Applied Physics 应用物理, 2026, 16(3), 154-165
Published Online March 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2026.163015

Hans汉斯

微纳结构表面热辐射性能的研究进展

丁炯毅

长春理工大学物理学院，吉林 长春

收稿日期：2026年1月26日；录用日期：2026年3月4日；发布日期：2026年3月11日

摘　要

热辐射在诸多领域均有着广泛应用，随着科技的持续发展与实际应用需求的日益提升，对热辐射性能的调控提出了更为严苛的要求。得益于微纳结构的独特功能特性，被广泛应用于热辐射性能的调控。相较于传统基于材料优化策略，借助微纳结构表面优化热辐射性能展现出难以替代的优势与巨大潜力。本文综述了基于微纳结构的热辐射相关理论及利用微纳结构实现热辐射性能调控的研究进展。首先，简要阐述了若干微纳结构对热辐射性能产生影响的典型作用机制；其次，分别从纳米结构、微米结构及微纳复合结构三个维度，列举了近年来的相关研究成果；最后，总结了微纳结构表面热辐射性能研究领域存在的问题，并结合实际应用场景进行了展望。

关键词

微纳结构，热辐射，辐射制冷，辐射加热

A Review of Thermal Radiation Performance Regulation via Micro-Nano Structures

Jiongyi Ding

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: January 26, 2026; accepted: March 4, 2026; published: March 11, 2026

Abstract

Thermal radiation boasts extensive applications across diverse fields. As technology advances incessantly and practical application demands keep escalating, more rigorous criteria have been imposed on the regulation of thermal radiation performance. Endowed with unique functional characteristics, micro-nano structures are widely employed in the regulation of thermal radiation performance. In contrast to conventional material optimization strategies, the utilization of micro-nano structures for regulating thermal radiation performance has manifested irreplaceable advantages

文章引用: 丁炯毅. 微纳结构表面热辐射性能的研究进展[J]. 应用物理, 2026, 16(3): 154-165.
DOI: 10.12677/app.2026.163015

and tremendous potential. This paper reviews the research progress concerning thermal radiation-related theories based on micro-nano structures and the regulation of thermal radiation performance using such structures. Firstly, it briefly elucidates several typical mechanisms through which micro-nano structures affect thermal radiation performance; Secondly, it enumerates relevant research achievements in recent years from three dimensions: nanostructures, microstructures, and micro-nano composite structures; Finally, it summarizes the existing issues in the research field of regulating thermal radiation performance via micro-nano structures and presents prospects in light of practical application scenarios.

Keywords

Micro Nano Structure, Thermal Radiation, Radiative Cooling, Radiative Heating

1. 引言

任何高于绝对零度的物体，因内部粒子的热运动效应，均会自发向外界辐射电磁波，此物理现象称为热辐射[1]。作为三大传热方式之一，热辐射在自然界中无处不在，且在诸多工程应用场景中都占据主导地位，例如航天器热管理系统散热[2]、军事热伪装技术[3]、红外测温[4]、农业温室大棚保温[5]等。传统热辐射应用高度依赖材料的本征物理特性：以热伪装技术为例，需要选低发射率材料(如锡纸)来实现红外隐身；温室大棚则依赖能反射长波红外线的玻璃或高分子塑料薄膜。然而这些传统材料在实际应用过程中暴露出不少局限性，包括材料成本较高、热辐射性能调控困难以及可能对环境有负面影响等问题。得益于微纳结构的独特功能特性[6]-[9]，为突破这些瓶颈提供解决方案，通过巧妙的结构设计赋予材料原先没有的热辐射性能[10]，如超普朗克热发射[11]、窄带热发射[12]、定向热发射[13]等，为推动热辐射应用领域的发展提供了关键支撑，这些都展现出了传统基于材料的优化策略难以比拟的功能优势与应用潜力。

在本综述中，我们首先简述了基于微纳结构的热辐射分析理论，然后分类并列举了近年来对微纳结构表面热辐射性能的部分最新研究进展，最后展望了微纳结构表面热辐射性能研究领域的机遇和挑战，为未来的研究与运用提供了思路。

2. 微纳结构增强热辐射的物理机制

从对黑体辐射的研究中得出的经典黑体辐射理论，是研究热辐射的基础。近几十年来，在对具有不同于宏观尺度热辐射特性的微观领域进行了更深入的研究分析后，研究者们也提出了一些典型的理论解释。

中长红外波段的热辐射，波长远大于微纳结构的尺度，分析其对这一波段的热辐射的影响时，一些几何光学相关的理论依然能生效。微纳结构遭遇近红外、可见光等短波段热辐射时，两者的尺度差距量级缩小，热辐射的波动性开始显现，要分析微纳结构对这些波段热辐射的影响机理，则需要用到一些电磁学等学科的相关理论。

2.1. 陷光效应与多重反射、衍射及干涉[14]

当入射光波长与结构单元尺度差距过大时，光与介质的相互作用时主要表现出粒子性，可以用几何

光学方法对异质材料界面的光线传播行为进行分析。入射光照射到金属微米结构时，在经过多次反射和散射过程中，不断有能量被吸收。而入射光线照射到透明介质界面时，还会有一部分能量会透射到介质内。

在不考虑材料吸收的前提下，界面菲涅尔效应是决定透明介质透射率最核心因素。

对于金属来说，光入射到微米结构时会受限在间隙中不断发生反射(如图 1 所示)，多次反射增加了界面处光散射及光吸收的次数，产生的陷光效应[15]增强了光吸收，还能抑制金属与空气界面的菲涅尔反射。

当结构单元的尺度逐渐减小到与中长红外波段相近甚至缩小至 $\frac{\lambda}{n}$，周期性微米结构形成的微腔表面会逐渐出现入射光干涉和衍射效应， n 的级数越高，干涉和衍射效应越强。

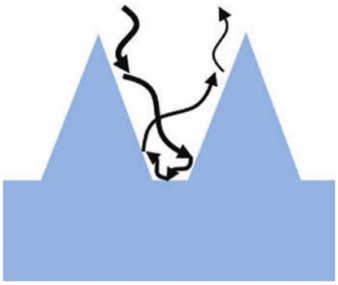


Figure 1. Multiple reflections of incident light by micron-scale structures [15]
图 1. 微米级结构对入射光的多重反射[15]

2.2. 有效介质理论[16]

有效介质理论起源于 20 世纪对复合材料电磁特性的研究，常被用来分析纳米结构及超材料的光学参数并计算辐射传热量，其中包含的两种经典理论为 Maxwell-Garnett 理论和 Bruggeman 自洽理论。作为一种近似理论，有效介质理论通过将复合材料视为整体，近似计算复合组分的光学性能。

Maxwell-Garnett 模型适用于离散相体积占比较小的分散体系，假设微粒间距远大于波长，忽略微粒间相互作用，该模型通过粒子掺杂复合物的有效极化率计算有效介电常数。MG 模型具有非对称性，如果粒子的占比较大，就违反了初始的假设，需要用到逆转形式。

Bruggeman 模型假设各种组分在三维中随机分布，在高掺杂混合物的等效介电常数计算中被广泛使用。BR 模型假设掺杂粒子与主要物质对等效介电常数的影响是等价的，调换主次物质的成分不会影响结果，是个对称模型。

2.3. 光子带隙[17] [18]

光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列制造的规则光学结构，可分为一维、二维、三维结构。在光子晶体中，存在着布拉格散射，导致出现电磁波传播不能通过的频率间隙，产生光子禁带作用，即所谓的光子带隙(PBG)，它可用于将电磁波强烈地限制在特定区域，抑制或增强自发辐射，并引导电磁波在受限频率下沿特定方向传播。例如，一维光子晶体可以显著抑制带隙内的一系列频率的热辐射，同时增强带隙外的辐射。

2.4. 表面激元[19]

外来电磁波照射到金属表面会激发电子振荡，产生表面等离子体，这种描述表面等离子体与光子之间相互作用的量子被称为表面等离极化激元，可以导致光子在沿着电磁波波矢的特定方向上被强烈吸收或发射。表面等离激元通常出现在金银铜等导电能力强的金属的可见光或近红外波段，在准金属和半导

体表面的红外波段也能被激发。在一些极性电介质材料中，声子与红外光发生相互作用，产生表面共振，即表面声子极化激元。以上两种准粒子在近场热辐射中比较常见。

2.5. 微腔效应[20]

微腔效应是由光栅表面上的每个腔或槽形成的波导模式引起的。在波导中，由于边界条件的限制，形成了一些波导模式，只有满足这些模式的波才能在波导中传播。对于由横截面为 $L_x \times L_y$ 的理想导体组成的无限大波导，传播模式的波长 λ_{lm}，由 Dearholt 和 McSpadden 确定

$$\lambda_{lm} = 2\pi/k' = \frac{2}{\sqrt{\left(l/L_x\right)^2 + \left(m/L_y\right)^2}} \tag{1}$$

其中 l 和 m 是整数。如果 $L_x > L_y$，则通过选择 $(l,m) = (1,0)$ 获得最大波长。这是矩形波导的截止波长 λ_c。波长大于 λ_c 的波不能在波导内传播。

Maruyama 等人提出，具有朝向 z 方向的孔径的微腔的热发射光谱的峰值波长由以下关系式给出：

$$\lambda_{lm} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}} \tag{2}$$

其中 l，m 和 n 是整数，$(l, m = 0,1,2,\cdots; n = 0,1,3,5,\cdots)$，$L_x \times L_y \times L_z$ 表示微腔的尺寸。最多可以有一个整数为零。通过在辐射表面上制造多个微腔，可以增加可见光和近红外波长的热辐射，在较深的微腔中，微腔效应对热辐射增强的贡献甚至还能超越表面等离激元。

图 2 中，按照结构尺度从大到小排序，将光子与不同尺度结构表面相互作用的物理机制进行了分类。

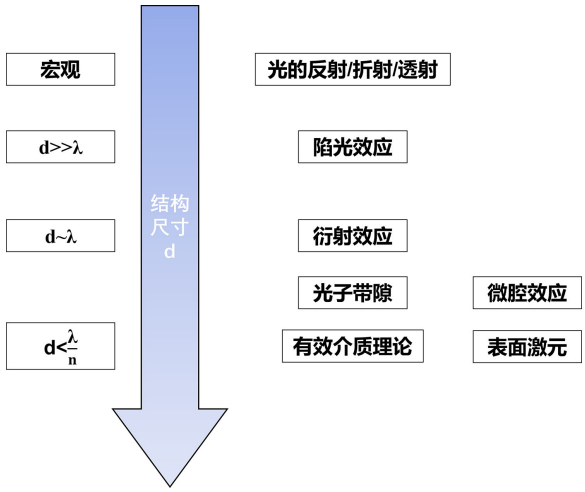


Figure 2. Schematic diagram of the classification of physical mechanisms for the interaction between photons and surfaces with different scale structures
图 2. 光子与不同尺度结构表面相互作用的物理机制分类示意图

3. 通过微纳结构表面优化材料热辐射性能的研究现状

上一章简要介绍了一些基于微纳结构的热辐射相关理论，可用于分析微纳结构如何给物体带来不同寻常的热辐射特性。传统的热辐射应用已经深入各个领域，但随着科技发展，更多复杂的实际应用场景对热辐射性能调控效果提出了更高更精细的要求。近年来，随着加工技术的进步，研究者们制备了众多

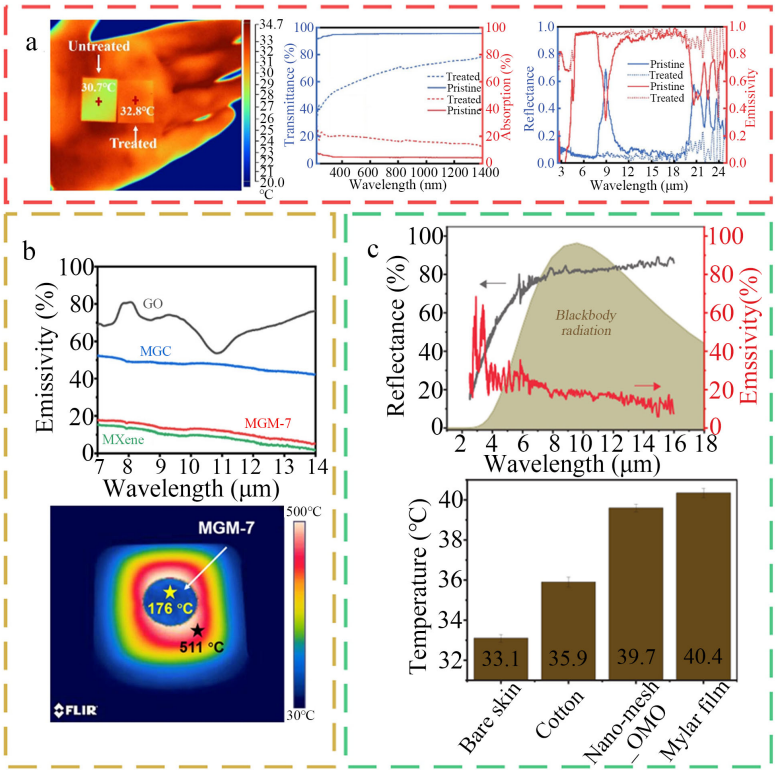
微纳结构来调控物体热辐射性能。根据维恩位移定律[21]，温度达到 3500℃左右的黑体发出的热辐射，其峰值发射波长才刚能与到红光波长相仿，但常规的热辐射应用场景中很少有上千摄氏度的高温环境，因此大多数调控物体热辐射相关性能的研究目标还是以调控红外波段的性能为主。另外，根据基尔霍夫定律[22]，物体同一波长的发射率与吸收率必然相等，所以好的热发射器也是好的热吸收器。

微纳结构涵盖了微米尺度到纳米尺度的所有结构，微米结构、纳米结构、微纳复合结构表面在优化热辐射性能方面各具优势，本章将从利用纳米结构、微米结构、微纳复合结构这三个尺度出发，对最近的一些微纳结构表面优化热辐射相关性能的研究现状进行举例。

3.1. 纳米结构表面热辐射性能的研究

传统热辐射应用的选材性能相对固定且单一，不能满足特定场景对热辐射性能的需求，而通过对纳米结构的尺寸、形状、排列方式等进行设计，就有精细化调控热辐射性能的可能，可以满足部分需求。

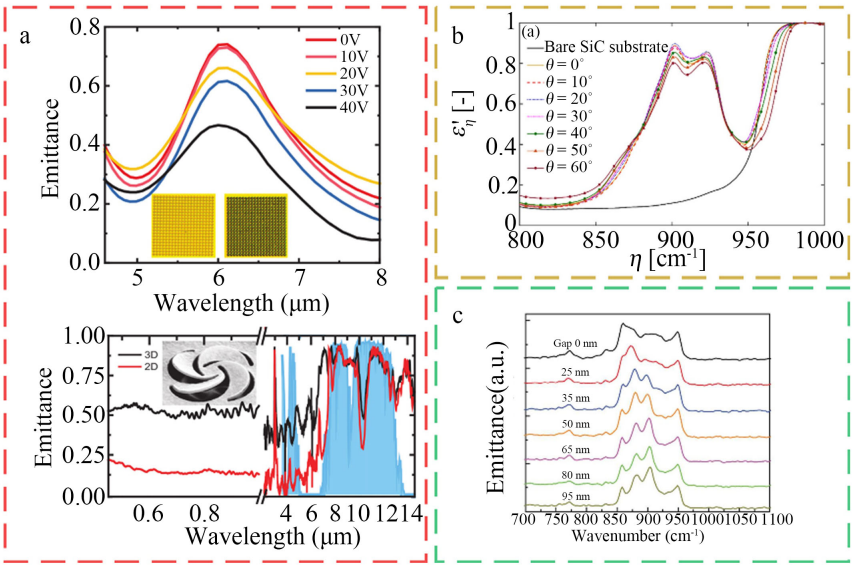
Wu 等[23]用飞秒激光扫描，在多孔玻璃上制备出了分布的纳米腔和纳米线，产生了陷光效应和微腔效应，使所制备的样品具有较好的红外热辐射性能，但对可见光的透过率较低，并通过将其放置在不同的背景下，其中激光处理玻璃(LT)的红外图像温度更接近实际环境(如图 3(a))，该策略可能为增强热成像提供新的视角。Zhang 等[24]通过构建由连续的低发射率 MXene 纳米片和高结构强度 GO 纳米片组成的交替多层结构(如图 3(b))，具有低红外发射率和优秀的热伪装性能。Woo 等[25]利用纳米网格图案化策略，制备了氧化物－金属－氧化物 VTIR 涂层(如图 3(c))。通过纳米波导、多重干涉等机制在可见光区同时具有高透过率和中红外区域的低发射率，在室内条件下达到 6.6℃的辐射加热效果。



a. 两种玻璃红外辐射性能[23]。b. 不同类型材料的中红外发射率和 MGM 膜的热伪装性能[24]。c. 不同样品的各波段热辐射性能和辐射加热效果[25]。

Figure 3. Thermal radiation properties of nanostructured surfaces
图 3. 纳米结构表面热辐射性能

Zhao 等[26]提出并演示了一种基于可变形纳米剪纸和聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜复合结构的动态多功能热发射器，该发射器可以通过电子偏压或机械压缩来驱动，通过调整几何形状和结构的变换来实现选择性发射和辐射强度/波长的变化(如图 4(a))。Pouria 等[27]研究了具有纳米级柱间距的碳化硅纳米柱零级阵列的远场热辐射的物理机制，研究发现，热辐射体体积的增加以及零阶阵列的混合波导－表面－声子－极化子模式的热辐射，使碳化硅的光谱发射率在很宽的角度范围内都有了很大的提高(如图 4(b))。Wang 等[28]利用相邻声子－极化子纳米结构的耦合，通过实验证明纳米尺度的间隙可以控制热发射频率，同时保持发射线宽窄至 10 cm^{-1} (如图 4(c))。这是通过使用深亚衍射蝴蝶结形碳化硅纳米天线实现的。



a. 纳米剪纸螺旋结构在不同电压下热辐射性能[26]。b. 各角度下纳米柱阵列光谱定向发射率[27]。c. 不同间隙尺寸的纳米天线的热发射光谱[28]。

Figure 4. Thermal radiation performance of specially designed nanostructured surfaces
图 4. 经特殊设计的纳米结构表面热辐射性能

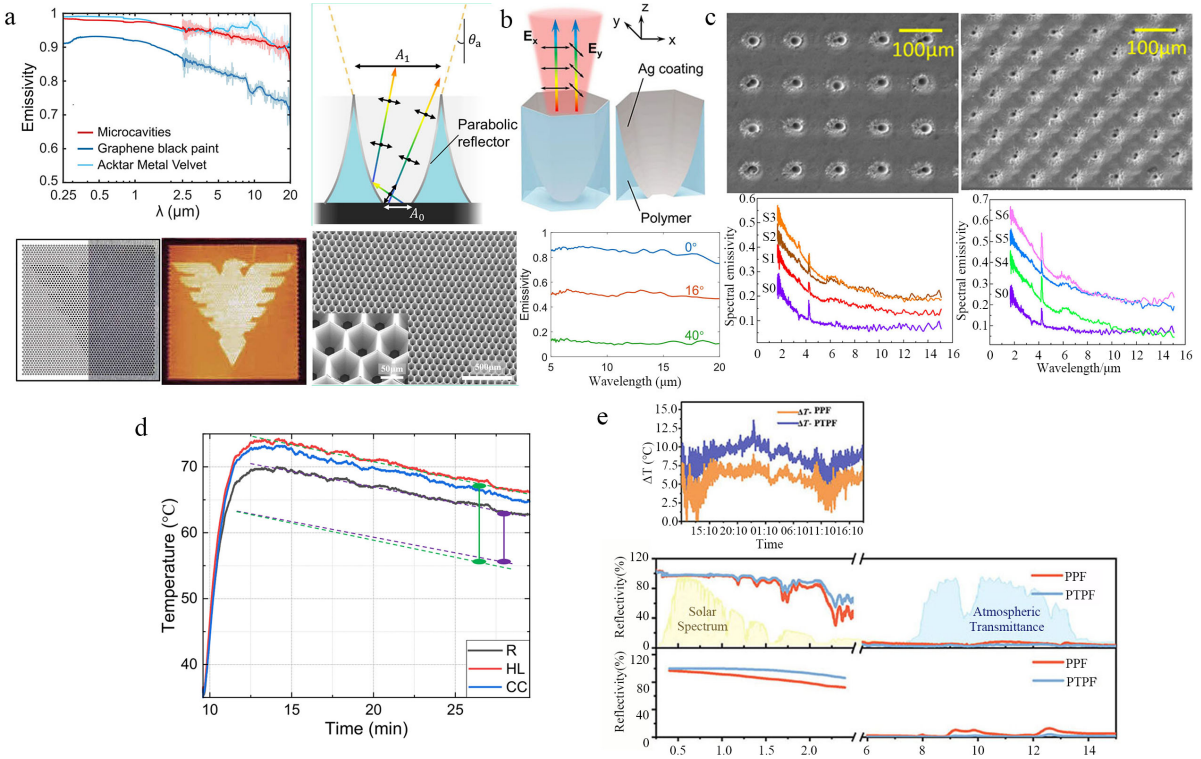
借助纳米结构，可对各项热辐射性能实施更为精细且主动的调控。但就当前而言，纳米结构在制备过程中仍存在成本偏高、加工精度不足、结构强度普遍偏低等问题；同时，对于纳米结构表面热辐射性能时所涉及的多物理场耦合理论机制，其认知深度亦有待加强。因此，要推动纳米结构表面优化材料热辐射性能技术在实际场景中的有效应用，仍需开展更为深入的研究工作。

3.2. 微米结构表面热辐射性能的研究

纳米结构存在的结构强度有限、制备成本高等问题，微米结构具有尺度较大、制备工艺相对成熟等优势，被更早更广泛地研究如何用于优化热辐射性能。下面介绍最近的一些微米结构表面热辐射性能的研究进展。

Ng 等[29]制备了由在金属上形成的数千个微尺度周期性孔隙组成的金属黑体微腔，在可见光和红外(IR)范围内表现出优异的发射率(从 0.25 到 20 μm 平均发射率超过 0.94)，还通过调控微腔深度改变结构的光学性能，实现了红外加密(如图 5(a))。Fan 等[30]制备了一种像素化定向微发射器，通过非成像光学原理实现了热辐射的可调角度控制，该微发射器具有宽谱的稳定高热发射率且具有明显的方向选择性(如图 5(b))。Zhang 等[31]采用飞秒激光脉冲在镍基合金表面制造具有大纵横比的周期性 3D 微结构，并测量了其热辐射特性。测试结果表明，制备的形貌通过多重反射和多微腔效应，极大地提高了表面辐射性能，

发射率增加。这项工作为在大型金属表面上制造 3D 周期性微结构提供了有价值的参考，并展示了工程微结构表面如何影响高温下的热辐射(如图 5(c))。Zheng 等[32]利用飞秒激光烧蚀在平面蓝宝石 Al_2O_3 上制备了线性和圆形微光栅，并通过控制表面纹理宽深比以设计反射率带。原始蓝宝石表面相比，Fs 激光烧蚀光栅通过多重反射、微腔效应、表面声子极化激元等效应结合，使发射率增加 3%~6% (如图 5(d))。Fu 等[33]通过微金字塔表面结构和 2D 六方氮化硼纳米片(h-BNN)散射填料的协同优化，制备了具有金字塔结构的光子晶体薄膜，经过结构表面多重反射，太阳光反射率达到 98.5%，采用高红外发射材料作为基底，中红外(MIR)发射率达到 97.2%，环境冷却效果高达 11℃ (如图 5(e))，为可扩展的亚环境辐射冷却技术带来了希望。



a. 微腔表面的发射率和深度编码红外加密示例[29]。b. 定向微发射器的示意图、原理和结构表征；15˚-PDME 的光学特性[30]。c. 两种阵列的结构表征及各样品的光谱发射率[31]。d. 不同结构样品的温度变化[32]。e. PPF/PTPF 的室外辐射制冷效果和光学性能[33]。

Figure 5. Thermal radiation performance of micron-structured surfaces
图 5. 微米结构表面热辐射性能

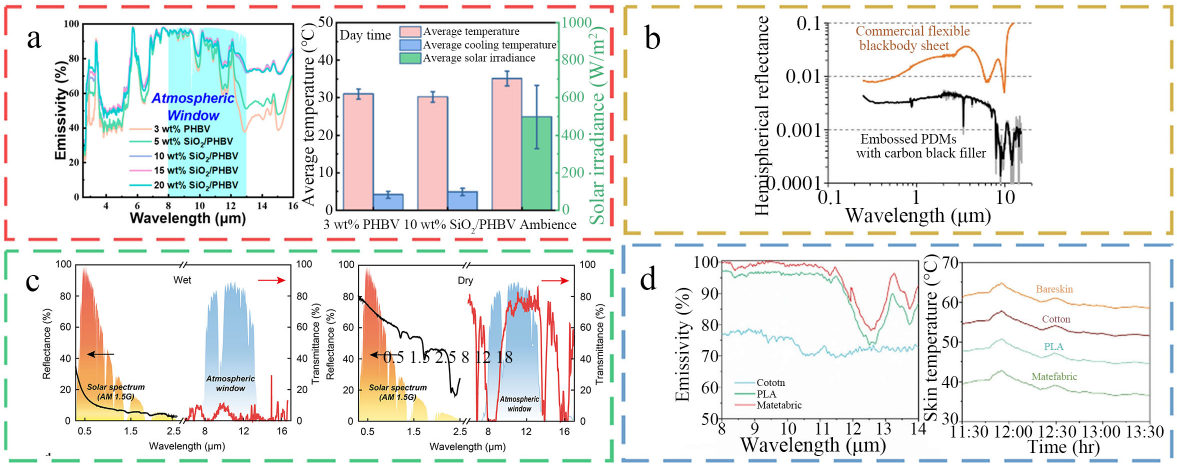
尽管通过调整微米结构的参数可实现对特定热辐射发射效果的调控，但对于热辐射性能调控需求更为精细的领域，其作用仍显局限。由于微米结构的尺度与热辐射波长相当或更大，其与热辐射的相互作用基本遵循几何光学规律，因此微米结构对热辐射性能的影响主要体现在宽波段增强及特定角度范围内的定向调控。基于此，微米结构表面热辐射性能的研究，仍是推动当前多数热辐射相关应用领域发展的关键课题。

3.3. 微纳复合结构表面热辐射性能的研究

微米结构和纳米结构各自存在的局限性对投入实际应用存在一定影响，微纳复合结构则突破了两种单一尺度结构的局限性，因此利用微纳复合结构表面优化热辐射性能相关研究的推进，成为了未来推动

热辐射应用领域进一步发展的更可靠方案。

Zhu 等[34]介绍了一种具有微纳米多级结构 SiO_2/PHBV 纤维膜，通过微纳结构多级增强光散射/反射及高红外发射材料的结合，在大气窗口中实现了 0.95 的太阳反射率和 0.89 的发射率，当暴露于平均辐射强度为 537.06 W/m² 的直射阳光下时，纤维膜实现了 4.85℃的冷却温度，与人体皮肤表面温度相比，存在近 12.8℃的明显温差(如图 6(a))。Amemiya 等[35]通过高能重离子加工和复制模塑纳米压印，可以在聚二甲基硅氧烷(PDMS)片材上提供纳米精度的微腔阵列，多重反射吸收结合高红外吸收率基底，在整个中红外范围(6~15 mm)内表现出极低的反射率(<0.0005)，这种有前途的黑体片材提供了前所未有的光和热辐射管理(如图 6(b))。Li 等[36]研制了一种具有纳米多孔结构的湿敏聚四氟乙烯(PTFE)/聚乙烯醇(PVA)复合膜，通过 PTFE/PVA 复合材料对水蒸气的可逆吸附和脱附，改变了材料的红外透射率，实现了对太阳辐射和热辐射的动态协调调节(如图 6(c))。Du 等[37]设计并制造了一种新型的具有 Janus 润湿性和高导热性的辐射冷却超织物，由于材料的光学特性和润湿性梯度/微纳结构设计，厚度 ≈ 100 μm 的纳米材料可以强烈反射阳光(Rsolar, ≈99.7%, 0.3~2.5 μm)并选择性地发射红外辐射(LWIR, ≈92%, 8~14 μm) (如图 6(d))。此外，热辐射、传导和蒸发的协同冷却策略在高温场景下产生了优秀的降温效果。

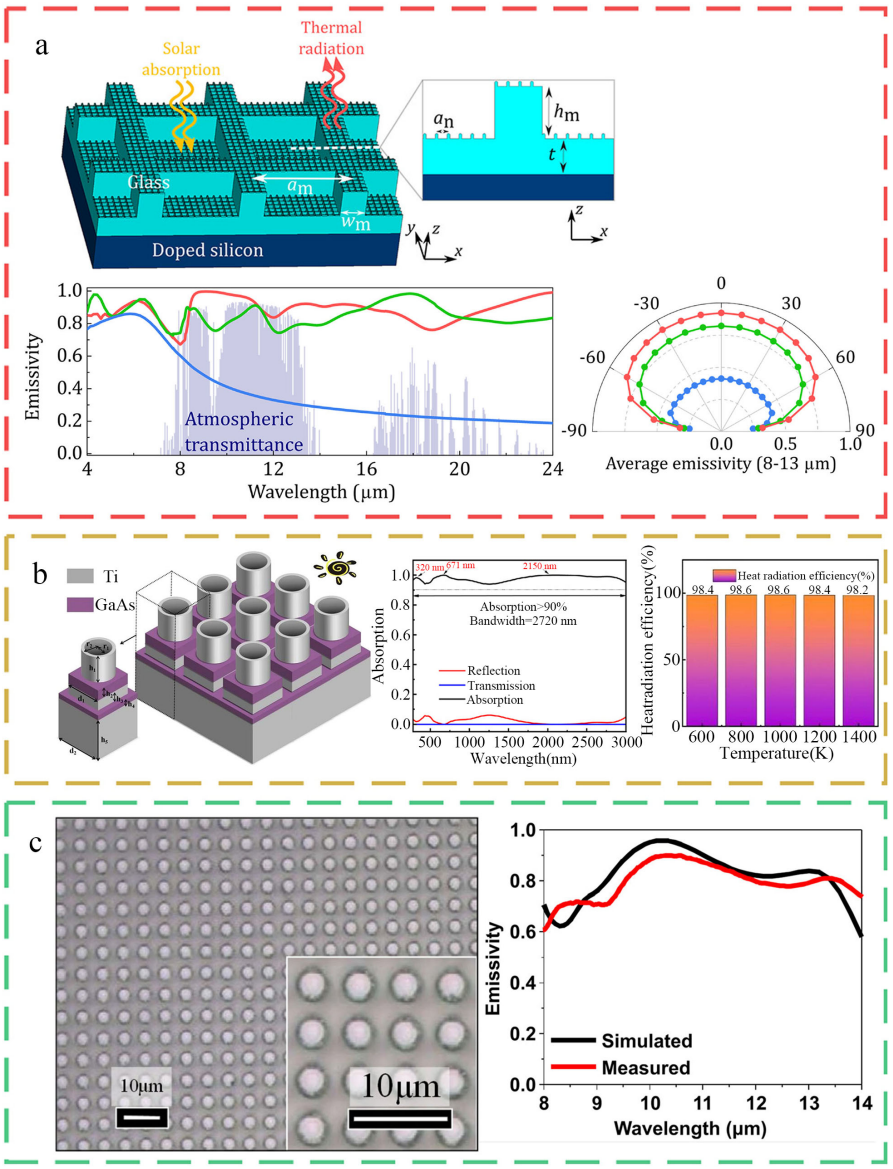


a. PHBV 和 SiO2/PHBV 纤维膜的热辐射性能和日间辐射冷却效果[34]。b. 各种材料的红外反射率[35]。c. 复合膜在干/湿模式下的光学性能[36]。d. 各种织物的红外发射率和辐射冷却效果[37]。

Figure 6. Thermal radiation performance of micro-nano composite structure surfaces without structural design
图 6. 未经结构设计的微纳复合结构表面热辐射性能

Perrakis 等[38]通过设计将平面内周期性微纳米图案进行叠加用于提高器件性能，该位于简单的平面硅基板上的玻璃辐射冷却器，在中红外波段有>0.85 的发射率，这种广泛的增强与光栅柱中局域共振模式的激发有关，包括 s 偏振和 p 偏振，以及激发集体平面内表面态的晶格效应，最终可实现~5.8℃的温度降低(如图 7(a))。Xiao 等[39]设计了一种由 Ti 和 GaAs 组成的高效太阳能捕获吸收器。该结构产生了腔共振(CR)和表面等离子体共振(SPR)，在宽波长范围(280~3000 nm)上表现出>90%的吸收率。该结构还可以在宽温度范围下始终保持 98%以上的热辐射效率(如图 7(b))。基于这种优异的辐射和吸收性能，它在太阳能吸收和热发射领域具有广阔的应用前景。Cao 等[40]制备了一种由两对圆形电介质(Si3N4) - 金属(Au)堆叠组成的堆叠纳米腔元表面，通过设计纳米腔超表面的几何形状将表面等离子体共振机制、多腔耦合及阻抗匹配等机制结合，可获得高热辐射性能，在 8~14 μm 的 M-IR 大气窗口中提供平均发射率超过 80%的宽带热辐射(如图 7(c))。Yu 等[41]采用角度选择滤光片和光谱选择发射器作为结构部件，设计了一系列不同的热辐射源，利用 NSGA-II 算法进行优化，得到了一个窄带方向性热辐射源，仅在给定方向和波长

下提供高发射率。仅具有七层的发射器展示出 0.97 的最大发射率，角分辨发射率测量结果表明，该辐射器的角宽度小于 20˚，光谱宽度小于 0.025 μm，为窄带定向热辐射器的设计提供了一条简单有效的途径，在热辐射管理中具有广阔的应用前景。



a. 周期性微纳米玻璃光栅涂层示意图和辐射冷却器的发射率[38]。b. 拟建结构的周期性结构图及吸收体的热辐射吸收性能、不同温度下的热辐射效率[39]。c. 超发射极的结构表征和仿真/实测的超发射极的光学性能[40]。

Figure 7. Thermal radiation performance of designed micro-nano composite structure surfaces
图 7. 经过设计的微纳复合结构表面热辐射性能

微纳复合结构具有跨尺度的特性，在热辐射性能调控方面展现出比单一微米结构或纳米结构更好的表现，已成为该领域的重要解决方案。但在结构设计、制备工艺、理论分析等环节还存在诸多难点与瓶颈，要实现微纳复合结构在实际场景中的高效应用，尚需开展更为深入系统的研究工作。

最后，按照应用领域分类，对制冷/伪装/加热领域的工作成果进行了综合对比，如表 1 所示。

Table 1. Comprehensive comparison of work achievements in various fields
表 1. 各领域工作成果综合对比

应用领域	研究者	结构类型	材料	工作波段	平均发射率/吸收率	制备工艺	核心优势
制冷	Fu 等[33]	微米金字塔结构 + 二维纳米片散射体	h-BNN 纳米片/光子晶体薄膜	太阳波段(反射)&中红外(发射)	太阳反射率 98.5%；MIR 发射率 97.2%	旋涂填料至模板后热固化	实现高达 11℃的环境冷却效果和可扩展的亚环境辐射冷却
	Zhu 等[34]	微纳米多级结构纤维膜	SiO_2/PHBV	太阳波段(反射)&大气窗口(发射)	太阳反射率 0.95；发射率 0.89	混合成料 + 静电纺丝技术	直射阳光下实现 4.85℃冷却，与皮肤温差达 12.8℃，适用于人体热管理。
	Du 等[37]	具有 Janus 润湿性的微纳结构超织物	纳米材料(未具体指明)	太阳波段(反射)&长波红外(发射)	太阳反射率 ≈ 99.7% (0.3~2.5 um)；LWIR 发射率 ≈ 92% (8~14 um)	混合成料 + 静电纺丝技术	协同热辐射、传导和蒸发冷却，在高温场景下具有优异的降温效果。
	Perrakis 等[38]	平面内周期性微纳米图案(光栅)	玻璃/硅基板	中红外波段	>0.85	模拟计算	可实现~5.8℃的温度降低。
伪装	Zhang 等[24]	交替多层纳米片结构	MXene/GO 纳米片	中红外波段	IR 发射率 12%	Ti3C2Tx MXene 和 GO 真空辅助交替过滤	具有优秀的热伪装性能
	Ng 等[23]	周期性微米孔隙阵列(黑体微腔)	金属	宽波段(0.25~20 um)	>0.94	分层 fs 激光写入技术	宽波段高发射率，同时可通过微腔深度实现红外加密功能
加热	Woo 等[25]	纳米网格图案化薄膜	氧化物–金属–氧化物(OMO)	可见光(透过) & 中红外(低发射)	可见光区 > 80% (550 nm)和中红外区域< 20% (7~14 μm)	光刻 + RIE + 后续剥离	可实现高效辐射加热
	Zhao 等[26]	可变形纳米剪纸复合结构	纳米剪纸/PDMS 薄膜	中红外波段	动态可调	纳米剪纸技术	可通过动态调控选择性发射和辐射强度/波长，实现多功能热管理
	Xiao 等[39]	周期性微纳复合结构	Ti/GaAs	宽波段(280~3000 nm)	吸收率 > 90%；热辐射效率 > 98% (宽温区)	仿真计算	可实现宽谱高效吸收与辐射，在太阳能捕获和热发射领域应用前景广阔

4. 总结与展望

本文概述了微纳结构表面影响材料热辐射性能的典型理论解释，并按照微纳结构的不同尺度，介绍了该领域最新的研究现状并对其中存在的问题进行了简要的剖析。借助微纳结构优异的热辐射特性，不少热辐射应用领域已经得到了新的发展。同时，还有新的应用思路被不断开发。尽管微纳结构表面热辐射性能的研究已经取得了显著进展，但仍面临诸多挑战：如微纳结构的均匀性、重复性均是以当前技术水平难以控制的；制备微纳结构用到的工艺目前还面临着成本高(光刻、模板法)、效率低(离子束、自组装)、污染严重(CVD/PVD)等问题；最终制得的结构性能稳定性通常也逊于常规材料，存在如结构表面纳米颗粒容易脱落、各类极端环境下表面成分改变导致性能变差等问题，这些问题都制约着微纳结构表面热辐射性能投入实际应用，未来亟需开展更多针对性的研究。AI 技术或将成为重要的研究助力，近年来常用的算法如遗传算法、拓扑优化、深度学习等，在微纳结构设计、性能仿真分析等领域有独特价值：

遗传算法可用于灵活地优化结构设计；拓扑优化可找出结构性能的极限探索；深度学习可实现近乎实时的正向预测和逆向设计。此外，现有的加工方法仍有较大的开发与改进空间，合适的加工策略或将为制备热辐射性能优异的微纳结构提供新的技术支撑。

参考文献

[1] 韩立, 徐莉, 李洋, 等. 基于 C-mount 封装的半导体激光器热特性模拟分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 27-31.

[2] 李淼, 周凤颖, 张琪琪, 等. 典型故障模式下载人航天器热管理系统的安全控制策略研究[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2025, 24(3): 6-10.

[3] 张玥, 张小雯, 李龙男, 等. 红外低发射率热光子材料研究进展(特邀) [J]. 光学学报, 2024, 44(19): 99-116.

[4] 张双双, 刘琦, 张济国. 红外热成像设备目标检测原理及影响因素分析[J]. 中国安全防范技术与应用, 2024(4): 43-52.

[5] 徐明. 多功能农业专业大棚膜[J]. 农家致富, 2013(10): 27.

[6] Ye, F., Song, L., Wang, Y., Yang, Y., Jin, R., Jiang, J., *et al*. (2025) Femtosecond Laser-Based Construction of 3D Spatially Distributed Graphene Oxide Surface for Enhancing Boiling Heat Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **237**, Article 126405. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126405

[7] He, Y., Yang, J., Wang, Y., Jiang, J., Wang, J., Tao, H., *et al*. (2024) Femtosecond Laser Combined with Hydrothermal Method to Construct Three-Dimensional Spatially Distributed Wurtzite ZnO Micro/Nanostructures to Enhance Photocatalytic Properties. *Langmuir*,**40**, 3892-3899. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03840

[8] Chen, Z., Song, L., Wang, Y., Tao, H., Liu, Z., Wang, T., *et al*. (2024) Air Pocket-Optimization Strategy for Micro/nanostructures Fabricated by Femtosecond Laser Technology for Anti-Icing Performance Improvement. *Applied Surface Science*, **655**, Article 159454. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159454

[9] Wang, Z., Song, L., Tao, H., He, Y., Yang, Y., Wang, T., *et al*. (2024) Fabrication of Micro/Nano Wettability MoS2 Hydrogen Evolution Electrocatalyst Based on Femtosecond Laser. *International Journal of Hydrogen Energy*, **51**, 327-335. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.160

[10] Cuevas, J.C. and García-Vidal, F.J. (2018) Radiative Heat Transfer. *ACS Photonics*, **5**, 3896-3915. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.8b01031

[11] Maslovski, S.I., Simovski, C.R. and Tretyakov, S.A. (2016) Overcoming Black Body Radiation Limit in Free Space: Metamaterial Superemitter. *New Journal of Physics*, **18**, Article 013034. https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013034

[12] Lu, G., Nolen, J.R., Folland, T.G., Tadjer, M.J., Walker, D.G. and Caldwell, J.D. (2020) Narrowband Polaritonic Thermal Emitters Driven by Waste Heat. *ACS Omega*, **5**, 10900-10908. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00600

[13] Chen, B., Wang, R., Si, X., Bao, R. and Zhan, Y. (2025) Optimal Azimuthal Distribution of Thermal Emission for Efficient Radiative Cooling. *Optics Letters*, **50**, 780-783. https://doi.org/10.1364/ol.549465

[14] 李珣. 微纳结构飞秒激光制备技术及其抗反射特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2021.

[15] Qi, J., Liu, X., Liu, Z., Zhang, X., Li, C., Chen, Q., *et al*. (2024) Ultrawide Spectrum Metallic Plane Blackbody with Extremely High Absorption from 0.2 to 25 MM. *Advanced Science*, **12**, Article 2411448. https://doi.org/10.1002/advs.202411448

[16] 臧子漪. 植物叶片水状态的太赫兹无损检测方法研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.

[17] 张玉发, 王成, 王勇. 光子晶体红外光谱特性调控及应用研究进展[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(3): 24-40.

[18] Fu, H., Jiang, Y., Tsai, M., Lee, S. and Chen, Y. (2009) A Thermal Emitter with Selective Wavelength: Based on the Coupling between Photonic Crystals and Surface Plasmon Polaritons. *Journal of Applied Physics*, **105**, Article 033505. https://doi.org/10.1063/1.3074293

[19] 胡一知. 基于微结构表面超材料的近场辐射传热研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[20] Sai, H., Kanamori, Y. and Yugami, H. (2005) Tuning of the Thermal Radiation Spectrum in the Near-Infrared Region by Metallic Surface Microstructures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **15**, S243-S249. https://doi.org/10.1088/0960-1317/15/9/s12

[21] 曹鼎汉. 维恩位移定律及其应用[J]. 红外技术, 1994(2): 46-48.

[22] 荀浩轩. 基于有序微纳结构的热辐射调控研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2023.

[23] Wu, T., Wu, Z., He, Y., Zhu, Z., Wang, L. and Yin, K. (2022) Femtosecond Laser Textured Porous Nanowire Structured Glass for Enhanced Thermal Imaging. *Chinese Optics Letters*, **20**, Article 033801. https://doi.org/10.3788/col202220.033801

[24] Zhang, Y., Li, L., Cao, Y., Yang, Y., Wang, W. and Wang, J. (2023) High-Strength, Low Infrared-Emission Nonmetallic Films for Highly Efficient Joule/Solar Heating, Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Camouflage. *Materials Horizons*, **10**, 235-247. https://doi.org/10.1039/d2mh01073a

[25] Woo, H.K., Zhou, K., Kim, S., Manjarrez, A., Hoque, M.J., Seong, T., *et al*. (2022) Visibly Transparent and Infrared Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article 2201432. https://doi.org/10.1002/adfm.202201432

[26] Zhao, Y., Liang, Q., Li, S., Chen, Y., Liu, X., Sun, H., *et al*. (2023) Thermal Emission Manipulation Enabled by Nano-kirigami Structures. *Small*, **20**, Article 2305171. https://doi.org/10.1002/smll.202305171

[27] Pouria, R., Chow, P.K., Tiwald, T., Zare, S. and Edalatpour, S. (2022) Far-Field Thermal Radiation from Short-Pitch Silicon-Carbide Nanopillar Arrays. *Applied Physics Letters*, **121**, Article 131702. https://doi.org/10.1063/5.0109819

[28] Wang, T., Li, P., Chigrin, D.N., Giles, A.J., Bezares, F.J., Glembocki, O.J., *et al*. (2017) Phonon-Polaritonic Bowtie Nanoantennas: Controlling Infrared Thermal Radiation at the Nanoscale. *ACS Photonics*, **4**, 1753-1760. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00321

[29] Ng, C., Chen, T., Ju, B., Chen, Y. and Ma, Y. (2025) Pixel-Level Metal Blackbody Microcavities via Hierarchical Laser Writing. *Science Advances*, **11**, eadu0608. https://doi.org/10.1126/sciadv.adu0608

[30] Fan, Z., Hwang, T., Lin, S., Chen, Y. and Wong, Z.J. (2024) Directional Thermal Emission and Display Using Pixelated Non-Imaging Micro-Optics. *Nature Communications*, **15**, Article No. 4544. https://doi.org/10.1038/s41467-024-48826-9

[31] Zhang, Y., Fu, T., Fu, L. and Shi, C. (2018) High Temperature Thermal Radiation Property Measurements on Large Periodic Micro-Structured Nickel Surfaces Fabricated Using a Femtosecond Laser Source. *Applied Surface Science*, **450**, 200-208. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.171

[32] Zheng, N., Smith, D., Ng, S.H., Huang, H., Stonytė, D., Appadoo, D., *et al*. (2025) Infrared Absorption of Laser Patterned Sapphire AL2O3 for Radiative Cooling. *Micromachines*, **16**, Article 476. https://doi.org/10.3390/mi16040476

[33] Fu, Y., Chen, L., Guo, Y., Shi, Y., Liu, Y., Zeng, Y., *et al*. (2024) Pyramid Textured Photonic Films with High-Refractive Index Fillers for Efficient Radiative Cooling. *Advanced Science*, **11**, Article 2404900. https://doi.org/10.1002/advs.202404900

[34] Zhu, Z., Li, Z., Wu, X., Liu, C., Chen, N., Zhang, Y., *et al*. (2025) High-Performance Radiative Cooling Using a SiO_2/PHBV Fiber Membrane with a Micronano-Multistage Structure. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 34625-34636. https://doi.org/10.1021/acsami.5c07156

[35] Amemiya, K., Koshikawa, H., Imbe, M., Yamaki, T. and Shitomi, H. (2019) Perfect Blackbody Sheets from Nano-Precision Microtextured Elastomers for Light and Thermal Radiation Management. *Journal of Materials Chemistry C*, **7**, 5418-5425. https://doi.org/10.1039/c8tc06593d

[36] Li, G., Jiang, X., Asfahan, H., Jia, S., Shao, S. and Li, X. (2025) Humidity-Controlled Smart Window with Synchronous Solar and Thermal Radiation Regulation. *Advanced Science*, **12**, e06980. https://doi.org/10.1002/advs.202506980

[37] Du, P., Zhao, X., Zhan, X., Li, X., Hou, K., Ji, Y., *et al*. (2024) A High-Performance Passive Radiative Cooling Meta-fabric with Janus Wettability and Thermal Conduction. *Small*, **20**, Article 2403751. https://doi.org/10.1002/smll.202403751

[38] Perrakis, G., Tasolamprou, A.C., Kenanakis, G., Economou, E.N., Tzortzakis, S. and Kafesaki, M. (2021) Combined Nano and Micro Structuring for Enhanced Radiative Cooling and Efficiency of Photovoltaic Cells. *Scientific Reports*, **11**, Article 11552. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91061-1

[39] Xiao, Y., Ma, C., Sun, T., Song, Q., Bian, L., Yi, Z., *et al*. (2025) Thermal Radiation Analysis of a Broadband Solar Energy-Capturing Absorber Using Ti and Gaas. *Dalton Transactions*, **54**, 4619-4625. https://doi.org/10.1039/d4dt03202k

[40] Cao, T., Lian, M., Liu, K., Lou, X., Guo, Y. and Guo, D. (2021) Wideband Mid-Infrared Thermal Emitter Based on Stacked Nanocavity Metasurfaces. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **4**, Article 015402. https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac3bb1

[41] Yu, W., Wang, B., Gong, Z. and Zhao, C. (2025) Independent Control of Spectral and Directional Emissivity with Multilayer Structures. *Advanced Optical Materials*, **13**, Article 2403086. https://doi.org/10.1002/adom.202403086