

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

新型红外隐身结构材料研究综述

左建坤, 潘美妍, 段辉高, 贾红辉, 胡跃强

引用本文:

左建坤, 潘美妍, 段辉高, 等. 新型红外隐身结构材料研究综述[J]. *光电工程*, 2023, 50(5): 220218.

Zuo J K, Pan M Y, Duan H G, et al. Review on new infrared stealth structural materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220218.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220218>

收稿日期: 2022-09-05; 修改日期: 2022-11-11; 录用日期: 2022-12-01

相关论文

Perfect electromagnetic and sound absorption via subwavelength holes array

Yanqin Wang, Xiaoliang Ma, Xiong Li, Mingbo Pu, Xiangang Luo

Opto-Electronic Advances 2018, 1(8): 180013 doi: [10.29026/oea.2018.180013](https://doi.org/10.29026/oea.2018.180013)

基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器

蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 唐紫依, 胡杰, 黄奕嘉, 李玲

光电工程 2022, 49(10): 220157 doi: [10.12086/oe.2022.220157](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220157)

用于可见光波段切趾成像的宽带消色差超表面滤波器

李柱, 王长涛, 孔维杰, 王彦钦, 郭迎辉, 李雄, 马晓亮, 蒲明博, 罗先刚

光电工程 2021, 48(5): 200466 doi: [10.12086/oe.2021.200466](https://doi.org/10.12086/oe.2021.200466)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220218

新型红外隐身结构材料研究综述

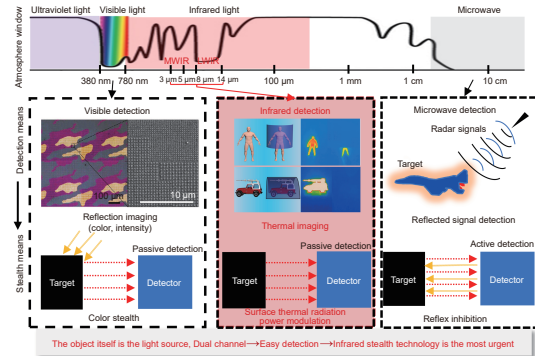
左建坤¹, 潘美妍², 段辉高^{1,3},
贾红辉¹, 胡跃强^{1,4*}¹湖南大学机械与运载工程学院国家高效磨削中心,
湖南长沙 410082;²季华实验室, 广东佛山 528200;³湖南大学粤港澳大湾区创新研究院,
广东广州 511300;⁴湖南大学深圳研究院微纳光学器件先进制造实验室,
广东深圳 518000

摘要: 随着军用光电技术的快速发展, 隐身技术在现代作战体系中的作用日趋重要, 其中, 隐身材料对于提高隐身性能至关重要。本文针对红外隐身材料, 重点从单波段的红外隐身、多波段兼容的红外隐身、动态的红外隐身三方面综述了国内外红外隐身材料的研究进展, 就微纳结构大面积柔性加工方法进行了深入分析。归纳了当前红外隐身材料存在的主要问题, 并展望了未来发展趋势。未来, 红外隐身材料将向着高强度、大面积、柔性化、智能化的新型结构和材料方向进一步发展, 实现高性能的隐身功能。

关键词: 红外隐身; 超构表面; 法布里珀罗腔结构; 光子晶体; 微纳制造

中图分类号: TB34

文献标志码: A



左建坤, 潘美妍, 段辉高, 等. 新型红外隐身结构材料研究综述 [J]. 光电工程, 2023, 50(5): 220218

Zuo J K, Pan M Y, Duan H G, et al. Review on new infrared stealth structural materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220218

Review on new infrared stealth structural materials

Zuo Jiankun¹, Pan Meiyang², Duan Huigao^{1,3}, Jia Honghui¹, Hu Yueqiang^{1,4*}¹National Research Center for High-Efficiency Grinding College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;²Jihua Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, China;³Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou, Guangdong 511300, China;⁴Advanced Manufacturing Laboratory of Micro-Nano Optical Devices, Shenzhen Research Institute, Hunan University, Shenzhen, Guangdong 518000, China

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2022-11-11; 录用日期: 2022-12-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3600500); 国家自然科学基金资助项目 (52005175, 62105120); 深圳市优秀科技创新人才培养项目 (RCBS20200714114855118)

*通信作者: 胡跃强, huyq@hnu.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Abstract: With the rapid development of military optoelectronic technology, the role of stealth technology in modern combat systems is becoming more and more important, among which, stealth materials are crucial to improve stealth performance. We focus on infrared stealth materials and review the research progress of domestic and foreign infrared stealth materials from three aspects including single-band infrared stealth, multi-band compatible infrared stealth, and dynamic infrared stealth, and provide an in-depth analysis on the large-area flexible processing methods for micro-nano structures. The main problems of current infrared stealth materials are summarized and the future development trend is foreseen. In the future, to achieve high-performance stealth functions, new infrared stealth materials will further develop in the direction of high strength, large area, flexibility, and intelligence.

Keywords: infrared stealth; metasurface; F-P cavity structure; photonic crystal; micro-nano fabrication

1 引言

隐身技术亦称低可探测技术或目标特征控制技术, 是降低目标与背景间的信号差异的一种手段, 一旦将目标与背景的探测信号变为相似或一致时, 即为隐身^[1]。在军事战斗中, 隐身技术广泛应用于各种导弹、无人机等装备, 敌方探测系统难以识别或检测距离逐步缩短, 提高作战人员的隐蔽性, 增大敌方的作战难度, 对军事战斗的胜利起着至关重要的作用。隐身技术与探测技术是相互发展、相互制约的关系, 一般根据探测技术的发展需求探索新的隐身技术。随着探测技术的迅速发展, 探测技术已经从微波探测拓展到红外、声波等波段。为应对多频段探测技术的需求, 隐身技术也提出了从单一波段隐身到多波段兼容隐身的高性能需求, 即兼容可见光隐身、红外隐身、激光隐身、雷达微波隐身甚至是全波段的隐身技术。

自然界中任何温度在绝对零度以上的物体, 如人体 (310 K)、白炽灯 (3000 K)、太阳 (6000 K)、宇宙 (3 K) 源源不断向外发射红外电磁波, 亦称热辐射^[2]。考虑到物体发射红外电磁波的主动属性, 在大气窗口 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中波红外波段和 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 的长波红外波段中各种用于夜间成像、目标追踪和探测的功能器件被研发出来, 如红外光电传感器、热电元件、红外热像仪^[3] 等。红外探测是基于热成像原理, 加之物体本身就是红外光源, 因此红外探测在中波和长波两个大气窗口探测相对容易且具有抗干扰能力强和全天候工作等特点, 因而使各种军事目标和武器装备的安全受到严重威胁。为此, 降低装备红外发射和削弱敌方红外探测的红外隐身技术, 受到世界各国军事领域的高度重视。

2 隐身及探测技术的分类

隐身技术与探测技术是矛与盾的关系, 二者都是

围绕目标和背景两个对象进行展开, 探测是通过不断放大目标与背景的差异从而识别出目标, 隐身则是缩小两者的差异^[4-5]。依据探测方式探测技术有主动式探测和被动式探测, 主动探测由探测器自主释放探测信号, 信号经过目标发生反射或者散射被探测器探头侦测, 主动式探测主要有微波雷达探测、激光探测等。被动探测是直接测量探测对象本身发生的信号, 其探测隐秘好, 但易受环境干扰, 被动式探测主要有可见光探测、红外探测, 如图 1 所示^[6-7]。

可见光探测是利用光敏感器件将可见光辐射转换为电能或化学参量等参数, 进一步将信息转换为图像信息。可见光隐身是将目标在可见光的反射光谱调整至与周围环境融合从而降低可探测性, 动物为躲避天敌的追捕, 长期自然进化使得自身颜色和环境颜色相似。色彩隐身成本低、方便实现, 已成为常用的可见光隐身方式之一。红外探测通过接收目标与背景发射的红外电磁波, 经过红外光学系统及后续电路转换成图像信号, 将目标与背景进行可视化。红外探测有点源探测和成像探测两种方式, 点源探测主要与探测距离有关, 成像探测主要由目标与背景的辐射对比度决定红外探测效果。

点源探测^[8]:

$$R = (J\tau_a)^{1/2} [\pi/2D_0(NA)]^{1/2} \times [1/(\omega\Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)]^{1/2}, \quad (1)$$

其中, R 为探测到目标的最大距离; J 为目标辐射强度; τ_a 为大气透过率; D_0 为红外探测系统中光学系统的接收孔径; NA 为红外探测系统中光学系统的数值孔径; ω 为瞬时视场; Δf 为系统带宽; V_s 为信号电平; V_n 为噪声电平。

成像探测^[9]:

$$C = (E_T - E_B) / E_B, \quad (2)$$

其中, C 为辐射对比度; E_T 为目标的红外辐射量;

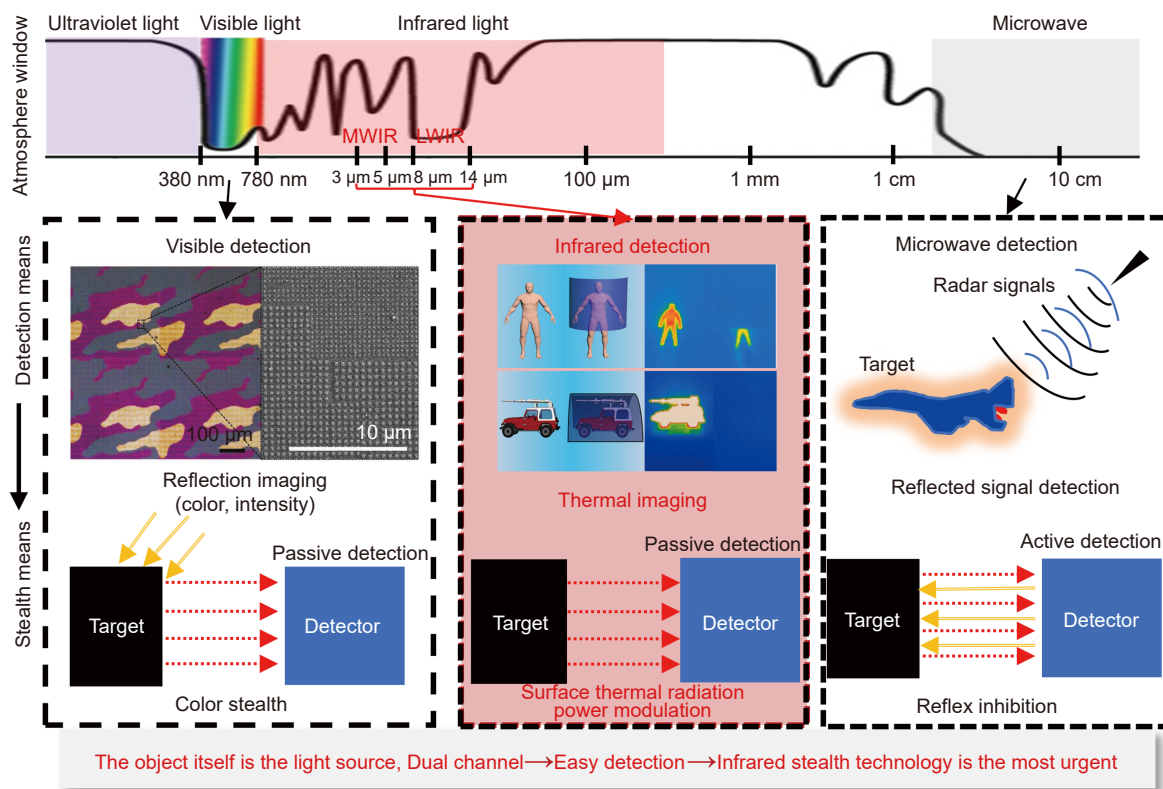


图 1 隐身及探测技术分类示意图^[6-7]

Fig. 1 Schematic diagram of the classification of stealth technologies^[6-7]

E_B 为背景的红外辐射量。

目标的红外辐射能量可通过斯特藩—玻尔兹曼定律近似表征：

$$J = \varepsilon\sigma T^4, \quad (3)$$

式中, J 为目标红外辐射总功率密度; ε 为目标表面的辐射率; σ 为玻尔兹曼常数; T 为目标表面的热力学温度。

若要降低目标被红外探测器识别的概率, 减小红外探测器的探测距离或是降低目标与背景的辐射对比度, 即可实现红外隐身的效果。1) 调控物体表面温度, 2) 调控物体表面辐射率, 3) 同时调控物体的温度与表面辐射率。

激光探测技术主要探测波段为 1.064 μm 、1.55 μm 、10.6 μm 波段, 激光隐身的原理一般与微波雷达隐身原理相似, 通常将发射的红外激光信号吸收, 探测器端接收不到信号实现目标隐身。近年来, 探测技术从单一波段探测不断向多波段探测发展, 配合卫星遥感技术, 结合光谱信息与图像信息, 发展出高光谱探测技术, 对隐身技术提出越来越高的技术要求。

3 国内外研究进展

3.1 单波段的红外隐身

对于降低目标的红外辐射总功率密度而言, 降低温度是最直接也是效益最高的一种方式, 通过采用控温材料, 如热绝缘材料等。采用新型的结构材料可对目标表面的温度分布进行设计, 实现与背景一致的热成像分布。

基于变换热学原理的红外隐身通过设计材料热导率的分布改变热流的路径和方向使高温或低温的物体不破坏原有的温度梯度从而实现对于物体的隐藏^[10-11]。如图 2(a) 所示, Li 等人^[12] 通过在传导系统中嵌入的热金属材料可以控制物体内部的热传导, 在给定的背景上使用结构化热表面对外部物体进行辐射伪装。该装置可以恢复其顶部任意的背景温度分布实现热隐身, 从而使热成像仪无法探测到, 这一器件的设计可以满足复杂未知环境下的反探测和热辐射控制的需求。针对热源的隐身, Zhou 等人利用坐标变换将实际热源的热量转移到其他位置制造虚拟目标, 通过红外成像设备可观测到几个不同的目标, 如图 2(b), 2(c) 所示。

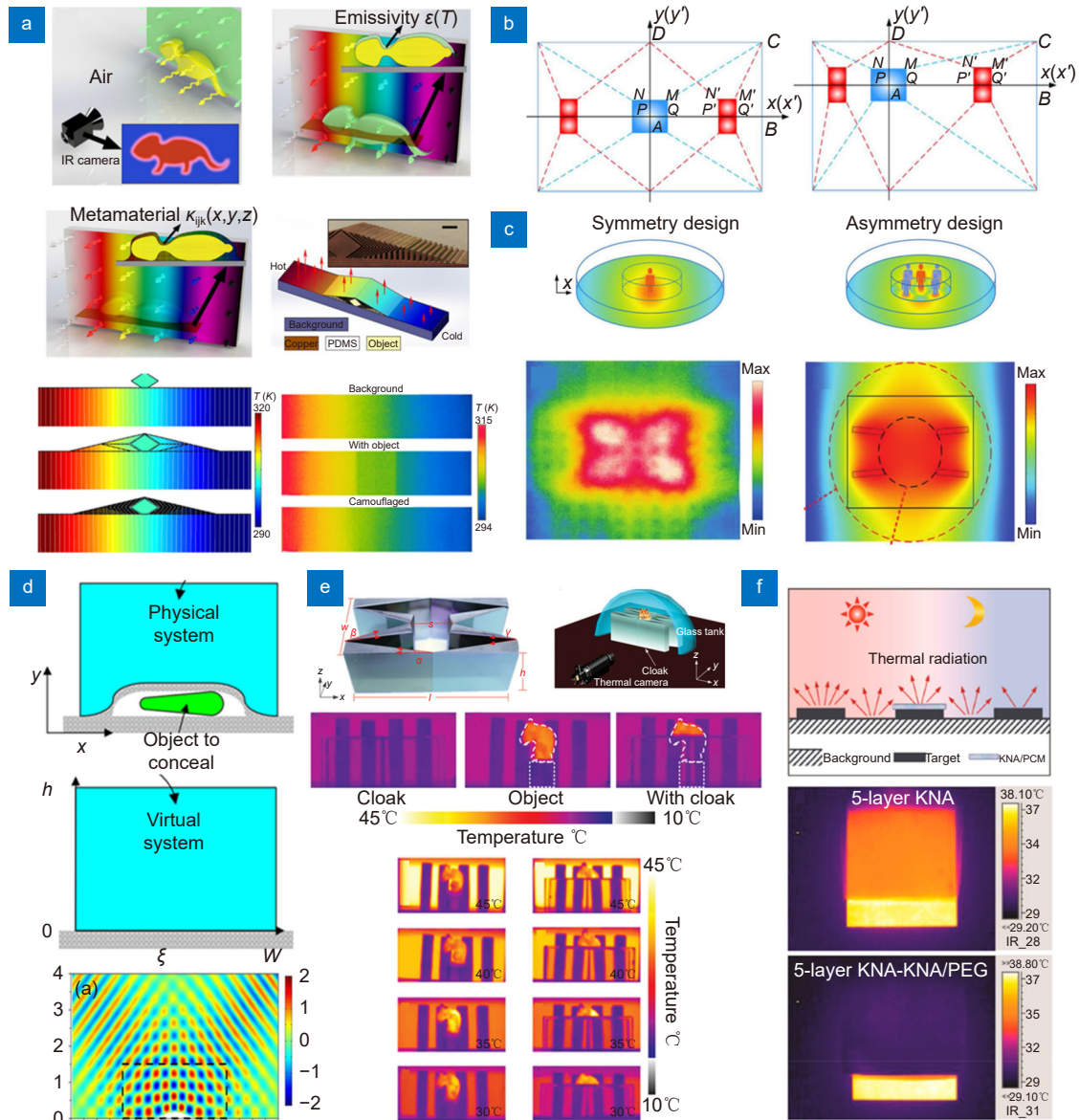


图 2 基于温度调控的红外隐身研究。(a) 结构化热表面^[12]; (b), (c) 虚拟目标的视觉混淆^[13-14]; (d) 隐身斗篷^[15]; (e) 远红外单向隐身斗篷^[16]; (f) 基于热绝缘材料的红外隐身^[17]

Fig. 2 Infrared stealth studies based on temperature modulation. (a) Structured thermal surfaces^[12]; (b), (c) Visual obfuscation of virtual targets^[13-14]; (d) Stealth cloak^[15]; (e) Far-infrared unidirectional stealth cloak^[16]; (f) Infrared stealth based on thermally insulating materials^[17]

此方式可以达到目标红外伪装并扰乱勘察的目的，通过设计合适的超表面结构实现复杂表面热导率分布^[13-14]。基于变换热学原理的隐身技术可以对探测器造成一定干扰，可实现对任何形状物体的伪装。

基于变换光学原理的红外隐身技术通过对物理空间与虚拟空间的坐标变换，设计相应的电磁参数，从而改变光线的传播路径，造成视觉死区，实现对任意形状物体的隐身。2008年Pendry等人基于变换光学设计出一种新型的斗篷，可以对所有被斗篷覆盖的物

体进行隐身^[15]，如图2(d)所示。2015年Shen等人基于光学坐标变换和光学保角变换的基础上，对空气环境中的大型远红外单向隐身斗篷进行了实验演示^[16]，该斗篷由锗材料制成，当面对入射波方向时，可以平滑地引导红外波绕过隐藏物体，可实现大尺度物体的隐身，是一种能够躲避热探测的远红外隐身器件，如图2(e)所示。基于变换光学方法实现红外热隐身不需对背景温度进行预先测量，可以实现任意背景温度分布的热隐身。

在目标表面覆盖热绝缘材料, 可有效隔绝热量的传递, 从而减少目标发射的红外辐射强度。二氧化硅气凝胶、凯夫拉尔纳米纤维气凝胶等热绝缘材料, 其在红外波段均具有不透明的特性。如图 2(f) 所示, Jing 等人利用热绝缘材料凯夫拉尔纳米纤维气凝胶与聚乙二醇等相变材料结合制备复合薄膜^[17], 复合薄膜具有较高的热管理能力和与各种背景相匹配的红外发射率, 在太阳光照变化的室外环境中表现出较高的红外隐身性能。

对于单一波段的红外隐身而言, 调控目标表面辐射率主要采用低辐射率材料如贵金属金、银、半导体、合金等材料。Huang 等人设计制备 Au/Ni 多层膜, 在 600 °C 工作后仍保持较低的发射率^[18]。Yan 等人以粘合剂聚氨酯 (PU) 和铝 (Al) 填料制备了低红外发射率涂料^[19]。Huang 等人在三组不同表面粗糙度的镍合金基底上溅射制备了用于高温应用的低发射率金薄膜^[20]。以上研究工作制备的低发射率材料可实现在红外波段低辐射率, 降低目标的红外辐射强度。由于在整个红外波段均保持低的辐射率, 易导致器件热量的积累。

单波段的红外隐身材料可以降低红外探测器发现识别目标的概率, 然而, 其均易造成热稳定性差, 难以兼容可见光、激光雷达等波段的隐身。

3.2 多波段兼容的红外隐身

多波段兼容的红外隐身主要是基于对材料红外发射率的调控设计, 通过对材料结构进行合理的设计, 在大气窗口 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 波段实现低的辐射率, 在非大气窗口 5 μm ~8 μm 波段达到高的辐射率进行辐射散热, 维持热稳定性。结合多波段内的光谱调控和吸波材料, 可实现可见光、红外激光、微波雷达等波段的隐身, 主要有基于光子晶体结构的红外隐身、基于 F-P 腔结构的红外隐身、基于超构表面的红外隐身。

3.2.1 基于光子晶体结构的红外隐身

光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列形成的微结构。如图 3(a) 所示, Zhang 等人采用光学镀膜技术, 在石英衬底上交叠沉积 Ge 和 ZnS 薄膜, 成功制备了 Ge/ZnS 一维异质结构光子晶体^[21]。Ge/ZnS 光子晶体在大气窗口 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 平均发射率分别低至 0.046 和 0.190, 在非大气窗口 5 μm ~8 μm 的平均发射率高达 0.579。如图 3(b) 所示, 利用

光谱控孔原理和光子晶体的介质材料在雷达波段高透射率的特性, Zhang 等人^[22]利用 Ge、ZnSe 和 Si 材料设计出了一个掺杂结构的一维光子晶体, 结合雷达吸收材料, 实现了 8 μm ~14 μm 波段、红外激光 10.6 μm 、雷达波段的兼容隐身。在 8 μm ~14 μm 波段平均反射率达 89.5%, 在 10.6 μm 波长处反射率低达 39.8%, 在 7.8 GHz 和 18 GHz 之间, 雷达信号被强烈吸收。考虑到金属膜高温不稳定、制造工艺的特点, 以及良好的光谱选择性等因素, 如图 3(c) 所示, Wang 等人^[23]利用传输矩阵和遗传算法设计了一个 12 层的光子晶体结构, 该结构由耐高温性能良好的 SiO₂、TiO₂ 和 Ge 交替组成, 在 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 两波段的辐射率分别为 0.14 和 0.21, 在非大气窗口 5 μm ~8 μm 辐射率高达 0.86, 在温度从 300 K~1000 K 和入射角度 0°~60°变化过程中的红外隐身性能维持稳定。

为提高红外隐身材料的耐温性能, Zhu 等人^[24]结合 Ge/ZnS 光子晶体和热绝缘材料二氧化硅气凝胶实现高温下的红外隐身, 如图 3(d)。在目标温度为 873 K 时, 目标表面温度与辐射温度分别降低至 410 K 与 310 K。Ge/ZnS 多层膜具有良好的耐热性, 在温度为 623 K 可保持一个小时的性能稳定。利用光子晶体在微波波段具有高透过率的特性, 该团队还设计制备出一种多光谱兼容红外隐身光子晶体结构, 结合波长选择性吸收/辐射器和微波吸收超表面, 实现在中红外、可见光、激光雷达 (1.5 μm 、10.6 μm) 和微波多个光谱范围的兼容隐身, 具备在非大气窗口的高效辐射散热的功能^[25], 如图 3(e)。波长选择性吸收/辐射器基于表面硫化锌单层减反层和锗/硫化锌一维光子晶体, 微波吸收超表面是由 Cu-ITO-Cu 三层结构超表面实现微波的高吸收功能。温度 373 K 时, 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 波段平均辐射率分别为 0.11 和 0.12, 非大气窗口波段平均辐射率为 0.61, 8 GHz~12 GHz X 波段电磁波吸收率大于 85%, 温度在 50 °C~300 °C 的范围内可稳定维持多波段的隐身性能。

光子晶体作为一种新型的人工周期结构功能材料, 在雷达波段具有高透射率, 结合雷达吸波材料, 利用光谱控孔原理以及准周期结构叠加等方式, 可同时实现可见光、红外、激光及雷达多波段兼容隐身。但是, 由于光子晶体层数较多、尺寸较大、加工制备复杂, 在 5 μm ~8 μm 波段光谱振荡严重, 散热性能有待提高, 易形成热应力等问题。

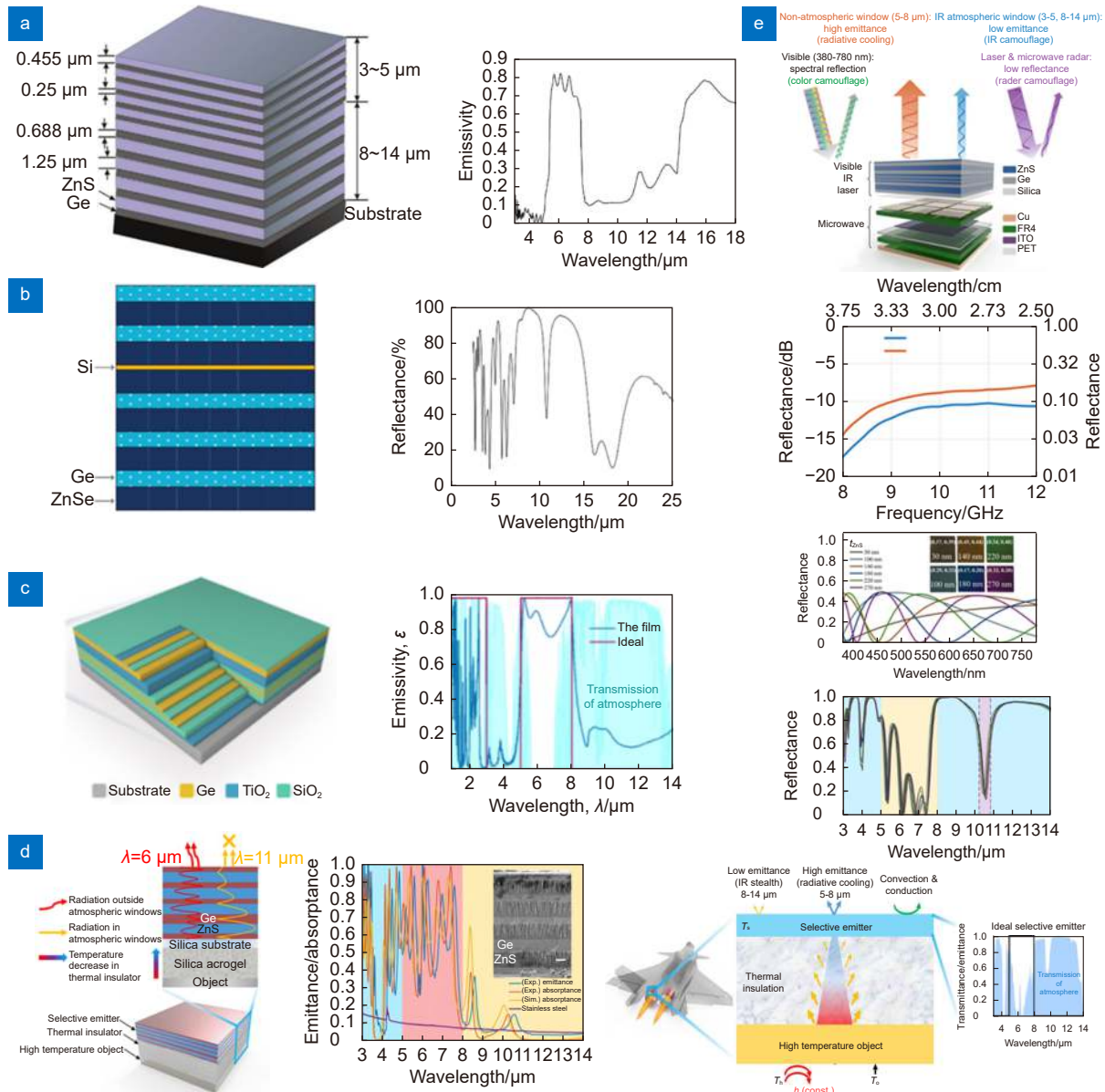


图 3 基于光子晶体结构的红外隐身研究。(a) Ge/ZnS 光子晶体结构^[21]; (b) Ge、ZnSe、Si 光子晶体结构^[22]; (c) SiO₂、TiO₂、Ge 交替结构^[23]; (d) Ge/ZnS 光子晶体结构^[24]; (e) 多光谱兼容光子晶体结构^[25]

Fig. 3 Infrared stealth research based on photonic crystal structures. (a) Ge/ZnS photonic crystals^[21]; (b) Ge, ZnSe, Si photonic crystals^[22]; (c) SiO₂, TiO₂, Ge alternating multilayer structures^[23]; (d) Ge/ZnS photonic crystal structures^[24]; (e) Multispectral compatible photonic crystal structures^[25]

3.2.2 基于 F-P 腔结构的红外隐身

基于 F-P 腔结构的红外隐身材料主要利用超薄金属的隧道效应与谐振腔相结合^[26], 如图 4(a) 所示, Peng 等人提出了一种基于银锗 F-P 腔多层膜的红外隐身选择性发射器, 在大气窗口 3 μm~5 μm 和 8 μm~14 μm 辐射率分别为 0.18 和 0.31, 非大气窗口辐射率高达 0.82, 进行辐射致冷从而维持器件的热稳定性, 在环境温度高达 200 °C 时可维持隐身性能的稳

定^[27]. 与低辐射率材料相比, 选择性辐射器在真空和实际环境中表现出更高的辐射冷却效果, 在红外相机上表现出更低的表现温度, 该选择性发射器具有制造简单, 易于大面积制造的优势. Zhang 等人采用氧化锡透明导电膜和硫化锌介电膜组成复合四层光谱选择性辐射结构^[28], 如图 4(b) 所示. 半透射 ITO 薄膜的损耗层和顶层增透 ZnS 薄膜来主要调节选择性发射率, 通过试验测得在 2.5 μm~3 μm 和 5 μm~8 μm 双波

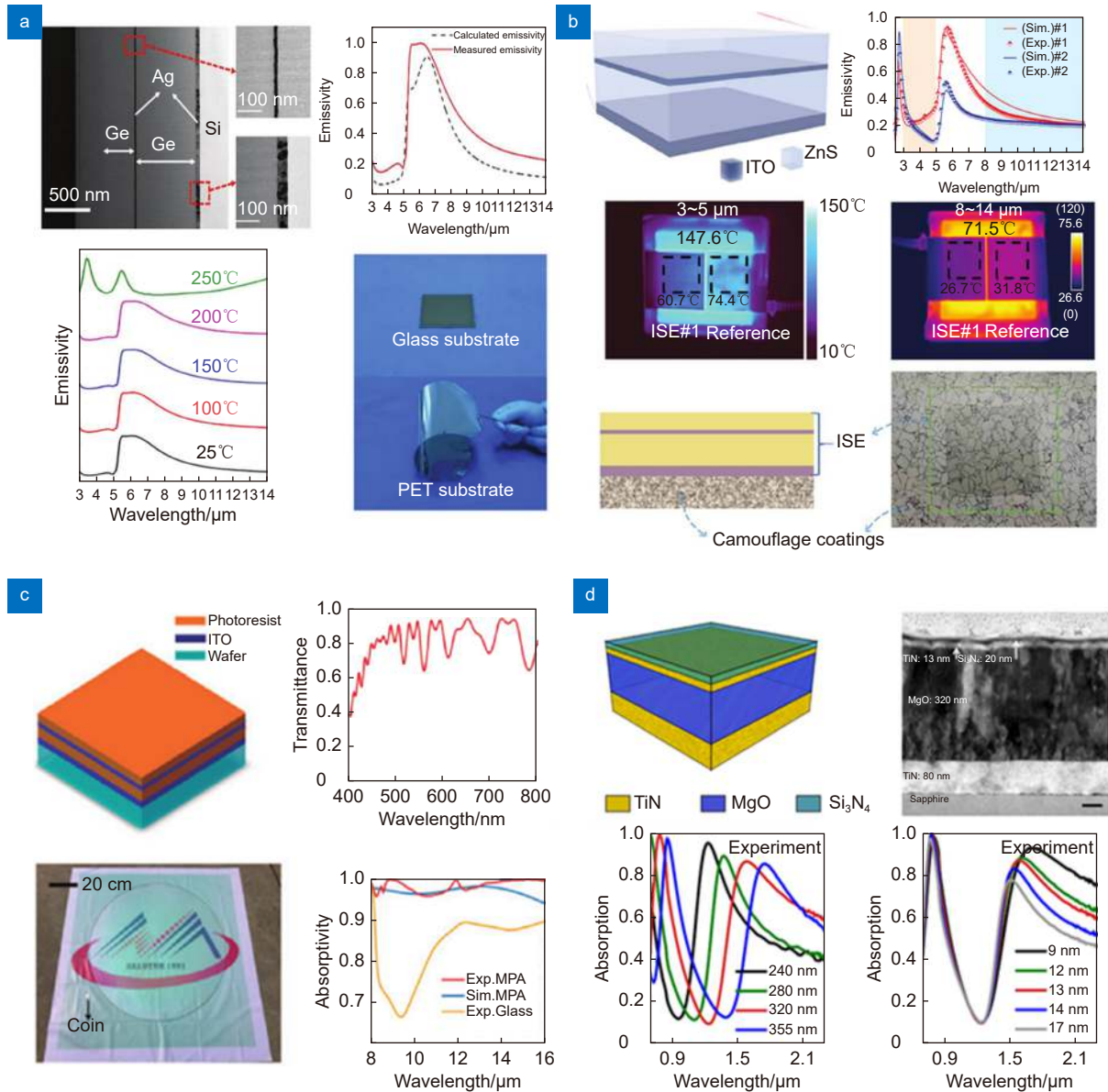


图 4 基于 F-P 腔结构的红外隐身研究。(a) Ag/Ge 多层膜的红外隐身选择性发射器^[27]；(b) 氧化锡铟透明导电膜和硫化锌介电膜复合四层结构^[28]；(c) 光刻胶和氧化锡铟四层交替结构^[29]；(d) Si₃N₄-TiN-MgO-TiN 四层结构^[30]
 Fig. 4 Infrared stealth research based on F-P cavity structures. (a) Infrared stealth selective emitter with Ag/Ge multilayer films^[27]；(b) Composite four-layer structure with transparent conductive films of indium tin oxide and dielectric films of zinc sulfide^[28]；(c) Alternating four-layer structure with photoresist and indium tin oxide^[29]；(d) Si₃N₄-TiN-MgO-TiN four-layer structures^[30]

段展示了优异的高发射率，在可见光波段 400 nm~780 nm 实现了高的透过率为 67.5%。在温度高达 700 K 的情况下，其隐身性能均保持稳定。

从结构简单、便于大面积制造和低成本制造的角度出发，Huang 等人^[29]设计出光刻胶-氧化锡铟四层交替结构，该结构在可见光波段具有高达 80% 以上的透过率，在 8 μm~16 μm 波段具有 90% 以上的吸收率，在入射角度达 60°时，其性能也基本保持稳定，

并实现了直径为 80 cm 圆盘样品加工制造，如图 4(c) 所示。氮化钛熔点高，且易与 CMOS 兼容，和低损耗金属金相比，氮化钛可允许在更高的温度下应用。如图 4(d) 所示，Roberts 等人^[30]利用氮化钛设计的 Si₃N₄-TiN-MgO-TiN 四层结构，氧化镁用于间隔层，氮化硅用作保护覆盖层。在 1070 K 的温度下表现出极好的稳定性，可实现近红外波段高的热发射率，但是辐射率调控范围过窄。

基于 F-P 腔的红外隐身多层结构, 由于其结构简单, 加工方便, 结合各种特殊材料如石墨烯、相变材料^[31]等, 可设计出性能优异的新型红外隐身结构材料。然而, 基于 F-P 腔的多层结构的光谱调控自由度较小, 难以设计出兼容多波段的复杂光谱。

3.2.3 基于超构表面的红外隐身

超构表面 (Metasurface), 即二维的超材料, 是由亚波长尺度的结构单元构成的人工微结构平面阵列。通过适当的结构单元的设计排列与材料选择, 以超薄、平面可集成的独特几何构型在亚波长空间尺度上对电磁波基本维度及传播模式等有效操控。此外, 基于亚波长结构的人工材料可以实现天然材料与传统复合材料难以实现甚至不能实现的新颖功能, 例如负折射率材料^[32-33]、日间辐射制冷材料^[34-35]、手性材料^[36-37]以及电磁隐身材料^[38-39]等。亚波长结构与电磁波相互作用存在多种作用模式, 如激发表面等离激元^[40-41]、导模共振^[42-43]、Fano 共振^[44]与声子谐振^[45]等。超构表面极大地降低了超材料的制造复杂性^[46-50], 具有更好的集成度并且更易于加工制备, 使其更容易组装和适用于片上集成的芯片中。

在红外隐身领域利用超构表面对热辐射的光调控主要基于光学电磁谐振原理, 结合结构的尺寸、形状、材料等实现对热辐射光谱的调控。表面等离激元共振是金属中自由电子的集体振荡, 可有效地将光耦合到金属微纳结构中, 有局域表面等离激元和传播表面等离激元。局域表面等离激元存在于金属微纳颗粒中, 金属微纳粒子的强辐射阻尼导致宽共振光谱。传播表面等离激元通常在高折射率棱镜的作用下或通过构造光栅结构在金属和电介质的界面处电子作为纵波传播。传播表面等离激元模的近场衰变长度是局域表面等离激元模的 40~50 倍^[51]。超构表面对表面等离激元的激发主要通过微纳颗粒的散射或者光栅结构的衍射提供空间波矢。为了使得超构表面具有理想的响应光谱, 往往需要激发多种共振模式相互耦合, 如具有多个堆叠的微纳结构金属阵列激发的 F-P 腔共振模式、线宽非常窄的表面晶格共振模式, 离散状态与连续体相互作用的法诺共振模式, 金属微纳颗粒接近金属膜或另一金属微纳颗粒时近场耦合产生的间隙模式等^[52]。在红外和可见光波段中磁谐振一般在介质的内部响应, 可由结构中金属辅助产生和加强。

如图 5(a) 所示, 利用超表面独特的相位调控能力, 不仅能实现类似于隐身地毯的功能, 也能突破变换光

学的宽带局限, 实现宽带隐身。Ni 等人^[53]提出了一种基于超表面的隐身地毯, 在三维任意曲面上设计具有反射相位调制能力补偿能力的超表面, 实现任意曲面下物体的电磁隐身。如图 5(b) 所示, Lee 等人^[54]提出了一种基于 Au-ZnS-Au 圆盘三层结构的超表面结构来调控光谱热辐射率实现红外隐身, 在 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 波段范围内实现低的辐射率, 在 5 μm ~8 μm 波段内实现高的辐射率进行辐射散热, 在圆盘直径为 7.95 μm 时辐射率高达 0.952。通过对圆盘直径的改变可调整共振峰值的位置, 从而实现对特定波长电磁波进行吸收, 但是散热能力有限。Kim 等人^[55]提出了基于 Ag-PI-Ag 三层结构超表面, 实现了中波红外和长波红外以及 1.54 μm 红外激光兼容的双波段隐身, 如图 5(c) 所示。在 1.54 μm 处是中心银圆盘产生的表面等离子体极化共振峰处, 能够降低 90% 的激光散射, 实现对激光制导弹的隐身。在 6.2 μm 处是由周围银圆环产生的磁极化共振峰, 其发射率极高, 用于将积累的热量进行辐射散热。对长波红外和中波红外的信号抑制可达 92% 以上, 从室温到 500 $^{\circ}\text{C}$ 转变过程中, 对长波红外和中波红外的信号抑制可达到 90% 以上, 表现出了一定耐高温的稳定性。

如图 5(d) 所示, 为应对多波段探测器的难题, Kim 等人^[56]提出兼容红外和微波隐身的分层超材料, 通过分层的超表面在 5 μm ~8 μm 波段实现了高的发射率, 在 6.67 μm 峰值辐射率高达 0.87, 将积累的热量散发出去保证了整个器件的热稳定, 在目标红外波段 (8 μm ~20 μm) 波段平均辐射率为 0.14, 结合吸波材料, 在微波 (2.5 cm~3.8 cm) 将特征信号水平降低达 99%, 平均吸收率高达 0.94, 该分层超表面结构实现了在红外和微波波段的兼容隐身。如图 5(e) 所示, Pan 等人^[57]设计出基于 Si-GST-Au 超构表面解决了红外隐身与辐射制冷、红外激光隐身、可见光迷彩隐身之间的光谱冲突。实验测得超构表面红外隐身材料在红外大气窗口 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 平均辐射率分别达 0.25 和 0.33, 10.6 μm 二氧化碳激光的吸收率达 0.9, 在非大气窗口 5 μm ~8 μm 平均辐射率达 0.77, 实现了热管理协同的多波段 (可见、红外、激光) 的同步隐身。Zhao 等人^[58]设计用于激光隐身和红外隐身的周期凹槽和不同尺寸的空腔及圆盘组成的全金属微纳结构, 在 1.064 μm 处由于圆盘电偶极子作用具有高的吸收率达 96.7%, 实现了对激光制导弹的隐身, 在大气

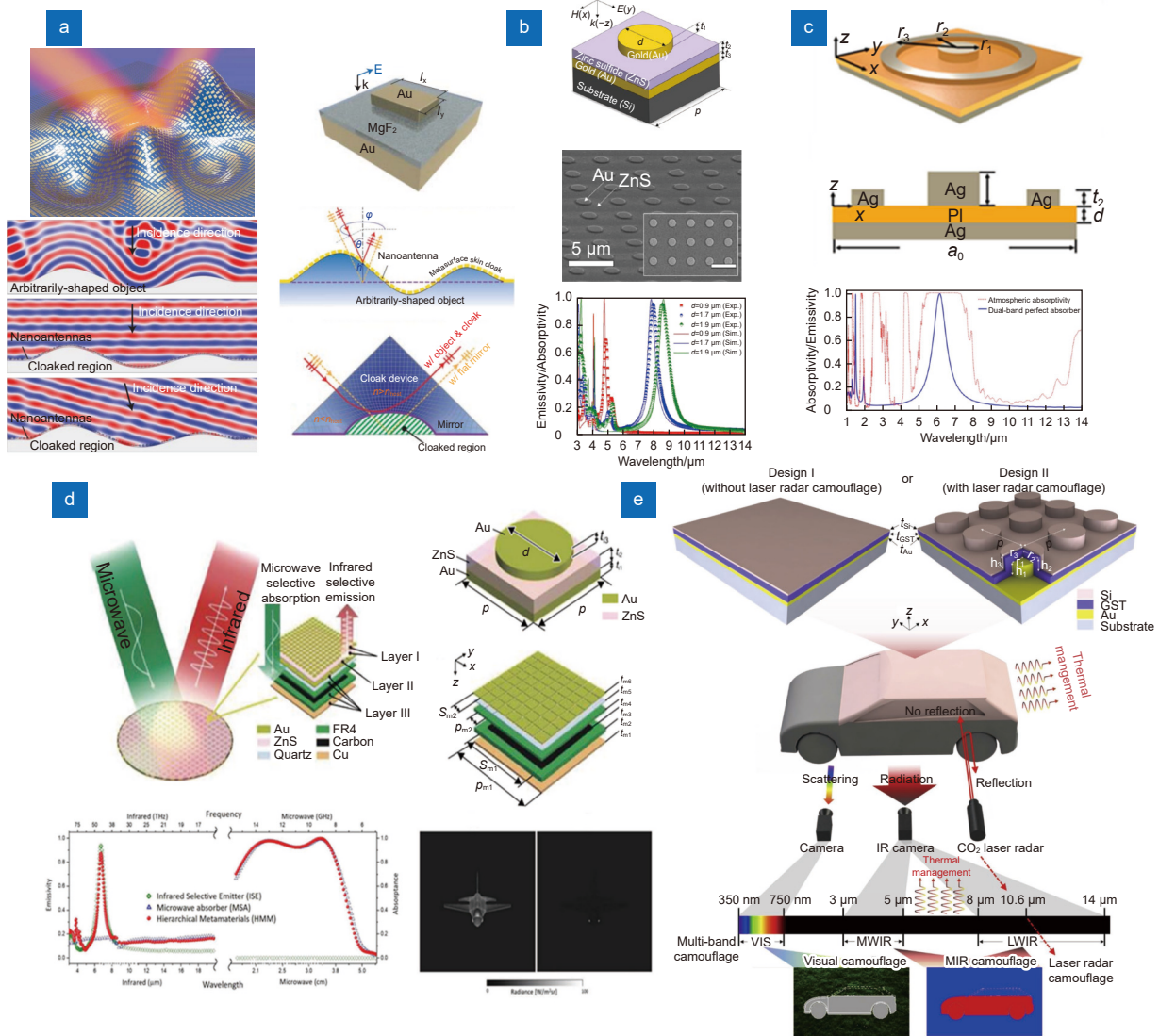


图 5 基于超构表面隐身材料的研究。(a) 超表面隐身地毯^[53]; (b) 圆盘超表面^[54]; (c) 圆环超表面^[55]; (d) 兼容红外和微波隐身的分层超表面^[56]; (e) 兼容可见光、红外、红外激光隐身的超表面^[57]

Fig. 5 Infrared stealth research based on metasurface structures. (a) Metasurface stealth carpet^[53]; (b) Disc metasurface^[54]; (c) Circular metasurface^[55]; (d) Metasurface compatible with IR and microwave stealth^[56]; (e) Metasurface compatible with visible, infrared, and laser stealth^[57]

窗口 3 μm~5 μm 和 8 μm~14 μm 具有低发射率。为实现在可见光波段的兼容隐身, Buhara 等人^[59]提出基于掺杂铟的氧化锡和氮化硼异质结构, 实现了可见光波段透明, 在短波红外波段实现高的吸收率, 在中波红外和长波红外实现了高的反射率的特性。

红外隐身的性能不仅取决于材料自身的辐射特性, 还受到外界热源的影响, 基于消除外界热源的影响和兼容多波段隐身的需求, Huang 等人提出了一种分层可见-红外-微波散射表面的多光谱隐身方案, 该设计减少了微波吸收产生的热量, 提高其克服外部热源影

响的能力^[60]。将铝和硅材料沉积到粗糙砂纸表面, 实现低红外发射率和低红外镜面反射率以及可见光颜色的可调谐性。采用铝板相位调控表面实现了在微波范围内的高散射, 两个相邻单元之间的反射相位差在(180±37)°的范围内, 8 GHz~13 GHz 范围内将雷达截面缩小在-10 dB 以下。由于材料属性和设计局限, 承受的最高温度在 100 °C 左右。Lee 等人通过组装柔性红外发射器和柔性微波吸收器, 设计了兼容红外和微波隐身的柔性组装超材料^[61]。作者以聚酰亚胺为衬底的金-氮化硅-金圆盘结构为红外发射器, 由于在介

质中的磁谐振在红外大气窗口形成一个窄带发射峰, 可进行辐射散热。微波通过缝隙传播到通过以铝金属衬底 PDMS 上的金结构微波吸收器实现了微波隐身。此外, 将红外发射器底层金膜分离 100 nm, 即断开脆性部分, 降低了机械应力从而提高了结构的柔性。然而, 由于非大气窗口散热波段过窄以及微波吸收的能量均易造成自身温度的积累升高, PDMS 材料的使用也会大大折扣超材料的耐高温性能。

为拓宽非大气窗口 5 μm ~8 μm 波段的发射率, 同时兼容多频段的隐身, 有研究工作在超构表面单元平面上叠加多个结构实现多峰干涉叠加。Zhang 等人^[62]通过两种不同尺寸的交叉形状的组合设计出金-石墨烯双波段的吸收器, 在中红外波段吸收效率高达 99% 以上, 在入射角 50° 范围内均可保持高的吸收率。Xu 等人^[63]在一个单元结构内设置 4 个几何形状相同尺寸不同的金属块, 通过调整金属块的尺寸获得不同的谐振频率, 实现多个相近吸收峰的叠加。在 3 μm ~5 μm 和 8 μm ~14 μm 波段范围内实现高反射率, 辐射率低至 0.06, 在大气吸收窗口 5.5 μm ~7.6 μm 波段范围内, 达到高吸收率和辐射率, 在 600 K 温度下, 辐射功率超过 7806 W/m², 实现了优异的降温性能。Zhao 等人^[64]提出 Au-ZnS-VO₂ 三层结构超表面在 5 μm ~8 μm 波段内相比于传统的低辐射率材料可辐射出 2.5 倍的热量。

在设计红外隐身超构表面的响应光谱时, 考虑到结构的可加工性和实际应用问题, 往往面临在非大气窗口光谱发射波段过窄造成散热效率过低等问题。由于在光吸收器领域需要超宽带吸收设计需求, 因此, 借鉴宽带吸收器的共振耦合机制, 可尝试应用于非大气窗口的发射光谱的拓宽工作。Cui 等人^[65]垂直方向上叠加 20 组金属 Au 和介质 Ge 锯齿形状结构, 基于慢光模式弱耦合共振的特性, 逐渐调整波导芯的宽度以此激发多个吸收峰进行叠加, 从而拓宽发射频段。由于模式在亚波长范围内具有局部共振, 因此吸收几乎与角度无关。该设计在红外波段 2.5 μm ~7 μm 中实现了在 0°~60° 的入射角度的超宽带的发射率, 发射效率约 95% 左右、带宽约 86%, 约为传统单波段吸收器的 5 倍。此外, 可以通过改变金属的填充率调整吸收光谱。Liang 等人利用 Au-Ge 在垂直平面上设计金字塔结构在介电层磁偶极共振耦合将入射能量捕获。TE/TM 波在入射角度为 $\pm 60^\circ$ 时, 发射度保持在 100% 左右, 理论上实现了偏振、角度不敏感以及全方位发

射的特性^[66]。Ji 等人在垂直平面上叠加交替 Ag-SiO₂ 矩形结构, 在结构波导锥形中的慢光模式增强光与物质相互作用, 实现对光的强/完美超宽带吸收, 并在实验上验证了不同结构参数下的吸收光谱的调控能力^[67]。

耐高温是红外隐身材料性能重要评价指标之一, 由于在实际的应用场景中, 红外隐身材料一般应用于武器装备高温部件中, 其不仅需在常规环境中发挥作用, 更需在多种极端条件中保持隐身性能的稳定。对于提高材料的耐高温性能, 主要可通过调控超材料的光谱, 提高在非大气窗口的散热效率从而对材料本身进行降温维持隐身性能稳定。此外, 还可结合耐热高熔点材料应用在超材料的设计中, 在高温下材料的光学特性不变, 从而保证结构响应光谱的稳定。在结合耐热材料的耐高温超构表面器件中光学吸收器有众多研究工作, Liu 等人^[68]在基于强等离子体共振的协同作用以及难熔金属的固有宽带光谱响应机理设计太阳能吸收器, 采用易获得的钛、钒、钨高熔点金属材料, 在温度高达 2000 K 和 3500 K, 器件的性能均保持稳定。Liu 等人^[69]将具有高熔点和高耐久性的 TiN 材料应用在太阳能吸收器设计中, 提高器件的热稳定性和兼容性。Li 等人^[70]采用耐火陶瓷二硼化钛和氧化铝设计一种温度不敏感的超材料微波吸收器, 由于氧化铝近乎恒定的介电性能和二硼化钛的良好导电性, 在超材料结构中感应电流通量激发出磁共振, 它在很宽的温度范围内产生强烈的微波吸收, 可以从室温下工作到 800 $^\circ\text{C}$ 维持性能的稳定。Qin 等人^[71]采用耐火高熔点材料设计 TiN 纳米结构和 Ti 薄膜的高效超宽带完美太阳能吸收器, 实现可见光和近红外波段宽带光的完美吸收。Li 等人^[72]提出了一种由金属 Ti-绝缘体复合多层 Al₂O₃ 堆叠组成的具有良好的热稳定性超宽带完美吸收器。此外, 由于宽带吸收器良好的特性将吸收器的频带转换拓展到需求频段也是红外隐身超表面可探索的方式之一^[73]。耐高温光学吸收器的研究为后续耐高温红外隐身超构材料提供了一种思路, 结合合适的耐火等离子体材料, 即在高温下物理和化学性能稳定的材料以增强材料的热稳定性并提高隐身性能。例如钛 (Ti)、钨 (W)、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钽 (Ta)、铂 (Pt)、铁 (Fe)、硅 (Si) 等具有高熔化温度的金属, 硼化锆 (ZrB₂)、氮化钛 (TiN)、碳化硅 (SiC)、氮化铝 (AlN)、氧化锌 (ZnO)、氧化钛 (TiO₂)、氧化铝 (Al₂O₃)、氧化硅 (SiO₂)、氟化镁 (MgF₂)、硫化钼

(MoS₂) 等多种难熔金属化合物^[74]。

基于超构表面结构的红外隐身材料, 依赖于超构表面的结构参数, 可通过调整其结构参数精确控制吸收峰位置, 具有自由度极高的光谱调控能力和光谱可设计性, 实现优于传统涂层不具备的光谱选择性能, 有望实现兼容可见光、红外、激光雷达甚至全波段的隐身。对于进一步发展大面积柔性功能的先进红外隐身超构材料具有极大潜力。多波段的红外隐身三种基本结构对比如图 6 所示^[24-57], 基于超构表面的红外隐身材料仍然停留在刚性/小面积原理演示阶段, 如表 1 所示。

3.2.4 动态的红外隐身

基于光子晶体、F-P 腔结构、超构表面, 结合自适应材料实现动态表面辐射率调控, 与静态热成像相比, 动态热成像在未来的应用场景中具有很大的实用性和前景。动态热隐身即在外外部刺激如电、光、温度、湿度、力等^[76]方式改变单元结构所用材料的折射率, 从而实现红外光谱的动态变化。

钒氧化物 (VO₂) 和 Ge₂Sb₂Te₆(GST) 相变材料, 通

过温度的改变实现相变的转换, 实现目标表面辐射率动态变化。如图 7(a) 所示, Xiao 等人^[77]提出了一种能够高效控制热辐射的有源隐形装置, 该装置基于纳米尺度厚度的 VO₂、石墨烯和碳纳米管三层结构组成, 可实现快速切换的热隐身, 具有低功耗和出色的可靠性。如图 7(b) 所示, Chandra 等人^[78]设计了一个多层的空腔耦合的红外吸收器, 通过利用 VO₂ 从半导体到金属的相变转变实现了多层空腔反射光谱的改变。如图 7(c) 所示, Tang 等人^[79]提出了一种基于钨掺杂的二氧化钒的薄膜结构, 实现动态调控辐射率。如图 7(d) 所示, Qu 等人基于相变材料 GST 提出了 GST-Au 两层结构, 通过对相变材料 Ge₂Sb₂Te₃ 加热使得 GST 从非晶态到晶态状态的转变, 材料热辐射率随波长的变化而变化^[80]。目标温度为 60 °C, 在背景温度从 30 °C~50 °C 的转变过程中, 视角从 0°~60°, 目标都实现了完美的隐身。此外, 具有图案 GST 表面可以编码空间信息, 使用热相机解码空间信息。通过控制 GST 从晶态到非晶态的相变(再结晶), 具有从高温到低温背景下工作的潜力。相变材料由于其优异的

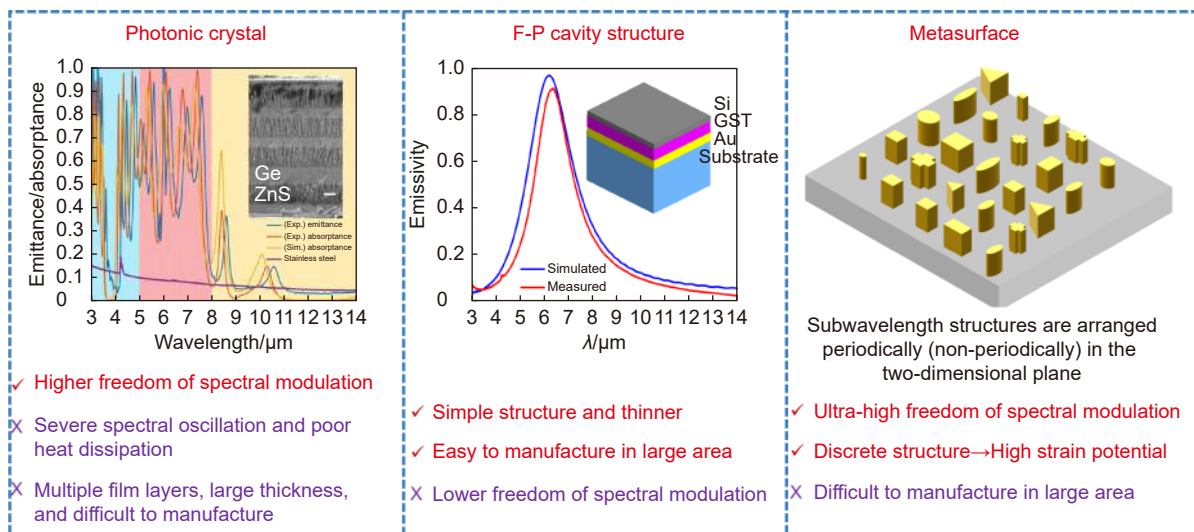


图 6 多波段的红外隐身三种基本结构对比^[24-57]

Fig. 6 Comparison of three basic structures for multi-band infrared stealth^[24-57]

表 1 文献报道的超构表面结构面积和柔性对比

Table 1 Comparison of structural area and flexibility of metasurfaces in the reported literature

Structure	Thickness/nm	Temperature resistant limit/K	Sample size/cm ²	Flexibility
Au-ZnS-Au ^[54]	~600	600	~1.69	None
Ag-PI-Ag ^[55]	~380	773	None	None
Au-ZnS-Au ^[56]	~600	None	~80	None
Au-GST-Si ^[57]	~1250	523	~1	Yes
Ag-BaF ₂ -W _x V _{1-x} O ₂ ^[75]	~1600	360	~4	Yes

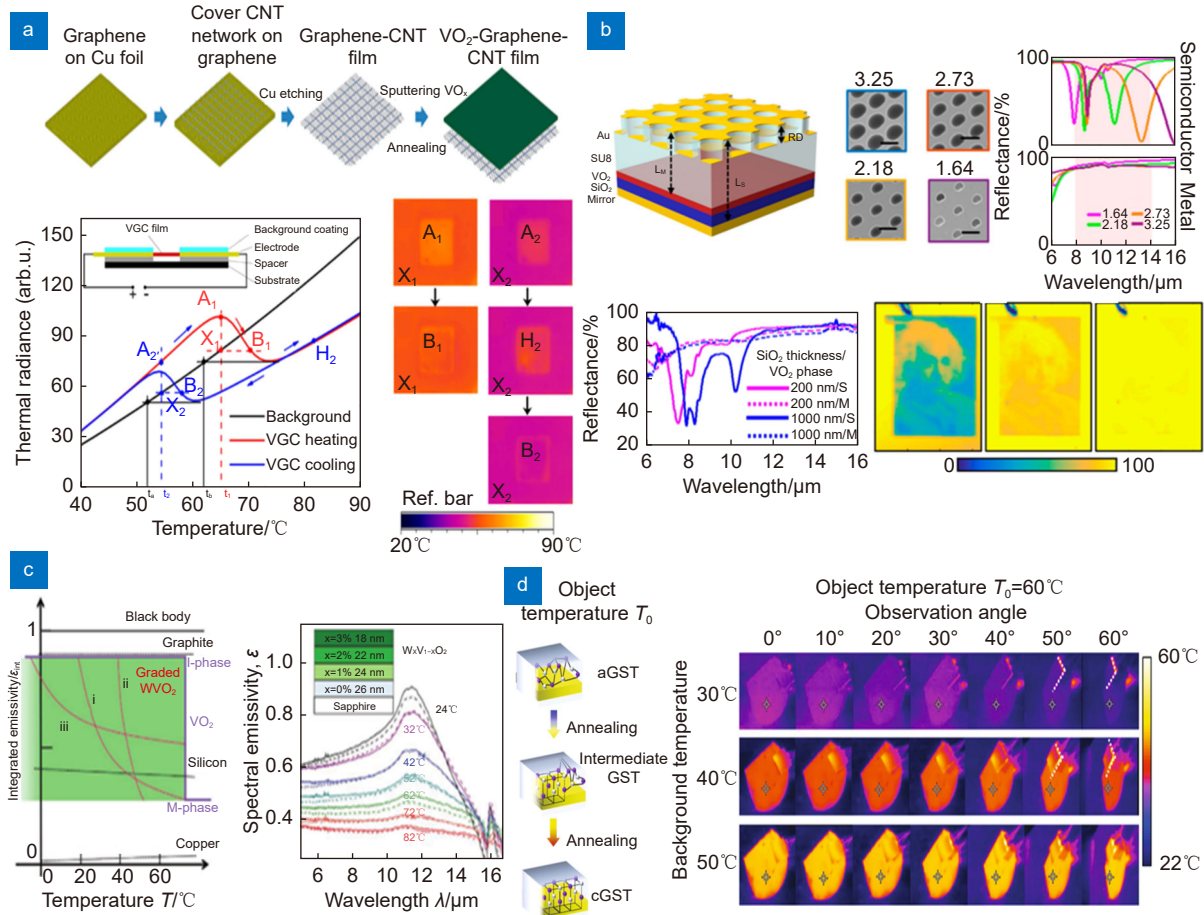


图 7 结合相变材料动态调控隐身材料应用实例。(a) VO₂、石墨烯、碳纳米管三层结构隐身装置^[77]；(b) 多层的空腔耦合的红外吸收器^[78]；(c) 钨掺杂的二氧化钒的薄膜结构^[79]；(d) GST-Au 两层结构^[80]

Fig. 7 Examples of combined phase change materials for dynamic modulation of stealth materials applications. (a) VO₂, graphene, and carbon nanotube trilayer structure stealth device^[77]; (b) Multilayer cavity-coupled IR absorber^[78]; (c) Thin film structure of tungsten-doped vanadium dioxide^[79]; (d) GST-Au two-layer structure^[80]

特性，在自适应隐身结构中被广泛应用。但是，相变材料有温度响应慢、可调辐射率范围太小等问题。

Inoue 等人提出了基于 n 型量子阱控制发射率动态控制热发射，速度比使用传统温度调制方法可能快四个数量级^[81]。基于 n 型量子阱中的子带间吸收的动态控制，子带间吸收通过光子晶体板中的光学谐振模式来增强。从量子阱中提取电荷载流子会导致在共振波长下发射率立即从 0.74 变化到 0.24，同时所有其它波长下保持更低的发射率。Nemati 等人^[82]提出了一种在反射模式下工作的电可调偏振不敏感调制器超表面，在可见光和近红外光谱中通过快速的电信号调制。超表面晶胞由圆形谐振器构成，该谐振器包括两个 ITO 盘和高介电常数钙钛矿钛酸铋膜。ITO 薄膜通过电子积累/耗尽以及施加偏置电压的电极充当主动调谐介质，磁偶极共振与累积层内部的耦合用于实

现反射光的总吸收。Salihoglu 等人^[83]基于通过非挥发性离子液体的多层石墨烯来调制材料红外发射率，能够在不改变表面温度的情况下，对整个红外光谱的热发射进行控制。整个结构重量轻、薄且柔韧，可以覆盖复杂结构表面。此外，作者通过将主动热表面与反馈机制相结合，实现了自适应热伪装系统，该系统可以在几秒钟内快速响应，与变化的背景快速融合。

Liu 等人提出了基于超材料微机电系统的人工热致变材料，随着温度的变化材料发生形变产生热应力，在温度为 623 K 时达到 81% 的峰值发射率，在室温下，结构表现出低发射率，但在一个设计的临界温度下，它的发射功率密度增加超过两个数量级，进行辐射致冷^[84]。Coppens 等人^[85]设计制造了一种由紫外线调制的大面积红外超材料。紫外光在光敏氧化锌间隔层中产生自由载流子，从而改变超材料的光学性质并

导致发射率局部增加。在紫外线照射期间, 由于发射率变化温度明显升高。Li 等人通过化学反应调节可见光谱和红外光谱中的表面发射率, 提出了一种基于纳米铂薄膜的动态热沉积装置^[86], 在电沉积之前, 铂膜显示出低反射和高发射率; 电沉积后, 银将逐渐沉积在铂膜上, 从而产生高反射和低发射率。这种高发射率和低发射率状态可以循环以实现动态热辐射调制。Mandal 等人^[87]提出了多孔聚合物涂层, 其光学透射率在与液体润湿时发生可逆变化, 其润湿后光散射减少, 使多孔聚合物从反射变为透明。

微纳结构在红外波段对电磁波调控的理论已有较多研究, 从单一波段、多波段、到宽波段均已实现了对材料发射率的控制。在实际工程应用, 隐身材料一般包覆于装备表面, 就隐身材料而言, 不仅需小面积实现良好的隐身性能, 还需在大面积保持稳定的隐身性能。由于机壳、武器装备的表面多是由曲面或是不规整的表面组成, 隐身材料需在可以实现柔性性能前提下而不影响隐身的性能。然而, 对于大面积柔性高

性能微纳红外隐身材料的制备仍然存在极大挑战。因此, 发展微纳结构大面积柔性制备工艺是解决这一难题的关键步骤。

3.3 微纳结构大面积柔性加工方法

纳米压印技术是实现微纳结构大面积加工制备的最有潜力的技术之一, 是一种利用机械力的方式实现大面积、低成本、高效率的工艺方法。将大面积纳米压印技术与纳米转印相结合, 有望实现大面积柔性微纳结构红外隐身材料的加工制备。

3.3.1 微纳模板制备

模板加工有直写光刻加工方法和自组装加工方法。传统光刻方法有电子束光刻、聚焦离子束光刻、干涉光刻、激光直写光刻^[88]等, 利用湿法刻蚀、干法刻蚀, 如离子束刻蚀、等离子体刻蚀、反应离子刻蚀等工艺, 将母模板制备加工出来。电子束光刻、聚焦离子束光刻、干涉光刻加工效率低, 成本高, 不适合产业化大面积发展。苏州大学光电科学与工程学院陈林森课题组^[89]在激光直写的基础上提出了 3D 激光直写

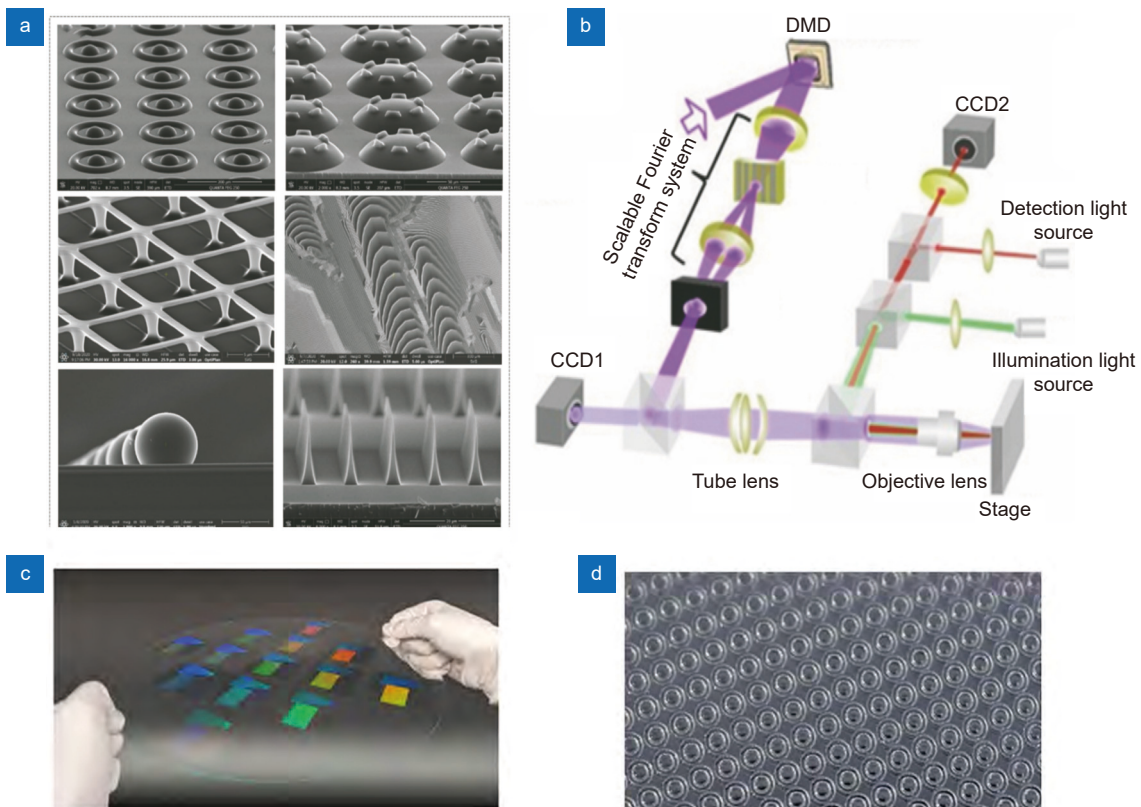


图 8 (a) 利用 3D 激光直写技术加工出的复杂图形; (b) 紫外连续变频光刻技术光路^[89]; (c) EVG 770NT 制备 300 mm 模板; (d) GL SR300300 mm 大面积母模板^[90]

Fig. 8 (a) Complex pattern processed by 3D laser direct writing technology; (b) UV continuous frequency lithography optical path^[89]; (c) 300 mm stencil prepared by EVG 770NT; (d) GL SR300300 mm large area master stencil^[90]

技术, 通过数字显微镜像素扫描积分的曝光的方法, 单次曝光无需对位套刻, 加工幅面可达 100 英尺, 即 254 cm, 最小加工线宽 500 nm 以上, 如图 8(a) 所示。紫外连续变频光刻技术, 激光经过扩束和准直, 通过傅里叶变换光学系统, 经物镜将干涉图样置于光刻胶上, 制备纳米周期结构特征尺寸达 90 nm, 最小像素尺寸为 5 μm , 实现大面积、跨尺度微纳结构的快速制备, 如图 8(b) 所示。EVG 公司利用 EVG 770NT 步进重复纳米压印设备制造大面积母模板, 生产制备 300 mm 模板, 如图 8(c) 所示。天仁微纳 GL SR300 步进式纳米压印设备, 从一个衍射光波导镜片模板制备的 300 mm 大面积母模板, 如图 8(d) 所示^[90]。

3.3.2 纳米压印技术

纳米压印是实现微纳结构大面积加工制备的最有潜力的技术之一, 是一种利用机械力的方式实现大面

积、低成本、高效率的工艺方法。纳米压印的概念是由美国华裔科学家周郁博士于 20 世纪 90 年代提出的^[91]。首先发展的是热压纳米压印技术, 在高温高压下, 利用热固性压印胶材料, 如 PMMA、PDMS、PET 等, 进行图案的转移。为降低高温高压的苛刻条件, 飞利浦实验室的 Haisma 等人提出基于紫外光固化材料的紫外压印技术^[92], 可在室温下一个大气压左右即可进行图案的转移。然而, 紫外压印技术最大的压印有效面积十分有限, 即不超过 1 英尺。为提高生产效率, 增大压印面积, 美国德克萨斯州的研究小组研究提出了步进闪光压印技术, 光敏材料可在几秒时间内完全固化, 压印模板可通过移动进行重复压印, 实现大面积的制备。如图 9(a) 所示, Ganesan 等人利用步进闪光压印技术制备的五个 1 cm \times 1 cm 的方块, 光栅宽度为 100 nm^[93]。

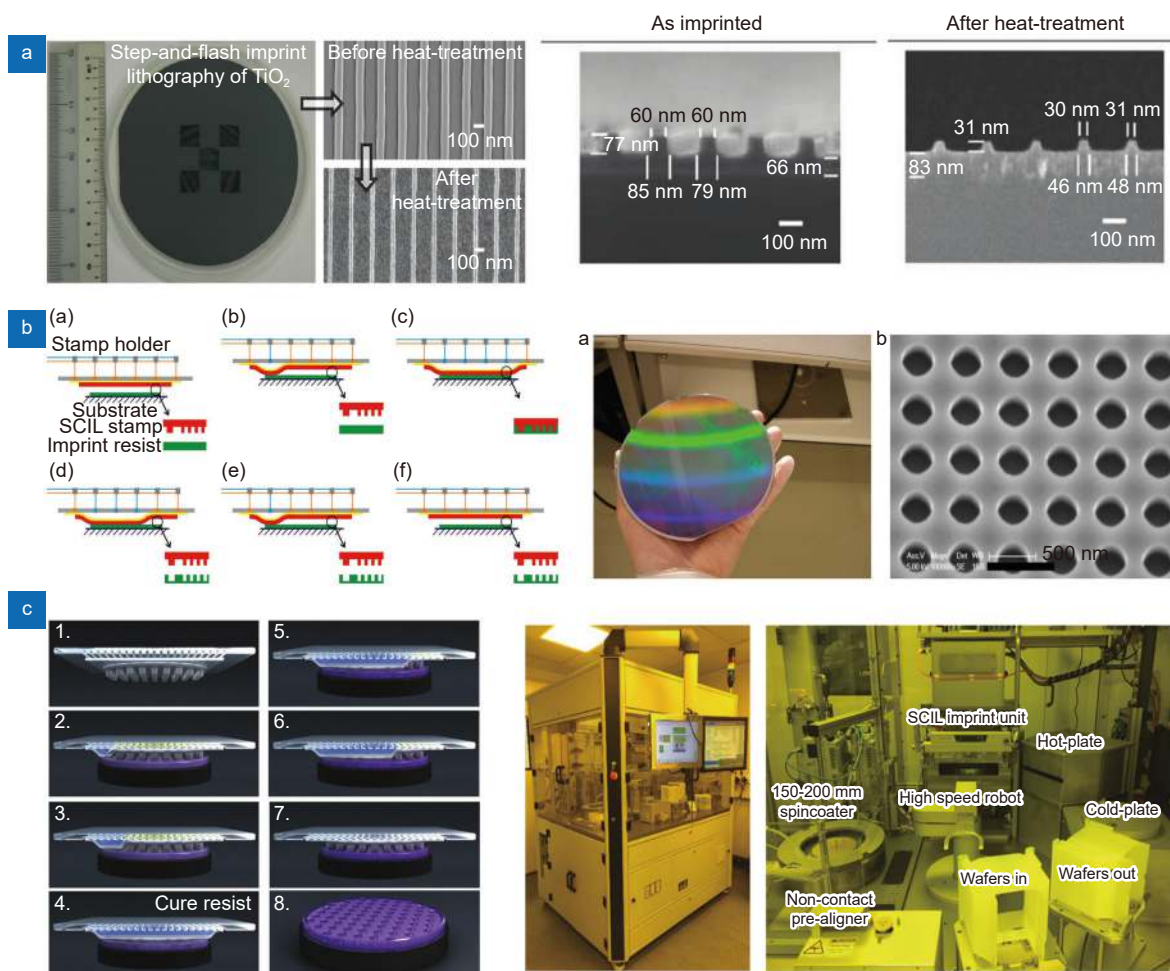


图 9 纳米压印技术研究示例。(a) 步进闪光压印技术压印的宽度为 100 nm 的光栅^[93]; (b) UV-SCIL 平板压印^[94]; (c) 晶圆级区域上实现亚 10 nm 的分辨率^[95]

Fig. 9 Examples of nanoimprinting technique studies. (a) Grating with a width of 100 nm embossed by step flash embossing technique^[93]; (b) UV-SCIL plate embossing^[94]; (c) Sub-10 nm resolution achieved on wafer-level area^[95]

为解决闪光压印的拼接缝、压力均匀等问题, 德国苏斯公司和飞利浦公司联合研发了基于软模板的紫外光固化基板完整纳米压印新技术 (UV-SCIL), 即平板压印, 通过平板式的模板进行压印。如图 9(b) 所示, Ji 等人利用该技术制备出了 6 inch (1 inch=2.54 cm) 面积基片上高分辨率纳米结构^[94]。Verschuuren 等人基于软印模的纳米压印方法可以在晶圆级区域上实现亚 10 nm 的分辨率, 新材料、工艺和工具的综合优势在大批量晶圆级生产工具中融合在一起, 每小时可生产高达 60 个晶圆, 如图 9(c) 所示^[95]。

基于柔性模板的压印优势的启发, Chou 等人提出的滚动式纳米压印技术, 发展出卷对平板的压印和卷对卷的压印技术。滚动纳米压印可解决多次压印的拼接问题, 改善压力不均匀和基底平整度造成的问题, 可实现在柔性基底上连续大面积的压印。如图 10(a) 所示, Ahn 等人^[96]提出了纳米光栅的大面积 (4 英寸宽) 连续压印, 使用一种新开发的设备, 能够在柔性卷材上进行卷对卷压印, 在柔性卷筒纸上进行卷对板压印, 实现在硬质或柔性基板上的大面积压印 300

nm 线宽光栅结构。Kim 等人^[97]利用卷对平板的纳米压印成功地实现大面积图案复制, 最小线宽为 3.5 μm , 单次压印面积 300 mm \times 400 mm, 如图 10(b) 所示。

3.3.3 微纳转印技术

将纳米转印与大面积纳米压印技术相结合, 可大大提高生产效率, 实现大面积柔性材料的制备。纳米转印通过上述所述的微纳模板加工方法制备出光刻胶母模板, 再通过刻蚀工艺和镀膜工艺, 如磁控溅射、电子束蒸镀、热蒸镀、原子层沉积、化学沉积、电铸将母模板制备成硬质模板^[98]。在镀膜工艺中, 为实现高效率大面积的镀膜工艺, 在传统原子层沉积基础上发展出空间隔离原子层沉积, 有旋转式沉积系统和平动式沉积系统, 能摆脱真空条件限制, 通过衬底快速运动, 实现在大面积柔性衬底上进行快速连续、均匀一致的薄膜沉积^[99]。

纳米压印技术将硬质模板结构复制到柔性基底, 通过镀膜工艺, 制备出转印载体, 将转印载体与柔性转印受体贴合压印, 在温度、光照、受力等条件下可将转印载体上的图形转印到柔性受体上, 此过程为纳

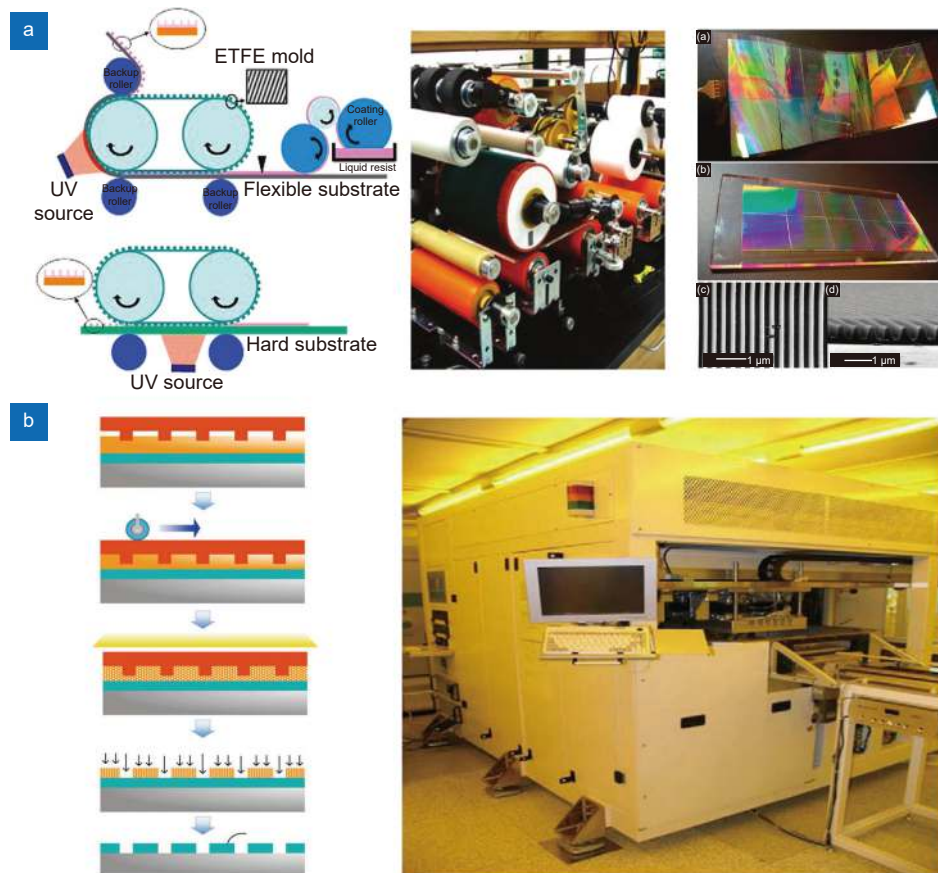


图 10 滚轴压印技术。(a) 卷对卷压印技术^[96]; (b) 卷对平板压印技术^[97]

Fig. 10 Roll-to-roll embossing technology. (a) Roll-to-roll embossing technology^[96]; (b) Roll-to-flat embossing technology^[97]

米转印技术。2002年 Rogers 课题组首次提出了纳米转印技术, 实现了金属层从转印载体到硅受体表面的转移^[100]。硬质模板的制备省去传统光刻工艺, 大大提高工作效率, 节约工作成本, 具有实现大面积柔性微纳材料的潜力。基于不同的压印条件, 发展出多种转印方法: 由剥离速度控制的转印技术、温度控制的转印技术、水辅助的转印技术、由接触面积控制的转印技术、加剪切力的转印技术、基于形状记忆的聚合物的转印技术、激光辅助的转印技术及磁辅助的转印技术等^[101]。转印技术的发展, 加速实现对大面积柔性微纳结构的制备。

4 结论与展望

新型红外隐身结构材料存在多频段兼容问题, 难以在实现红外波段隐身的基础上兼顾在可见光、红外波段、激光雷达、微波、全波段范围内的隐身, 多数研究工作主要集中在红外波段和红外激光的兼容隐身。在动态调控辐射率方面, 实际工程中满足动态调控辐射率是十分关键的一环, 由于实际外界环境是不断变化的, 固定的辐射率特性难以满足在多变环境下的红外隐身。由于微纳加工技术和结构材料本身复杂度的制约, 新型红外隐身结构材料的研究工作主要集中在小面积刚性的性能演示, 难以实现大面积柔性的加工制造。此外, 对于新型的红外隐身材料耐温性能也有待提高。

对新型红外隐身结构材料提出以下展望。1) 高强度方向发展: 在一些隐身材料应用场景如飞机、车辆、坦克等武器装备中, 材料将在极端的环境下发挥作用。因此, 新型的红外隐身材料须具有良好机械性能、耐高温、耐腐蚀、耐冲击力等。2) 大面积方向发展: 在实际的应用中, 需隐身的目标均是从厘米级到米级的应用, 大面积的新型红外隐身材料是未来发展的必然趋势。3) 柔性化方向发展: 不论隐身目标是装备部件还是服装穿戴, 实现共形隐身是隐身材料发展的关键一环。4) 智能化方向发展: 由于多波段探测技术的不断发展与整合和实际环境的苛刻要求, 实现实时动态的多波段智能隐身是隐身技术的重大需求。

参考文献

[1] Bahret W F. The beginnings of stealth technology[J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1993, **29**(4): 1377–1385.
 [2] Li W, Fan S H. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications [Invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(12):

15995–16021.
 [3] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Phys Technol*, 2011, **54**(3): 136–154.
 [4] Sun X C, Zhang T X, Li M. Moving point target detection using temporal variance filter in IR imagery[J]. *Proc SPIE*, 2007, **6786**: 67861Z.
 [5] Lu J H, Wang R F. The implementation method and the development tendency of infrared stealth technology[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9674**: 96741V.
 [6] Moghimi M J, Lin G Y, Jiang H R. Broadband and ultrathin infrared stealth sheets[J]. *Adv Eng Mater*, 2018, **20**(11): 1800038.
 [7] Kim J, Park C, Hahn J W. Metal–semiconductor–metal metasurface for multiband infrared stealth technology using camouflage color pattern in visible range[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(6): 2101930.
 [8] Fu W. Principle and application technology of IR stealth[J]. *Infrared Laser Eng*, 2002, **31**(1): 88–93.
 付伟. 红外隐身原理及其应用技术[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(1): 88–93.
 [9] Chen H, Yuan J T, Yang L. The study on infrared characterization and stealthy technology of ground targets[J]. *J Eng Thermophys*, 2007, **28**(5): 844–846.
 陈翮, 袁江涛, 杨立. 地面目标红外特性及其隐身技术研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, **28**(5): 844–846.
 [10] Choe H S, Prabhakar R, Wehmeyer G, et al. Ion write microthermotics: programing thermal metamaterials at the microscale[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(6): 3830–3837.
 [11] Han T C, Bai X, Gao D L, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(5): 054302.
 [12] Li Y, Bai X, Yang T Z, et al. Structured thermal surface for radiative camouflage[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 273.
 [13] Zhou S L, Hu R, Luo X B. Thermal illusion with twinborn-like heat signatures[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2018, **127**: 607–613.
 [14] Hu R, Zhou S L, Li Y, et al. Illusion thermotics[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(22): 1707237.
 [15] Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**(20): 203901.
 [16] Shen L, Zheng B, Liu Z Z, et al. Large-scale far-infrared invisibility cloak hiding object from thermal detection[J]. *Adv Opt Mater*, 2015, **3**(12): 1738–1742.
 [17] Baranov D G, Xiao Y Z, Nechepurenko I A, et al. Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters[J]. *Nat Mater*, 2019, **18**(9): 920–930.
 [18] Huang Z B, Zhou W C, Tang X F, et al. Effects of substrate roughness on infrared-emissivity characteristics of Au films deposited on Ni alloy[J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**(10): 3100–3106.
 [19] Yan X X, Xu G Y. Corrosion and mechanical properties of polyurethane/Al composite coatings with low infrared emissivity[J]. *J Alloys Compd*, 2010, **491**(1–2): 649–653.
 [20] Huang Z B, Zhou W C, Tang X F. Effects of annealing time on infrared emissivity of the Pt film grown on Ni alloy[J]. *Appl Surf Sci*, 2010, **256**(7): 2025–2030.
 [21] Zhang W G, Xu G Y, Zhang J C, et al. Infrared spectrally selective low emissivity from Ge/ZnS one-dimensional heterostructure photonic crystal[J]. *Opt Mater*, 2014, **37**: 343–346.
 [22] Zhang J K, Shi J M, Zhao D P, et al. Realization of

- compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals[J]. *Infrared Phys Technol*, 2017, **85**: 62–65.
- [23] Wang L, Yang Y, Tang X L, et al. Combined multi-band infrared camouflage and thermal management via a simple multilayer structure design[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(20): 5224–5227.
- [24] Zhu H Z, Li Q, Zheng C Q, et al. High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**: 60.
- [25] Zhu H Z, Li Q, Tao C N, et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 1805.
- [26] Peng L, Liu D Q, Cheng H F. Design and fabrication of the ultrathin metallic film based infrared selective radiator[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2019, **193**: 7–12.
- [27] Peng L, Liu D Q, Cheng H F, et al. A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(23): 1801006.
- [28] Zhang L, Wang J, Lou J, et al. A thermally robust and optically transparent infrared selective emitter for compatible camouflage[J]. *J Mater Chem C*, 2021, **9**(42): 15018–15025.
- [29] Huang Y J, Pu M B, Gao P, et al. Ultra-broadband large-scale infrared perfect absorber with optical transparency[J]. *Appl Phys Express*, 2017, **10**(11): 112601.
- [30] Roberts A S, Chirumamilla M, Wang D Y, et al. Ultra-thin titanium nitride films for refractory spectral selectivity [Invited][J]. *Opt Mater Express*, 2018, **8**(12): 3717–3728.
- [31] Kim M K, Lee D S, Yang Y H, et al. Switchable diurnal radiative cooling by doped VO₂[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(5): 200006.
- [32] Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, et al. Negative index of refraction in optical metamaterials[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(24): 3356–3358.
- [33] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 788–792.
- [34] Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, **355**(6329): 1062–1066.
- [35] Raman A P, Anoma M A, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, **515**(7528): 540–544.
- [36] Groever B, Chen W T, Capasso F. Meta-lens doublet in the visible region[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(8): 4902–4907.
- [37] Plum E, Fedotov V A, Zheludev N I. Extrinsic electromagnetic chirality in metamaterials[J]. *J Opt A Pure Appl Opt*, 2009, **11**(7): 074009.
- [38] Huang Y J, Pu M B, Zhang F, et al. Broadband functional metasurfaces: achieving nonlinear phase generation toward achromatic surface cloaking and lensing[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(7): 1801480.
- [39] Yang Y H, Jing L Q, Zheng B, et al. Full - polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase[J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(32): 6866–6871.
- [40] Brongersma M L, Kik P G. *Surface Plasmon Nanophotonics*[M]. Dordrecht: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-1-4020-4333-8.
- [41] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824–830.
- [42] Sakat E, Vincent G, Ghenuche P, et al. Guided mode resonance in subwavelength metallodielectric free-standing grating for bandpass filtering[J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(16): 3054–3056.
- [43] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(14): 2606–2613.
- [44] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, et al. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nat Mater*, 2010, **9**(9): 707–715.
- [45] Hillenbrand R, Taubner T, Keilmann F. Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale[J]. *Nature*, 2002, **418**(6894): 159–162.
- [46] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, **339**(6125): 1232009.
- [47] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427.
- [48] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333–337.
- [49] Hasman E, Kleiner V, Biener G, et al. Polarization dependent focusing lens by use of quantized Pancharatnam–Berry phase diffractive optics[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(3): 328–330.
- [50] Bomzon Z E, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam–Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(13): 1141–1143.
- [51] Shalabney A, Abdulhalim I. Sensitivity - enhancement methods for surface Plasmon sensors[J]. *Laser Photonics Rev*, 2011, **5**(4): 571–606.
- [52] Yang K, Yao X, Liu B W, et al. Metallic plasmonic array structures: principles, fabrications, properties, and applications[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(50): 2007988.
- [53] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310–1314.
- [54] Lee N, Kim T, Lim J S, et al. Metamaterial-selective emitter for maximizing infrared camouflage performance with energy dissipation[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, **11**(23): 21250–21257.
- [55] Kim J, Han K, Hahn J W. Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 6740.
- [56] Kim T, Bae J Y, Lee N, et al. Hierarchical metamaterials for multispectral camouflage of infrared and microwaves[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(10): 1807319.
- [57] Pan M Y, Huang Y, Li Q, et al. Multi-band middle-infrared-compatible camouflage with thermal management via simple photonic structures[J]. *Nano Energy*, 2020, **69**: 104449.
- [58] Zhao L, Liu H, He Z H, et al. All-metal frequency-selective absorber/emitter for laser stealth and infrared stealth[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(8): 1757–1764.
- [59] Buhara E, Ghobadi A, Ozbay E. Multi-spectral infrared camouflage through excitation of plasmon-phonon polaritons in a visible-transparent hBN-ITO nanoantenna emitter[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(19): 4996–4999.
- [60] Huang Y, Zhu Y N, Qin B, et al. Hierarchical visible-infrared-microwave scattering surfaces for multispectral camouflage[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(16): 3613–3622.
- [61] Lee N, Lim J S, Chang I, et al. Flexible assembled metamaterials for infrared and microwave camouflage[J]. *Adv*

- Opt Mater*, 2022, **10**(11): 2200448.
- [62] Zhang Y P, Li T T, Chen Q, et al. Independently tunable dual-band perfect absorber based on graphene at mid-infrared frequencies[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 18463.
- [63] Xu C L, Qu S B, Pang Y Q, et al. Metamaterial absorber for frequency selective thermal radiation[J]. *Infrared Phys Technol*, 2018, **88**: 133–138.
- [64] Zhao Y C, Fang F. Thermochromism frequency-selective emitter for infrared stealth application[J]. *ACS Appl Electron Mater*, 2021, **3**(6): 2694–2702.
- [65] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(3): 1443–1447.
- [66] Liang Q Q, Wang T S, Lu Z W, et al. Metamaterial-based two dimensional plasmonic subwavelength structures offer the broadest waveband light harvesting[J]. *Adv Opt Mater*, 2013, **1**(1): 43–49.
- [67] Ji D X, Song H M, Zeng X, et al. Broadband absorption engineering of hyperbolic metafilm patterns[J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 4498.
- [68] Liu G Q, Liu X S, Chen J, et al. Near-unity, full-spectrum, nanoscale solar absorbers and near-perfect blackbody emitters[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2019, **190**: 20–29.
- [69] Liu Z Q, Liu G Q, Huang Z P, et al. Ultra-broadband perfect solar absorber by an ultra-thin refractory titanium nitride meta-surface[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2018, **179**: 346–352.
- [70] Li Y K, Li W, Wang Y, et al. Refractory metamaterial microwave absorber with strong absorption insensitive to temperature[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(21): 1800691.
- [71] Qin F, Chen X F, Yi Z, et al. Ultra-broadband and wide-angle perfect solar absorber based on TiN nanodisk and Ti thin film structure[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, **211**: 110535.
- [72] Li Y Y, Liu Z Q, Zhang H J, et al. Ultra-broadband perfect absorber utilizing refractory materials in metal-insulator composite multilayer stacks[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(8): 11809–11818.
- [73] Wang Y Q, Ma X L, Li X, et al. Perfect electromagnetic and sound absorption via subwavelength holes array[J]. *Opto-Electron Adv*, 2018, **1**(8): 180013.
- [74] Yao Y, Zhou J, Liu Z Q, et al. Refractory materials and plasmonics based perfect absorbers[J]. *Nanotechnology*, 2021, **32**(13): 132002.
- [75] Tang K C, Dong K C, Li J C, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation[J]. *Science*, 2021, **374**(6574): 1504–1509.
- [76] Hu R, Xi W, Liu Y D, et al. Thermal camouflaging metamaterials[J]. *Mater Today*, 2021, **45**: 120–141.
- [77] Xiao L, Ma H, Liu J K, et al. Fast adaptive thermal camouflage based on flexible VO₂/Graphene/CNT thin films[J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(12): 8365–8370.
- [78] Chandra S, Franklin D, Cozart J, et al. Adaptive multispectral infrared camouflage[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(11): 4513–4519.
- [79] Tang K C, Wang X, Dong K C, et al. A thermal radiation modulation platform by emissivity engineering with graded metal-insulator transition[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(36): 1907071.
- [80] Qu Y R, Li Q, Cai L, et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 26.
- [81] Inoue T, De Zoysa M, Asano T, et al. Realization of dynamic thermal emission control[J]. *Nat Mater*, 2014, **13**(10): 928–931.
- [82] Nemati A, Wang Q, Ang N S S, et al. Ultra-high extinction-ratio light modulation by electrically tunable metasurface using dual epsilon-near-zero resonances[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(7): 200088.
- [83] Salihoglu O, Uzlu H B, Yakar O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(7): 4541–4548.
- [84] Liu X Y, Padilla W J. Thermochromic infrared metamaterials[J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(5): 871–875.
- [85] Coppens Z J, Valentine J G. Spatial and temporal modulation of thermal emission[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(39): 1701275.
- [86] Li M Y, Liu D Q, Cheng H F, et al. Manipulating metals for adaptive thermal camouflage[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(22): eaba3494.
- [87] Mandal J, Jia M X, Overvig A, et al. Porous polymers with switchable optical transmittance for optical and thermal regulation[J]. *Joule*, 2019, **3**(12): 3088–3099.
- [88] Zhang J Q, Gao Y, Li C, et al. Laser direct writing of flexible antenna sensor for strain and humidity sensing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(1): 210316.
张嘉琪, 高阳, 李淳, 等. 基于激光直写的柔性天线传感器研究[J]. *光电工程*, 2022, **49**(1): 210316.
- [89] Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(8): 0823018.
陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. *光学学报*, 2021, **41**(8): 0823018.
- [90] Gao X L, Chen Y Q, Zheng M J, et al. Large-area nanoimprint lithography: processes and device applications[J]. *Opt Precis Eng*, 2022, **30**(5): 555–573.
高晓蕾, 陈艺勤, 郑梦洁, 等. 大面积纳米压印技术及其器件应用[J]. *光学精密工程*, 2022, **30**(5): 555–573.
- [91] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub - 25 nm vias and trenches in polymers[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, **67**(21): 3114–3116.
- [92] Haisma J. Nanoimprint lithography combined with direct bonding: A possibility to construct quantum dots, wires, and planes in vertical cascade[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(24): 244105.
- [93] Ganesan R, Dumond J, Saifullah M S M, et al. Direct patterning of TiO₂ using step-and-flash imprint lithography[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(2): 1494–1502.
- [94] Ji R, Hornung M, Verschuuren M A, et al. UV enhanced substrate conformal imprint lithography (UV-SCIL) technique for photonic crystals patterning in LED manufacturing[J]. *Microelectron Eng*, 2010, **87**(5–8): 963–967.
- [95] Verschuuren M A, Megens M, Ni Y F, et al. Large area nanoimprint by substrate conformal imprint lithography (SCIL)[J]. *Adv Opt Technol*, 2017, **6**(3–4): 243–264.
- [96] Ahn S H, Guo L J. Large-area roll-to-roll and roll-to-plate nanoimprint lithography: a step toward high-throughput application of continuous nanoimprinting[J]. *ACS Nano*, 2009, **3**(8): 2304–2310.
- [97] Kim J G, Sim Y, Cho Y, et al. Large area pattern replication by nanoimprint lithography for LCD–TFT application[J]. *Microelectron Eng*, 2009, **86**(12): 2427–2431.
- [98] Jiang Y J. Fabrication of flexible metal micro/nano-surface structures by transfer printing and its technical methods[D]. Suzhou: Soochow University, 2016. (in Chinese).
姜英杰. 柔性金属微纳结构转印机理及方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.

- [99] Yin Z P, Huang Y A, Chen R, et al. Key technologies and applications of flexible electronic manufacturing[J]. *China Basic Sci*, 2020, 22(5): 21–34.
尹周平, 黄永安, 陈蓉, 等. 柔性电子制造关键技术与应用[J]. *中国基础科学*, 2020, 22(5): 21–34.
- [100] Loo Y L, Willett R L, Baldwin K W, et al. Additive, nanoscale

- patterning of metal films with a stamp and a surface chemistry mediated transfer process: Applications in plastic electronics[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(3): 562–564.
- [101] Zhou H L, Qin W Y, Yu Q M, et al. Transfer printing and its applications in flexible electronic devices[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(2): 283.

作者简介



左建坤 (1998 年-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外隐身、微纳结构设计制造方面的研究。
E-mail: zuojiankun@hnu.edu.cn



段辉高 (1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事极小尺寸、极高精度的微纳制造及相关应用的研究。中科院青年创新促进会首批特邀会员。
E-mail: duanhg@hnu.edu.cn



【通信作者】胡跃强 (1992-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 2013 年于西南交通大学获得学士学位, 2018 年于清华大学获得博士学位, 主要从事微纳加工、微纳光学和表界面力学等方面的研究。
E-mail: huyq@hnu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

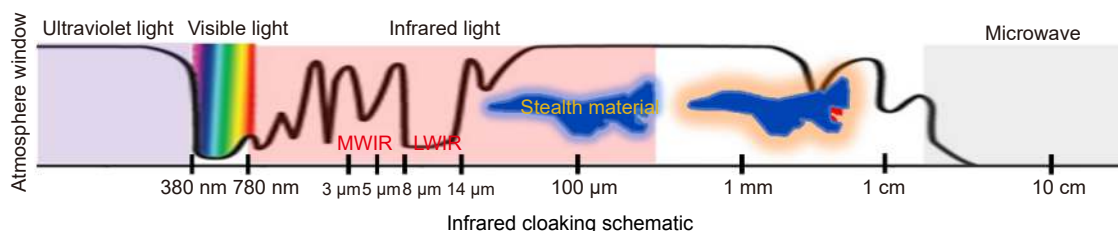
团队介绍

极端微纳制造研究团队以段辉高教授为学术带头人, 团队目前拥有老师 8 人, 其中国家级青年人才 2 名, 省部级人才 6 名。团队围绕微纳制造装备与工艺、微纳光学设计与制造、MEMS 传感器及应用等方向, 正在承担国家重点研发计划、国家自然科学基金、成果转化及产学研合作等各类项目 20 余项。先后发表 SCI 论文 200 余篇, 其中影响因子大于 10.0 的 120 余篇。工艺能力贯穿“光刻、镀膜、刻蚀、封装”等整个半导体制造流程, 并在“微光学、微传感、微能源”等高性能器件及装备应用方面积累了丰富的研究经验。团队依托湖南大学正在打造一条 6 英寸微纳制造与检测的中试线。与美国麻省理工学院、德国斯图加特大学、英国南安普顿大学、新加坡国立大学、新加坡科技设计大学、韩国科学技术院 (KAIST) 等研究机构有长期的合作关系, 建设有省级“微纳光学先进设计制造国际联合研究中心”。



Review on new infrared stealth structural materials

Zuo Jiankun¹, Pan Meiyan², Duan Huigao^{1,3}, Jia Honghui¹, Hu Yueqiang^{1,4*}



Overview: With the rapid development of military optoelectronic technology, the role of stealth technology in modern combat systems is becoming more and more important, in which stealth materials are essential to improve stealth performance. Infrared stealth is to tune the infrared radiation signal characteristics of the target to become the smallest difference from the background. The target will be invisible in the background and can not be identified through the infrared imaging equipment.

Starting from the background of infrared stealth technology, we introduce the classification of stealth technology and the progress of domestic and foreign infrared stealth materials from three aspects including single-band infrared stealth, multi-band compatible infrared stealth, and dynamic infrared stealth, and provide an in-depth analysis on the large-area flexible processing methods for micro-nano structures. Compared with single-band infrared stealth, multi-band compatible infrared stealth based on the photonic crystal, Fabry-Perot cavity structure, and metasurface, dynamic infrared stealth has higher freedom of spectral modulation. With the development of advanced micro-nano processing technology, metasurface is expected to become the first choice for new infrared stealth in the future due to its ultra-high freedom spectral modulation, ultra-thin subwavelength structures, etc. In addition, we have conducted an in-depth analysis of flexible processing methods for large areas of micro and nano structures.

Finally, based on the summary and reflection of the research work, the development of new infrared stealth materials will be further prospected. 1) High-strength direction development. In some stealth material application scenarios such as aircraft, vehicles, tanks, and other weaponry, the material will function in extreme environments. Therefore, the new infrared stealth materials have good mechanical properties, high-temperature resistance, corrosion resistance, impact resistance, etc. 2) Large-area direction development. In actual applications, the target to be stealthy is from centimeter-level to meter-level applications, so a large area of new infrared stealth materials is the inevitable trend of future development. 3) Flexible direction development. No matter the stealth target is equipment parts or clothing wear, achieving conformal stealth is a key part of stealth material development. 4) Intelligent direction development. Due to the continuous development and integration of multi-band detection technology and the harsh requirements of the actual environment, the realization of real-time dynamic multi-band intelligent stealth is a major demand for stealth technology.

Zuo J K, Pan M Y, Duan H G, et al. Review on new infrared stealth structural materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220218; DOI: [10.12086/oe.2023.220218](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220218)

Foundation item: National Key Research and Development Program (2021YFB3600500), National Natural Science Foundation of China (2005175, 62105120), and Excellent Science and Technology Innovation Personnel Training Project in Shenzhen (RCBS20200714114855118)

¹National Research Center for High-Efficiency Grinding College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; ²Jihua Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, China; ³Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou, Guangdong 511300, China; ⁴Advanced Manufacturing Laboratory of Micro-Nano Optical Devices, Shenzhen Research Institute, Hunan University, Shenzhen, Guangdong 518000, China

* E-mail: huyq@hnu.edu.cn