

超表面的热辐射多自由度调控 (封面文章·特邀)

尚劲光¹, 尚效合¹, 仲 帆², 肖彦玲¹, 高 恺¹, 姚哲涵¹, 张 也¹, 王 强¹, 祝世宁¹, 刘 辉^{1*}

(1. 南京大学 物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 人工微结构科学与技术协同创新中心,
江苏 南京 210093;

2. 东南大学 物理学院 量子材料与信息器件教育部重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘 要: 传统热辐射源所发出的辐射通常表现为无波长选择、无偏振选择、无方向选择的非相干光, 难以实现对红外热辐射特性的灵活调控, 从而限制了其在红外领域的应用。近些年, 随着纳米光子学研究和微纳加工工艺的快速发展, 超表面被广泛应用于热辐射特性调控中, 有效打破了传统热辐射调控所面临的瓶颈。目前, 基于超表面研发的热辐射器件已广泛应用于热管理、能源利用和传感检测等领域, 显著推动了多种红外应用的发展。此外, 依托多样化设计的超表面结构, 研究人员已经实现了对热辐射光谱、偏振、方向等多自由度调控, 进一步拓展了热辐射器件的红外应用场景, 并推动其向小型化与集成化方向发展。

关键词: 超表面; 红外应用; 多自由度调控; 热辐射芯片

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250447

引用格式: SHANG Jinguang, SHANG Xiaohu, ZHONG Fan, et al. Multi-degree-of-freedom regulation of thermal emission in metasurfaces (cover paper·invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2026, 55(1): 20250447.

尚劲光, 尚效合, 仲帆, 等. 超表面的热辐射多自由度调控 (封面文章·特邀)[J]. 红外与激光工程, 2026, 55(1): 20250447.

0 引 言

热辐射是物质内部带电粒子热运动向外辐射能量的过程, 当物体温度高于绝对零度时, 内部带电粒子的热运动会使能量以电磁波形式向外辐射。热辐射在自然热环境中普遍存在, 例如太阳辐射、地表长波辐射、大气逆辐射、生物体间的热交换等。在 19 世纪, 热辐射理论迅速发展, 从基尔霍夫定律到斯特藩-玻尔兹曼定律, 从维恩位移定律再到普朗克定律, 四大理论的相继产生, 不仅阐明了黑体辐射的物理机制, 也奠定了热辐射调控和红外应用的理论基础。由于物体内部带电粒子的热运动具有随机性, 因

此传统材料的热辐射具有波长随机、偏振随机、方向随机、非相干的特点。尽管改变传统材料温度或调节表面发射率可以在一定程度上调控其辐射谱, 但仍难以实现精准、多自由度灵活调控的目标。随着微纳光子学和纳米加工技术的发展, 对波长及亚波长尺度纳米结构的研究, 为实现热辐射的多自由度灵活调控带来了重要突破。

目前, 多种人工微结构已广泛应用于热辐射调控领域中, 光子晶体^[1-3]、超材料^[4-5]、超表面^[6-7]、热辐射芯片^[8-10]等概念被相继提出, 为亚波长尺度下的光场调控开辟了新的方向。而二维超表面凭借其超薄特性和可实现辐射率的空间调控, 为多自由度调控热辐

收稿日期: 2025-09-16; 修订日期: 2025-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFA1210500); 国家自然科学基金项目 (92163216, 92463308, 12334015, 62288101); 国家重点研发计划青年科学家项目 (2023YFB2805700); 江苏省自然科学基金项目 (BK20243009)

作者简介: 尚劲光, 男, 博士生, 主要从事热辐射芯片方面的研究。

导师(通信作者)简介: 刘辉, 男, 教授, 博士, 主要从事光学超构材料与集成光子芯片方面的研究。

射开辟了新的研究路径。通过精心设计微纳结构,能够激发和操控各种光学共振模式,导致微纳结构在特定频率和方向上表现出高发射率,在自身热激发下,光谱会出现辐射峰,将热辐射从一种宏观、统计、宽谱的随机过程,转变为一种由结构决定的、可编程的电磁响应过程。通过采用金属^[11-12]或电介质材料^[13-14]来设计出多样化的微纳结构如光栅^[15-16]、纳米孔^[8-10]、纳米天线^[17]等,热辐射的光谱^[18-20]、偏振^[21-23]、方向^[24-27]等特性实现了多参量同时调控。热辐射芯片是将多个超表面集成的阵列型热辐射器件,能够在单一器件上实现多自由度的热辐射调控,进一步提高了空间利用率,并促进了红外器件的高度集成。基于超表面在热辐射调控领域的快速发展,热辐射器件在热管理^[28-29]、能源利用^[30-31]、传感检测^[32]等领域展示出广阔的应用前景,促进了相关技术与产业的持续进步。

本综述对超表面多自由度调控热辐射的最新研究进行了总结与讨论。首先,回顾并分析了近年来热辐射器件在热管理、能源利用、传感检测中的典型应用。其次,从光谱、偏振、方向等特性入手,探讨了超表面与热辐射芯片多参量调控热辐射的进展。最后,总结了热辐射器件的发展历程,并展望了未来的发展方向。

1 超表面调控热辐射的应用

1.1 热管理

利用超表面调控热辐射近年来被广泛应用于热管理领域中,包括辐射制冷^[33-34]、热量调控^[35-36]、红外伪装^[37]和信息加密^[38]等。传统的制冷技术需要消耗大量能源,造成环境污染,并进一步加剧温室效应。辐射制冷是一种新兴技术,依托大气透明窗口将多余热量从地球辐射至约 3 K 的太空中,无需电力或制冷剂就能够降低环境温度,为缓解温室效应提供了新的解决方案。为了实现高效冷却性能,选择性热辐射器件的设计和制造至关重要,这类器件需在大气透明窗口内具有较高的辐射率,同时在太阳光波段保持宽带高反射率。目前,基于热辐射器件的辐射制冷研究已在理论和实验层面得到验证。在理论方面,REPHAELI 等人^[39]首次提出基于金属-电介质光子结构的辐射制冷方案,如图 1(a) 所示。该设计将电介质宽带反射器与波长选择性热辐射器相结合,最大限度地减少了太

阳能吸收,并在大气透明窗口实现了选择性热辐射,使其在环境温度下的净制冷功率超过 100 W/m²。该热辐射器件的设计满足了白天辐射制冷中对超宽带特性的需求。在实验方面,南京大学的朱嘉等人^[33]利用可扩展的静电纺丝工艺,通过生产分层聚合物纳米纤维薄膜,实现了中红外选择性热辐射以及高效的太阳光反射,具有优异的全天辐射制冷性能。该设计在白天可降低环境温度约 5 ℃,夜间可降低约 7 ℃。为缓解温室效应提供了一种新方法。

此外,选择透气性、柔软度较好的材料作为衬底,并合理设计辐射制冷材料,可以提升热辐射器件的可穿戴性,用于个人热管理 (PTM) 领域中。PTM 技术是利用辐射制冷原理来直接调控人体局部微环境温度,以满足人体热舒适需求、降低建筑能耗的前沿研究技术。华中科技大学陶光明课题组和浙江大学马耀光课题组^[34]共同设计制造了一种具有形态分级结构的光学辐射制冷织物,以实现高效的户外个人热管理,如图 1(b) 所示。该研究团队将光学随机超材料与批量纤维制备技术相结合,获得了均匀连续的超材料纤维;再利用纺纱织造和层压技术,制备得到超材料织物。该光学辐射制冷织物在太阳光波段 (0.3~2.5 μm) 具有 92.4% 的反射率,在中红外波段 (8~13 μm) 具有 94.5% 的发射率。此外,该织物利用可扩展、高通量、全自动制造技术,克服了长期以来实验室规模织物向实际热管理应用转化的挑战,同时还具有商业服装所需的理想机械强度、防水性和透气性等特点。根据实际人体表面降温测试,该织物相比于当前商用白色棉织物,人体可实现约 4.8 ℃ 的降温。

随着红外技术的发展,各种高灵敏度的红外探测器已经广泛应用于军事监视和侦察领域。同时,宽谱红外隐身技术,亦称红外热伪装技术,也逐渐受到重视。红外热伪装是一种旨在隐藏或改变目标在红外波段,特别是中波红外 (3~5 μm) 和长波红外 (8~14 μm) 热辐射特征的技术,使其难以被红外热像仪、夜视设备或红外制导武器检测和识别。因此红外隐身技术需要精准控制目标的温度和发射率以隐藏其红外特征。KIM 等人^[40]使用具有多个谐振模式的金属/半导体/金属 (MSM) 超表面,在宽光谱范围内实现了隐身效果。在短波红外范围内,结构的等离子体共振可以将红外信号减弱 34%,使短波红外图像劣化。在中波

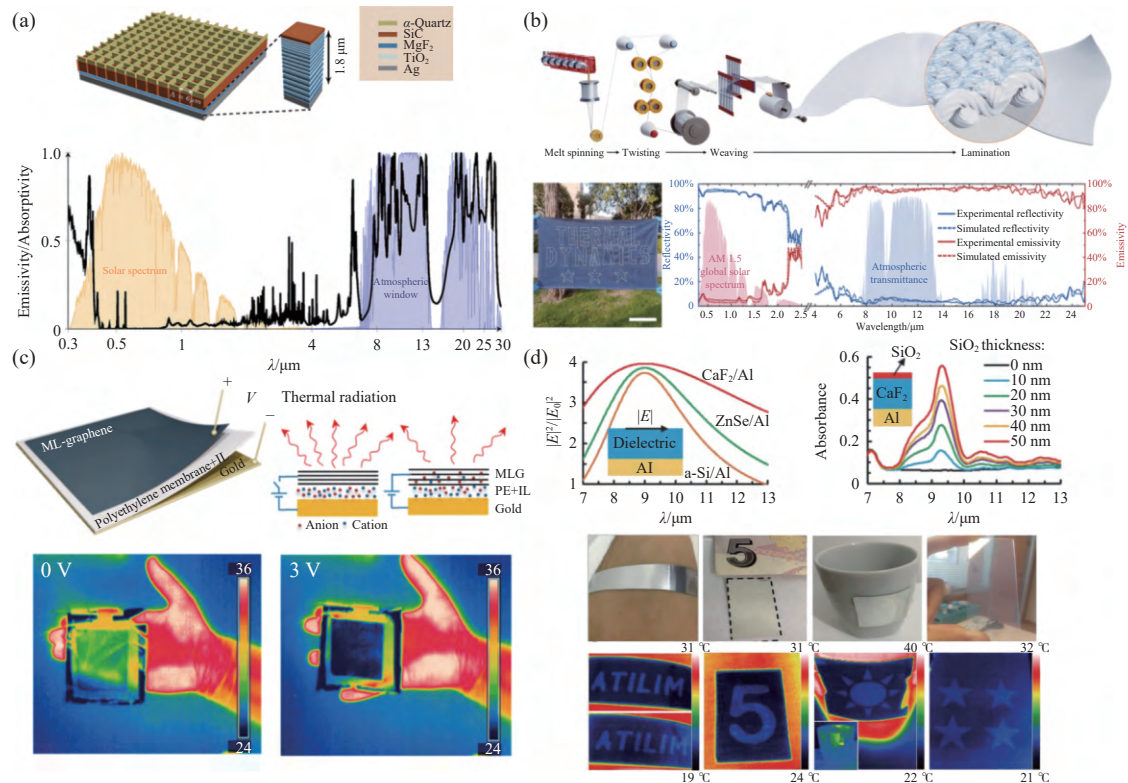


图1 热辐射超表面在热管理领域的应用。(a) 辐射制冷器结构示意图以及正入射下的计算辐射率^[39]；(b) 辐射制冷织物的加工过程及其辐射谱^[34]；(c) 基于多层石墨烯的超表面设计、主动热表面的工作原理图以及在不同电压偏置下的热伪装效果图^[41]；(d) 基于纳米厚度介质的结构图和吸收谱以及热辐射图案实现的光学安全加密效果图^[28]

Fig.1 Applications of thermal emission metasurfaces in the field of thermal management. (a) Schematic of the radiative cooler structure and the calculated emissivity under normal incidence^[39]; (b) The manufacturing process of the emission-cooling fabric and its radiative spectrum^[34]; (c) The metasurface design based on multi-layer graphene, the working principle schematic of the active thermal surface, and the thermal camouflage effect diagrams under different voltage biases^[41]; (d) The structural diagram and absorption spectrum of the nano-thickness dielectric-based system, and the optical security encryption effect diagrams achieved by thermal-emission patterns^[28]

和长波红外范围内也表现出极低的发射率, 分别实现了大于 94.4% 和 97.7% 的红外信号抑制率。为实现热辐射的动态调控与自适应伪装, SALIHOGLU 等人^[41] 开发出一种以多层石墨烯为核心的实时主动超表面, 如图 1(c) 所示。该超表面的独特之处在于, 通过非挥发性离子液体的可逆嵌入, 可在维持表面温度稳定的条件下, 利用电学手段调节其热辐射性能, 并借助反馈机制实现自适应热伪装效果。

传统的光学加密 (如全息、衍射、偏振编码) 主要集中在可见光波段, 而热辐射加密则利用中红外 (3~5 μm) 或长波红外 (8~14 μm) 波段的热辐射作为信息载体, 可以避免人眼直接读取, 具有隐蔽性强、抗干扰、安全性强等优势, 为光学加密开辟了一个新的维度。BAKAN 等人^[28] 利用具有纳米厚度的 SiO_2 介质

层形成热辐射图案, 图案将在可见光下加密, 通过热成像解密, 如图 1(d) 所示。此外, 该研究利用均匀的场增强进一步提高薄膜的红外发射率, 将检测热辐射的最低温度降低至约 30 $^{\circ}\text{C}$, 使图案能够在相对较低的温度下解密出来。该设计中的光学加密-解密功能利用了大面积制造技术、低成本和柔性基板以及方便的解密方法, 提高了其实用性, 为信息加密提供了新的方向。

1.2 能源利用

利用超表面调控热辐射在能源领域具有广泛的应用, 如太阳能热光伏系统 (STPV)^[28, 42-43]、热光伏 (TPV) 电池^[44-47]、水蒸发淡化^[30, 48-49] 等。STPV 系统是一种极具前景的下一代太阳能利用技术。它先将太阳能转化为高温热能, 再利用光谱调控的热辐射来驱

动光伏电池发电,从而实现高效率、可调度、全天候的太阳能电力输出。因此,具有强光谱选择性的高温吸收体和辐射体是实现太阳辐射与光伏电池高效耦合的关键条件。CHANG C C 等人^[43]实验展示了一种 STPV 系统,利用高熔点的钨制备超表面,使其在 1200 °C 的高温下仍具有稳定性,如图 2(a) 所示。该

钨基超表面实现了从可见光到近红外的均匀吸收,并在较长波长下抑制辐射,减少了热辐射损失。通过理论计算,当采用完全集成的超表面辐射器时,预计的 STPV 整体效率高达 18%,与目前最好的商用单结光伏电池的效率相当,并具备进一步提升的潜力。

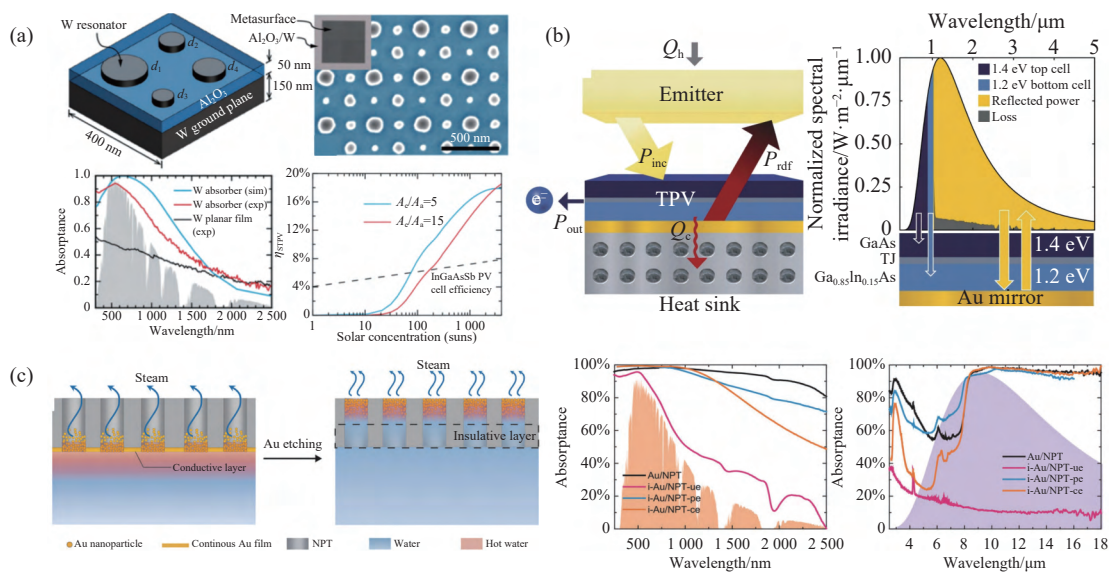


图 2 基于热辐射超表面在能源利用领域的应用。(a) 利用钨超表面实现耐高温的太阳能热光伏器件图及可见到近红外的吸收谱和太阳能热光伏效率^[43]; (b) 热光伏电池结构图和内部原理图^[47]; (c) 倒置的三维多孔膜结构示意图及可见光区域的高吸收和长波红外的高辐射谱图^[49]

Fig.2 Applications of thermal emission metasurfaces in the realm of energy utilization. (a) Schematic of a solar thermophotovoltaic device with high-temperature resistance enabled by tungsten metasurfaces, along with the absorption spectrum spanning from the visible to the near-infrared region and the solar thermophotovoltaic efficiency^[43]; (b) Structural diagram and internal schematic of a thermophotovoltaic cell^[47]; (c) Schematic of an inverted three-dimensional porous membrane structure, along with the spectral plots of high absorption in the visible light region and high emission in the long-wave infrared region^[49]

热光伏电池是 TPV 系统的核心组件,其功能是将高温物体发出的红外辐射直接转换为电能。HENRY A 团队^[47]报道了一种效率超过 40% 的 TPV 电池。该电池由两个结器件组成,如图 2(b) 所示。该设计通过带边光谱滤波实现可见至红外的高辐射率,并利用高反射的背表面反射器将较长波段的辐射重新辐射回到发射器中进行二次利用。这种高性能优势是通过使用具有至少 1.0 eV 的带隙的多结电池实现的,比传统 TPV 系统中的带隙更大。该电池还允许采用更高的发射极温度,适用于天然气或氢气燃烧和低成本电网级热能储存 (TEGS) 技术。

将水蒸发淡化是一种利用自然能源(太阳光和天空冷源)实现被动、节能、可持续的海水淡化或水净

化的前沿技术。其核心思想是利用热辐射器件精确调控蒸发界面的热量,实现高效的太阳能驱动蒸发,同时利用辐射制冷进行冷凝或系统冷却。ZHOU L 等人^[30]提出了一种等离子体增强的太阳能海水淡化装置,通过铝纳米颗粒自组装成一个三维多孔膜,形成的多孔等离子体吸收器可以自然漂浮在水面上,依靠铝纳米颗粒的局域等离激元、多重散射以及多孔阳极氧化铝衬底的自身吸收,整体结构能够有效吸收宽太阳光谱(>96%)。但是这种多孔结构产生的热能主要集中在底部,结构上方的冷水区会导致热量耗散,降低了系统的光热转化效率。2023 年,该团队^[49]对结构和光谱进行了优化。结构上,通过刻蚀去除了底部的金属衬底并将材料倒置于水面上,从而降低了下

层水的散热影响,如图 2(c)所示。同时等离子激元作用的底部作为热源处在水层分界面上,提高了光热转化效率。光谱上,该结构保持了可见光波段的强吸收,同时降低了红外辐射损耗,如果进一步提升器件性能,光热效率能够达到 80%。该研究对太阳能蒸汽发电领域的进一步发展具有启发意义。

1.3 传感检测

红外光谱技术能够识别有机物质中的键型、结构特征以及官能团,成为生物医学和环境监控等领域中不可或缺的分析工具。当分子暴露于红外光下时,那些与入射光频率相匹配的分子键或官能团会发生振动,并产生相应的红外吸收峰。通过将实验测得的红外光谱数据与标准数据库对比,研究人员能够迅速确定样品成分,该技术在分析化学、生物学及医学研究中是一种常见的检测手段。随着红外检测技术的进步,具备高灵敏度和宽光谱响应的检测器的需求不断扩大,因此基于超表面的热辐射调控在红外光谱检测领域具有重要的应用价值^[50-53],它通过精确设计和控制材料表面的发射率、吸收率和反射率等热辐射特性,能够显著提升红外检测系统的灵敏度和选择性。

在气体/液体检测领域,利用超表面调控窄带热辐射,可以实现针对物质的红外特征吸收光谱的波长选

择性匹配。气体检测方面,LOCHBAUM A 等人^[53]利用超表面作为红外辐射源开发了一种紧凑高效的气体检测装置,将超表面辐射源与检测器集成到单一小型化设备中,如图 3(a)所示。这种创新设计利用辐射源在 4.26 μm 处的窄带辐射峰形成热辐射信号,该信号穿过待测气体后被超材料检测器捕捉并转换为电信号,实现了气体浓度的精确测量。相较于传统的气体传感器,该新型传感器利用超表面结构来充当光学滤波器,其体积减少了 30 倍,能量消耗降低了 80%,极大地提高了能效和便携性。这标志着中红外光学气体传感器微型化的重大进展,有望推动包括医疗技术和大气传感在内的多种应用器件实现更小尺寸的集成。在液体检测方面,XU 等人^[54]采用低温异质薄膜直接键合技术开发出了基于蓝宝石 (Al_2O_3) 的中红外混合纳米流体-SEIRA 平台,实现了液体传感,如图 3(b)所示。该设计利用毛细管作用力,液体分析物无需外部驱动系统即可被驱动进入传感热点。此外,通过动态监测丙酮分子在去离子水中的扩散过程,实验结果表明该平台即使对折射率相近的液体仍具有较强的检测能力,并能够进行定量分析。该中红外混合纳米流体-表面增强红外吸收 (SEIRA) 传感平台在液体传感中具有很大的应用潜力,对新一代传感器件的开发

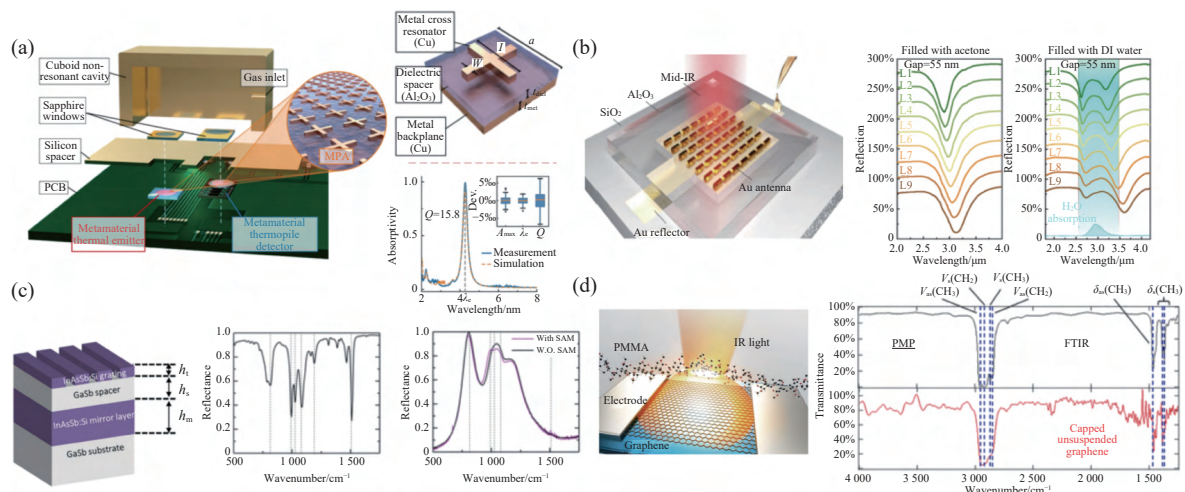


图 3 基于热辐射超表面在传感检测领域的应用。(a) 应用于 CO_2 气体传感的十字形超表面结构图及其窄带的吸收/辐射谱^[53]; (b) 中红外混合纳米流体-SEIRA 平台示意图及其液态传感光谱图^[54]; (c) 基于 III-V 半导体超表面的结构图及其检测光谱图^[55]; (d) 基于多层石墨烯微辐射器的结构图及其红外光谱图^[56]

Fig.3 Applications of thermal emission metasurfaces in sensing and detection. (a) Cross-shaped metasurface structure for CO_2 gas sensing and its narrowband absorption/emission spectrum^[53]; (b) Schematic diagram of the mid-infrared hybrid nanofluid-SEIRA platform and its liquid sensing spectrum^[54]; (c) Structure diagram of the III-V semiconductor metasurface and its detection spectrum^[55]; (d) Structure diagram of the multilayer graphene micro-radiator and its infrared spectrum^[56]

具有重要的推动作用。

上述 SEIRA 分子传感技术,本质上是利用超表面在纳米尺度上产生的近场电磁增强效应,来显著提升检测的灵敏度。该方法虽能有效降低检测限,但通常仍需要依赖复杂的光谱仪系统和成本较高的红外光源。为了能进一步降低成本,近年来,研究者提出利用热辐射器件开展无需额外红外光源的分子传感方案^[57-59],但仍需光谱仪或简化光谱设备进行红外光谱测量以分辨分子的共振吸收模式。BARHO 等人^[55]提出了一种基于 III-V 族半导体超表面热辐射的表面增强光谱技术,该技术能够对涂在超表面上的分子层实现有效检测,如图 3(c) 所示。该研究利用等离子体超表面的电磁场增强,检测不同分子的振动指纹。超表面同时作为辐射源和传感器芯片,无需额外的红外光源,简化了实验装置,使分子传感器件更加紧凑,具有更高的成本效益,推动了检测器件向小型化与集成化方向发展。NAKAGAWA 等人^[56]提出了一种基于多层石墨烯微辐射器的红外光谱检测和成像技术,与传统的红外源相比,多层石墨烯微辐射器具有亮度高、占地面积小、调制速度快的优点,如图 3(d) 所示。此设计将多层石墨烯微辐射器作为红外辐射源,通过红外透射光谱测量实现分子检测。此外,该辐射器还实现了将分子种类和官能团等化学信息可视化的红外成像功能,其空间分辨率高达 $10.1\ \mu\text{m}$,远高于衍射极限。该基于石墨烯的红外光谱和成像器件可以为化学、材料科学、医学和物理等领域的红外应用开辟新的研究路径。

2 超表面调控热辐射自由度

2.1 光谱调控

根据黑体辐射理论,传统的热辐射是连续宽谱的电磁波信号,大部分能量会辐射到其他非需求波段,导致热辐射在红外特定所需波段的能量利用率低下。随着微纳加工技术的进步,研究人员发现利用超表面在微纳尺度上调控热辐射能够实现窄带^[60-64]、宽带^[65-68]、动态可调^[69-73]等定制化的光谱。

选择不同的微结构设计方案可以实现波长选择的热辐射器,在气体传感、红外光源、热光伏等领域具有广泛的应用。PADILLA W J 课题组^[74]组合不同的“十”字型的金属结构,利用“金属-电介质-金属”

(MIM) 构型的超表面在实验中实现了单波长和双波长的热辐射输出,如图 4(a) 所示。通过测量吸收光谱和热辐射光谱,发现二者具有良好的一致性,从而验证了基尔霍夫热辐射定律。此外,该热辐射器的共振峰尖锐并且峰值接近黑体理论的最大值,实现了能量利用的最大化。NODA 课题组^[61]将光子晶体微结构引入多层量子阱系统中,实现了超窄带的热辐射峰,如图 4(b) 所示。该方法能够将输入能量回收并集中到窄带、角度受限的热辐射中,从而使峰值强度比黑体参考样品的峰值强度高出 4 倍以上,因此该系统相较于黑体,需要更少的能量就可以达到相同温度,能够更高效地回收能量。

多波段窄带热辐射器件具有更强的实用性和灵活性,在实际应用中的需求也更为显著。针对这一需求,HE 等人^[75]运用随机梯度下降算法优化了 Tamm 等离子体激元 (TPP) 辐射源的设计参数,成功实现了对单个或多个辐射带的发射波长、线宽及振幅的定制化设计。该 TPP 辐射源由掺杂镉的氧化物 (CdO) 薄膜和非规则排列的布拉格反射镜构成,生产过程中无需光刻步骤,其晶圆级设计与 CMOS 工艺兼容,因而非常适合应用于自由空间通信和气体传感等场景。

除了窄带热辐射调控,基于超表面调控宽带热辐射也很重要。尤其是在能源利用、辐射制冷等领域,设计合适的结构来提高特定范围的宽带辐射^[66, 76-78]并抑制其他波段是实现宽带热辐射的关键。GU M 课题组^[66]基于金属-介电锥形超表面 (CMM) 设计了由铝和锗的交替组成的锥形柱体结构,在大气窗口 (长波红外) 实现了宽带热辐射,相比于体块材料表现出更优异的辐射性能。在整个 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 的大气透明窗口, CMM 辐射源可以直接向自由外太空释放热量。即使在实际的非辐射热交换和标准大气条件下,结构仍然能够在夜间将温度降低到低于环境温度 $12.2\ ^\circ\text{C}$, 在白天将温度降低到低于环境温度 $9\ ^\circ\text{C}$ 。ARGYROPOULOS 等人^[65]基于一维和二维等离子体光栅结构实现了超宽带全向吸收和辐射,如图 4(c) 所示。该设计将等离子体布鲁斯特能量泛函与锥形等离子体狭缝中的绝热聚焦和吸收相结合,实现了在可控角度范围内的宽带共振吸收特性,为开发具备空间相干性和角度选择性的宽带辐射器件提供了新的可能性。

上述研究主要集中在静态的热辐射波长调控,其

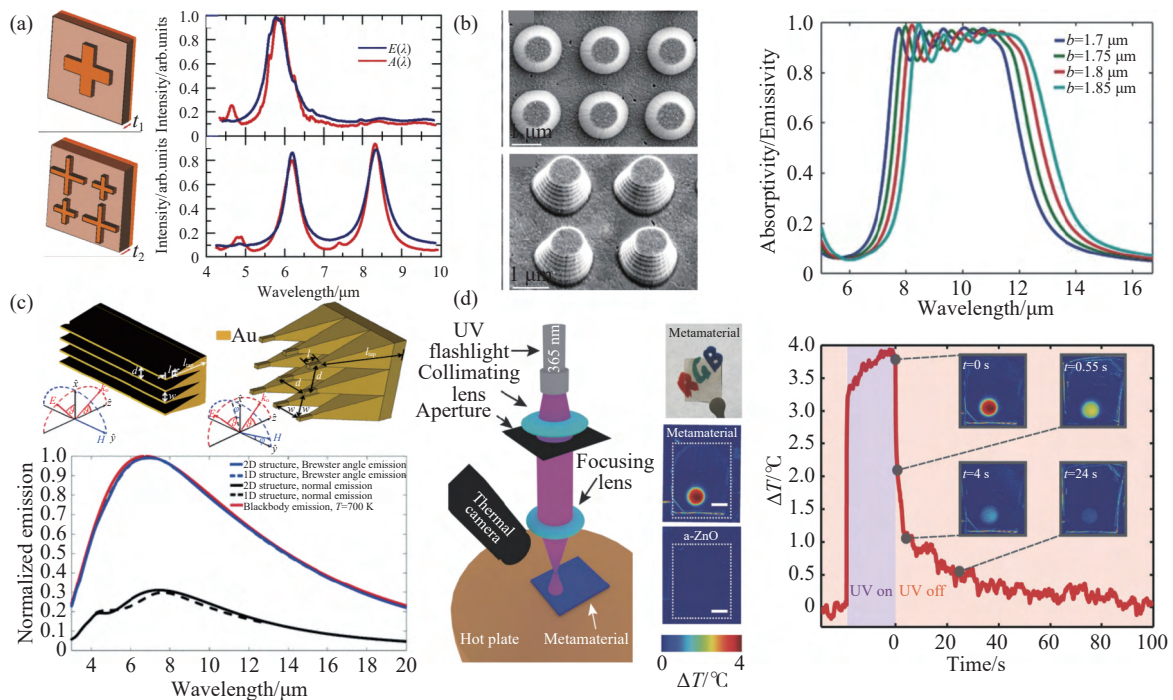


图4 基于超表面的光谱热辐射调控。(a)“金属-介质-金属”三明治构型的超表面示意图及其吸收和辐射光谱^[74]；(b)不同尺寸下锥形超表面的辐射率(吸收率)^[61]；(c) $T = 700\text{ K}$ 时一维和二维等离子体光栅结构的辐射光谱^[65]；(d)通过紫外光照射实现热辐射光谱的动态调控示意图^[70]

Fig.4 Spectral thermal emission control based on metasurfaces. (a) Schematic diagram of the "metal-dielectric-metal" sandwich structure metasurface and its absorption and emission spectra^[74]; (b) Emissivity (absorption rate) of conical metasurfaces at different sizes^[61]; (c) Emission spectra of one-dimensional and two-dimensional plasmonic grating structures at $T = 700\text{ K}$ ^[65]; (d) Schematic diagram of dynamic control of thermal emission spectrum achieved through ultraviolet light irradiation^[70]

辐射特性由结构参数决定。除此之外,通过引入石墨烯^[71, 79-81]、相变材料^[82-84](如 VO_2 、GST)或光响应材料等可调谐材料^[85-87],结合电、热或光等外部动态调控机制^[69-70, 88-92],可实现对热辐射光谱的动态调控,从而具有更高的灵活性和可控性。KANG等人^[93]利用 GaN/AlGaIn 多量子阱结构实现了 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下中红外窄带热辐射的电调制。由于量子阱带间的吸收和光子晶体的光共振,发射极呈现窄带热辐射,并且辐射强度可以通过控制多量子阱中的电子密度进行高速 (50 kHz) 电调制,通过降低 p-GaN 层的自由载流子吸收,还可以进一步增大发射率的调制幅度。 VO_2 和 GST 是典型的相变材料,材料属性会受温度变化的影响。 VO_2 在温度超过 $68\text{ }^\circ\text{C}$ 时能够从绝缘态转变为金属态,光学性质也会随之变化。ZHOU P H 课题组^[83]将金属圆盘结构与 VO_2 相结合,通过温控的方式实现了宽带的开关控制。在室温条件下,辐射光谱在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 的大气窗口具有高辐射率;升高温度使 VO_2 变为金属态时,辐射峰会移出大

气窗口,在 $5\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 产生强辐射,从而显著降低大气窗口范围内的辐射率。QU 等人^[82]提出了基于金属-绝缘体-金属等离子体超表面的零静态功率中红外热发射器,通过控制温度来控制 GST 的结晶程度,从而实现热辐射波长、带宽、辐射率的连续调谐。在 GST 从非晶到晶相的过程中,高阶磁共振和抗反射共振的耦合使结构共振峰从 $6.51\text{ }\mu\text{m}$ 红移至 $9.33\text{ }\mu\text{m}$ 。热辐射的动态调控为中红外光源的发展提供了新的思路。COPPENS 等人^[70]将 MIM 超表面与光敏材料氧化锌 (ZnO) 集成,利用紫外光照射激发 ZnO 产生自由载流子,从而调控超表面的光学特性,如图 4(d) 所示。实验表明在紫外光照下,材料局部区域的辐射率发生显著变化,从而实现了光谱的动态调控。由于 ZnO 具有较长的光载流子寿命,该系统可在低功率连续光照下有效调节辐射率。此外,机械应变材料通过改变结构的几何参数也能实现光谱响应的动态调控。LIU 等人^[94]将微纳电子机械系统 (MEMS) 与超材料结合,实现了可重构的热辐射光谱调控。

因此,开发不同需求的热辐射器件需要选择不同的材料和工艺制备方法。金属材料易于加工,并且具有较强的局域场增强,但是欧姆损耗较高,难以实现高 Q 的热辐射信号;全电介质材料光学损耗低,支持磁偶极、电偶极等多极子共振,加工工艺与 CMOS 半导体工艺高度兼容,适合大规模制造;相变材料非晶态与晶态可以相互转化,因此具有折射率突变、开关速度快的优势,但晶态会存在吸收损耗,开关循环次数有限,此外需要激光或电脉冲等外部激励诱导相变,集成驱动电路复杂;二维材料通过载流子浓度调控可实现电调谐,但该材料大面积高质量制备和转移仍具有一定的挑战。基于新材料和新工艺的研发,未来更多的调控方案将应用于热辐射的光谱调控中。

2.2 偏振调控

传统均匀材料引起的热辐射通常不具备偏振选择性,随着微纳光子学和微纳加工技术的发展,非对称超表面的引入使热辐射的偏振调控成为可能。以一维光栅结构为例,在平行于光栅与垂直于光栅的两个方向,热辐射会表现出不同的线偏振响应^[95-98]。当设计手性结构时,超表面能够产生不同旋性的圆偏振热辐射^[89, 99-101],进一步增加热辐射携带的信息量。基于纳米天线结构,MAKHSIYAN 等人^[62]提出了一种具有非均匀分布特性的光学纳米天线超表面,该设计能够在波长尺度上对热辐射进行空间和偏振状态的

精确调控。此外,通过不同纳米天线辐射单元的组合使用,这项技术能够实现远场多光谱及偏振选择性的成像效果。LIU B A 等人^[98]设计了一种非对称的纳米天线结构,将传统的直线型天线改造成“C”形和“V”形结构,并系统研究了偏振热辐射强度随结构参数 d 和 θ 的变化规律,实现了辐射强度的优化调控,如图 5(a) 所示。研究表明,通过调节波导损耗或调整天线的弯曲形态,可有效控制该结构的辐射功率峰值,使其接近黑体辐射的理论极限。ZHANG 等人^[102]基于光子晶体平板的连续域中的束缚态(BICs)模式首次实现热辐射的偏振涡旋,如图 5(b) 所示。BIC 是指开放系统中的非辐射本征模,光学 BICs 具有无限大的品质因子(Q 值)和波局域化的光学性质,可以有效增强光与物质间的相互作用。该研究采用具有 C_4 对称性的二维方形格子构造超晶格平板,远场探测以 BICs 为中心点的偏振矢量分布。不同的 BIC 模式携带不同拓扑荷($q = \pm 1$),在动量空间中具有不同的涡旋形式,取闭合回路能够实现偏振矢量的连续变化。基于偏振涡旋热辐射,有望在单个器件上实现红外区域的宽频段、多类型的偏振涡旋调控,进而应用到微热成像、微红外传感、芯片信息加密等相关领域。手性结构是指经过旋转、对称等操作后仍无法与其镜像重合的特殊结构,通过破坏结构的镜面对称性及空间反转对称性,电磁场将具备手性特征。采用手性结构

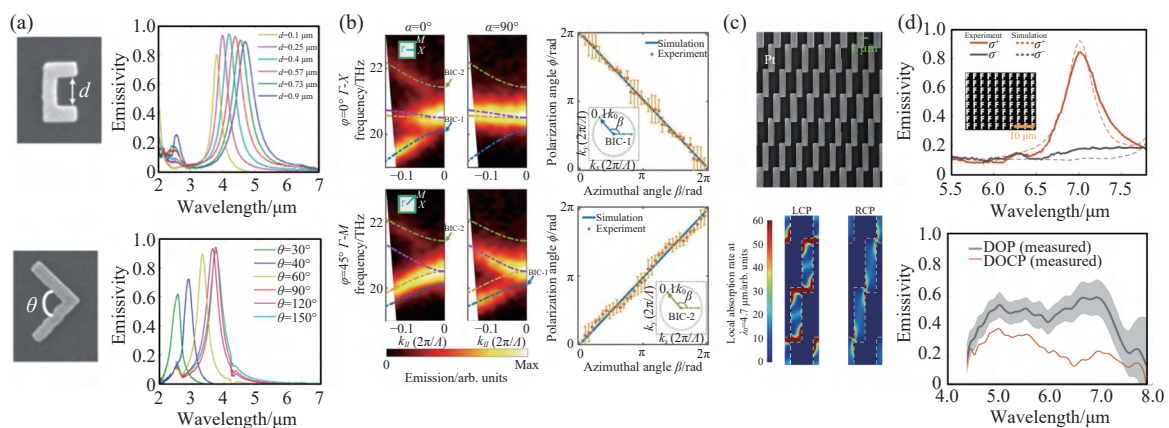


图 5 基于超表面的偏振热辐射调控。(a) “C”字形和“V”字形结构图及不同参数下的偏振辐射率^[98]; (b) 测量的受保护 BIC 的极化涡流^[102]; (c) “Z”字形白炽手性超表面示意图及圆偏振特征图^[101]; (d) 利用“F”型结构实现左旋圆偏振辐射谱及在大角度下的手性热辐射光谱^[103]

Fig.5 Polarized thermal emission control based on metasurfaces. (a) Structure diagrams of "C" and "V" shapes and polarized emissivity under different parameters^[98]; (b) Measured polarization vortices of symmetry-protected BICs^[102]; (c) Schematic of "Z" shaped incandescent chiral metasurface and circular polarization characteristics^[101]; (d) Left-handed circular polarized emission spectrum achieved using "F" shaped structure and chiral thermal emission spectrum at large angles^[103]

能够实现圆偏振热辐射。基于这些特性,手性热辐射超表面在开发手性热光源、检测手性纳米颗粒以及手性传感等领域展现了潜在的应用前景。NGUYEN 等人^[101]提出了一种基于连通“Z”字形谐振器的超薄手性超表面,该结构可实现宽带圆偏振中红外热辐射,如图 5(c) 所示。该超表面厚度仅为 700 nm,通过焦耳加热方式驱动,能够在 5~7 μm 波长范围内实现偏振度高于 0.5 的热辐射,并支持超过 10 MHz 的高速辐射调制。该设计成功集成了对中红外辐射源的光谱特性、偏振态及调制速率的协同调控能力。JACOB Z 团队^[103]通过同时打破镜面对称性和空间反演对称性,利用对称破缺的“F”型超表面在中波红外实现了非对称的圆偏振热辐射,并在角度光谱的大角度扫描中仍能保证良好的左旋光手性响应,如图 5(d) 所示。该热辐射可以直接作为广角、窄带圆偏振中红外光源,应用于气体传感和红外成像等领域。除了设计手性结构,打破晶格对称性也能实现手性响应。HAN 等人^[104]提出了一种基于单斜晶格的非局域手性超表面,由周期性错位排列的锗纳米线构成“Z”形平面图案以打破结构的镜像对称性,形成具有手性响应的单斜晶格。该设计将耦合谐振光波导效应融入手性超表面的热辐射过程中,并利用单斜晶格实现鞍形色散能带,有效克服了传统高相干热发射中空间相干性与辐射功率收集之间的固有权衡问题,为热辐射偏振调控的发展提供了新的途径。

2.3 方向调控

由于辐射源各点之间缺乏固定的相位关系,热辐射通常表现为非相干的全向发散。对热辐射角度的调控本质上是调控空间相干性^[25-26, 105-112],其核心在于建立辐射源点之间的有序相位关系,从而实现定向发射。为突破传统热辐射的发散特性,研究人员提出利用表面波模式增强空间相干性,例如通过极性材料中的表面声子极化激元或金属结构中的表面等离子激元来调控热辐射的角度分布。声子极化激元是指光子与声子在特定材料中强耦合形成的准粒子。当光(电磁波)在某些离子性或极性晶体材料中传播时,其电场会驱动材料中的正负离子发生相对位移,从而激发晶格振动(即声子)。这种光与声子的强相互作用形成了声子极化激元。表面等离子激元是光子与金属表面自由电子的集体振荡强耦合形成的一种沿金属-电介质界面传播的电磁表面波,为突破传统光学衍射极

限、实现亚波长尺度的光操控提供了关键途径。这类机制能够有效调控辐射相位,实现定向热辐射。2002 年,GREFFET J J 等人^[105]首次提出基于碳化硅光栅结构的相干热辐射方案,开创了热辐射角度调控的先河。该设计利用光栅提供的动量匹配条件,激发 SiC 界面处的表面声子极化激元,实现近场热激发下的选择性辐射。通过调控光栅的色散关系,不同波长的辐射可被定向发射至特定空间角度,从而获得具有角度选择性和空间相干性的热辐射。这一工作突破了传统认为热辐射不相干的观念,为热辐射的角度与相干性调控开辟了新道路。为实现定向热辐射,还可采用具有高度对称性的圆形同心槽结构(即“牛眼”结构)。PARK J H 等人通过在钨和钼薄膜上制备牛眼结构^[108],利用表面等离子激元共振效应,成功实现了窄带且高度定向的热辐射,发散角约为 2° 。实验表明,当加热至 900 $^\circ\text{C}$ 时,该结构在垂直方向上可发射出具有高方向性的红外辐射光束,为定向热源的设计提供了重要依据。在提升热辐射相干性的研究中,能否实现对其波前的精确调控成为当前领域的重要关注点。由于热辐射的远场特性主要由微结构所支持的光学模式决定,实现全面控制需要同时调控结构的局域与非局域散射响应。为解决这一难题,ZHOU 等人^[113]提出一种理论方案,借助微观热辐射体间的光学耦合作用,实现了热辐射自聚焦与热辐射全息成像,如图 6(a) 所示。这些微观辐射体的尺寸介于数十至数百个波长之间,其辐射产生的热光子可通过彼此间的光学耦合效应,实现对热辐射波前的有效调控。ALÜ A 课题组^[111]提出一种理论方案,通过引入连续体中准束缚态(QBIC)设计了一种超薄双层介质热超表面,如图 6(b) 所示。QBIC 具有超高 Q 值的共振能力,当微小扰动(如几何参数、入射角等)被引入共振系统并打破相应对称性时,BIC 通常会转变为具有高 Q 因子且电磁能量高度局域的泄漏模式,形成 QBIC。该设计通过协同调控对称性可控的非局域 QBIC 模式与局域模式,结合自旋与轨道角动量效应,实现了热辐射的波前整形与聚焦,为热辐射调控设定了“全参数控制”的发展目标。然而,对热辐射波前进行精确调控目前仍缺乏实验验证,实现光谱、偏振、角度等多维度调控仍面临挑战,亟需进一步探索。

引入模式耦合机制也是调控热辐射角度响应的一种有效手段^[24, 27, 114-115]。ZHANG 等人^[116]设计了一

种铝/二氧化硅/铝超表面结构, 利用其内部的模式耦合机制实现了对声子热辐射光谱、偏振和角度的多自

由度调控, 通过耦合模式理论分析与实验结果相吻合, 表明该结构具有较强的耦合性, 如图 7(a) 所示。

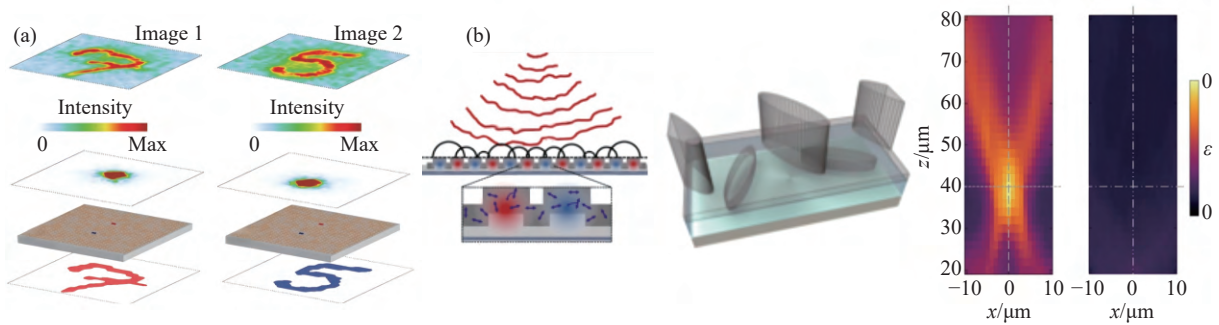


图 6 基于超表面的角度热辐射调控。(a) 基于微观热辐射体之间的光学耦合理论实现的热辐射自聚焦以及热辐射全息成像^[113]; (b) 双层超表面示意图以及理论上的热辐射聚焦效果^[111]

Fig.6 Angle-controlled thermal emission based on metasurfaces. (a) Thermal emission self-focusing and thermal emission holography achieved based on the optical coupling theory among microscopic thermal radiators^[113]; (b) Schematic diagram of a double-layer metasurface and theoretical thermal emission focusing effect^[111]

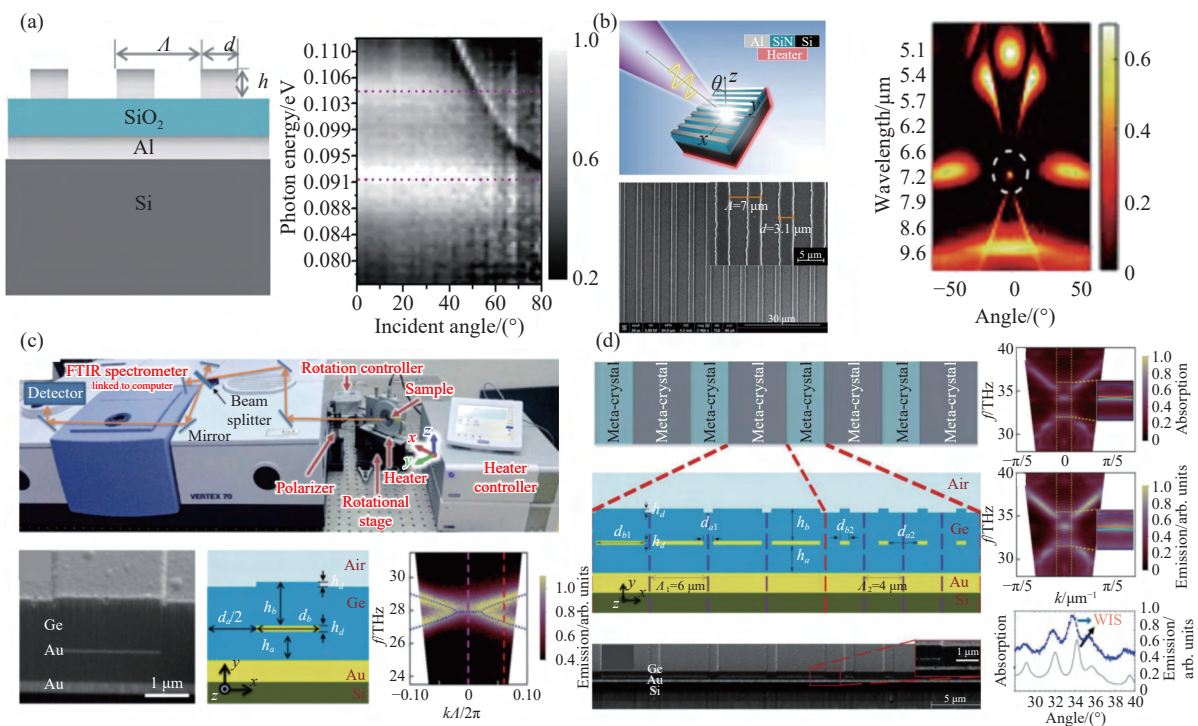


图 7 热辐射角度响应机制与角分辨热辐射光谱测量技术。(a) Al/SiO₂/Al 超表面结构示意图以及测量得到的不同偏振下随角度变化的热辐射光谱^[116]; (b) Al/SiN/Al 超表面结构示意图以及测量的空间孤立的热辐射图^[117]; (c) 角分辨热辐射光谱测量装置示意图以及设计的超晶格示意图和该结构下测量和计算的热辐射色散^[118]; (d) 设计的超晶格示意图和测量与计算的热辐射色散, 证明了界面态的存在^[119]

Fig.7 Thermal emission angular response mechanism and angular resolved thermal emission spectrometry technology. (a) Schematic diagram of the Al/SiO₂/Al metasurface structure and the thermal emission spectra measured at different polarizations as a function of angle^[116]; (b) Schematic diagram of the Al/SiN/Al metasurface structure and the measurement of spatially isolated thermal emission^[117]; (c) Schematic diagram of the angular resolved thermal emission spectrometry device and the schematic of the designed superlattice as well as the measured and calculated thermal emission dispersion under this structure^[118]; (d) The schematic diagram of the designed superlattice and the measured and calculated thermal emission dispersion, which demonstrates the existence of interface states^[119]

该结构在 TE 偏振 (电场平行于光栅) 入射下, 仅激发声子共振, 呈现典型的角度依赖辐射行为; 而在 TM 偏振 (电场垂直于光栅) 入射时, SiO_2 层内的声子共振与等离激元模式发生耦合, 从而产生具有偏振选择特性的宽角度热辐射。此外, ZHANG 等人^[117] 进一步提出一种基于铝/氮化硅/铝三明治结构的法诺 (Fano) 共振型热辐射器。法诺共振是由一个高 Q 的离散谐振态与一个低 Q 的连续散射背景之间的干涉所导致的非对称光学响应, 是实现高灵敏度传感、慢光器件、非线性增强和光开关等应用的关键。ZHANG 等采用了暗磁共振模式与表面晶格共振模式相耦合的策略, 通过调节结构几何参数和周期性, 成功实现 Fano 共振, 获得了窄带且高度定向的热辐射, 进一步验证了模式耦合在热辐射角度调控中的普适性和有效性, 如图 7(b) 所示。为精确表征其角度响应特性, 研究团队发展了一种基于傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 的角度分辨热辐射光谱 (ARTES) 技术: 将样品置于可旋转加热台上, 配合红外偏振片, FTIR 能够采集不同角度下的偏振分辨辐射信号并进行分析。该 ARTES 技术具备高精度的角度分辨能力, 工作波段覆盖从近红外到远红外的宽频范围, 且无需外部红外光源激发, 即可直接检测红外表面波信号, 已成为研究热辐射角度响应的有力工具。ZHONG 等人^[118] 利用该方法直接表征了超晶格结构的色散特性, 验证了非厄米系统中异常点 (Exceptional point) 的存在, 如图 7(c) 所示。通过 ARTES 技术得到, 奇异点仅出现在特定的波长角度位置, 其周围的热辐射能带结构 (波长) 对微扰 (角度) 变化极其敏感, 展示了热辐射系统的非厄米性质及非厄米系统对热辐射角度的调控作用。此外, ZHONG 等人^[119] 将拓扑界面态概念与热辐射调控结合, 基于“金-锗-(金)-锗”的结构设计了一种超晶格单元, 如图 7(d) 所示。该结构由两种不同拓扑表现的晶格拼接而成, 在拼接界面处产生拓扑界面态热辐射。通过 ARTES 技术表征得到, 该窄带热辐射光谱具有特定的辐射角度范围, 超出该范围辐射被抑制。进一步地, 通过调节上层介质的厚度, 可同时调控界面态热辐射的波长与辐射角度, 从而实现多自由度调控热辐射。

3 热辐射芯片的发展

随着集成红外光源、红外传感等片上红外技术的

快速发展, 对具备多个特征辐射波长、可实现多自由度调控的热辐射器件需求日益迫切。尽管基于超表面的设计已实现波长、偏振、方向等自由度调控, 但通常需要改变结构参数, 并设计多个超表面才能满足需求。因此, 开发具有高空间分辨率、高集成度、小型化、多波长输出的热辐射芯片成为亟待突破的关键方向。通过将多种功能的热辐射单元集成于同一芯片, 不仅可实现多波长、多模式的辐射输出, 还能实现多自由度的热辐射调控, 显著推动红外器件向高度集成化与小型化方向发展。

ZHANG 等人^[10] 基于纳米孔超表面阵列结构形成的热辐射芯片, 研究了一维、二维合成参数空间中的多重对称保护 BIC, 如图 8(a) 所示。该工作根据纳米孔对称性定义出两个非对称参数以构建合成空间, 通过改变非对称参数来打破对称性, 实现了利用 BIC 模式来调控热辐射的光谱。CHU 等人^[8] 提出并实现了一种具有高空间分辨率的多波长热辐射芯片, 通过构建像素化的超构微腔阵列, 在长波红外波段实现了波长覆盖 $7\sim 9\ \mu\text{m}$ 和 $10\sim 14\ \mu\text{m}$ 的双波段热辐射, 如图 8(b) 所示。每个超构微腔由纳米孔超表面与法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔构成, 利用 FP 腔的窄带共振特性与纳米孔结构对偏振和模式的灵活调控能力, 器件在两个波段均表现出显著的 X 偏振热辐射特性。此外, 微腔的共振波长随纳米孔长度的增加呈现红移趋势, 为波长可调提供了设计自由度。通过将纳米孔设计为“NJU”和“PHY”等特定图案, 并精确控制其空间排布与取向, 利用热成像能够在不同偏振态下显示不同的图案, 进一步实现了偏振、波长和空间多路复用的热辐射功能。该芯片设计为多功能、集成化红外热源在成像、传感等片上应用提供了可行路径。由于热辐射芯片可直接作为红外光源, CHU 等人^[9] 基于热辐射芯片和热成像技术提出了一种紧凑、集成化的间接红外吸收光谱检测方法, 如图 8(c) 所示。该工作基于覆盖 $7.6\sim 12\ \mu\text{m}$ 的热辐射芯片, 通过对像素化的超构微腔阵列进行热成像, 无需利用红外光源与光谱仪就可以从空间上独立的单个超构微腔中获取样品的等效光谱吸收信息。热辐射芯片不仅作为红外辐射源, 还充当了光谱分析元件, 从而实现了高度集成的一体化系统, 大大简化了检测系统的复杂性, 并显著降低了设备成本, 在气体传感和微型生化传感器等领

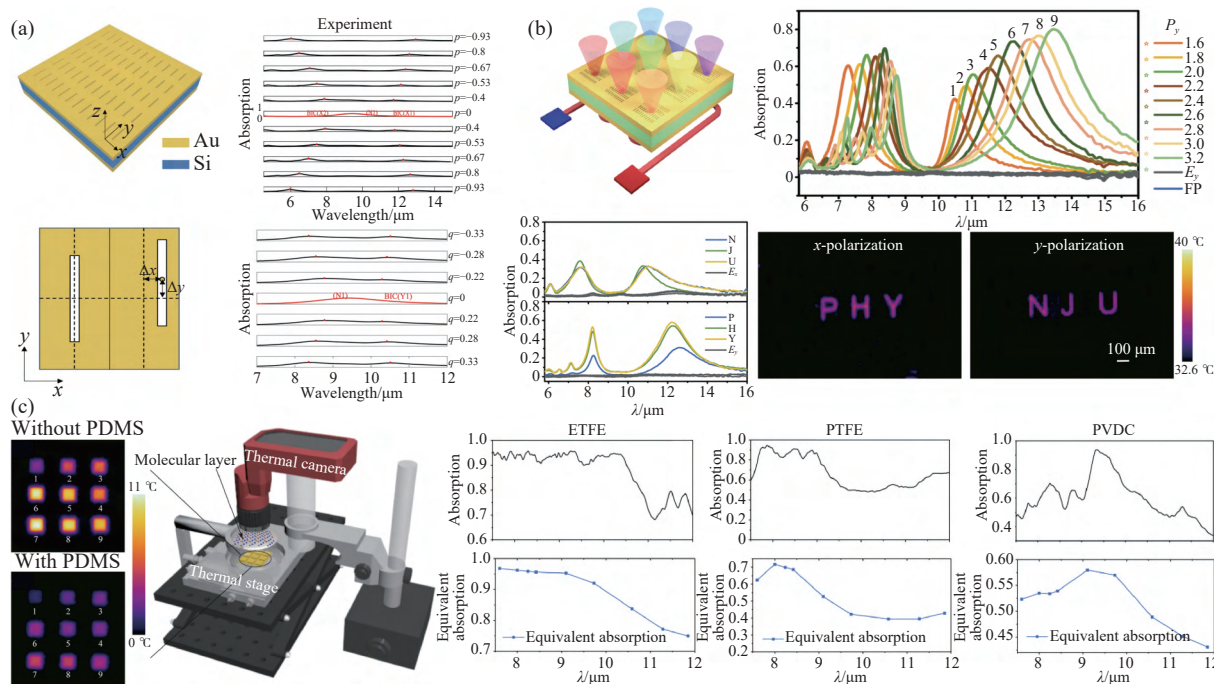


图8 热辐射芯片的发展。(a) 纳米孔结构示意图及不同不对称参数下的吸收谱^[10]; (b) 热辐射芯片示意图及其辐射谱和不同偏振下纳米孔图案的热像图^[8]; (c) 热辐射芯片成像装置和 ETFE、PTFE、PVDC 材料的等效吸收光谱^[9]

Fig.8 Progress of thermal emission microchips. (a) Schematic diagram of nanopore structure and absorption spectra under different asymmetric parameters^[10]; (b) Schematic diagram of thermal emission microchip with its emission spectrum and thermal images of nanopore patterns under different polarizations^[8]; (c) Imaging device for thermal emission microchips and equivalent absorption spectra of ETFE, PTFE, and PVDC materials^[9]

域展现了巨大的潜力。

4 结束语

目前,基于超表面的热辐射器件已广泛应用于热管理、能源利用、传感检测等多个领域。超表面的发展不仅促进了热辐射调控理论与技术的深入发展,还实现了多参量协同优化的目标,为相关应用的创新与拓展奠定了坚实的基础。文中系统梳理了超表面调控热辐射的典型应用场景,回顾了其在光谱、偏振和方向等多自由度调控方面的相关研究,并总结了热辐射芯片的优势与研究进展。

为了进一步推广热辐射调控研究至实际应用领域,未来仍有许多工作值得开展。1) 高 Q 的热辐射器件可以大大提高红外传感检测的灵敏度,利用窄带辐射阵列来检测红外吸收光谱,其光谱分辨率有望进一步提高,使其更贴近实际红外光谱检测的应用需求^[120]。2) 目前,超表面领域的发展仍受限于微纳加工技术,大多数超表面设计对加工误差极其敏感,导

致良率低,难以大规模制备多个阵列器件,限制了其在红外中的应用范围。随着微纳加工技术的进步,更精细和复杂结构的制备将成为可能,从而为单一器件实现多自由度热辐射调控提供更多的可能性。3) 人工智能的不断发展能够实现超表面的定制化设计,基于逆向设计算法实现多自由度调控热辐射也是当下的研究重点。可以将超表面 AI 设计、纳米加工和光学表征流程集成,实现自动化闭环优化,AI 根据实测结果反馈自动调整设计模型,不断迭代提升器件性能,实现多自由度协同优化的目标。4) 动态调控热辐射方向来实现定向发射的研究还较为缺乏,现有动态超表面在调制速度、调制效率和循环稳定性之间难以兼顾,基于电控、光控等快速调控热辐射的方法仍需在调制速度和效率方面进一步提高。在材料方面,可以尝试探索新型相变材料或者设计异质集成器件,将相变材料与石墨烯等可高速、小范围调谐材料结合,实现粗调与精调的复合调控模式。在驱动方式上,可以发展低功耗、局域化的激励方法,实现快速、高效的

光控和电热调谐。5) 通过设计拓扑边界态超表面或莫尔超表面, 在超表面中引入可控的增益和损耗, 可以将拓扑、莫尔和非厄米光子学等光学研究中的特殊物理机制与热辐射调控相结合, 有望赋予热辐射器件新的物理内涵与功能。

随着多参量协同调控热辐射技术的不断进步, 其应用场景日益拓展。在单个热辐射器件中引入更多的调控自由度有助于突破传统红外器件的性能瓶颈。随着新物理原理的不断涌现与制造工艺的逐步成熟, 一系列新颖且高效的红外技术有望广泛应用于产业前沿领域和日常生活中。

参考文献:

- [1] LIN S Y, MORENO J, FLEMING J G. Three-dimensional photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic power generation [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(2): 380-382.
- [2] ARPIN K A, LOSEGO M D, CLOUD A N, et al. Three-dimensional self-assembled photonic crystals with high temperature stability for thermal emission modification[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(8):132630.
- [3] RINNERBAUER V, LENERT A, BIERMAN D M, et al. Metallic photonic crystal absorber-emitter for efficient spectral control in high-temperature solar thermophotovoltaics [J]. *Advanced Energy Materials*, 2014, 4(12): 1400334.
- [4] DYACHENKO P N, MOLESKY S, PETROV A Y, et al. Controlling thermal emission with refractory epsilon-near-zero metamaterials via topological transitions[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(8):1611809.
- [5] XU J, MANDAL J, RAMAN A P. Broadband directional control of thermal emission [J]. *Science*, 2021, 372(6540): 393-397.
- [6] DIEM M, KOSCHNY T, SOUKOULIS C M. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(3): 033101.
- [7] DOIRON C F, NAIK G V. Non-hermitian selective thermal emitters using metal-semiconductor hybrid resonators [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(44): 1904154.
- [8] CHU Q Q, ZHANG F Y, ZHANG Y, et al. Integrated thermal emission microchip based on meta-cavity array [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(18): 4263-4271.
- [9] CHU Q Q, ZHANG F Y, ZHANG Y, et al. Indirect measurement of infrared absorption spectrum through thermal emission of meta-cavity array [J]. *Optics Express*, 2023, 31(24): 39832-39840.
- [10] ZHANG F Y, CHU Q Q, WANG Q, et al. Multiple symmetry protected BIC lines in two dimensional synthetic parameter space [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2405-2413.
- [11] WOOLF D, HENSLEY J, CEDERBERG J G, et al. Heterogeneous metasurface for high temperature selective emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(8): 081110.
- [12] ZHU L X, SANDHU S, OTEY C, et al. Temporal coupled mode theory for thermal emission from a single thermal emitter supporting either a single mode or an orthogonal set of modes [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(10): 103104.
- [13] ASANO T, SUEMITSU M, HASHIMOTO K, et al. Near-infrared-to-visible highly selective thermal emitters based on an intrinsic semiconductor [J]. *Science Advances*, 2016, 2(12): 1600499.
- [14] HOWES A, NOLEN J R, CALDWELL J D, et al. Near-unity and narrowband thermal emissivity in balanced dielectric metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4): 1901470.
- [15] WANG C M, CHANG Y C, TSAI M W, et al. Reflection and emission properties of an infrared emitter [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14673-14678.
- [16] PARK S J, KIM Y B, MOON Y J, et al. Tuning of polarized room-temperature thermal radiation based on nanogap plasmon resonance [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15472-15481.
- [17] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [18] LIU L X, ZHANG X Q, KENNEY M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [19] WANG Q, XIAO M, LIU H, et al. Measurement of the Zak phase of photonic bands through the interface states of a metasurface/photonic crystal [J]. *Physical Review B*, 2016, 93(4): 041415.
- [20] XIAO S Y, ZHONG F, LIU H, et al. Flexible coherent control of plasmonic spin-hall effect[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(7): 158360.
- [21] LIU H, CAO J X, ZHU S N, et al. Lagrange model for the chiral optical properties of stereometamaterials [J]. *Physical Review B*, 2010, 81(24): 241403.
- [22] ARBABI A, HORIE Y, BAGHERI M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.

- [23] YANG Y M, WANG W Y, MOITRA P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [24] NISHIJIMA Y, MORIMOTO S, BALCYTIS A, et al. Coupling of molecular vibration and metasurface modes for efficient mid-infrared emission [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(2): 451-462.
- [25] DAHAN N, NIV A, BIENER G, et al. Enhanced coherency of thermal emission: Beyond the limitation imposed by delocalized surface waves [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(4): 045427.
- [26] ARNOLD C, MARQUIER F, GARIN M, et al. Coherent thermal infrared emission by two-dimensional silicon carbide gratings [J]. *Physical Review B*, 2012, 86(3): 035316.
- [27] LEE G J, KIM D, HEO S Y, et al. Spectrally and spatially selective emitters using polymer hybrid spoof plasmonics [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(47): 53206-53214.
- [28] BAKAN G, AYAS S, SERHATLIOGLU M, et al. Invisible thin-film patterns with strong infrared emission as an optical security feature [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(21): 1800613.
- [29] JIN W L, LI W, KHANDEKAR C, et al. Laser cooling assisted thermal management of lightsails [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(10): 3384-3390.
- [30] ZHOU L, TAN Y L, WANG J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 393-399.
- [31] WANG H C, CHEN Q, WEN L, et al. Titanium-nitride-based integrated plasmonic absorber/emitter for solar thermophotovoltaic application [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 329-334.
- [32] TITTL A, LEITIS A, LIU M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces [J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [33] LI D, LIU X, LI W, et al. Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(2): 153-159.
- [34] ZENG S N, PIAN S J, SU M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling [J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.
- [35] LUO H, ZHU Y N, XU Z Q, et al. Outdoor personal thermal management with simultaneous electricity generation [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3879-3886.
- [36] LI L, LIU W D, LIU Q F, et al. Multifunctional wearable thermoelectrics for personal thermal management [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(22): 2200548.
- [37] YAO J, LIU Z W, LIU Y M, et al. Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires [J]. *Science*, 2008, 321(5891): 930-939.
- [38] BAKAN G, AYAS S, SERHATLIOGLU M, et al. Reversible decryption of covert nanometer-thick patterns in modular metamaterials [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4507-4510.
- [39] REPHAELI E, RAMAN A, FAN S H. Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(4): 1457-1461.
- [40] KIM J, PARK C, HAHN J W. Metal-semiconductor-metal metasurface for multiband infrared stealth technology using camouflage color pattern in visible range [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(6): 2101930.
- [41] SALIHOGLU O, UZLU H B, YAKAR O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4541-4548.
- [42] WANG H, CHANG J Y, YANG Y, et al. Performance analysis of solar thermophotovoltaic conversion enhanced by selective metamaterial absorbers and emitters [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 98: 788-798.
- [43] CHANG C C, KORT-KAMP W J M, NOGAN J, et al. High-Temperature refractory metasurfaces for solar thermophotovoltaic energy harvesting [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7665-7673.
- [44] SHEMELYA C, DEMEO D, LATHAM N P, et al. Stable high temperature metamaterial emitters for thermophotovoltaic applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(20): 201113.
- [45] COPPENS Z J, KRAVCHENKO, II, VALENTINE J G. Lithography-free large-area metamaterials for stable thermophotovoltaic energy conversion [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(5): 671-676.
- [46] WOOLF D N, KADLEC E A, BETHKE D, et al. High-efficiency thermophotovoltaic energy conversion enabled by a metamaterial selective emitter [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 213-218.
- [47] LAPOTIN A, SCHULTE K L, STEINER M A, et al. Thermophotovoltaic efficiency of 40% [J]. *Nature*, 2022, 604(7905): 287-291.
- [48] ZHOU L, TAN Y L, JI D X, et al. Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation [J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): 1601227.

- [49] WANG Y, MA H Y, YU J Y, et al. All-dielectric insulated 3D plasmonic nanoparticles for enhanced self-floating solar evaporation under one sun [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(7): 2201907.
- [50] NAJEM M, CARCENAC F, TALIERCIO T, et al. Aluminum bowties for plasmonic-enhanced infrared sensing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(20): 2201025.
- [51] MIYAZAKI H T, KASAYA T, IWANAGA M, et al. Dual-band infrared metasurface thermal emitter for CO₂ sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(12): 121107.
- [52] PUSCH A, DE LUCA A, OH S S, et al. A highly efficient CMOS nanoplasmonic crystal enhanced slow-wave thermal emitter improves infrared gas-sensing devices[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(7): 1517451.
- [53] LOCHBAUM A, DORODNYI A, KOCH U, et al. Compact mid-infrared gas sensing enabled by an all-metamaterial design [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4169-4176.
- [54] XU J K, REN Z H, DONG B W, et al. Nanometer-scale heterogeneous interfacial sapphire wafer bonding for enabling plasmonic-enhanced nanofluidic mid-infrared spectroscopy [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 12159-12172.
- [55] BARHO F B, GONZALEZ-POSADA F, BOMERS M, et al. Surface-enhanced thermal emission spectroscopy with perfect absorber metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1506-1514.
- [56] NAKAGAWA K, SHIMURA Y, FUKAZAWA Y, et al. Microemitter-based IR spectroscopy and imaging with multilayergraphene thermal emission [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(8): 3236-3244.
- [57] AIGNER A, TITTL A, WANG J, et al. Plasmonic bound states in the continuum to tailor light-matter coupling [J]. *Science Advances*, 2022, 8(49): 224816.
- [58] LEITIS A, TITTL A, LIU M K, et al. Angle-multiplexed all-dielectric metasurfaces for broadband molecular fingerprint retrieval [J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): 192871.
- [59] LEITIS A, TSENG M L, JOHN-HERPIN A, et al. Wafer-scale functional metasurfaces for mid-infrared photonics and biosensing [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(43): 2102232.
- [60] LOCHBAUM A, FEDORYSHYN Y, DORODNYI A, et al. On-chip narrowband thermal emitter for mid-IR optical gas sensing [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1371-1380.
- [61] DE ZOYSA M, ASANO T, MOCHIZUKI K, et al. Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 535-539.
- [62] MAKHSIYAN M, BOUCHON P, JAECK J, et al. Shaping the spatial and spectral emissivity at the diffraction limit [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(25): 251103.
- [63] MATSUNO Y, SAKURAI A. Perfect infrared absorber and emitter based on a large-area metasurface [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(2): 618-626.
- [64] STREYER W, FENG K, ZHONG Y, et al. Selective absorbers and thermal emitters for far-infrared wavelengths [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(8): 081105.
- [65] ARGYROPOULOS C, LE K Q, MATTIUCCI N, et al. Broadband absorbers and selective emitters based on plasmonic Brewster metasurfaces [J]. *Physical Review B*, 2013, 87(20): 205112.
- [66] HOSSAIN M M, JIA B H, GU M. A metamaterial emitter for highly efficient radiative cooling [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(8): 1047-1051.
- [67] ZOU C J, REN G H, HOSSAIN M M, et al. Metal-loaded dielectric resonator metasurfaces for radiative cooling [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(20): 1700460.
- [68] LIU G Q, LIU X S, CHEN J, et al. Near-unity, full-spectrum, nanoscale solar absorbers and near-perfect blackbody emitters [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 190: 20-29.
- [69] PARK J, KANG J H, LIU X G, et al. Dynamic thermal emission control with InAs-based plasmonic metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): 183163.
- [70] COPPENS Z J, VALENTINE J G. Spatial and temporal modulation of thermal emission [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(39): 1701275.
- [71] FREITAG M, CHIU H Y, STEINER M, et al. Thermal infrared emission from biased graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(7): 497-501.
- [72] INOUE T, DE ZOYSA M, ASANO T, et al. Realization of dynamic thermal emission control [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(10): 928-931.
- [73] KIM C, KIM Y, KANG D, et al. Laser-printed emissive metasurface as an anticounterfeiting platform [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(10): 2200215.
- [74] LIU X L, TYLER T, STARR T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045910.
- [75] HE M Z, NOLEN J R, NORDLANDER J, et al. Deterministic inverse design of Tamm plasmon thermal emitters with multi-resonant control [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(12): 1663-1670.
- [76] JARAMILLO-FERNANDEZ J, WHITWORTH G L, PARIENTE J A, et al. A self-assembled 2D thermofunctional

- material for radiative cooling [J]. *Small*, 2019, 15(52): 1905290.
- [77] ZHOU Y, QIN Z, LIANG Z Z, et al. Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 138.
- [78] ZHU H Z, LI Q, TAO C N, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 220510.
- [79] LUO F, FAN Y S, PENG G, et al. Graphene thermal emitter with enhanced joule heating and localized light emission in air [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 2117-2125.
- [80] SHI C, MAHLMEISTER N H, LUXMOORE I J, et al. Metamaterial-based graphene thermal emitter [J]. *Nano Research*, 2018, 11(7): 3567-3573.
- [81] LI Y Y, FERREYRA P, SWAN A K, et al. Current-driven terahertz light emission from graphene plasmonic oscillations [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(10): 2562-2569.
- [82] QU Y R, LI Q, DU K K, et al. Dynamic thermal emission control based on ultrathin plasmonic metamaterials including phase-changing material GST [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(5): 1700091.
- [83] SUN R Z, ZHOU P H, AI W S, et al. Broadband switching of mid-infrared atmospheric windows by VO₂-based thermal emitter [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11537-11546.
- [84] SUN K, XIAO W, WHEELER C, et al. VO₂ metasurface smart thermal emitter with high visual transparency for passive radiative cooling regulation in space and terrestrial applications [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(17): 4101-4114.
- [85] SHANG X, ZHONG F, SHANG J, et al. Thermal emission manipulation and its infrared applications based on metasurfaces (Invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(19): 1925001. (in Chinese)
- [86] KOCER H, BUTUN S, BANAR B, et al. Thermal tuning of infrared resonant absorbers based on hybrid gold-VO₂ nanostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 161104.
- [87] KIM Y, KIM C, LEE M. Parallel laser printing of a thermal emission pattern in a phase-change thin film cavity for infrared camouflage and security [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(3): 2100545.
- [88] ABDOLLAHRAHEZANI S, HEMMATYAR O, TAGHIN-EJAD M, et al. Electrically driven reprogrammable phase-change metasurface reaching 80% efficiency [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 293746.
- [89] KHANDEKAR C, JACOB Z. Circularly polarized thermal radiation from nonequilibrium coupled antennas [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(1): 014053.
- [90] KRISHNA A, KIM J M, LEEM J, et al. Ultraviolet to mid-infrared emissivity control by mechanically reconfigurable graphene [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5086-5092.
- [91] KIM C, KIM Y, LEE M. Laser-induced tuning and spatial control of the emissivity of phase-changing Ge₂Sb₂Te₅ emitter for thermal camouflage [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7(8): 2101349.
- [92] CONRADS L, HONNÉ N, ULM A, et al. Reconfigurable and polarization-dependent grating absorber for large-area emissivity control based on the plasmonic phase-change material In₃SbTe₂ [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(8): 2202696.
- [93] KANG D D, INOUE T, ASANO T, et al. Electrical modulation of narrowband GaN/AlGaIn quantum-well photonic crystal thermal emitters in mid-wavelength infrared [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1565-1571.
- [94] LIU X Y, PADILLA W J. Reconfigurable room temperature metamaterial infrared emitter [J]. *Optica*, 2017, 4(4): 430-433.
- [95] DAHAN N, NIV A, BIENER G, et al. Space-variant polarization manipulation of a thermal emission by a SiO₂ subwavelength grating supporting surface phonon-polaritons [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(19): 191102.
- [96] SCHULLER J A, TAUBNER T, BRONGERSMA M L. Optical antenna thermal emitters [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 658-661.
- [97] GINN J, SHELTON D, KRENZ P, et al. Polarized infrared emission using frequency selective surfaces [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4557-4563.
- [98] LIU B A, GONG W, YU B W, et al. Perfect thermal emission by nanoscale transmission line resonators [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(2): 666-672.
- [99] DAHAN N, GORODETSKI Y, FRISCHWASSER K, et al. Geometric doppler effect: spin-split dispersion of thermal radiation [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136402.
- [100] WU C H, ARJU N, KELP G, et al. Spectrally selective chiral silicon metasurfaces based on infrared Fano resonances[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(9): 143892.
- [101] NGUYEN A, HUGONIN J P, COUTROT A L, et al. Large circular dichroism in the emission from an incandescent metasurface [J]. *Optica*, 2023, 10(2): 232-238.
- [102] ZHANG Y, WANG Q, XIAO M, et al. Polarization vortices of thermal emission [J]. *Science Advances*, 2025, 11(38): 256252.
- [103] WANG X J, SENTZ T, BHARADWAJ S, et al. Observation of

- nonvanishing optical helicity in thermal radiation from symmetry-broken metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2023, 9(4): 234203.
- [104] SUN K L, YANG B X, CAI Y J, et al. Circularly polarized thermal emission driven by chiral flatbands in monoclinic metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2025, 11(31): 250986.
- [105] GREFFET J J, CARMINATI R, JOULAIN K, et al. Coherent emission of light by thermal sources [J]. *Nature*, 2002, 416(6876): 61-64.
- [106] BIENER G, DAHAN N, NIV A, et al. Highly coherent thermal emission obtained by plasmonic bandgap structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(8): 081913.
- [107] CHALABI H, ALÙ A, BRONGERSMA M L. Focused thermal emission from a nanostructured SiC surface [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(9): 094307.
- [108] PARK J H, HAN S E, NAGPAL P, et al. Observation of Thermal Beaming from tungsten and molybdenum bull's eyes [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(3): 494-500.
- [109] JANONIS V, BALAGULA R M, GRIGELIONIS I, et al. Spatial coherence of hybrid surface plasmon-phonon-polaritons in shallow n-GaN surface-relief gratings [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13839-13851.
- [110] LU G Y, GUBBIN C R, NOLEN J R, et al. Engineering the spectral and spatial dispersion of thermal emission via polariton-phonon strong coupling [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(4): 1831-1838.
- [111] OVERVIG A C, MANN S A, ALÙ A. Thermal metasurfaces: complete emission control by combining local and nonlocal light-matter interactions [J]. *Physical Review X*, 2021, 11(2): 021050.
- [112] JANONIS V Y, KACPERSKI J, SELSKIS A, et al. Directive and coherent thermal emission of hybrid surface plasmon-phonon polaritons in n-GaN gratings of linear and radial shapes [J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(9): 2662-2673.
- [113] ZHOU M, KHORAM E, LIU D J, et al. Self-focused thermal emission and holography realized by mesoscopic thermal emitters [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(2): 497-504.
- [114] WANG T, LI P N, CHIGRIN D N, et al. Phonon-polaritonic bowtie nanoantennas: controlling infrared thermal radiation at the nanoscale [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(7): 1753-1760.
- [115] AUDHKHASI R, ZHAO B, FAN S H, et al. Spectral emissivity modeling in multi-resonant systems using coupled-mode theory [J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9463-9472.
- [116] ZHANG X, LIU H, ZHANG Z G, et al. Controlling thermal emission of phonon by magnetic metasurfaces [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(8): 1741858.
- [117] ZHANG X, ZHANG Z G, WANG Q, et al. Controlling thermal emission by parity-symmetric fano resonance of optical absorbers in metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2671-2676.
- [118] ZHONG F, DING K, ZHANG Y, et al. Angle-resolved thermal emission spectroscopy characterization of non-hermitian metacrystals [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(1): 014071.
- [119] ZHONG F, ZHANG Y, ZHU S N, et al. Probing mid-infrared surface interface states based on thermal emission [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35216-35225.
- [120] CHU Q Q, ZHONG F, SHANG X H, et al. Controlling thermal emission with metasurfaces and its applications [J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(8): 1279-1301.

Multi-degree-of-freedom regulation of thermal emission in metasurfaces (*cover paper·invited*)

SHANG Jinguang¹, SHANG Xiaohe¹, ZHONG Fan², XIAO Yanling¹, GAO Kai¹, YAO Zhehan¹, ZHANG Ye¹,
WANG Qiang¹, ZHU Shining¹, LIU Hui^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics,
Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Key Laboratory of Quantum Materials and Devices of Ministry of Education, School of Physics, Southeast University,
Nanjing 211189, China)

Abstract:

Significance The emission emitted by traditional thermal emission sources usually manifests as broadband, unpolarized, and nearly isotropic incoherent light. This makes it difficult to flexibly regulate the properties of infrared thermal emission, thereby limiting its applications in the infrared field. In recent years, with the rapid development of nanophotonics research and micro-nano processing technology, metasurfaces have been widely used in the regulation of thermal emission properties, effectively breaking through the bottlenecks faced by traditional thermal emission regulation. At present, thermal emission devices developed based on metasurfaces have been widely applied in fields such as thermal management, energy utilization, and sensing detection, significantly promoting the development of various infrared applications. In addition, relying on diversely designed metasurface structures, researchers have achieved multi-degree-of-freedom regulation of thermal emission-including its spectrum, polarization, and angle.

Progress With the continuous development of metasurfaces, thermal emission devices have been widely applied in thermal management, energy utilization, sensing and detection. In terms of thermal management, Rephaeli et al. first proposed a radiative cooling scheme based on a metal-dielectric photonic structure. The research groups of TAO Guangming and MA Yaoguang jointly designed and fabricated an optical radiative cooling fabric with a morphologically hierarchical structure to achieve efficient outdoor personal thermal management. In the field of energy utilization, CHANG C C et al. experimentally demonstrated a Solar Thermophotovoltaic (STPV) system. A metasurface was fabricated using high-melting-point tungsten, which maintains stability even at a high temperature of 1200 °C. The team of HENRY A reported a Thermophotovoltaic (TPV) cell with an efficiency exceeding 40%. ZHOU L et al. proposed a plasmon-enhanced solar desalination device. For sensing and detection applications, XU et al. developed a sapphire (Al₂O₃)-based mid-infrared hybrid nanofluid-Surface-Enhanced Infrared Absorption (SEIRA) platform for liquid sensing. BARHO et al. proposed a surface-enhanced spectroscopy technique based on thermal emission from III-V semiconductor metasurfaces, enabling effective detection of molecular layers coated on the metasurface.

Furthermore, with the continuous advancement of metasurfaces, simultaneous multi-parameter regulation of thermal emission properties—such as spectrum, polarization, and angle—has been achieved.

In terms of thermal emission spectrum regulation: The research group of Padilla W J combined different "cross"-shaped metal structures and used a metasurface with a Metal-Dielectric-Metal (MIM) configuration to experimentally realize single-wavelength and dual-wavelength thermal emission. COPPENS et al. integrated an MIM metasurface with zinc oxide (ZnO), a photosensitive material; ultraviolet light emission excites free

carriers in ZnO, thereby regulating the optical properties of the metasurface. In thermal emission polarization regulation: LIU B A et al. designed an asymmetric nano-antenna structure. NGUYEN et al. proposed an ultra-thin chiral metasurface based on connected zigzag resonators, achieving broadband circularly polarized mid-infrared thermal emission. The JACOB Z team, by simultaneously breaking mirror symmetry and spatial inversion symmetry, used a symmetry-broken "F"-shaped metasurface to realize asymmetric circularly polarized thermal emission in the mid-wave infrared. In thermal emission angle regulation: ZHANG et al. designed an aluminum/silicon dioxide/aluminum metasurface structure, achieving multi-degree-of-freedom regulation of the spectrum, polarization, and angle of phonon thermal emission using its internal mode coupling mechanism. ZHANG et al. further proposed a Fano resonance-based thermal radiator with an aluminum/silicon nitride/aluminum sandwich structure. ZHONG et al. directly characterized the dispersion properties of a superlattice structure using Angle-Resolved Thermal Emission Spectroscopy (ARTES), verifying the existence of exceptional points in non-Hermitian systems. ZHONG et al. combined the concept of topological interface states with thermal emission regulation, designing a superlattice unit based on a "gold-germanium-(gold)-germanium" structure.

To achieve multi-wavelength, multi-mode emission output and multi-degree-of-freedom thermal emission regulation, the concept of a thermal emission microchip was proposed. ZHANG et al. studied multiple symmetry-protected BICs in one-dimensional and two-dimensional synthetic parameter spaces based on a thermal emission microchip formed by a nano-pore metasurface array. CHU et al. proposed and realized a multi-wavelength thermal emission microchip with high spatial resolution; based on this chip, CHU et al. further proposed a compact and integrated indirect infrared absorption spectroscopy detection method.

Conclusions and Prospects In recent years, the technology for regulating infrared thermal emission based on metasurfaces has made continuous progress and has been widely applied in various fields such as thermal management, energy utilization, sensing and detection, and infrared light sources. Expanding the thermal emission regulation mechanism and realizing the collaborative optimization of multiple parameters based on metasurfaces not only promotes the in-depth development of theories and technologies related to thermal emission regulation, but also lays a solid foundation for the innovation and expansion of relevant applications. To further promote the research on thermal emission regulation to the field of practical applications, there are still many tasks worth carrying out in the future. For instance, improving the Q -factor of thermal emission devices, enhancing the precision of micro-nano processing technology, utilizing artificial intelligence for inverse structural design, realizing dynamic regulation of thermal emission devices, and integrating special physical mechanisms from optical research fields (such as topological photonics, moiré photonics, and non-Hermitian photonics) with thermal emission regulation mechanisms into metasurface design.

Key words: metasurface; infrared application; multi-degree-of-freedom regulation; thermal emission microchip

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2024YFA1210500); National Natural Science Foundation of China (92163216, 92463308, 12334015, 62288101); Youth Scientist Project under National Key Research and Development Program of China (2023YFB2805700); Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (BK20243009)