

超材料前沿研究一周精选



2026 年 8 月 10 日-2026 年 8 月 16 日

索引:

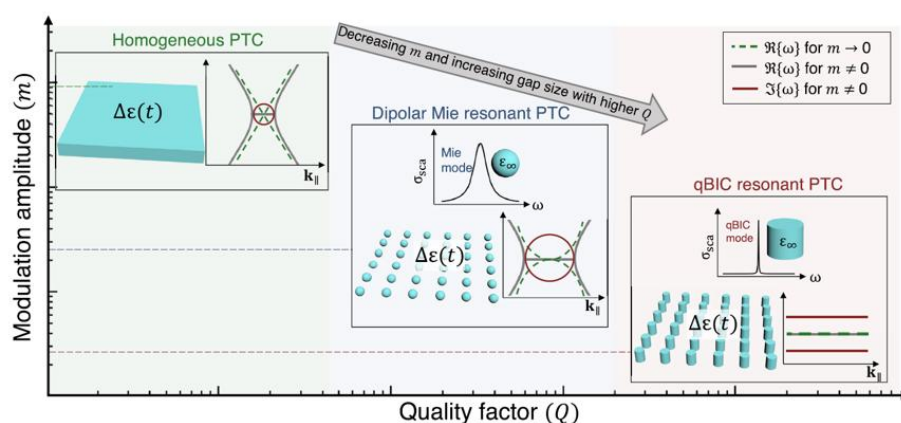
- 1、利用准连续体束缚态实现的光子时间晶体
- 2、基于微扰工程的零间距光子信道
- 3、超导 KTaO_3 界面表面声子极性的定向增强
- 4、用于小尺度机器人的空气中无线驱动声学谐振器
- 5、复动量空间中非厄米谱形变的观测
- 6、通过电子-声子协同作用实现非接触式人机交互的高灵敏度可见光-长波红外超宽带光电探测器

1、准连续体束缚态实现的光子时间晶体

近年来, 时间变化光子介质受到广泛关注。光子时间晶体通过在时间上周期性调制介电常数形成动量带隙, 带隙内具有复频率的本征模可放大与其耦合的入射光, 从而增强光-物质相互作用, 并有望应用于自发辐射放大、亚光速切伦科夫辐射和时间局域等领域。尽管光子时间晶体已在微波频段得到实验验证, 但向光学频段拓展仍面临巨大挑战: 体材料通常需要接近光频两倍的超快调制以及接近 100% 的介电常数变化。透明导电氧化物在近零介电区虽可实现大幅调制, 却依赖极高的泵浦强度, 并伴随显著损耗和热损伤风险。Si、Ge 和 GaAs 等透明材料可通过三阶非线性实现超快调制, 但其介电常数变化通常不足 1%, 易被散射损耗和系统缺陷掩盖。借助超表面的结构共振可在弱调制下拓宽动量带隙, 但已有基于硅球米氏共振的方案品质因子较低, 仍需在接近材料激光损伤阈值的条件下工作。

近日, 卡尔斯鲁厄理工学院 Carsten Rockstuhl 团队, 引入光子准连续体束缚态 (qBIC) 并将其与光子时间晶体相结合。光子 qBIC 具有极高的品质因子, 其上限主要受材料损耗、有限尺寸效应和加工误差制约。研究表明, 由支持 qBIC 的纳米谐振器构成的超表面, 可在采用常规材料并考虑实际损耗的条件下实现实用化光子时间晶体。具体而言, 本文提出了由多层球形纳米谐振器和均匀圆柱形纳米谐振器构成的两种超表面: 前者用于阐明材料诱导 qBIC 拓宽动量带隙的理论机制, 后者利用几何诱导 qBIC, 证明在存在实际损耗的合理结构中仍可获得显著的动量带隙, 且所需泵浦强度比材料的激光损伤阈值低一个数量级。此外, 本研究还将米氏理论框架拓展至由多层球体和有限尺寸圆柱体组成的时间变化超表面。该方法将连续体束缚态与时间变化超材料的概念相结合, 为在光学频段实现可行的光子时间晶体铺平了道路。

相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



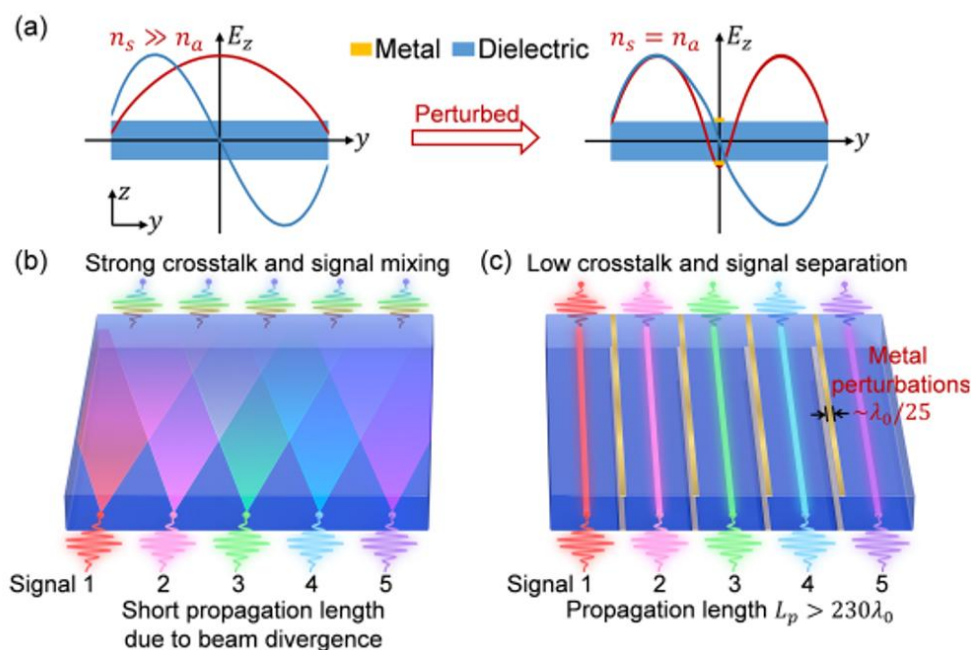
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aed4055>

2、基于微扰工程的零间距光子信道

随着光子集成技术不断向高密度、小型化方向发展，相邻波导之间的串扰逐渐成为限制器件进一步压缩尺寸的重要瓶颈。传统介质波导通常需要在相邻通道之间设置低折射率包层或间隔，以抑制倏逝场耦合，因此波导间距往往需要达到波长尺度，直接限制了芯片上的空间利用率。近年来，各向异性包层、超晶格、周期弯曲结构、近零介电材料以及高阶模式调控等方案虽可降低串扰，但仍难以彻底摆脱物理间隔。金属-介质混合等离激元波导能够进一步压缩光场，却受到明显欧姆损耗制约；无包层波导则通常依赖光子晶体或超材料等复杂结构。如何在不依赖波长尺度间隔的条件下实现低串扰甚至无串扰传输，同时兼顾低损耗、结构简单和现有光子芯片工艺兼容性，因而成为实现超高密度光子集成的重要研究方向。

近日，南京大学赖耘教授、王牧教授、彭茹雯教授和苏州大学罗杰研究员联合研究团队在微波介质板表面引入深亚波长金属扰动，利用扰动位置处不同超模场分布的差异，显著改变对称超模的有效折射率，同时使反对称超模基本保持不变，由此实现超模简并并使耦合长度大幅增加。全波仿真与微波实验均表明，即使相邻通道之间不存在物理间隔，信号仍可保持在原始通道中传播，并且该机制同样适用于弯曲波导。进一步面向实际片上光学应用，该研究设计了硅基绝缘体零间距波导，将银扰动与硅介质扰动相结合，前者主要用于获得极长耦合长度，后者则通过调节超模色散显著拓宽低串扰工作带宽，使器件在较宽光谱范围内保持高度隔离。由于金属仅作为微小扰动而非用于激发表面等离激元，该结构能够在提高集成密度的同时显著减轻金属损耗，并保持与主流硅光平台的兼容性，为超紧凑定向耦合器、分束器以及可重构光子线路提供了新的设计自由度。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



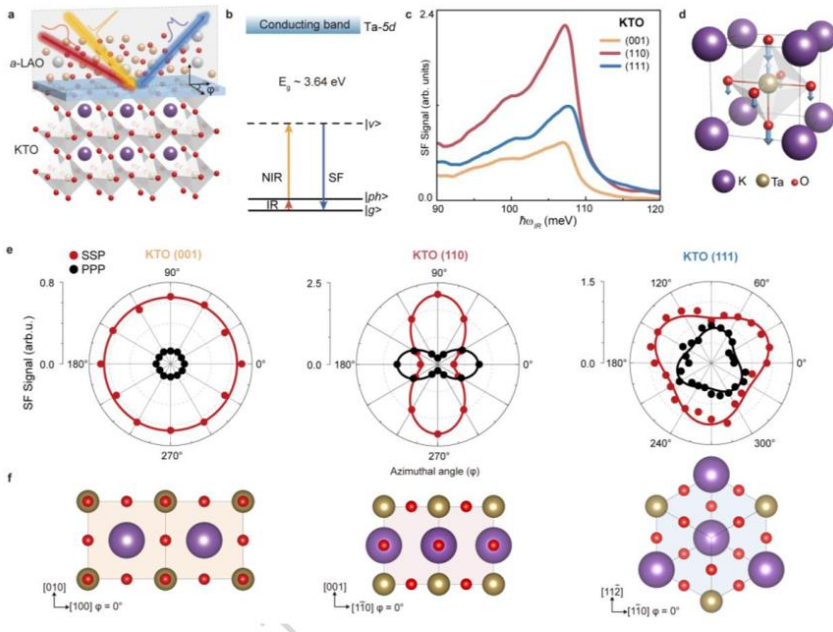
文章链接: <https://doi.org/10.1103/3q3v-hw8n>

3、超导 KTaO_3 界面表面声子极性的定向增强

近年来, 极性纵向光学 (LO) 声子及其电子 - 声子耦合被认为可能参与界面超导电子配对, 而对称性破缺产生的巨大界面极化场还能够调节 Rashba 自旋 - 轨道耦合、载流子屏蔽以及界面电子态分布。 KTaO_3 (KTO) 作为典型量子顺电体, 具有高介电常数、高载流子迁移率以及显著的自旋 - 轨道耦合, 是研究上述问题的重要平台。尤其值得关注的是, KTO 异质界面的超导表现出异常显著的晶向依赖: 已有研究中, (111) 取向 LAO/KTO 界面的超导转变温度可达到约 2 K, (110) 取向约为 0.9 K, 而 (001) 取向在 25 mK 以上甚至不表现出超导。这种显著的超导各向异性究竟来自何种微观机制仍未完全明确, 其中一个关键问题是: 不同晶向产生的界面对称性破缺和极性环境是否会改变特定声子模式, 并进一步影响电子 - 声子耦合及超导电子配对? 由于传统拉曼光谱主要探测体相信息, 而 KTO 中的关键物理发生在纳米尺度埋藏界面, 因此直接获取具有界面选择性和对称性敏感的晶格动力学信息一直具有挑战性。

近日, 复旦大学刘韡韬课题组利用具有表面/界面特异性和对称性选择能力的和频光谱 (SFS), 系统研究了不同晶向 KTO 及 a-LAO/KTO 异质界面的声子响应, 在约 107 meV 处发现了来源于 KTO 体相 LO_4 声子的显著表面声子共振。该模式涉及 Ta 原子与氧八面体的反相振动, 并因界面反演对称性破缺而表现出强烈的和频响应。更重要的是, 形成异质界面后该声子响应表现出巨大的晶向差异: 相对于裸 KTO, (001)、(110) 和 (111) 界面的声子强度分别增强约 4 倍、33 倍和 35 倍, 而对应样品中 (111) 和 (110) 界面的超导转变温度分别达到 1.22 K 和 0.35 K, (001) 界面在 0.1 K 以上未观察到超导转变, 呈现出声子增强与超导各向异性同步变化的趋势。进一步通过非线性光学极化率张量分析, 团队定量揭示表面声子极性增强满足 $(111) > (110) \gg (001)$, 并指出 (110)/(111) 表面更大的电荷密度和 Born 有效电荷可产生更强的界面极性; LO_4 声子则可能通过广义 Fröhlich 机制提供长程电子吸引, 同时强极化场还可能增强 Rashba 型自旋-轨道耦合, 共同

影响电子配对。此外，研究还在约 100 meV 处识别出与界面氧空位相关的软化局域振动，并发现(111)表面具有更高的氧空位浓度，可能进一步影响载流子密度和超导转变温度。该研究从界面声子极性的角度建立了晶向—对称性破缺—界面极性—声子/缺陷—超导各向异性之间的实验关联，为理解 KTO 及相关氧化物异质界面的超导机制以及通过晶向和界面工程调控量子态提供了新的物理图景。相关内容发表在《Nature Communications》(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-76343-4>

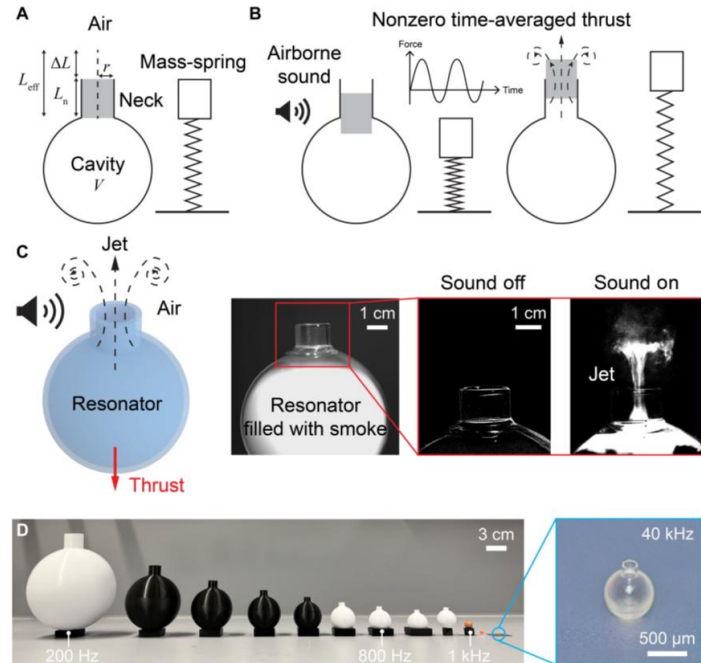
4、用于小尺度机器人的空气中无线驱动声学谐振器

声学驱动具有非接触、微创和柔性操控等优势，在机器人与自动化领域展现出重要潜力。体声波和表面声波能够对液体中的细胞、微气泡及颗粒施加声辐射力，实现其在微流控器件和生物体内的运输。除声学捕获外，声波还可通过流固耦合无线驱动谐振执行器：行波在共振频率下激发气泡或尖锐固体结构的强烈振动，进而产生声流与推力。结合双光子光刻等先进制造技术，具有复杂结构的刚性或柔性微型机器人已可被精确加工并通过声致振动驱动。在空气中，声辐射力也可借助驻波或相控阵波束实现轻质物体悬浮，但该方法依赖声阱而非结构共振，难以直接驱动机器人执行器，并受到声学对比因子和物体几何形状的限制。相比之下，亥姆霍兹谐振器利用封闭腔体颈部空气的质量-弹簧振荡放大声场，其共振频率由腔体体积和颈部几何决定；当振幅足够大时，非线性气流可通过动量交换形成定向射流并产生推力。

近日，洛桑联邦理工学院 Mahmut Selman Sakar 团队，提出了一套集设计、制造与控制于一体的方法，将带有腔体的简单聚合物结构转化为无缆移动机器人。研究通过实验系统考察了腔体形状、颈部几何结构、壁厚和刚度等几何与力学参数对推力产生的影响。研究人员采用熔融沉积成型（FFF）、立体光刻（SLA）、数字光处理（DLP）和双光子聚合（TPP）等多种增材制造技术，制备了尺度从厘米到微米的刚性及柔性谐振器。为实现不同尺度谐振器的激励，研究人员搭建了多种高功率声学控制系统，可产生频率范围为 1 Hz 至 40 kHz 的声波，从而

将这些谐振器转化为无线供能的执行器。该研究还将空气谐振驱动原理从空气传播声激励拓展至结构传播声激励，证明通过换能器直接激发腔体同样能够产生推力。最后，研究通过微型船只的远程操控以及微型飞行器的起飞实验，展示了该驱动技术在小尺度机器人领域的应用潜力；其中，微型飞行器可分别利用竖直推力或气动升力实现升空。

相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



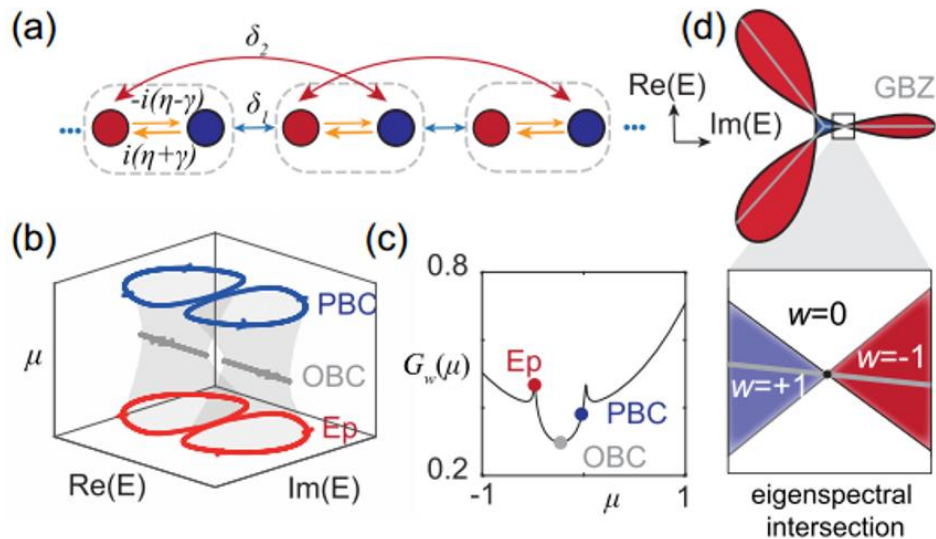
文章链接：<https://doi.org/10.1126/sciadv.aef5620>

5、复动量空间中非厄米谱形变的观测

拓扑能带理论通过能带的几何与拓扑性质，为理解陈绝缘体、Weyl 半金属等拓扑物态提供了统一框架。近年来，随着开放体系研究不断深入，增益、损耗及非互易耦合所产生的非厄米效应逐渐成为拓扑物理的重要前沿。与传统厄米体系不同，非厄米系统的复能谱会对边界条件表现出异常敏感性，并可能产生非厄米趋肤效应，使常规 Bloch 能带理论中的体边对应关系失效。为描述此类体系，非 Bloch 能带理论将实数准动量推广至复数动量，使不同边界条件下的能谱能够通过复动量空间中的连续形变相互联系，并由此定义广义布里渊区等关键概念。然而，现有实验大多局限于实动量空间的能谱测量，难以直接获得复动量对应的非 Bloch 信息。尤其是复动量的虚部对应空间上的指数增长或衰减，对实验态制备和测量提出了更高要求，因此如何直接观测复动量空间中的非厄米能谱形变，成为检验非 Bloch 能带理论及进一步探索非厄米拓扑性质的重要问题。

近日，中国科学技术大学的易为教授、许金时教授和李传锋教授研究团队利用简并光学腔中光子的轨道角动量合成维度，构建了具有可调非互易耦合和长程跃迁的非厄米晶格，并发展了一种复动量分辨的投影光谱测量方法。通过分别将复动量的实部和虚部编码到轨道角动量模式的相位与振幅分布中，并借助空间光调制器实现任意复值非 Bloch 态的选择性投影，实验直接重构了复动量变化过程中复能谱的连续形变。结果显示，能谱能够由周期边界条件下的闭合环逐渐演化至开放边界条件对应的能谱，并可从形变过程提取广义布里渊区、例外点以及 Ronkin

函数等非 Bloch 特征。进一步引入长程耦合后，复杂能谱中出现的自交点随复动量演化，其轨迹能够描绘开放边界能谱并重构广义布里渊区；相应复动量的虚部还直接决定开放边界本征态的空间局域长度。该研究由此建立了复动量、复能谱几何与非厄米局域态之间的实验联系，为非 Bloch 理论的核心预言提供了直接验证，同时展示了一种不依赖特定哈密顿量工程的通用测量方案，可进一步用于多能带、高维非厄米体系以及非 Bloch 拓扑相变和高阶例外点等问题。该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）

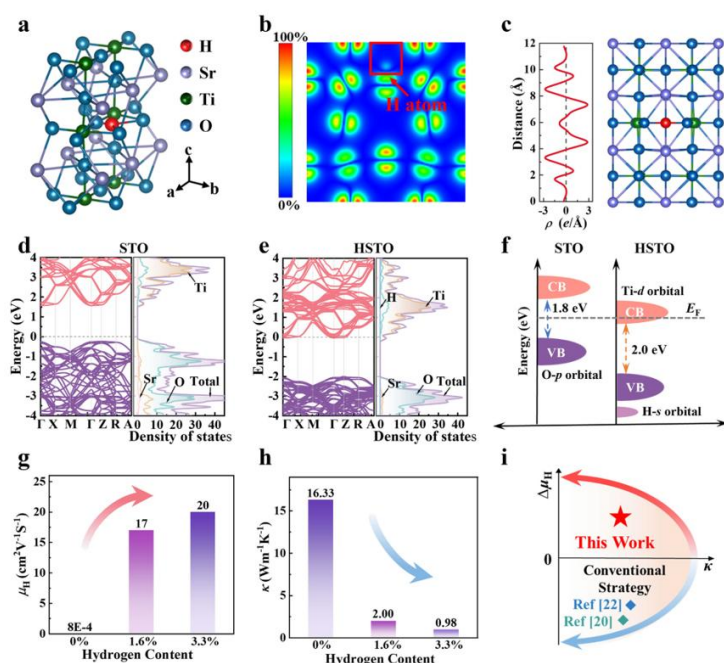


文章链接: <https://doi.org/10.1103/v3qv-hdqg>

6、通过电子-声子协同作用实现非接触式人机交互的高灵敏度可见光-长波红外超宽带光电探测器

红外探测是现代智能感知体系的重要基础，在热成像、遥感监测、气体识别、生物医学诊断以及人机交互等领域发挥着关键作用。传统窄带隙半导体光子探测器虽然灵敏度高、响应速度快，但通常受限于有限的光谱响应范围，并容易受到热噪声影响，往往需要复杂的低温制冷系统；热探测器虽然能够实现室温、宽光谱探测，却普遍存在响应较慢、时间分辨率不足的问题。因此，如何兼顾超宽光谱、高灵敏度、快速响应、零偏压和室温工作，一直是红外探测领域的重要挑战。光热电（photothermoelectric, PTE）效应通过光吸收产生温度梯度，再借助 Seebeck 效应输出电信号，为实现无需外加偏压的宽带探测提供了新方案。 SrTiO_3 （STO）具有低成本、高热稳定性和较大的 Seebeck 系数，同时在长波红外大气窗口具有较强声子吸收，是很有潜力的 PTE 材料。但本征 STO 电导率低、晶格热导率高，而传统化学掺杂虽然能够降低热导率，却往往同时增强载流子散射、降低迁移率，使电子输运与声子输运难以兼顾。因此，如何在同一种材料中实现“电子输运增强、声子传热抑制”的协同调控，成为提升 PTE 探测性能的关键。近日，中国科学院大学杭州高等研究院物理潘昌翊助理研究员，单玉凤副研究员及华东师范大学邓惠勇研究员团队提出间隙氢掺杂 SrTiO_3 （HSTO）策略，使氢以浅施主形式进入晶格：一方面，电子有效质量降低并减少严重的合金无序散射，使载流子迁移率提高至约 $7.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ；另一方面，氢诱导 TiO_6 八面体旋转

及 Ti - O 键长扰动, 增强声子散射, 使室温热导率由 17.88 降至 9.95 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 从而实现电子与声子输运的协同优化。在此基础上, 团队构筑半悬浮 HSTO 光热电探测器, 通过降低向衬底的热泄漏进一步放大温度梯度, 实现从 532 nm 可见光到 8.47 μm 长波红外的超宽带自供能探测, 在 1550nm、4 μm 和 8.47 μm 处的最大响应度分别达到 3.86、3.69 和 3.39V/W, 探测率约为 10^8 Jones 量级。进一步缩小器件尺寸后, 响应时间由秒级降至 87.9/95.8 ms。团队还构建了 3×3 HSTO 探测阵列, 利用人体自身中红外热辐射实现非接触手势感知, 并结合随机森林机器学习算法, 对五类手势实现 100% 识别准确率。该工作通过间隙掺杂实现了传统热电材料中电子与声子输运的“解耦式”优化, 为室温、高灵敏、超宽带光热电探测器及非接触智能人机交互提供了新的材料设计思路和器件路径。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.77621>
(来源: 两江科技评论)