

激光与光电子学进展

多波段兼容红外伪装技术研究进展(特邀)

李强^{1*}, 秦并¹, 仇旻²¹浙江大学极端光学技术与仪器全国重点实验室和光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;²西湖大学工学院, 浙江 杭州 310024

摘要 红外伪装技术是指隐藏或改变目标红外辐射特征的技术,对于提高目标的生存率具有重大意义。多波段探测技术的发展,给传统的红外伪装技术带来了严峻的挑战,使得多波段兼容红外伪装材料的研究变得十分紧迫。针对这一挑战,首先须厘清各波段的伪装要求,其次应合理利用各波段材料电磁响应的不同和结构尺寸的差异,设计分层次结构以满足不同波段的光谱要求。最后,应认识到现有研究存在的不足,向着适应更多探测波段、应用场景,制备工艺更简便、成本更低、应用性更优的方向发展。

关键词 红外伪装; 兼容性伪装; 热伪装; 光谱调控; 微纳结构

中图分类号 O434.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232321

Research Progress of Multi-Band Compatible Infrared Camouflage Technology (Invited)

Li Qiang^{1*}, Qin Bing¹, Qiu Min²¹State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;²School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, Zhejiang, China

Abstract Infrared camouflage refers to the capability of hiding or changing the infrared radiation characteristics, hence improving the survival rate of the objects. However, advanced multi-band detection technologies have emerged as a significant threat to the objects, necessitating the development of multi-band compatible infrared camouflage technologies. To address the challenge, it's of vital importance to clarify the camouflage requirements of different bands and design hierarchical structures based on the difference in electromagnetic response and structure size in these bands. Finally, it's essential to recognize the shortcomings of existing research and promote camouflage technologies more applicable, easy to prepare, and lower cost.

Key words infrared camouflage; compatible camouflage; thermal camouflage; spectral manipulation; micro-nano structure

1 引言

热辐射是由粒子热运动产生的一种电磁辐射,发生于一切温度高于绝对零度的物体之上。在现代军事领域中,目标物自发的热辐射是暴露其信息的重要途径。红外探测技术的不断发展,特别是融合了其他探测手段的多波段探测技术的应用,使得目标物的生存面临着日益严峻的考验。为应对这一新的挑战,与其他探测波段的伪装兼容成为了热伪装研究的一个重要方向^[1-4]。特别是,随着近年来微纳光子学理论研究和

技术的发展,微纳光子学结构被广泛引入到红外和多波段伪装器件的设计中,实现对电磁波谱的精细调控^[5-15]。

2 兼容性伪装原理

由斯特藩-玻尔兹曼定律可知,发射率为 ϵ 的物体在单位面积上向半球空间辐射出的总辐射功率 M 为

$$M = \epsilon\sigma T^4, \quad (1)$$

式中: σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数; T 为物体的热力学温度。由式(1)可知,影响物体热辐射强度的因素主要

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-24; 录用日期: 2023-11-29; 网络首发日期: 2023-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(61975181, U2341225)

通信作者: *qiangli@zju.edu.cn

有:1)物体表面的发射率;2)物体表面的温度。因而可通过调节物体的发射率或表面温度来调控其热辐射强度,从而达到热红外波段伪装的目的。由于一般目标的辐射强于背景,因此往往需要在常用的热红外探测波段(对应两个大气透明窗口 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$)抑制目标物的热辐射信号。这可以通过减小目标物的表面发射率或降低其表面温度来实现(图1)。

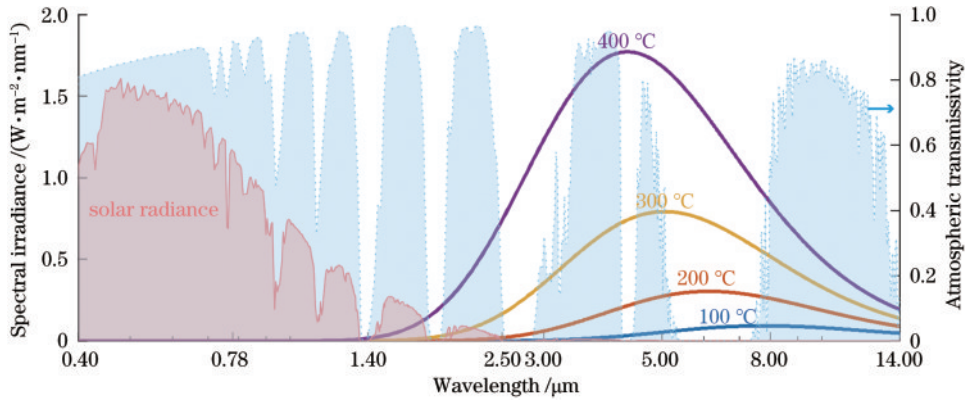


图1 太阳辐射与黑体辐射(100~400 °C)的光谱辐照度及大气透射率光谱

Fig. 1 Spectral irradiance of solar radiance and blackbody radiance (100—400 °C), and the atmospheric transmittance spectrum

3 兼容性伪装技术

兼容性伪装技术要求目标物对两个或多个波段的探测设备具有良好的伪装效果,其实现思路一般为:1)利用伪装材料自身在不同波段的电磁响应特性,满足各波段的伪装要求;2)将针对不同波段的伪装材料在空间上叠加起来,使得复合结构能够满足各波段的伪装要求。值得注意的是,使用叠加方法实现兼容性伪装,要求上层材料对下层伪装波段透明,以保障下层材料的伪装效果。

下文将从热红外波段与可见、微波、近红外波段的兼容性伪装技术研究进展出发,介绍微纳光子结构在兼容性伪装技术上的应用,对比、评述基于不同材料与结构的兼容性伪装技术的优势与不足。

3.1 热红外-可见兼容性伪装技术

兼容可见波段伪装的热红外伪装技术要求在保障热红外波段低发射率的同时,在可见波段有较低的反射率(高吸收率或透明)或与背景相似的色彩特征,以提高其在肉眼和可见探测设备下的隐蔽性。

热红外波段的低发射率可通过金属微纳结构或介质增反膜实现。其中,金属微纳结构主要利用金属材料在热红外波段的高反射特性,介质增反膜一般为设计波长在热红外探测波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$)的一维光子晶体。但是由于金属材料和介质膜堆中的高折射率红外透明材料(如Si、Ge等)在可见波段也有着较高的反射率,因此需要在结构顶部增加一层可见调控层,以实现可见波段内的迷彩或减反效果。

在结构顶部增加可见调控层,利用其干涉效应产

为应对多波段探测设备的威胁,目标物须兼顾其他探测波段的伪装要求:1)在可见波段,目标可采用低反射率(高吸收率或透明)表面或者与背景色相似的迷彩表面(图1);2)在近红外波段,目标须考虑减少对日光、月光等自然光源或激光等人造光源的反射信号(图1);3)在微波波段,目标须通过吸收或散射等手段减少回波信号,减小目标物的雷达散射截面。

生结构色,可实现覆盖一定色域的迷彩色。Qi等^[16]利用Ge/ZnS准周期性光子晶体实现了 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 内的低发射率(约0.1),并通过调节顶部ZnS层的厚度实现对可见色彩的控制[图2(a)]。进一步地,Zhang等^[17]和Liu等^[18]用Ge/ZnSe一维光子晶体实现了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 内的低发射率(0.1左右)和 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 内的辐射散热,并分别利用顶部的ZnSe层和(MgF₂/ZnSe/MgF₂/ZnSe)层来调控色彩。Pan等^[19]利用金属微纳结构也实现了热红外-可见兼容的伪装材料。他们在金膜上沉积了一层220 nm厚的GST薄膜,实现了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 内的低发射率(约0.3)和 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 内的高发射率(0.77)。可见颜色的变化通过在顶部沉积一层Si薄膜,并调控其厚度实现[图2(b)]。

特别地,在昏暗的背景(如夜间、高空)中,需要尽可能地降低目标的反射率,使其表面呈现与背景相近的黑色或深灰色。这要求伪装材料表面具备可见波段的低反射特性。Deng等^[20]在Ge/ZnS光子晶体(实现热红外波段的低发射率 <0.1)顶部增加了(YbF₃/ZnS/Ge/ZnS)薄膜,使材料在可见波段的反射率降低到了2.67%[图2(c)]。Fu等^[21]受蝴蝶翅膀启发,使用微粉阳极氧化技术制备了多孔阳极氧化铝/铝片材料,实现了热红外波段的低发射率(约0.08)和可见波段的低反射率(0.32)。

与一维光子晶体结构相比,金属微纳结构具有更少的膜层数量与更薄的总厚度。然而,金属微纳结构的制备依赖于光刻等图形转移技术,结构性能对加工参数敏感,大面积制备难度较高。

另一种实现可见兼容性伪装的技术是采用可见透

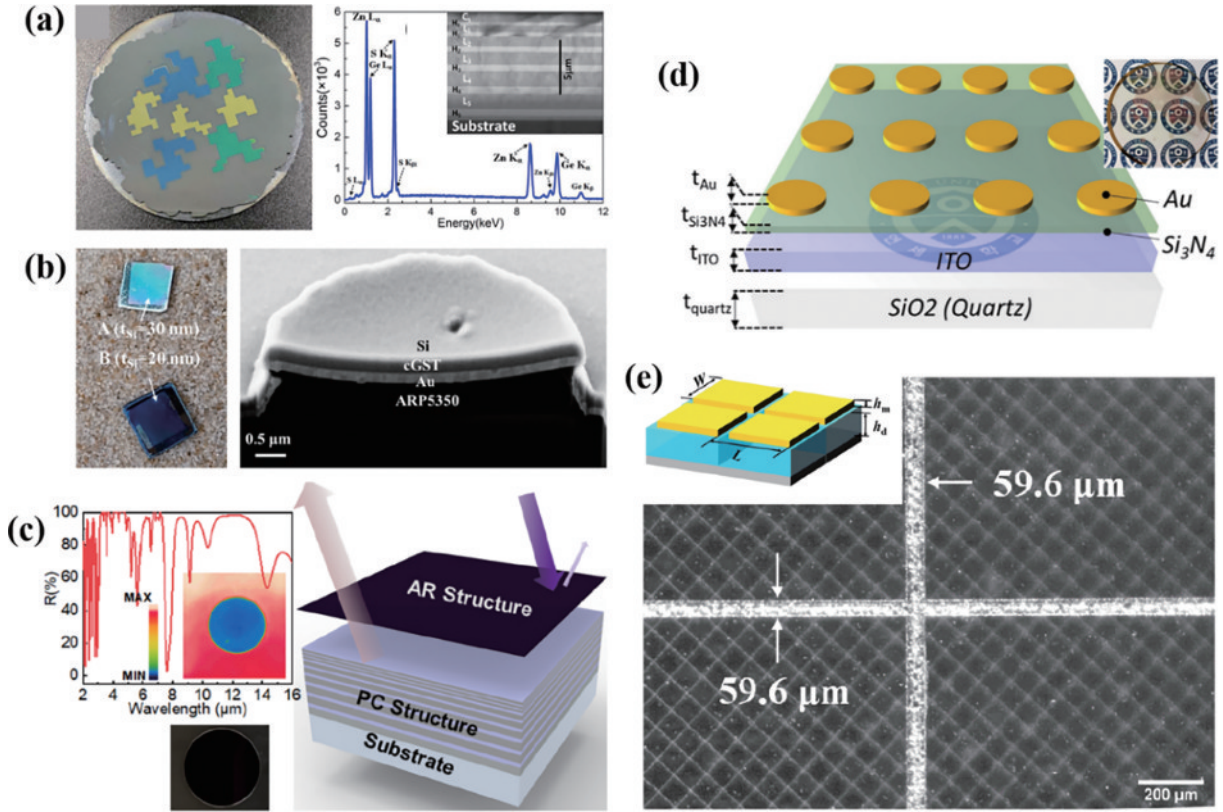


图 2 热红外-可见兼容性伪装技术。(a) Ge/ZnS 光子晶体^[16]和(b) Si/GST/Au 结构^[19]实现热红外低发射和可见结构色；(c) 减反射层和 Ge/ZnS 光子晶体实现热红外低发射和可见高吸收^[20]；(d) Au 圆盘-Si₃N₄-ITO 结构^[22]和(e) 超薄金属层、金属线网^[25]实现热红外低发射和可见透明

Fig. 2 Thermal infrared-visible compatible camouflage technologies. Low emissivity in the thermal infrared band and structural color realized by (a) Ge/ZnS photonic crystal^[16] and (b) Si/GST/Au structure^[19]; (c) low emissivity in the thermal infrared band and high absorptivity in the visible band are realized by the Ge/ZnS photonic crystal and antireflection layer^[20]; low emissivity in the thermal infrared band and visible transparency realized by (d) Au disk-Si₃N₄-ITO structure^[22] and (e) ultra-thin metal layer/metal mesh^[25]

明的热红外伪装材料,可应用于载具的观察窗等对可见透过率有特殊要求的场合。Lee 等^[22]用透明导电氧化物 ITO 薄膜代替金属作为红外反射层,制备了 Au 圆盘-Si₃N₄介质层-ITO 反射层结构[图 2(d)],在实现热红外低发射率(约 0.3)的同时,实现了可见透明(透过率约 0.5)。Zhang 等^[23]制备了 ZnS/ITO/ZnS/ITO 薄膜,可实现 3~5 μm 和 8~14 μm 内的低发射率(约 0.25)、2.5~3 μm 和 5~8 μm 内的辐射散热,可见透过率达到了 0.675。但是 ITO 的性质较硬、脆,且其可见波段透过率与热红外发射率比值较低,因此有研究使用超薄金属层^[24-25]或金属线网^[25]来代替 ITO[图 2(e)],可以取得较高的可见透过率(0.6~0.8)和更低的红外发射率(<0.1)。

可见波段的伪装,应充分考虑背景的特征。迷彩色的可见伪装技术适用于地面背景,而低反射率的可见伪装技术更适用于天空背景。采用可见透明材料的热红外-可见兼容性伪装技术具有更强的适用性,既可用于观察窗等特殊的应用场景,也可贴于传统的迷彩伪装材料表面,适应各类背景。但是,可见透明材料的

制备工艺更为复杂,成本相对也更高。

3.2 热红外-微波兼容性伪装技术

兼容微波波段伪装的热红外伪装技术要求在保障热红外波段低发射率的同时,对雷达波有较弱的回波信号,以减小其雷达散射截面,可以通过对雷达波的吸收或将雷达信号散射到其他方向实现。

前述的全电介质一维光子晶体在微波波段有着很高的透过率^[16-18,20],可在其下方设置微波吸收结构或材料实现对雷达波的吸收。金属材料在微波波段有着很高的反射率,低红外发射率的金属微纳结构会带来较强的雷达回波信号。为解决这一问题,可利用红外与微波间的波长差异,将连续的金属层分割为与微波波长尺寸相近的岛状结构。这样,在构成微波波段的频率选择性表面的同时,金属岛的尺寸相比红外波长足够大,仍能保持红外的低发射率特性。

Wen 等^[26]设计了由周期性金属片构成的红外屏蔽层,可使微波透过,并被下方的雷达吸收层吸收。该结构在 8.1~19.3 GHz 波段的吸收率大于 90%,其红外发射率由金属片的发射率与占空比决定[图 3(a)]。在

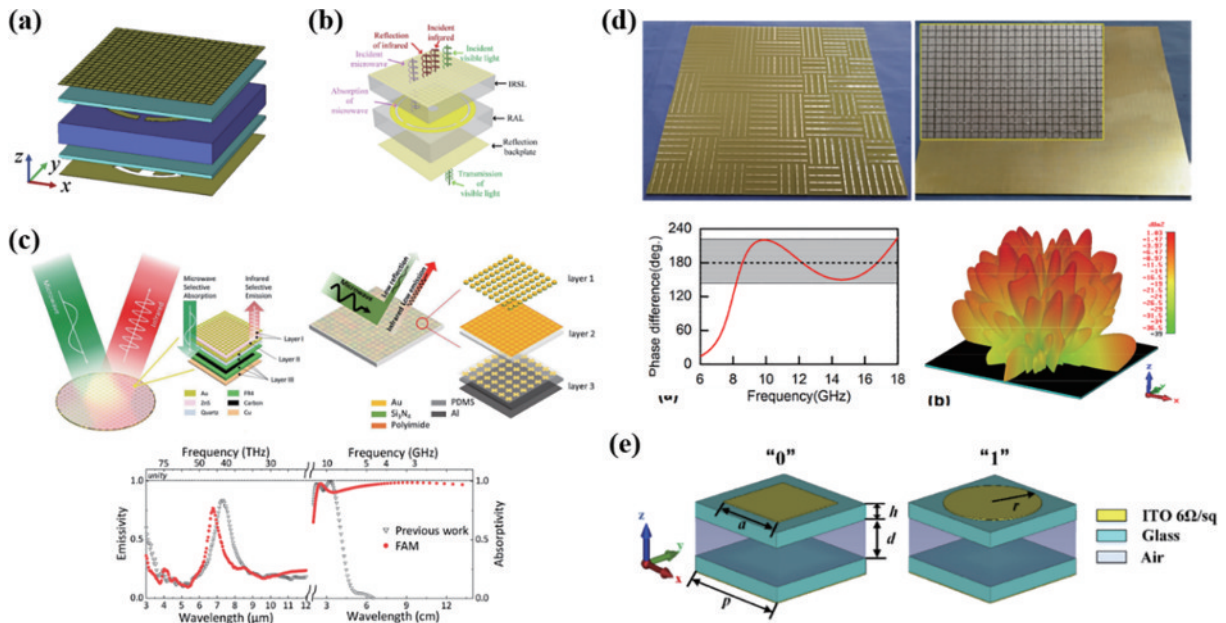


图3 热红外-微波兼容性伪装技术。(a) 红外屏蔽层(微波频率选择性透过)与微波吸收层相结合^[26]; (b) 可见透明红外屏蔽层与微波吸收层相结合^[31]; (c) 红外选择性辐射器与微波频率选择性吸收器相结合^[32-33]; (d) 红外屏蔽层与微波编码超表面相结合^[34]; (e) 可见透明红外屏蔽层与微波编码超表面相结合^[35]

Fig. 3 Thermal infrared-microwave compatible camouflage technologies. (a) Combination of infrared shielding layer and radar absorption layer^[26]; (b) combination of visible transparent infrared shielding layer and radar absorption layer^[31]; (c) combination of infrared selective emitter and microwave frequency selective absorber^[32-33]; (d) combination of infrared shielding layer and microwave coding metasurface^[34]; (e) combination of visible transparent infrared shielding layer and microwave coding metasurface^[35]

此之上,将红外屏蔽层和微波频率选择性吸收器中的金属材料更换为透明导电氧化物可以实现可见透明、红外低发射率、微波波段高吸收的伪装材料[图3(b)]^[27-31]。Kim等^[32]将红外选择性辐射器与微波频率选择性吸收器相结合[图3(c)],在实现红外 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 内低发射和 $5\sim 8\mu\text{m}$ 辐射散热的同时,实现了 $8\sim 12\text{GHz}$ 波段的高吸收($>90\%$)。进一步地,通过优化微波吸收器结构,可将微波吸收波段拓展至 $2\sim 12\text{GHz}$ ^[33]。

除了利用微波吸收器吸收入射的雷达波外,将雷达波散射到其他方向上也可以有效降低回波信号。Pang等^[34]设计了编码超表面,两种结构单元“0”、“1”在入射方向上的反射相位差为 π ,这使得入射方向上的两种单元的反射信号干涉相消,反射信号被分散到其他方向上。该超表面在 $3\sim 14\mu\text{m}$ 波段内的发射率为0.27,在 $8.2\sim 18\text{GHz}$ 波段内的回波信号小于 -10dB [图3(d)]。Meng等^[35]将金属材料替换为ITO,实现了可见透过率72.2%, $3\sim 14\mu\text{m}$ 发射率0.275和 $3.8\sim 6.8\text{GHz}$ 波段回波信号小于 -10dB 的透明编码超表面[图3(e)]。

微波散射技术以散射的形式降低回波信号,有效避免了由于吸收微波而增加的热负载,对于目标物的热管理有着积极意义。但是由于散射式编码超表面的构建需要相邻单元之间存在 π 的反射相位差,其微波

隐身带宽受到了限制。与之相对的,微波吸收器可通过增加金属(导电材料)谐振结构的层数、拓宽其吸收波段,实现超宽带的微波隐身(代价是厚度、质量和制备难度的增加)。

3.3 热红外-近红外兼容性伪装技术

与热红外波段不同,近红外波段的热辐射信号相对较弱,反射的外部光源信号往往占据主导地位。常见的近红外信号来源有:1)太阳辐射,其在近红外波段有着较强的辐照度,是最重要的自然光源;2)夜光,主要包括月光、星光、大气辉光等,其辐照强度虽远弱于太阳辐射,但在微光夜视仪等像增强设备的辅助下,仍会暴露目标物的信息;3)红外探照灯等人造光源;4)激光雷达。实现近红外兼容隐身,须尽量减少其反射信号,如采取近红外波段高吸收的表面或散射表面。

近红外波段与可见波段波长相近,3.1节所述的可见调控层可对材料近红外波段的特性产生影响。如:Liu等^[18]的Ge/ZnSe光子晶体在顶部增加了(MgF₂/ZnSe/MgF₂/ZnSe)层后可在近红外波段取得较低的反射率,其中在 $1.06\mu\text{m}$ 激光波长处反射率小于3%;Deng等^[20]的光子晶体结构在 $300\sim 1100\text{nm}$ 范围内的平均反射率仅为9%。

Park等^[36]利用金属-电介质-金属结构实现了热红外的选择性辐射($3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 内发射率约为

0.02, 5~8 μm 波段辐射散热), 并通过顶层金属结构的单端口光栅谐振效应实现了近红外波段的宽带吸收 [图 4(a)]. 该结构在 InGaAs 探测器响应波段范围 (0.9~1.7 μm) 内平均吸收率为 0.651, 在 1.06 μm 激

光波长处吸收率为 92.2%. Huang 等^[37]用 Ge/Ti/Ge/Au 薄膜结构亦实现了近红外波段的高吸收, 其在 1.06 μm 和 1.55 μm 激光波长处的反射率分别为 0.017 和 0.13 [图 4(b)].

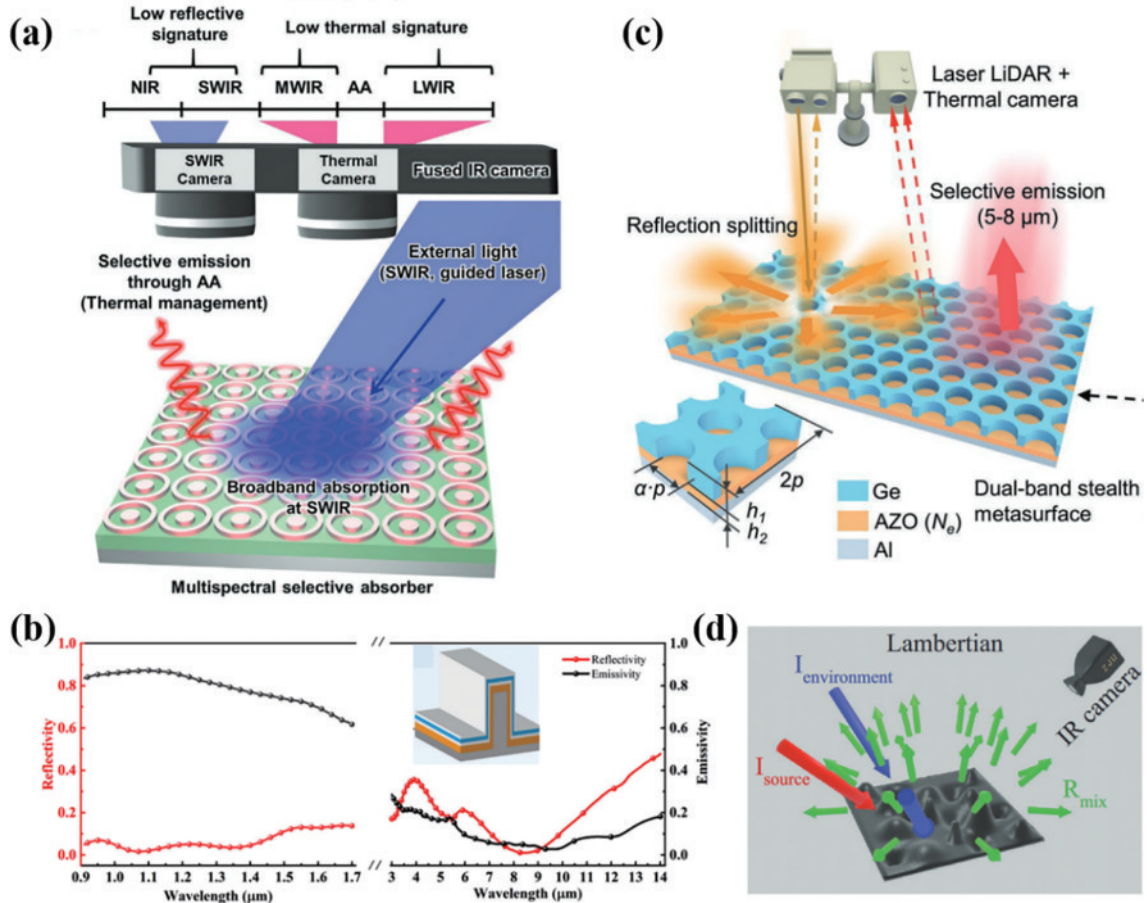


图 4 热红外-近红外兼容性伪装技术。(a)金属-电介质-金属结构实现热红外选择性辐射和近红外吸收^[36]; (b) Ge/Ti/Ge/Au 薄膜结构实现热红外低发射率和近红外高吸收率^[37]; (c)近红外编码超表面实现入射激光的散射^[38]; (d)粗糙表面实现红外波段的低发射率和低镜面反射率^[39]

Fig. 4 Thermal infrared-near-infrared compatible camouflage technologies. (a) Selective radiation in the thermal infrared band and absorption in the near-infrared band are realized by metal-dielectric-metal structure^[36]; (b) low emissivity in the thermal infrared band and high absorptivity in the near-infrared band are realized by the Ge/Ti/Ge/Au structure^[37]; (c) laser scattering realized by the coding metasurface in the near-infrared band^[38]; (d) low emissivity and specular reflectivity are realized by the rough surface^[39]

除提高近红外吸收率外, 将入射激光散射/漫反射到其他方向的伪装技术也能有效降低激光雷达回波信号。例如, 将编码超表面引入近红外波段, 设计将近红外入射激光散射到其他方向的编码超表面可有效降低激光镜面反射信号强度。Liu 等^[38]以自组装光刻技术制备了蜂窝状的编码超表面, 其设计中心波长为 1.06 μm, 可将入射激光散射到六个斜角方向上, 对 1.06 μm 激光的镜面反射率小于 0.01 [图 4(c)]. 该结构还同时实现了热红外探测波段的低发射率和 5~8 μm 波段的辐射散热。

利用粗糙表面的漫反射效应亦可降低对红外主动探测的镜面反射信号。Huang 等^[39]将 Al 薄膜沉积在砂纸上, 再转移至柔性 PI 衬底上, 可获得具有朗伯辐

射特征的粗糙表面 [图 4(d)]. 其在近红外波段内的镜面反射率接近 0, 且在热红外波段兼具低发射率 (约 0.1) 和低镜面反射率 (约 0.05) 的特性, 对红外主被动探测均可进行伪装。

基于近红外吸收的伪装技术可大大减少目标的反射信号。然而, 其对外部光源 (如太阳辐射、激光) 的吸收, 将增大目标的热负载, 并对材料自身的热稳定性和激光损伤阈值产生更高的要求。基于近红外编码超表面的伪装技术避免了吸收带来的热效应, 但是其散射带宽受限, 并依赖于光刻技术, 难以大面积制备。粗糙表面的制备方法简单、成本低, 且能实现由近红外至热红外波段的超宽带漫反射, 但是其光谱可调控性有限, 难以进一步地与光谱选择性发射器等伪装技术结合起来。

3.4 多波段兼容性伪装技术

随着多波段探测技术的发展,目标物须应对两种波段以上的探测器的威胁。因此发展多波段兼容的伪装技术也就显得尤为重要。

实现多波段兼容伪装,一个重要的思路是利用各探测波段的波长差异,设计分层次的结构,从而满足各个探测波段不同的伪装需求。Zhu 等^[40]将可见色彩调控层、近红外-热红外光子晶体和微波频率选择性吸收器集成,设计了兼容可见迷彩、热红外探测波段(3~5 μm 和 8~14 μm)低发射率、1.55 μm 和 10.6 μm 激光高吸收、8~12 GHz 雷达波高吸收的伪装材料

[图 5(a)]。Feng 等^[41]将针对 1.06 μm 和 10.6 μm 激光的编码超表面复合,并与微波频率选择性吸收器结合,设计了在 0.9~1.2 μm 和 9~12 μm 范围内散射、红外低发射率、2.7~26 GHz 波段高吸收的伪装材料 [图 5(b)]。Huang 等^[42]用铝板制备了棋盘格状的微波散射结构,可将 8~13 GHz 波段的入射雷达波散射到 4 个倾斜方向上;然后将沉积了 Al 和 Si 薄膜的砂纸粘贴到微波散射结构表面,使得复合结构能在可见波段呈现出伪装色,并在 0.75~14 μm 的红外波段内表现出低发射率和低镜面反射率 [图 5(c)]。

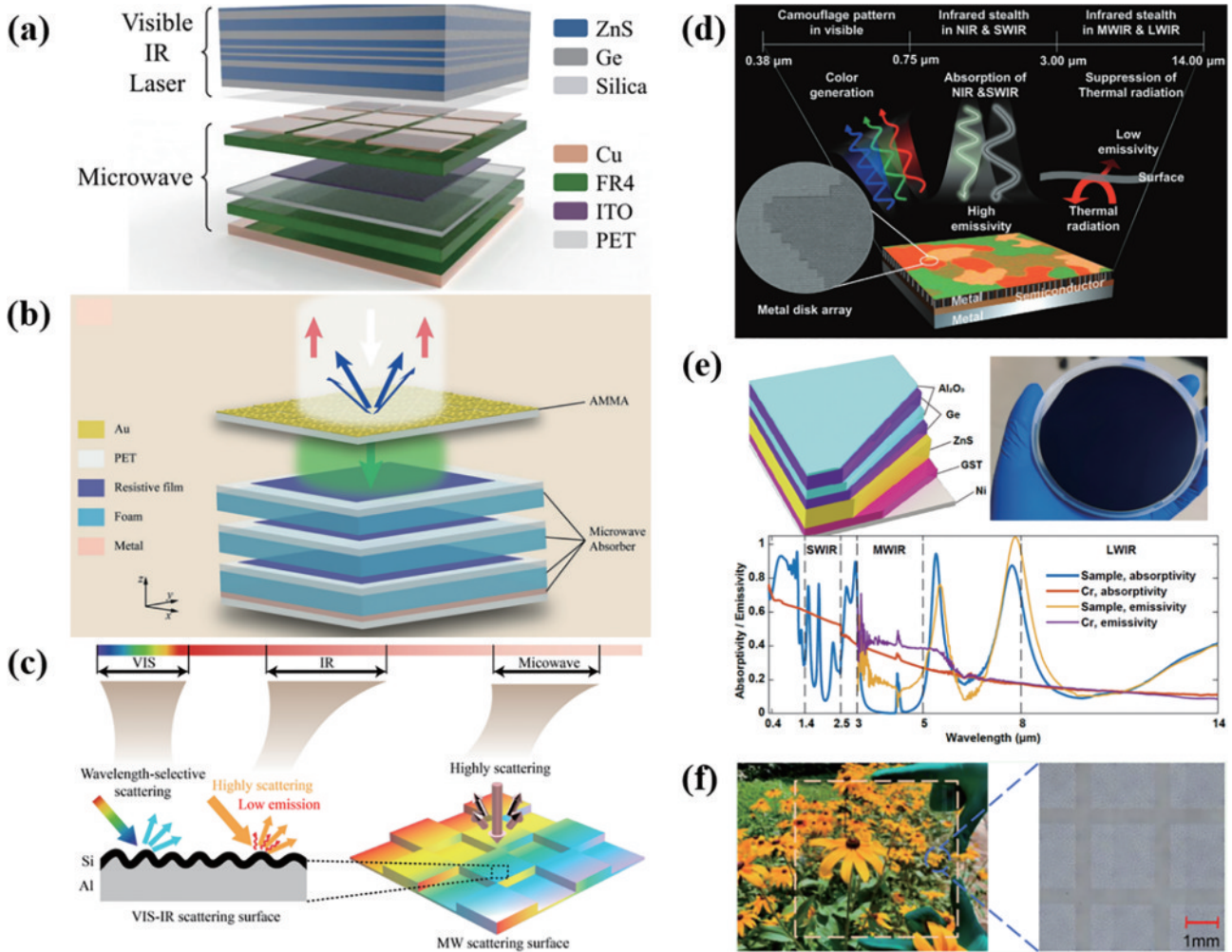


图 5 多波段兼容性伪装技术。(a)光子晶体与微波频率选择性吸收器复合实现可见-激光-热红外-微波兼容性伪装^[40];(b)红外编码超表面与微波频率选择性吸收器复合实现激光-热红外-微波兼容性伪装^[41];(c)可见-红外散射表面与微波散射表面复合实现可见-红外-微波兼容性伪装^[42];(d) Al-Ge-Ag 结构实现可见-近红外-热红外兼容性伪装^[43];(e)多层薄膜结构实现全红外及可见波段伪装^[44];(f)金属线网微波编码超表面实现可见-红外-微波兼容性伪装^[45]

Fig. 5 Multi-band compatible camouflage technologies. (a) Visible-laser-thermal infrared-microwave compatible camouflage is realized by the combination of photonic crystal and microwave selective absorber^[40]; (b) laser-thermal infrared-microwave compatible camouflage is realized by the combination of infrared coding metasurface and microwave selective absorber^[41]; (c) visible-infrared-microwave compatible camouflage is realized by the combination of visible-infrared scattering surface and microwave coding metasurface^[42]; (d) visible-near-infrared-thermal-infrared compatible camouflage is realized by the Al-Ge-Ag structure^[43]; (e) whole-infrared-band and visible camouflage is realized by multilayer structure^[44]; (f) visible-infrared-microwave compatible camouflage is realized by metal grid-based coding metasurface^[45]

利用材料本身在不同波段的不同响应特性可以减少分层结构的层数。Kim 等^[43]设计了 Al 圆盘-Ge 间隔层-Ag 反射层的金属-半导体-金属结构[图 5(d)]。在可见波段 Ge 薄膜不透明, Al 圆盘激发的局域等离子体模式使得结构在可见波段实现迷彩色;在近红外波段 Ge 作为一种有损的介质,能以超薄的光学厚度激发相消干涉模式,实现近红外波段的减反射,其在 1.06 μm 波长处的吸收率大于 92%;在热红外波段, Ge 是一种透明材料,其底部的 Ag 反射层使得结构在热红外波段呈现出低发射率特性。Qin 等^[44]设计了多层薄膜结构,在实现全红外波段(近红外、短波红外、中波红外和长波红外)伪装及可见高吸收式伪装的同时,还兼容了 2.5~3 μm 和 5~8 μm 的双波段辐射散热[图 5(e)]。Shim 等^[45]设计了金属结构层-PI 间隔层-石墨层的三层结构。通过光刻工艺在金属结构层上制备的微米尺寸微孔结构和毫米尺寸的片状结构可分别使 1.54 μm 的红外光和 35 GHz/94 GHz 的毫米波透过。底部的石墨层在红外波段作为吸收层,在毫米波段则作为反射层,与顶部的金属片状结构构成谐振器,实现对 35 GHz/94 GHz 毫米波的吸收。Zhong 等^[46]则利用了金属线网在可见-红外波段透明、微波波段反射的特性,用其替代了微波编码超表面中的金属材料,实现了 319 nm 到 4.56 μm 范围内高透明(>87%)、19~23 GHz 波段散射的器件[图 5(f)]。

上述第一种思路在设计阶段将各波段伪装器件分解开来独立设计,有助于简化设计难度,但是最后组装得到的多波段伪装器件结构较为复杂,集成度较低。后一种思路在设计阶段就考虑了材料在不同波段的电磁响应特性,有利于提高器件的集成度,但是设计难度更大,难以兼顾较宽的波段范围。

4 结束语

随着先进的多波段探测技术的发展,厘清各探测波段的信号来源、伪装要求,并设计兼容性的伪装材料是当下伪装技术研究的重要方向。不同于传统的针对单一波段的伪装材料,多波段兼容的伪装材料需要综合考虑材料和结构在不同波段的电磁响应,并加以合理利用。利用各探测波段的波长差异,设计分层次的结构,将满足不同波段伪装要求的结构复合起来是实现多波段兼容性伪装的重要思路。针对多波段伪装的需求,研究人员已提出多种解决方案,但未来多波段兼容性伪装材料走向实际应用,还需解决以下问题:

1) 各细分波段的伪装问题。前面对各探测波段采用的是一种较粗略的划分方式,实际上,各个细分波段对伪装要求仍可能存在差异。这要求光子结构对光谱进行精细化的调控,以满足各细分波段的光谱要求。机器学习能大大提升兼容性伪装材料的设计^[38,47]和制备^[48]效率,促进更加适应多元化的应用环境的伪装技术的发展。使用大量的微纳结构及其光谱数据对神经

网络等机器学习模型进行训练,得到的模型可以快速地对光子结构的光谱特性进行预测,并可被用来根据光谱要求进行光子结构的逆向设计。

2) 材料和结构的大规模制备问题。目前很多基于微纳结构的多波段兼容性伪装材料依赖于光刻等微纳加工技术,限制了其进一步推向大规模、低成本的应用。纳米压印技术有望实现高通量的微纳结构加工^[25,49]。卷对板、卷对卷等滚轴式的纳米压印技术可以实现连续性的微纳加工,用于制备大面积的兼容性伪装器件。

3) 材料和结构的应用性问题。多波段兼容性材料在推向实际应用时,还需考虑材料的耐高温、耐腐蚀、结合力、质量、尺寸等应用性问题。使用耐高温的绝热材料,如气凝胶、石英纤维等可以大大降低伪装材料的表面温度,提升其热稳定性。同时,对于高温目标而言,将红外伪装材料与绝热材料相结合,在减少伪装材料热负载的同时可使其具有更低的红外辐射信号^[50-51]。

4) 动态调控问题。在实际应用中,由于地形、季节、天气、时间等条件的变化,可能带来目标背景的变化。为提高目标在复杂多变背景下的生存能力,对伪装材料进行动态调控,使其能对背景进行自适应就显得很重要。利用石墨烯、碳纳米管等电致变发射率材料^[52-53]或者氧化钒、锆铋碲等热致变发射率材料^[54-56],可设计动态可调的伪装材料,根据背景的变化主动或自适应地调整其红外辐射特征。

参 考 文 献

- [1] 卢仪, 卜小海, 李栋先, 等. 基于光子晶体的红外隐身材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080003.
Lu Y, Bu X H, Li D X, et al. Research progress of infrared stealth materials based on photonic crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080003.
- [2] 石智成, 孙凌夫, 李海豹, 等. 兼容性隐身材料的研究进展[J]. 激光与红外, 2022, 52(9): 1267-1273.
Shi Z C, Sun L F, Li H B, et al. Research progress of compatible stealth materials[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(9): 1267-1273.
- [3] 孟子晖, 李仁玢, 邱丽莉, 等. 多波段兼容隐身用光子晶体研究进展[J]. 兵工学报, 2019, 40(1): 198-207.
Meng Z H, Li R F, Qiu L L, et al. Research progress on photonic crystal multiband stealth material[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1): 198-207.
- [4] 冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等. 基于红外隐身及多波段兼容隐身材料[J]. 化学进展, 2021, 33(6): 1044-1058.
Feng L L, Liu Y M, Yao L, et al. Infrared stealth and multi-band compatible stealth materials[J]. Progress in Chemistry, 2021, 33(6): 1044-1058.
- [5] Li W, Fan S H. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15995-16021.

- [6] Baranov D G, Xiao Y Z, Nechepurenko I A, et al. Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters[J]. *Nature Materials*, 2019, 18(9): 920-930.
- [7] Kumar N, Dixit A. Nanotechnology for defence applications[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [8] Abdulkarim Y I, Mohanty A, Acharya O P, et al. A review on metamaterial absorbers: microwave to optical [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 893791.
- [9] Wu Y, Tan S J, Zhao Y, et al. Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101088.
- [10] Hu R, Xi W, Liu Y D, et al. Thermal camouflaging metamaterials[J]. *Materials Today*, 2021, 45: 120-141.
- [11] Yang J J, Zhang X F, Zhang X, et al. Beyond the visible: bioinspired infrared adaptive materials[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(14): 2004754.
- [12] 孙雨威, 贺楠, 张智, 等. 吸波超表面及其在中红外波段的应用[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1704001.
Sun Y W, He N, Zhang Z, et al. Absorbing metasurfaces and their applications in the mid-infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1704001.
- [13] Zhu Y N, Zhou Y W, Qin B, et al. Night-time radiative warming using the atmosphere[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 268.
- [14] Yu J B, Qin R, Ying Y B, et al. Asymmetric directional control of thermal emission[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(45): 2302478.
- [15] Ying Y B, Yu J B, Qin B, et al. Directional thermal emission covering two atmospheric windows[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300407.
- [16] Qi D, Chen F, Wang X, et al. Effective strategy for visible-infrared compatible camouflage: surface graphical one-dimensional photonic crystal[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5323-5326.
- [17] Zhang J K, Zhao D P, Chen Z S, et al. One dimensional photonic crystal based multilayer film with low IR and visible signatures[J]. *Optical Materials*, 2019, 91: 261-267.
- [18] Liu B, Chen Z S, Li Z G, et al. Design and preparation of multispectral stealth photonic crystals for visible light, infrared radiation, and 1.06- μm laser[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(12): 127107.
- [19] 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.
- [20] Deng Z C, Su Y R, Qin W, et al. Nanostructured Ge/ZnS films for multispectral camouflage with low visibility and low thermal emission[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(4): 5119-5127.
- [21] Fu S Q, Zhang W, Wu Y, et al. Bioinspired porous anodic alumina/aluminum flake powder for multiband compatible low detectability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(6): 8464-8472.
- [22] Lee N, Lim J S, Chang I, et al. Transparent metamaterials for multispectral camouflage with thermal management[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 173: 121173.
- [23] Zhang L, Wang J, Lou J, et al. A thermally robust and optically transparent infrared selective emitter for compatible camouflage[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(42): 15018-15025.
- [24] Wu Y J, Luo J, Pu M B, et al. Optically transparent infrared selective emitter for visible-infrared compatible camouflage[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 17259-17269.
- [25] Li D, Chen Q X, Huang J H, et al. Scalable-manufactured metamaterials for simultaneous visible transmission, infrared reflection, and microwave absorption [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(29): 33933-33943.
- [26] Wen K H, Han T C, Lu H P, et al. Experimental demonstration of an ultra-thin radar-infrared bi-stealth rasorber[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8872-8879.
- [27] Zhang C L, Wu X Y, Huang C, et al. Flexible and transparent microwave-infrared bistalth structure[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1900063.
- [28] Xu C L, Wang B K, Yan M B, et al. An optically transparent sandwich structure for radar-infrared bi-stealth [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103108.
- [29] Xu C L, Wang B K, Yan M B, et al. An optical-transparent metamaterial for high-efficiency microwave absorption and low infrared emission[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(13): 135109.
- [30] Huang S N, Fan Q, Xu C L, et al. A visible-light-transparent camouflage-compatible flexible metasurface for infrared-radar stealth applications[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(1): 015001.
- [31] Gao Z Q, Xu C L, Tian X X, et al. Ultra-wideband flexible transparent metamaterial with wide-angle microwave absorption and low infrared emissivity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22108-22116.
- [32] Kim T, Bae J Y, Lee N, et al. Hierarchical metamaterials for multispectral camouflage of infrared and microwaves[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(10): 1807319.
- [33] Lee N, Lim J S, Chang I, et al. Flexible assembled metamaterials for infrared and microwave camouflage[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(11): 2200448.
- [34] Pang Y Q, Li Y F, Yan M B, et al. Hybrid metasurfaces for microwave reflection and infrared emission reduction[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11950-11958.
- [35] Meng Z, Tian C H, Xu C L, et al. Optically transparent coding metasurface with simultaneously low infrared emissivity and microwave scattering reduction[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27774-27784.
- [36] Park C, Kim J, Hahn J W. Integrated infrared signature management with multispectral selective absorber via single-port grating resonance[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(13): 2002225.
- [37] Huang J K, Wang Y T, Yuan L M, et al. Large-area

- and flexible plasmonic metasurface for laser - infrared compatible camouflage[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(3): 2200616.
- [38] Liu X H, Wang P, Xiao C Y, et al. Compatible stealth metasurface for laser and infrared with radiative thermal engineering enabled by machine learning[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(11): 2212068.
- [39] Huang Y, Ma B Z, Pattanayak A, et al. Infrared camouflage utilizing ultrathin flexible large-scale high-temperature-tolerant lambertian surfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000391.
- [40] 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: 1805.
- [41] Feng X D, Pu M B, Zhang F, et al. Large-area low-cost multiscale-hierarchical metasurfaces for multispectral compatible camouflage of dual-band lasers, infrared and microwave[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(36): 2205547.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Qin B, Zhu Y N, Zhou Y W, et al. Whole-infrared-band camouflage with dual-band radiative heat dissipation[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 246.
- [45] Shim H B, Han K, Song J, et al. A multispectral single-layer frequency selective surface absorber for infrared and millimeter wave selective Bi-stealth[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(6): 2102107.
- [46] Zhong H, Liu N, Yang Z H, et al. Visible-infrared transparent coding metasurface based on random metal grid for broadband microwave scattering[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(11): 4870-4876.
- [47] Zhu R C, Wang J F, Jiang J M, et al. Machine-learning-empowered multispectral metafilm with reduced radar cross section, low infrared emissivity, and visible transparency[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(5): 1146.
- [48] 龚伟, 赵文华, 王心田, 等. 基于机器学习的激光微纳加工研究:应用和前景[J]. *中国激光*, 2023, 50(20): 2000001. Gong W, Zhao W H, Wang X T, et al. Machine learning for laser micro/nano manufacturing: applications and prospects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(20): 2000001.
- [49] Oh D K, Lee T, Ko B, et al. Nanoimprint lithography for high-throughput fabrication of metasurfaces[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(2): 229-251.
- [50] Zhu H Z, Li Q, Zheng C Q, et al. High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 60.
- [51] Huang L H, Li H C, Li Z G, et al. Multiband camouflage design with thermal management[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(5): 839.
- [52] Ergoktas M S, Bakan G, Kovalska E, et al. Multispectral graphene-based electro-optical surfaces with reversible tunability from visible to microwave wavelengths[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(7): 493-498.
- [53] Sun Y, Chang H C, Hu J, et al. Large-scale multifunctional carbon nanotube thin film as effective mid-infrared radiation modulator with long-term stability[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(3): 2001216.
- [54] Qu Y R, Li Q, Cai L, et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 26.
- [55] Xu Z Q, Li Q, Du K K, et al. Spatially resolved dynamically reconfigurable multilevel control of thermal emission[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(1): 1900162.
- [56] Xu Z Q, Luo H, Zhu H Z, et al. Nonvolatile optically reconfigurable radiative metasurface with visible tunability for anticounterfeiting[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(12): 5269-5276.