”行为而表现出典型的趋肤效应。与常规非厄米模型不同, 该系统在无限大阵列中仍允许束缚态具有无限辐射寿命。然而, 在有限系统中, 由于束缚态的手性解离成散射态, 非厄米性和局域化效应随之出现。反直觉的是, 当光子优先向右传播时, 束缚态反而局域于阵列的左边缘, 反之亦然。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。(金梦成)

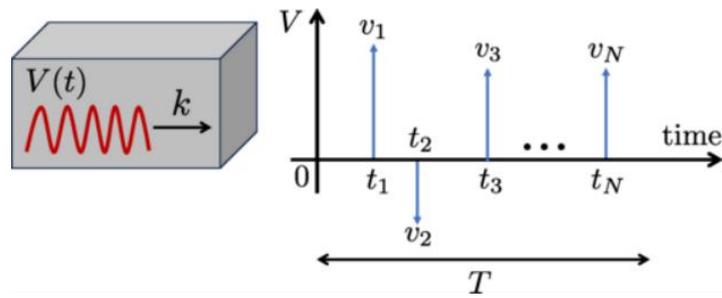


文章链接: <https://doi.org/10.1103/q6wr-2rt9>

## 2、时变无序介质中波传输的因果关系与不稳定性

在随机时间变化介质中传播的波，其介质属性随时间随机波动，是一个具有挑战性且引人兴趣的问题。与传统的空间无序静态介质不同，这类系统中的随机性作用于时间维度，使得波与介质之间的相互作用呈现出高度的动态性和复杂性。这类时间无序环境在多个物理系统中均具有现实意义，例如波速或折射率随时间波动的场景，包括：在等离子体中传播的电磁波，无线通信网络中的信号扰动，以及大气条件随时间演变时的声波传播等。近年来，随着可时控结构超材料的发展（涵盖声学、电磁和光学等方向），以及时间界面的提出，时域调控逐渐成为波动物理研究的新前沿。特别是当介质参数随时间进行周期性调制时，波的传播常数  $k$  会出现带隙结构，甚至具出拓扑相位，从而引出了光子时间晶体的概念。而其他类型的确定性时间调制也揭示出时间域与空间域结构之间丰富的对应关系与物理类比。相比之下，随机时间波动则产生一系列更为独特的波动现象。例如，波在这类介质中会经历多次散射过程——这是在空间无序系统中并不常见的机制。已有研究表明，当一个波包受到一系列随机“冲击”（即波速的突变）作用时，其系综平均能量在长时间演化下会呈现指数增长，并且其能量的统计分布趋于对数正态。这些现象与一维空间无序系统中的安德森局域存在某种类比关系。然而，尽管人们已对波能量的输运行为开展了广泛研究，波动场本身（即场的平均行为与统计结构）仍缺乏系统性的理论框架。

近日，巴黎文理研究大学的 R. Pierrat 团队提出了一个完整的理论模型，用以研究随机时变介质中波动传播的平均行为。该模型以系综平均格林函数为核心研究对象，在有限持续时间的时间无序情形下给出了精确解析解，并将分析自然推广至热力学极限。研究发现，由于因果性限制了回波散射事件，使得这一问题可在无近似条件下获得非微扰求解。研究团队进一步提出了一个有效介质理论，以有效频率的概念直观刻画了波动在时间无序中的传播特性。令人瞩目的是，在某些参数条件下，平均场会出现指数增长，揭示出系统可能存在的动力学不稳定性。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）

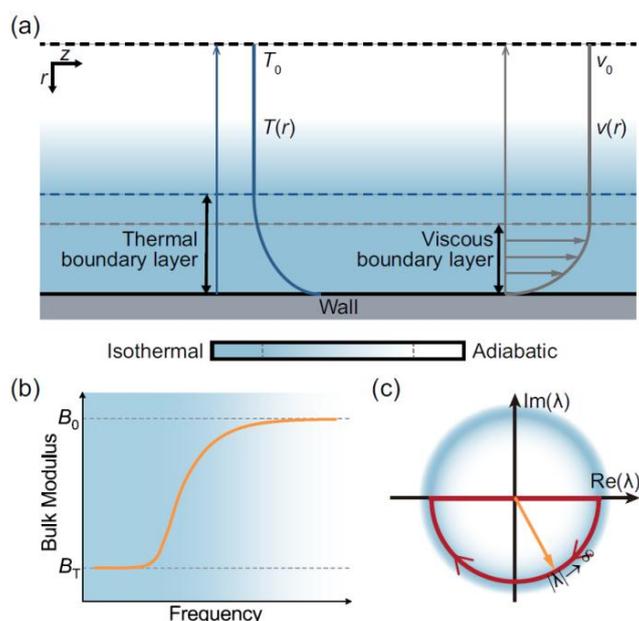


文章链接: <https://doi.org/10.1103/td38-f69r>

### 3、等温过程中因果约束宽带吸声

准确确定流体的状态方程 (EOS) 对于理解其动态行为至关重要。历史上, 不同的 EOS 假设导致了对空气中声音传播的截然不同的预测。与空气相比, 由于材料复杂的内部结构以及由此产生的气固界面, 声音在材料中的传播要复杂得多。这种复杂性决定了材料的声学响应, 进而影响其吸声和散射特性。这种行为的基础是因果关系原理, 这是一个将特定吸收谱与可实现的最小材料厚度联系起来的基本概念。因此, 准确定义状态方程对于在理论上确定吸声器性能的物理极限至关重要。超材料和超表面利用局部共振来增强波与物质的相互作用, 提高结构内的声能密度, 从而显著提高吸声性能。绝热假设通常被用作通过平衡吸收带宽和材料厚度来优化声学性能的理论基础。然而, 声音传播本质上需要介质, 而该介质的连续性方程在流体-固体界面处强制执行非滑移边界条件。这种边界条件导致形成粘性边界层和热边界层, 其特征是速度和温度梯度。因此, 热交换和粘性效应变得越来越显著, 尤其是在接近静态极限的低频区域, 此时边界层的厚度与材料结构的特征尺寸相当或超过其特征尺寸。在这些条件下, 声音传播转变为等温过程, 这对传统的绝热假设提出了挑战, 并凸显了建立更全面的理论框架的必要性。

近日, 同济大学的李勇教授、王旭教授团队, 提出了一个广义因果框架, 该框架包含等温过程, 考虑了流体-固体界面处的非滑移边界条件。这些条件引入了速度和温度梯度, 挑战了传统的绝热假设。为了验证该框架, 作者分析了两种不同的吸声体类型: 一种具有多谐振单元的超材料和一种具有多层双孔结构的超泡沫。理论和实验研究表明, 吸声体厚度可以超过绝热极限, 而是受等温约束的制约。这种范式转变加深了对吸声机制的理解, 并为设计接近基本性能极限的高性能声学设备铺平了道路。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。(刘帅)

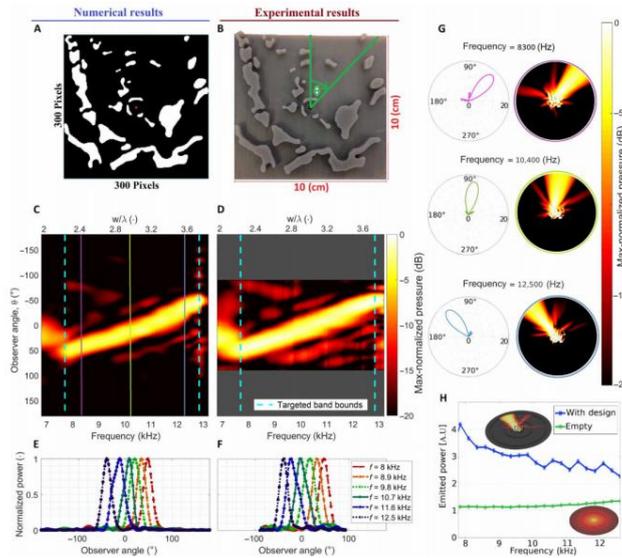


文章链接: <https://doi.org/10.1103/jwvm-ntts>

#### 4、声音的形态发生创造声学彩虹

自然界中许多生物通过演化出复杂声学结构实现高效的声波散射与频域分解,例如哺乳动物耳廓可通过被动散射产生独特的空间-频谱声学特征以辅助声源定位。然而,人工结构难以复现此类性能,现有技术通常依赖主动换能或窄带共振,无法在宽频范围内实现被动式、可调控的空间-频谱分解。尽管声学超材料在波场调控方面展现出潜力,但其设计多聚焦于单一谐振频率的定向增强,而宽带声波的连续空间-频谱分离仍未被实现。这一挑战源于多尺度结构的复杂性:器件需同时包含亚波长与超波长特征,且需在宽频带内协调散射效应。

近日,丹麦技术大学的 Rasmus E. Christiansen 副教授和 Ole Sigmund 教授研究团队,提出一种基于拓扑优化的计算形态发生框架,设计出波长尺度的单材料硬质散射结构,首次实现了自由场中宽带声波的空间-频谱分解。其核心方法是通过伴随灵敏度分析优化材料分布,使亥姆霍兹方程描述的声压场逼近目标场分布。基于此方法,研究设计出两类器件:(1)声学彩虹发射器(ARE),尺寸为  $10 \times 10$  cm,可将 7.6 - 12.8 kHz 宽带噪声分解为连续空间谱,主瓣方向随频率从  $-50^\circ$  连续偏移至  $+50^\circ$ ,主副瓣声压差达 20 dB,且在目标频带内辐射效率超过单极子自由场辐射;(2)声学  $\lambda$  分离器,能将 6.5 - 8.4 kHz 与 9.4 - 12 kHz 频段声波分别导向  $+35^\circ$  和  $-35^\circ$  方向,各频段超过 82% 的声能集中于目标主瓣。实验通过 3D 打印样品验证了设计与仿真高度一致,证实器件通过非共振机制运作——多路径声波的相位干涉是声谱分解的物理基础,特征结构(如 ARE 的六通道反射脊)通过调制声程差实现频控偏转。该设计框架为声学天线、生物仿生传感及波场调控提供了新范式,其原理可拓展至光学与电磁学领域。该成果发表于《Science Advances》。(刘梦洋)

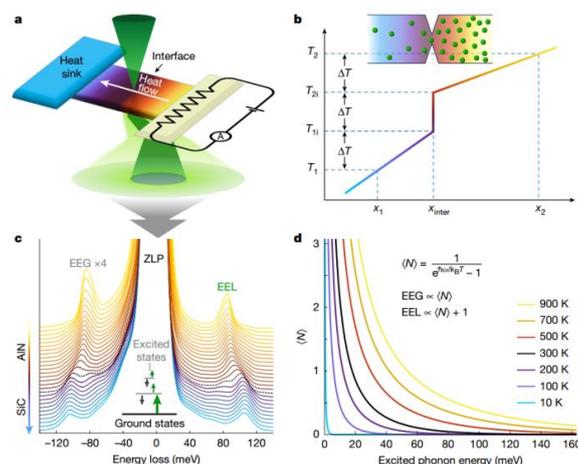


文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv. ads7497>

## 5、电子显微镜探测界面上的声子输运动力学

在人工智能、大数据与高性能计算持续发展的当下，芯片“发烫”成了不可回避的难题。随着器件日益微型化、集成度大幅提升，微米甚至纳米尺度的热管理问题日益突出。特别是在高功率密度运行条件下，材料界面所造成的热阻正逐渐成为热运输瓶颈。热流在不同材料之间“穿越”的那一瞬间，究竟发生了什么？这一问题长期困扰着科学界。在半导体材料中，热量的主要载体是声子。然而，由于不同材料之间在晶格结构、成分和对称性上的差异，使得声子在界面处容易发生散射，导致能量无法顺畅传递，形成局部“热点”并加剧器件失效。尤其是在如 AlN - SiC 这样的宽禁带半导体异质结中，界面声子散射尤为剧烈，其具体动态机制至今仍未被实验精确捕捉。传统热反射率测量方法如 TDTR 或 FDTR 等，虽可获取界面热阻 (ITR)，但空间分辨率受限，难以揭示纳米尺度下的非平衡声子行为。近年来尽管扫描热显微、近场拉曼等方法在表面温度探测方面有所突破，但要在原子级别上“看到”埋藏界面中的热流分布，仍是一项极具挑战的任务。近日，北京大学物理学院高鹏教授课题组联合中科院半导体研究所等单位，首次利用原位振动电子能量损失谱 (STEM-EELS) 技术，实现了对 AlN - SiC 异质结界面在热传输过程中的非平衡声子动态行为的原位观测，空间分辨率优于 1 纳米，时间维度接近稳态条件，揭示了声子在材料交界处的精细输运规律。研究团队构建了一个模拟一维稳态热传输的加热系统，在纳米级横截面的 AlN - SiC 异质结中引入稳定温度梯度，通过分析电子束与材料中不同能量声子相互作用所产生的能量损失与增益谱 (EEL/EEG)，获取局域温度分布和声子激发状态。实验观测发现，在界面处存在约 2 纳米宽的陡峭温度跃变区，温差可达 10 - 20K，直接揭示了相对界面热阻 (ITR) 并首次实验确认了声子在界面处的强烈非平衡特征。更引人注目的是，该研究还发现，声子在不同热流方向下的行为具有方向选择性：AlN 中的横向光学声子在靠近界面约 3 纳米范围内，其“模态温度”发生显著变化，且界面特有的声子模式 ( $\alpha$  和  $\beta$  模) 在正反热流下激发强度明显不同。这一现象源于声子在界面处的非弹性散射过程，其中高能光学声子更容易与界面模耦合，成为能量“桥梁”，从而造成非对称的声子分布状态。结合 NEMD 数值模拟

与谱函数分析，研究进一步提出了一个三声子非弹性散射机制模型，为理解热整流、热二极管等热逻辑器件提供了理论基础。这一工作不仅验证了长期以来关于界面声子桥接效应的理论预测，也为界面热管理提供了精确量化工具和物理模型。其原位成像技术和高空间分辨的声子温度谱图，为调控器件热输运特性、优化热界面设计开辟了新路径。未来，这一方法有望应用于纳米晶体管、热电材料、甚至量子器件中的热调控研究，推动先进信息系统与能量转换装置的性能跃迁。相关内容发表于《Nature》上。（张琰炯）

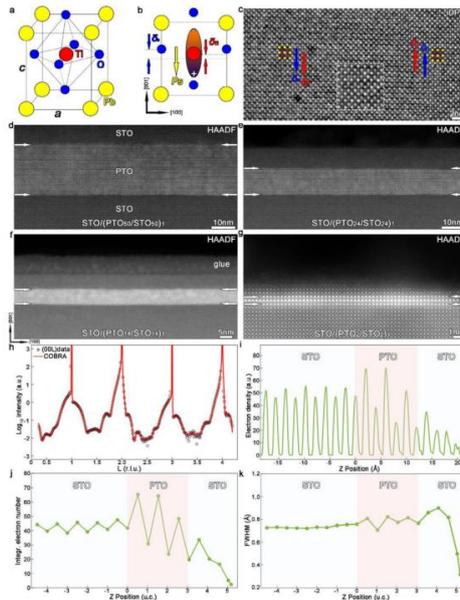


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09108-6>

## 6、双层氧化物铁电体中 Néel 型斯格明子的观测

铁电材料中的拓扑结构与磁性体系存在显著类比性，但斯格明子构型呈现本质差异：磁性斯格明子可形成纯 Néel 型或 Bloch 型结构，而铁电斯格明子通常表现为混合特征。这种混合性源于偶极-偶极相互作用的非手性本质，其能量上天然倾向于 Bloch 型构型。纯 Néel 型铁电斯格明子的形成需克服双重挑战：既要补偿电极化径向梯度的发散，又需平衡体能量、梯度能、弹性能和静电能的复杂相互作用。尽管理论预测其存在概率较低，该态的探索价值依然显著——其实验验证将深化铁电与铁磁材料的物理类比，为超薄电子器件设计与铁电拓扑物态研究开辟新路径。

近日，松山湖材料实验室/中国科学院的马秀良研究员课题组与浙江大学的洪子健研究员团队合作，通过精准调控钛酸铅/钛酸锶双层薄膜厚度（50 至 2 单胞），首次在 2 单胞超薄体系中观测到纯 Néel 型铁电斯格明子。实验表明：当厚度大于 14 单胞时，斯格明泡呈现扭曲混合畴壁，同时具备 Néel 与 Bloch 特征；当厚度缩减至临界尺寸 2 单胞时，Bloch 特征完全消失，仅存发散型极化分布，其拓扑电荷为  $\pm 1$ 。原子尺度分析揭示面内离子位移显著增强，同步辐射三维倒易空间映射检测到特征性“子杆”信号，共同证实纯 Néel 态的存在。相场模拟阐明核心机制：超薄极限下退极化场强度骤增至  $6.58 \text{ V} \cdot \text{nm}^{-1}$ ，而应变弛豫效应减弱，导致朗道能量密度急剧升高，迫使体系选择纯 Néel 构型以实现能量最小化。此项成果在理论层面填补了铁电拓扑态分类空白，建立了与磁性斯格明子的直接对应关系；在机制层面揭示了梯度能与退极化场对拓扑态选择的决定性作用；在应用层面为纳米级高密度存储器和低功耗拓扑电子器件提供了新载体。此项研究成果发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



文章链接:

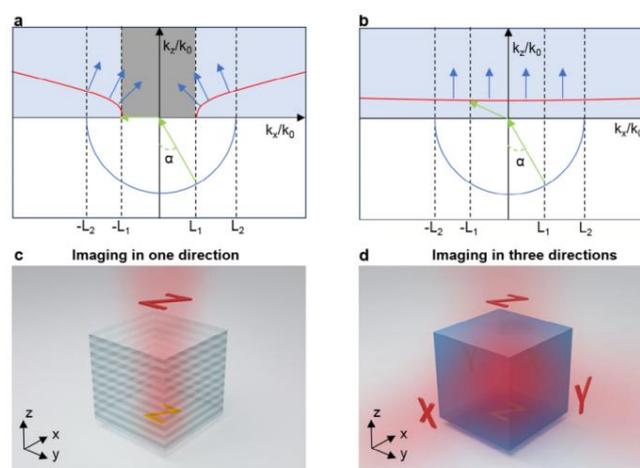
<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202501411>

## 7、用于无损纳米电子电路成像和检测的自然范德化渠化透镜

随着摩尔定律逼近物理极限，人工智能与量子芯片架构的复杂性急剧增加，对芯片制造过程中的多维精密检测提出了前所未有的挑战。在半导体制造过程中，光学检测技术因其非破坏性与高通量特性，长期被视为工艺控制与缺陷检测的“眼睛”。然而，传统的光学散射成像（如暗场法）由于衍射极限，无法解析亚波长结构；而原子力显微镜（AFM）虽能提供纳米级表面信息，却难以穿透多层结构获取掩埋层信息。近年来，超透镜与超材料等新型光学器件虽在一定程度上突破了分辨率限制，但依赖于复杂纳米结构制造的人工超材料，不仅损耗高、稳定性差，且多为单轴各向异性材料，无法实现多方向成像。如何实现一种无需复杂制备、同时具备高分辨率、非接触、三维成像能力的“新型镜头”，成为半导体工业亟需突破的技术瓶颈。近日，研究人员发现自然存在的双轴晶体——正交相三氧化钼（ $\alpha$ - $\text{MoO}_3$ ）具备独特的各向异性与超低光学损耗特性，能支持无衍射的声子极化激元（PhP）传输通道，从而为突破衍射极限提供了一种天然材料解决方案。尤其是在中红外频段， $\alpha$ - $\text{MoO}_3$  表现出方向相关的“平带色散”，可在三个晶体方向同时实现无衍射、无损耗的信息传输。这种“渠化”（canalization）机制本质上不同于传统超镜依赖的超材料带隙，能够完整保留亚波长信息的波矢分量，为亚波长成像提供了极具优势的天然平台。更重要的是，这一成像机制在物体与镜头之间距离变化时依然稳定，极大提高了其实用性。

近日，澳门科技大学欧清东助理教授、中国地质大学（武汉）戴志高教授、厦门大学陈焕阳教授、上海理工大学 Qiaoliang Bao 教授及合作者，首次提出并验证了一种基于自然双轴范德华晶体  $\alpha$ - $\text{MoO}_3$  的“渠化透镜（canalization lens）”用于非破坏成像的策略。该工作提出的成像方案不仅具备 15 纳米的空间分辨率，还能在不剥离封装层的情况下解析 100 纳米周期的掩埋图案，在纳米尺度芯片检测领域实现了实质性突破。实验中，团队通过机械剥离法制备出高质量  $\alpha$ - $\text{MoO}_3$  薄片，并将其覆盖在不同尺寸的金纳米图案上。在中红外光照射下，采用

s-SNOM 近场光学成像系统，清晰观察到了多个深亚波长结构的恢复图像——其中包括仅 15 纳米宽的金线、68 纳米间距的纳米盘对，甚至还能解析出掩埋于 240 纳米 SiO<sub>2</sub> 封装层下的人工“CPU”线路断点（宽度仅 40 纳米）。这一分辨能力已远远优于现有超镜头（如 hBN 或 SiC），甚至在某些场景下超过了 s-SNOM 探针本身的物理极限。数值模拟结果表明，这种高分辨成像依赖于  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> 在三个方向同时支持的极平色散，以及极低的极化子损耗（约 1.5 cm<sup>-1</sup>），实现了目前已知最高保真度（图像真实宽度与峰宽比达 74%）的亚波长成像。此外，研究团队还系统比较了  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> 透镜与其他常见超镜在空间分辨率、损耗水平、成像方向、结构复杂度等方面的优劣。结果表明，相较于 SiC、hBN 等单轴超材料， $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> 不仅实现了在 xyz 三个方向的三维成像，还兼具多频带操作、高成像稳定性与材料天然存在的优势。这意味着  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> 有望作为新一代光学检测“元器件”，被集成进未来的芯片工艺线上，用于纳米电路缺陷检测、断点定位、图案对准等关键工艺步骤。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）



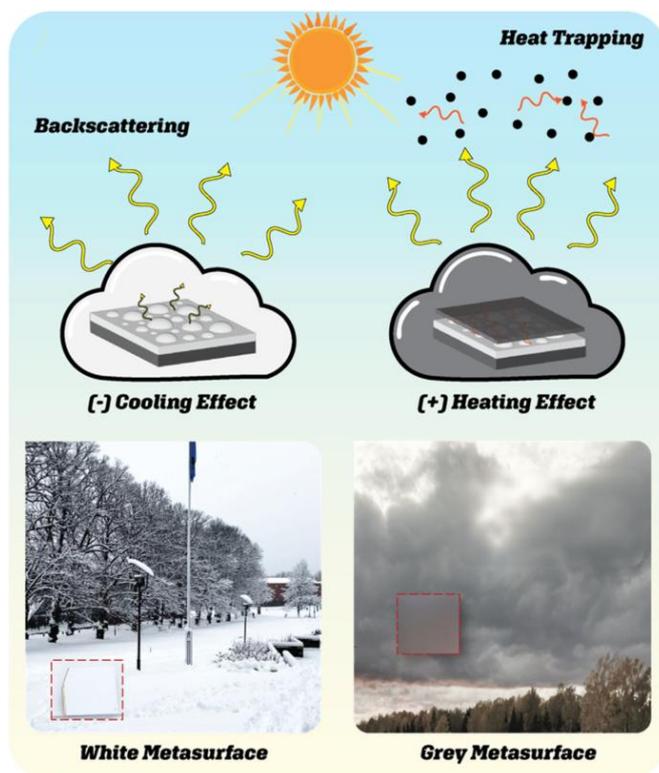
文章链接：<https://doi.org/10.1002/adma.202504526>

## 8、云层启发的白色与灰色等离子体超表面用于伪装热管理

自然界中，生物体的白色和灰色对于体温调节和伪装至关重要，许多物种拥有这些特征是为了更好地适应环境并躲避捕食者。类似地，在不同的长度尺度上，这种白色和灰色机制的相互作用超越了生物体，延伸到地球大气层，在那里它受辐射强迫原理的支配。这些原理通过量化能量平衡的变化，突出了一种先进的热管理模型大气中流动的热量。在色彩功能方面，等离子体材料和超表面已被广泛用于通过散射和吸收来操纵光，从而能够创造出鲜艳的色彩和黑色材料。尽管取得了这些进展，但使用等离子体材料实现灰色和特别是白色的外观仍然是一个重大挑战，因为等离子体材料天然就是强吸收剂，这使得它们在使用金属或介电超材料的宽带太阳能吸收器等应用中非常有效。为了实现白色冷却表面，同时又保持其在热红外范围内不可探测，需要一种新的优化设计，将背向散射和低发射率涂层结合起来，从而开辟一个全新且尚未探索的领域。

近日，阿尔托大学的 Moheb Abdelaziz 和 Mady Elbahri 团队，受地球大气中云层和气溶胶之间错综复杂的相互作用的启发，开发了一个人工系统，旨在复制这些自然过程，并通过新颖的白色和灰色等离子体设计精确控制视觉和热行为。通过等离子体超表面模拟云层的白色背向散射，并通过添加纳米复合层模拟其向减

少背向散射（或灰色）的转变。类似云层的白色等离子体超表面可以有效地反向散射太阳辐射，从而产生冷却效应，使底层基底的温度相对降低 $-10^{\circ}\text{C}$ 。此外，通过模拟大气分层效应，在白色超表面顶部添加了纳米复合吸收体，以抵消反向散射，从而实现向灰色的转变并有效地捕获光线。这种增强效应使系统温度显著升高，在1个太阳辐射下，其性能比传统的黑色吸收体和选择性黑色吸收体高出 $+10^{\circ}\text{C}$ 。该等离子体反向散射系统，弥合了热效率与基底热控制之间的差距，为先进伪装、隐身技术和创新热能解决方案释放了变革潜力。相关工作发表在《Advanced Materials》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202501080>

(来源: 两江科技评论)