

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250320.

专题:纪念创刊50周年

成龚芸,潘丹宁,王浩强,等. 基于微纳结构的红外兼容多波段隐身:原理、现状及挑战[J]. 光通信研究, 2025(6): 250320.

Cheng G Y, Pan D N, Wang H Q, et al. Micro-Nano Structured Multispectral Stealth with Infrared Compatibility: Principles, Status, and Challenges [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250320.

# 基于微纳结构的红外兼容多波段隐身:原理、现状及挑战

成龚芸,潘丹宁,王浩强,雷蕾

(深圳大学 a. 射频异质异构集成全国重点实验室; b. 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室; c. 物理与光电工程学院,深圳 518060)

**摘要:**随着红外和雷达探测技术的飞速发展及其与可见光和激光等探测手段的融合,战场目标的生存环境日益严峻,发展多波段兼容隐身技术具有重大战略意义。传统涂层材料通常仅在特定波段具备低发射率特性,缺乏光谱选择性,难以满足多波段兼容隐身的应用需求。近年来,基于多响应模式融合的光学微结构为实现光谱的精准调控提供了新的途径,通过逼近理想光谱响应,有望在多个目标波段实现有效隐身。文章系统梳理并评述了多波段隐身技术的最新研究进展:首先阐述了基于干涉与谐振原理的电磁吸收调控机制,及其在可见光、红外与微波等波段的隐身机理与实现路径;进而剖析了多波段兼容隐身结构的设计策略,针对传统正向设计计算复杂度高和优化效率低的局限性,重点探讨了智能逆向设计在实现光谱精准匹配与结构优化中的关键作用;接着,面向复杂环境背景下的隐身需求,重点分析了基于相变材料、液晶和石墨烯等新型功能材料赋能的自适应动态调控隐身技术;最后,对多波段隐身技术的未来进行了探讨与展望。

**关键词:**红外隐身;多波段兼容;热辐射调控;微纳结构;动态自适应;逆向设计

**中图分类号:**TN929 **文献标志码:**A

## Micro-Nano Structured Multispectral Stealth with Infrared Compatibility: Principles, Status, and Challenges

CHENG Gongyun, PAN Danning, WANG Haoqiang, LEI Lei

(a. State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration; b. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province; c. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The rapid advancement of infrared and radar detection technologies and their integration with visible light, laser, and other detection methods, the survivability of battlefield targets is facing increasing challenges. Consequently, the development of multispectral compatible stealth technology holds significant strategic significance. Traditional coating materials, typically exhibiting low emissivity only in specific bands and lacking spectral selectivity, struggle to meet the demands of multispectral stealth applications. In recent years, optical microstructures based on the fusion of multi-response modes have provided a novel pathway for precise spectral manipulation, showing great potential for achieving effective stealth across multiple target bands by approaching the ideal spectral response. This review systematically investigates the latest research progress of multispectral stealth technology. It begins by elucidating the electromagnetic absorption regulation mechanisms based on interference and resonance principles, along with their corresponding stealth mechanisms and implementation pathways in the visible, infrared, and microwave bands. Subsequently, it analyzes the design strategies for multispectral compatible stealth structures. To address the limitations in traditional forward design, such as high computational complexity and low optimization efficiency, this review highlights the pivotal role of intelligent reverse design in achieving precise spectral matching and structural optimization. Furthermore, focusing on the requirements for stealth in complex and variable environmental backgrounds, it provides an in-depth analysis of adaptive and dynamically tunable stealth technologies enabled by novel functional materials such as phase-change materials, liquid crystals, and graphene. Finally, the review discusses future prospects and outlines development directions for multispectral stealth technology.

**Key words:** infrared stealth; multispectral compatibility; thermal radiation regulation; micro-nano structure; dynamic adaptability; inverse design

收稿日期:2025-09-30; 修回日期:2025-10-29; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62522512,62475162,62405198);广东省自然科学基金资助项目(2024A1515011802);深圳大学重大科研仪器培育资助项目(2024YQ005);深圳大学青年教师科研启动资助项目(RC20240183)

作者简介:成龚芸(2000-),女,湖北武汉人。硕士,主要研究方向为超材料隐身器件。

潘丹宁(2001-),女,广西钦州人。硕士,主要研究方向为超材料隐身器件。

作者贡献声明:成龚芸与潘丹宁贡献等同,为共同第一作者。

通信作者:王浩强,助理教授。E-mail:hqwang@szu.edu.cn。

雷蕾,副教授。E-mail:leilei@szu.edu.cn。

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## 0 引言

得益于光学、电子学和材料学等领域的迅猛发展,现代探测技术的性能得到了显著提升<sup>[1-2]</sup>。在构成现代探测体系的各种探测技术中,红外(Infrared, IR)探测与雷达探测是两大核心技术手段。IR探测是一种被动探测技术,主要利用目标自身发射的IR信号,通过分析目标与背景的辐射差异实现定位与识别。而雷达探测则属于主动探测,该技术基于电磁波反射原理,通过发射特定频率的电磁波并接收目标反射信号,实现对目标的远距离侦测与跟踪。在现代先进的防空和舰载等作战平台中,IR探测与雷达探测协同作用,共同实现对目标的精准定位与识别。

在此背景下,能够有效应对多波段探测的先进隐身技术已成为世界各国国防科技领域竞相研究的前沿热点<sup>[3]</sup>。隐身技术旨在通过主动或者被动手段调控被探测目标的热辐射、吸收、反射和散射等特征,降低其被探测与识别的概率,来提升目标的生存能力。目前,多波段兼容隐身主要基于多种单一波段隐身材料的组合,并已在部分电子信息装备上通过隐身涂层、隐身篷布、伪装网和隐身复合材料等形式初步实现了可见光(Visible, VIS)、IR和雷达波的兼容隐身<sup>[4-5]</sup>。然而,该技术路线本质上属于“拼接式”设计,难以从根本上解决不同波段隐身机制之间的内在矛盾。而光学微结构具有较大的自由度空间<sup>[6]</sup>,可通过微结构设计实现多波段光学与电磁特性的协同调控,为多波段兼容隐身提供了新的解决方案。

结合近年来多波段隐身技术的最新研究进展,本文系统梳理了相关电磁辐射理论基础和典型电磁吸收调控机制,并对各波段隐身技术的3大主要实现路径进行了归纳,包括:①通过材料属性调控和电磁干涉/谐振调控等关键技术手段,构建兼具多波段隐身性能的功能材料与微纳结构;②将人工智能辅助算法引入多波段兼容隐身结构的优化设计,突破了传统人工设计过程中参数优化的局限性,有效提升了设计效率;③利用先进材料的动态响应特性,设计具有实时调控能力的隐身结构,以适配复杂多变的实际应用场景。文末进一步结合当前新材料与微纳制造技术的发展动态,从核心技术突破方向和应用场景拓展路径等关键维度,对多波段隐身技术的未来发展趋势进行了展望。

## 1 光学隐身的物理机理

### 1.1 热辐射与吸收核心理论

热辐射理论由3大定律共同构筑:普朗克黑体辐射定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律和基尔霍夫定律。普朗克黑体辐射定律揭示了黑体辐射能量随波长和温度的分布规律,为热辐射光谱行为提供了基本的理论描述与理想参考。斯蒂芬-玻尔兹曼定律可由普朗克黑体辐射定律在全波长范围内积分导出,可表示为

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

式中: $X$ 为物体的总辐射功率密度; $\epsilon$ 为发射率( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ); $\sigma$ 为斯特藩-玻尔兹曼常数; $T$ 为绝对温度。该定律指出黑体( $\epsilon=1$ )的 $X$ 与 $T^4$ 成正比。实际物体的辐射能力需通过发射率修正,本质上反映了材料辐射性能与黑体的偏差。基尔霍夫定律<sup>[7]</sup>进一步阐明,在热平衡状态下,物体的光谱发射率 $\epsilon$ 等于其光谱吸收率,可表示为

$$\epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T), \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为电磁辐射的波长; $\alpha$ 为吸收率( $0 \leq \alpha \leq 1$ )。该定律表明物体的辐射能力与其吸收能力成正相关。以上定律共同构筑了热辐射理论的核心体系。

### 1.2 薄膜干涉

薄膜干涉的本质是光波在不同界面间反射、透射后产生的多光束相干叠加。其相长干涉对应于最大反射率,而相消干涉则对应最小反射率或最大吸收率<sup>[8]</sup>。通过精确调控薄膜的厚度,即可实现对入射波的连续与精准调控,为定制化IR光谱特性提供了基本原理依据。将单层膜干涉原理拓展至多层膜体系后,可通过各层反射/透射波的协同调控,实现宽波段增透和选择性吸收等复杂光谱响应。多层膜光学特征分析常用传输矩阵法,该方法将每层膜的光学特性表征为一个 $2 \times 2$ 的特征矩阵<sup>[8-9]</sup>;整个膜系的总光学特性即为各层矩阵的乘积,据此可计算反射率 $r$ 、透射率 $\tau$ 及吸收率 $\alpha=1-r-\tau$ <sup>[10]</sup>。基于传输矩阵法的多层膜设计,能精准调控大气窗口的光谱响应,具有较高的可靠性和可重复性。

### 1.3 谐振调控机制

在光学隐身技术中,基于多模式谐振效应的调控是实现高性能、光谱选择性吸收的主要途径。该调控体系主要依赖于传播型表面等离子体共振(Propagating Surface Plasmon Resonance, PSPR)、局域型表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)和法布里-珀罗(Fabry-

Pérot, F-P)腔谐振 3 大核心机制。

如图 1(a)所示, PSPR 源于介质-金属界面自由电子的集体相干振荡,其沿界面传播的特性可用于调控 IR 长波波段的谐振响应。根据麦克斯韦方程组推导, PSPR 的波矢-频率色散关系为

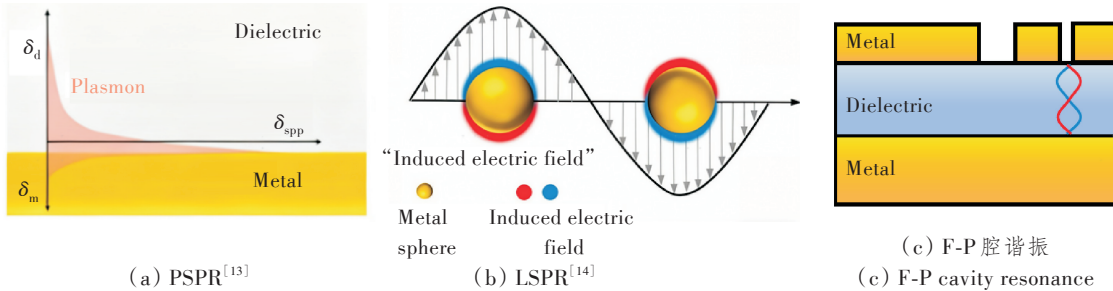
$$k_{\text{PSPR}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (3)$$

式中:  $k_{\text{PSPR}}$  为 PSPR 波矢;  $\omega$  为频率;  $c$  为光速;  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为介质和金属的介电常数。PSPR 具有亚波长局域性和强场增强效应,通过调控金属薄膜的厚度、介电环境或引入周期性结构,可在 IR 波段实现窄带吸收,适用于中远 IR 隐身中的频段选择性抑制<sup>[11-12]</sup>。

如图 1(b)所示, LSPR 由金属纳米结构的局域电磁振荡引起,能量约束在纳米尺度,无需动量匹配

即可激发。LSPR 对颗粒形貌、尺寸及周围介电环境高度敏感,其共振波长随介质折射率的变化而发生显著偏移。此外, LSPR 还具有强烈的局域场增强效应,场增强因子可达  $10^3$  以上,可有效提升中短波 IR 波段的吸收效率。

F-P 腔谐振如图 1(c)所示, F-P 腔隐身结构常采用“金属-介质-金属 (Metal-Insulator-Metal, MIM)”<sup>[15]</sup>或“介质-金属”堆叠结构。底层电极金属充当高反射镜,顶层金属(或介质层)则实现部分反射和部分透射,透射波在两界面间来回传播,当往返光程差等于波长的整数倍时,发生相长干涉,从而在介质层形成强烈的驻波场,将电磁波能量局域在亚波长尺度范围内,并通过介质损耗或金属欧姆损耗转化为热能,进而实现特定波段的高吸收。



注:  $\delta_d$  为介质穿透深度;  $\delta_m$  为金属穿透深度;  $\delta_{\text{spp}}$  为表面等离子体极化子传播长度。

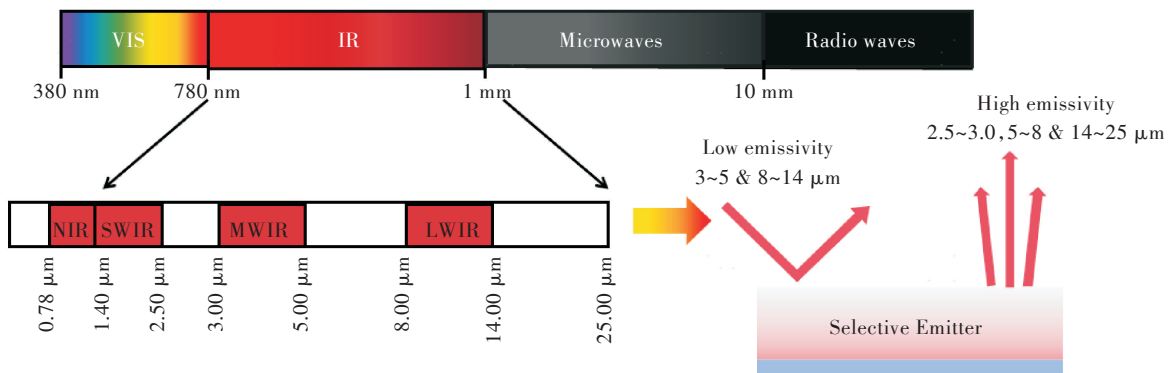
图 1 隐身技术中典型的谐振模式

Figure 1 Typical resonance modes in stealth technology

#### 1.4 光谱选择性辐射

电磁波谱的频段划分如图 2 所示,不同电磁波

段(如 VIS、IR、激光和雷达)的探测原理与特征不同,其对应隐身技术的光谱调控方式也各不相同。



注: NIR 为近红外; SWIR 为短波红外; MWIR 为中波红外; LWIR 为长波红外。

图 2 电磁波谱频段划分

Figure 2 Electromagnetic spectrum bands

在 VIS 波段(0.38~0.78  $\mu\text{m}$ ), 隐身的主要方法是通过散射或吸收机制降低反射和产生结构色, 以实现目标与周围环境的色彩融合。

在 IR 波段(0.78  $\mu\text{m}$ ~1.00 mm), 由于大气吸收作用<sup>[16]</sup>, 实际可用于探测的窗口主要为 SWIR(1.4~

2.5  $\mu\text{m}$ )、MWIR(3~5  $\mu\text{m}$ ) 和 LWIR(8~14  $\mu\text{m}$ )。由式(1)所示的斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知, 实现高效 IR 隐身的途径是降低目标表面辐射率或温度, 然而, 实际中这二者却存在内部矛盾: 低辐射率会阻碍热辐射过程, 导致热量聚积和温度升高; 而降低目

标温度则通常需要通过提高辐射率来加速释放热量。为了解决上述矛盾,当前 IR 隐身的设计重点是在 3~5 和 8~14  $\mu\text{m}$  的关键“探测窗口”尽可能保持低发射率以实现有效隐身,同时,在非探测波段(如 2.5~3.0、5.0~8.0、14.0~25.0  $\mu\text{m}$ )提高发射率,从而兼顾隐身与热管理的双重需求。此外,在 NIR (0.78~1.40  $\mu\text{m}$ )和 SWIR 波段也需尽量降低反射,以应对更广泛的探测可能。

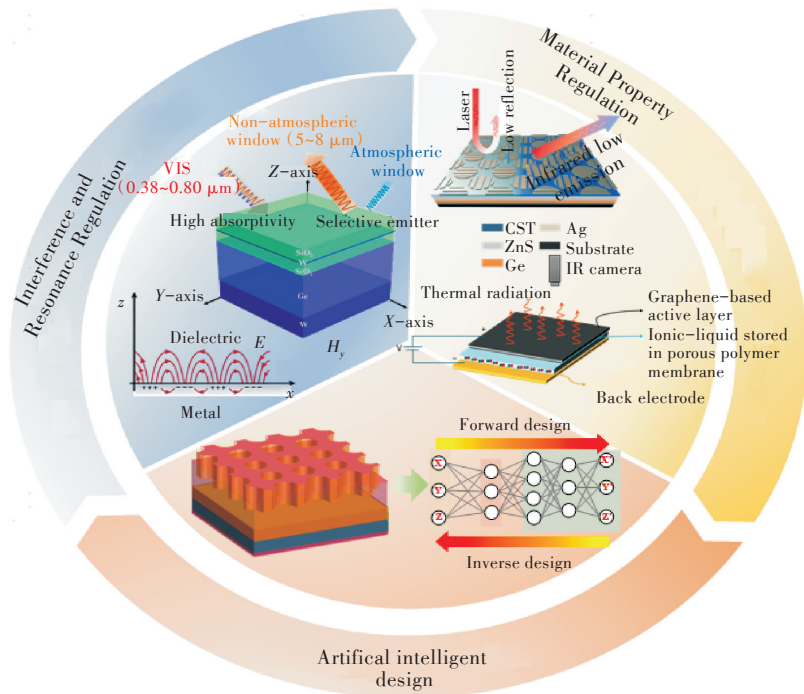
特别地,在激光探测方面,典型的激光雷达波长包括 0.93、1.06、1.55 和 10.60  $\mu\text{m}$ 。激光探测和雷达探测原理类似,通过发射激光信号或微波、毫米波并接收目标反射回波,实现隐身的关键是通过吸收或者散射机制减弱激光回波信号和降低目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),从而降低被探测概率。

由此可见,针对各波段隐身方式的不同,要实现

多波段兼容隐身,需要对目标的热辐射(或吸收)光谱进行精准调控,根据需求利用光的干涉和共振等吸收机理增强或抑制目标波长范围内的辐射、吸收、散射与反射<sup>[17-18]</sup>。

## 2 光学隐身的多波段兼容与动态智能设计

正如引言所述,多波段隐身技术的进展主要体现在 3 大技术路径的协同发展和融合。图 3 系统地归纳了多波段隐身技术的前沿动态。在此背景下,本章将围绕光学隐身的多波段兼容特性与动态智能设计展开,重点探讨多波段兼容实现路径、智能优化算法在微结构设计中的应用及动态自适应隐身技术核心机制,为多波段隐身技术的性能提升与工程化应用提供理论与技术支撑。



注:GST为锗锡碲合金;Ge为锗;ZnS为硫化锌;Ag为银;SiO<sub>2</sub>为二氧化硅。

图3 多波段隐身技术的技术路径分类<sup>[11,19-21]</sup>

Figure 3 Categorization of recent research approaches in multispectral stealth technology<sup>[11,19-21]</sup>

### 2.1 多波段兼容光学隐身技术

基于前述多波段兼容隐身的理想光谱模型,近年来,研究人员在材料与微结构设计上取得了关键进展,尤其在解决 VIS-IR 及激光-IR 等跨波段兼容难题方面成果显著。因此,本节将重点综述这几类代表性的兼容隐身技术,并结合器件深入分析其实现不同波段信号调控的机理与性能优劣。

在 VIS-IR 兼容隐身方面,Tan 等人提出了一

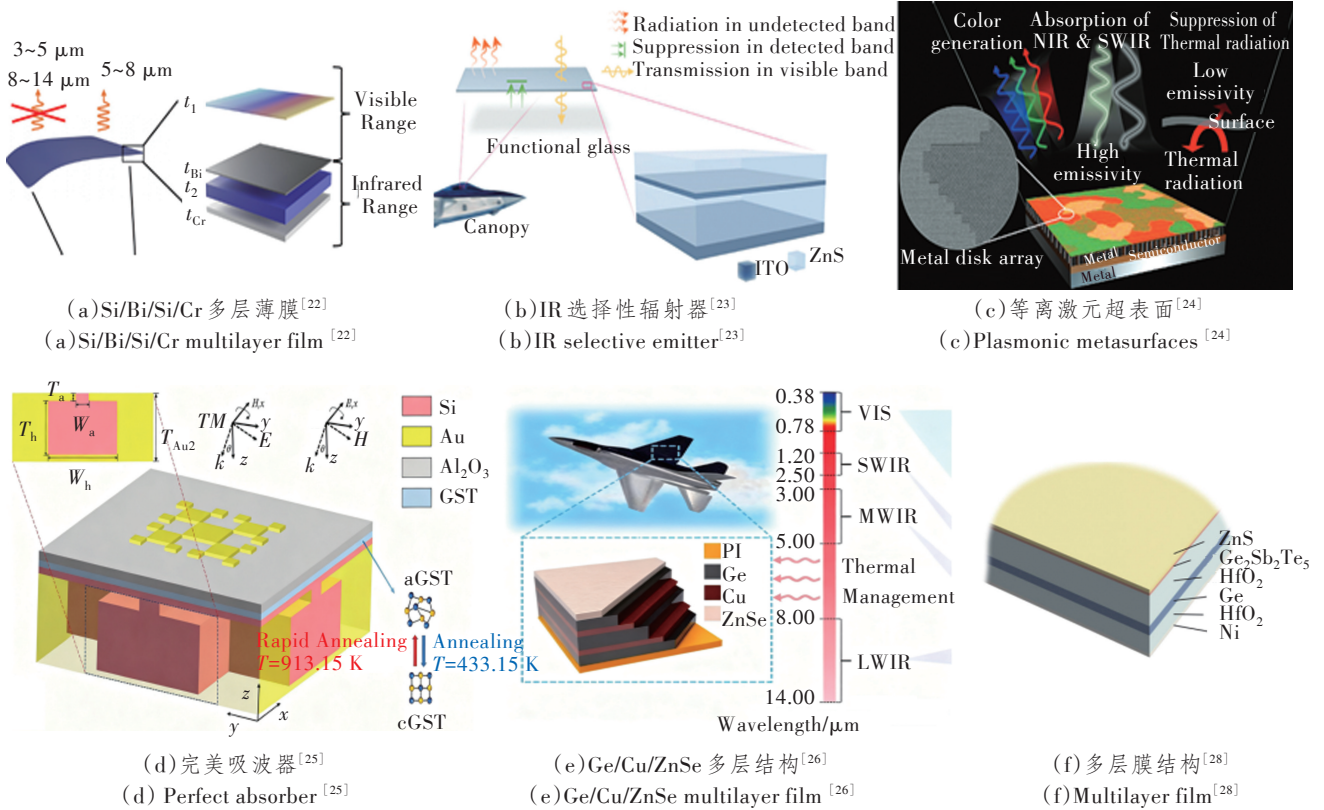
种由硅(Si)/铋(Bi)/Si/铬(Cr)组成的超薄 4 层薄膜结构<sup>[22]</sup>,如图 4(a)所示,通过非对称 F-P 共振实现宽色域调控,并借助 MIM(Bi/Si/Cr)共振结构,在 3~5 和 8~14  $\mu\text{m}$  实现低发射率(分别为 0.39 和 0.36),在 5~8  $\mu\text{m}$  保持高发射率(0.79)以利于散热;针对高温目标散热难题,Zhang 等人提出基于氧化铟锡(ITO)/ZnS 的 IR 选择性辐射器<sup>[23]</sup>,如图 4(b)所示,在保持 VIS 高透射率(0.68~0.82)的同时,

在 2.5~3.0 与 5~8  $\mu\text{m}$  波段发射率分别达到 0.621 和 0.925,在 3~5 和 8~14  $\mu\text{m}$  维持低发射率(约 0.26)。

在激光-IR 兼容隐身方面,如图 4(c)所示, Kim 利用铝(Al)圆盘阵列、Ge 和 Ag 组成的超表面<sup>[24]</sup>, 通过 LSPR 效应生成迷彩图案,在 1.06  $\mu\text{m}$  激光处吸收率超 92%,并在 SWIR、MWIR 与 LWIR 波段均实现显著信号抑制,展示了 5 波段兼容隐身能力; 如图 4(d)所示, Luo 等人提出基于亥姆霍兹共振器和分形结构的完美吸波器<sup>[25]</sup>,在 1.06 与 10.60  $\mu\text{m}$  激光波段均实现完美吸收,吸收率大于 0.99,同时在 3~5 与 8~14  $\mu\text{m}$  平均发射率分别为 0.03 和 0.31。

随着 SWIR 探测技术的普及, Huang 等人开发的 Ge/Cu/ZnSe 多层结构在 SWIR、MWIR 与 LWIR 波段平均发射率分别为 0.23、0.11 和 0.27,

并在大气吸收窗口实现了高效辐射散热<sup>[26]</sup>,如图 4(e) 所示,在太空隐身应用场景,由于太空环境下常规的热传导与热对流机制基本失效,因此,航天器只能依靠辐射散热,如何在抑制 IR 探测信号的同时实现有效散热成为太空目标隐身的核心难题;为解决这一问题, Li 等人提出一种复合超材料,在 3~12  $\mu\text{m}$  MWIR 波段展现出 83.4% 的平均发射率<sup>[27]</sup>; Qin 等人设计并实验验证了如图 4(f)所示的多层结构,在 H(1.5~1.8  $\mu\text{m}$ ) 和 K(2.0~2.4  $\mu\text{m}$ ) 面观测信噪比高的波段吸收率分别达到 0.839 与 0.633,能有效抑制太阳反射信号,在 MWIR 与 LWIR 波段发射率低于 0.14,同时利用 13~25  $\mu\text{m}$  的超长波 IR 波段高发射率(0.798)进行辐射散热,使太空目标与背景更好地融合<sup>[28]</sup>。



注: Au 为金;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为氧化铝; aGST 为非晶态 GST; cGST 为晶态 GST; PI 为聚酰亚胺;  $\text{HfO}_2$  为二氧化铪; Ni 为镍;  $T$  为厚度;  $W$  为宽度。

图 4 VIS-IR 兼容隐身

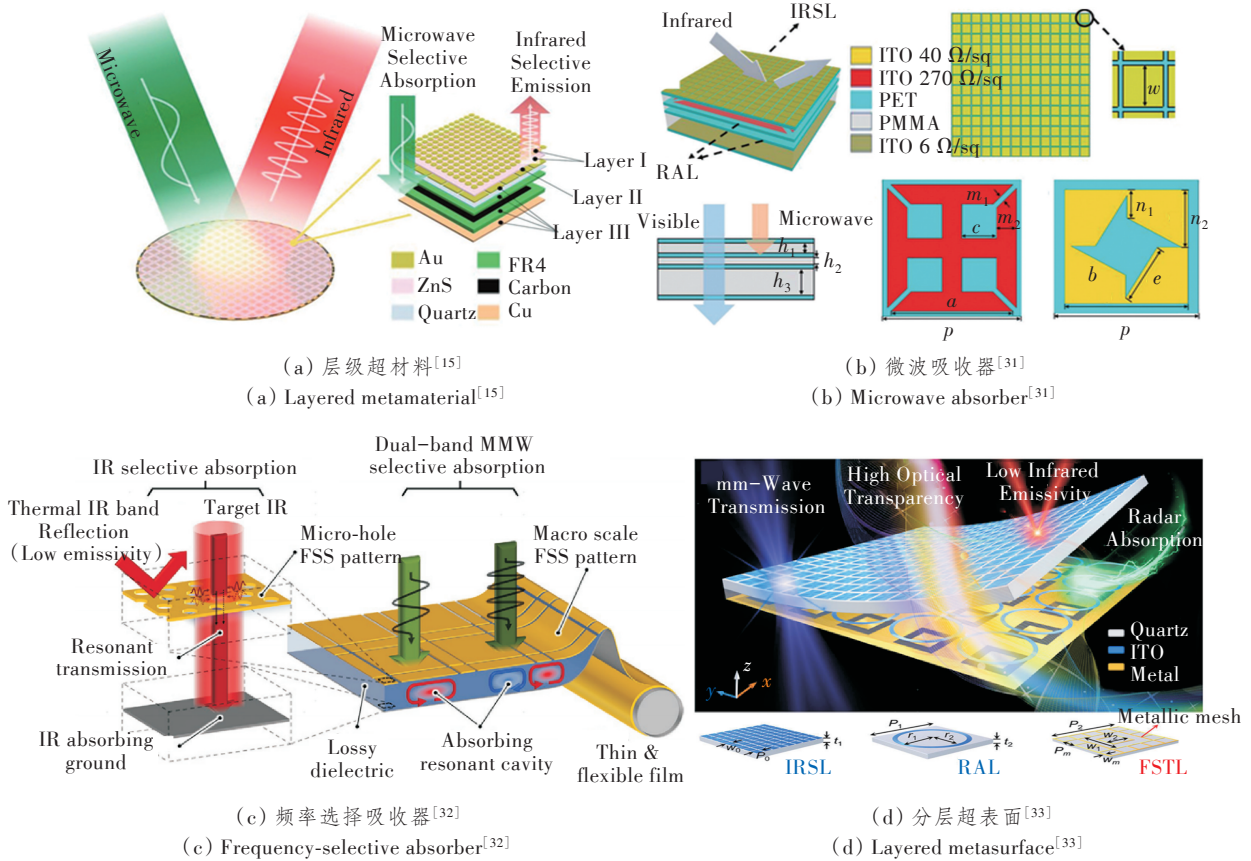
Figure 4 VIS-IR compatible stealth

对于 IR-雷达兼容隐身则需要降低 IR 探测波段的热发射率和增加雷达波段的吸收率<sup>[29-30]</sup>。超材料的工作波长与单元尺寸成正比,因此,多光谱隐身要求在同一结构中包含各种尺寸的元胞,以覆盖微波、毫米波和 IR 光等多光谱波长范围,但这会大大增加设计和制备难度。Kim 等人提出并实验

证了一种由石英中间层集成 IR 选择性发射器与微波选择性吸收器的超材料,如图 5(a)所示,在 5~8 和 8~12  $\mu\text{m}$  波段发射率分别为 0.92 和 0.14,在 X 波段(8~12 GHz)平均吸收率达 0.94,实现了 IR-微波多光谱隐身与热稳定的协同<sup>[15]</sup>; Cui 等人提出并实验验证了一种 VIS 透明宽带微波超材料吸收

器<sup>[31]</sup>,如图5(b)所示,该器件在7~23 GHz微波频段实现超90%吸收,在VIS和IR波段分别保持低反射和低发射;为优化多层堆叠结构带来的厚重与串扰问题,如图5(c)所示,Shim等人提出的结构实现了1.54 μm激光高吸收(0.91)、IR探测窗口低发

射率(0.05)以及35/94 GHz毫米波高吸收(>0.91),结构简洁且性能稳定<sup>[32]</sup>;如图5(d)所示,Ge等人提出了一种分层集成多功能超表面,实现IR低发射率与宽带雷达吸收并构建毫米波传输窗口,解决了传统隐身材料“通信阻断”的关键矛盾<sup>[33]</sup>。



注:FR4为阻燃等级4;IRSL为红外屏蔽层;RAL为雷达吸波层;PET为聚对苯二甲酸乙二醇酯;PMMA为聚甲基丙烯酸甲酯;FSS为频率选择表面;FSTL为频率选择透过表面; $h$ 和 $t$ 为厚度; $p$ 为周期; $r$ 为半径; $w$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $m$ 和 $n$ 均为微纳形状尺寸。

图5 雷达-IR兼容隐身

Figure 5 Radar-infrared compatible stealth

## 2.2 智能优化算法赋能设计的光学隐身微结构

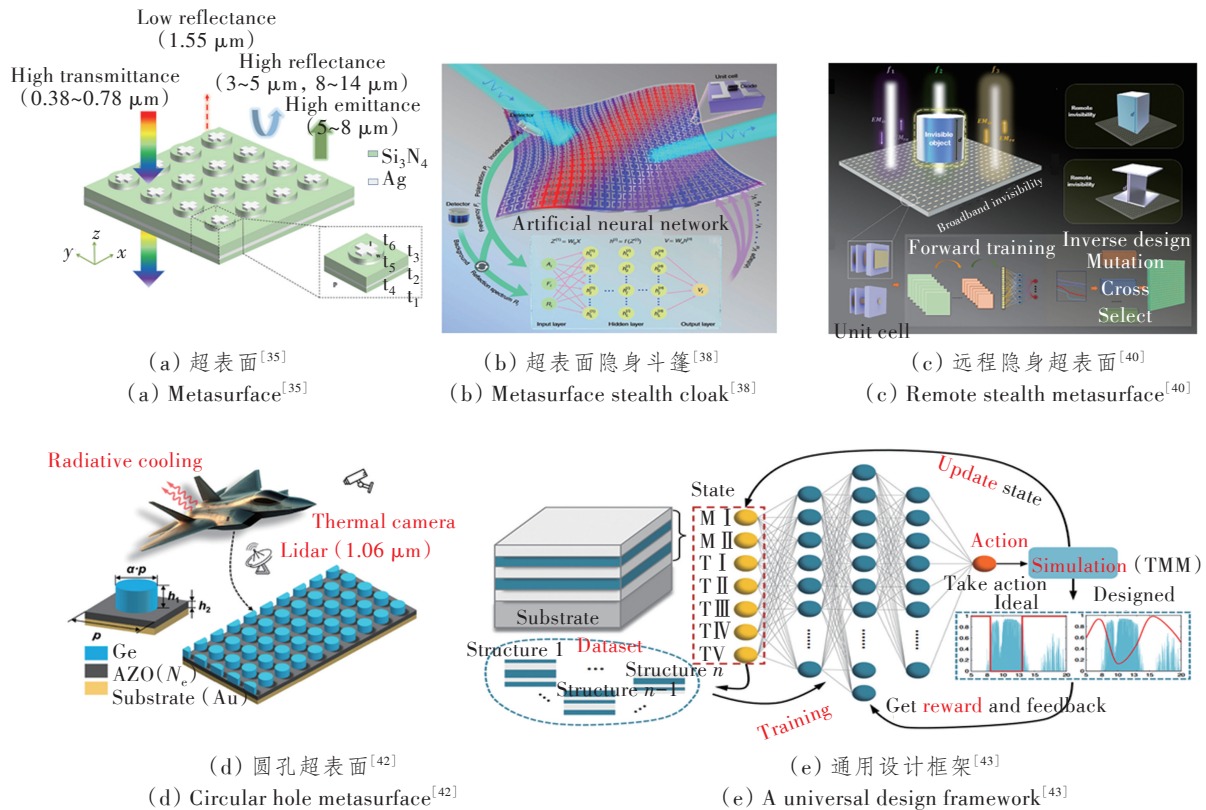
多参数协同优化是实现微纳结构精准设计的关键,重点要解决如何利用先进的非凸优化算法自动搜索全局最优解,从而规避局部最优的问题。该过程通常遵循一个闭环流程:①将光学目标转化为数学目标函数;②求解麦克斯韦方程组评估当前结构性能,并求解实际响应与目标响应的误差函数;③利用智能优化算法更新结构参数,迭代直至误差函数收敛。在此类算法中,启发式算法包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法等,应用尤其广泛。GA通过选择、交叉和变异操作逐步逼近最优解,在隐身器件设计中广泛应用,适用于复杂多峰优化问题<sup>[34]</sup>。例如:Nong等人通过GA与有限时域差分

法优化Ag/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>多层结构,如图6(a)所示,实现了VIS高透射(最高0.81)与IR低发射率(3~5 μm波段0.15),显著提升了设计效率<sup>[35]</sup>。

机器学习(Machine Learning, ML)利用数据驱动方式构建预测模型,其强大的自适应和泛化能力是隐身器件设计中应用最广泛的算法<sup>[36]</sup>。神经网络(Neural Network, NN)及其延伸的深度学习(Deep Learning, DL)模型<sup>[37]</sup>因在处理高维参数和复杂非线性映射方面的卓越能力而备受青睐。该方法需要构建大量器件结构参数与器件性能参数的数据集,利用NN从该数据集中学习并建立二者之间的逆向映射模型。借助该模型,可根据目标性能指标逆向设计出最优的器件结构。如图6(b)所示,Qian等人提出了DL驱动的智能自适应微波超表

面隐身斗篷概念,通过 10 000 个样本训练人工 NN,并经仿真(15 ms 响应)与实物实验(RCS 降低 85% 以上,适应入射波和背景变化)验证其有效性,解决了传统隐身斗篷自主性和实时性差等痛点<sup>[38]</sup>;2024 年,Qian 等人引入随机自主学习,将隐身技术集成于无人机,向实用化隐身载体(如移动装备)迈进<sup>[39]</sup>;传统的基于超表面的隐身技术通常将隐身结构直接附着在被隐藏物体的表面上,如图 6(c)所示, Lu 等人结合 DL 和差分优化方法设计了一种微波宽带远程隐身超表面,将不同尺寸的物体随机放置在设备前方,超表面在 8~18 GHz 的频率范围内

始终表现出优异的隐身性能,实现了对位于超表面一定距离的物体的隐藏<sup>[40]</sup>;针对逆向设计中“一对多”的映射难题,Liu 等人首次提出了一种双向 NN 模型,该模型通过串联正向预测网络与逆向设计网络,显著增强了求解结果的可靠性和稳定性<sup>[41]</sup>;如图 6(d)所示,Wang 等人将 NN 与 GA 结合,高效攻克了激光与 IR 兼容隐身的设计难题<sup>[42]</sup>;如图 6(e)所示,Yu 等人进一步构建了基于强化学习的通用框架,将其适用性成功拓展至辐射制冷与气体传感等多个功能领域<sup>[43]</sup>。



注:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  为氮化硅;AZO 为铝掺杂氧化锌;M 为材料。

图 6 逆向设计兼容隐身结构

Figure 6 Inverse-designed compatible stealth structures

在光电子领域,大多数器件都是基于传统的正向设计方法来满足应用需求的,设计者往往会根据自然启发、前人经验或自身直觉确定初始结构,通过理论分析手动调整材料与几何参数,结合仿真或实验验证,反复迭代直到获得达到预期目标的结果,最终确定器件参数。这样的设计方法存在很大的局限性:计算复杂度高、设计周期长、灵活性和创新性有限、难以处理多动能目标。由于多波段兼容的光谱选择性 IR 辐射器在各个波段的隐身需求矛盾,难以在大参数空间的前提下快速找到全局最优解,

严重制约了隐身器件的发展。人们结合优化算法对器件进行智能设计能显著弥补传统正向设计的效率与优化能力短板,但智能设计方法的计算资源消耗高,应用门槛较高,同时高度依赖目标函数与约束条件的合理性,通过轻量化技术和小样本学习降低对算力与数据的依赖,将工艺约束融入设计,让智能设计从理论可行走向产业可用,在微纳设计领域充分发挥其潜力。

### 2.3 动态自适应光学隐身技术

随着探测技术向宽频谱、高分辨率及智能化方

向快速发展,传统静态隐身方案因工作带宽固定、环境适应性差,难以满足复杂动态场景需求,动态自适应光学隐身技术通过外部激励实时调控材料或结构的光学性能,实现对变化环境的智能响应,已成为隐身技术发展的重要方向。目前主流调控机制主要包括相变结构调控、分子取向调控、电子密度调控以及其他辅助路径。

在相变结构调控方面,以二氧化钒( $\text{VO}_2$ )和GST为代表的相变材料,在热、光和电等外场激励下发生晶相转变,引起光学性能随之变化,进而实现隐身光谱响应的动态调控。然而,基于不同材料的相变体系在性能上各有侧重,也面临着相应的挑战。 $\text{VO}_2$ 主要受金属-绝缘体转变驱动,其在相变前后于中远IR波段的光学常数变化尤为显著,如图7(a)

所示,Li等人通过温度驱动 $\text{VO}_2$ 相变,将其与Al-CuFe准晶体和光子晶体板结合,在IR频段实现多波段/超宽带吸收切换,兼具偏振无关与大入射角稳定性<sup>[44]</sup>;如图7(b)所示,Liu等人则通过电流驱动 $\text{VO}_2$ 相变,将其集成于金纳米砖阵列与柔性基底之上,实现了能耗低且响应稳定的偏振态可调IR图像切换<sup>[45]</sup>。尽管如此, $\text{VO}_2$ 体系相变过程中的滞后效应以及对制备工艺的敏感性为器件的精准控制与重复性带来了挑战。相较于 $\text{VO}_2$ ,GST系列相变材料的主要优势在于相变温度可调范围宽,可实现非晶态与晶态之间的多级调控。如图7(c)所示,Kang等人利用紫外激光调控GST结晶度,在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段实现发射率 $0.15\sim 0.77$ 的连续调控,并演示了图案化隐身的应用潜力<sup>[46]</sup>。

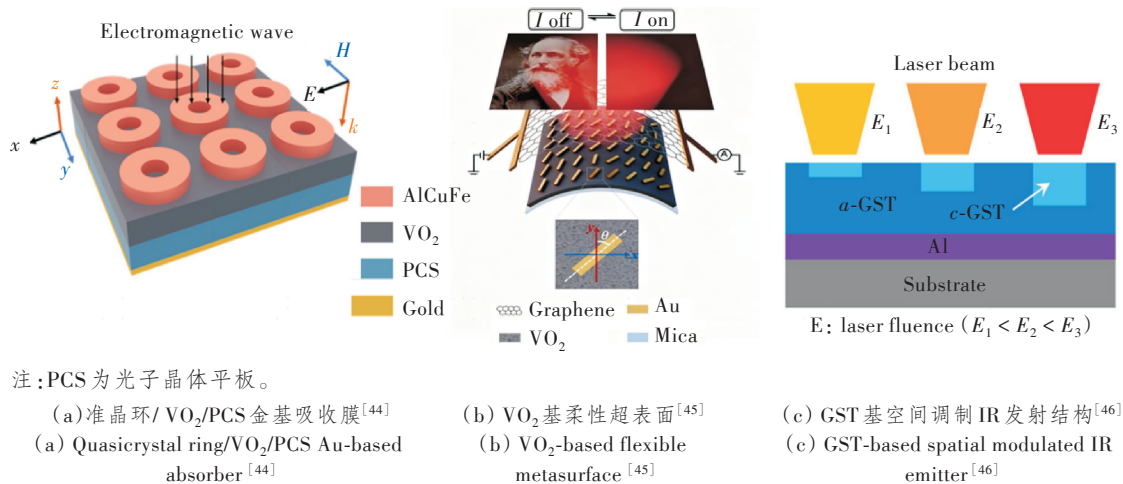


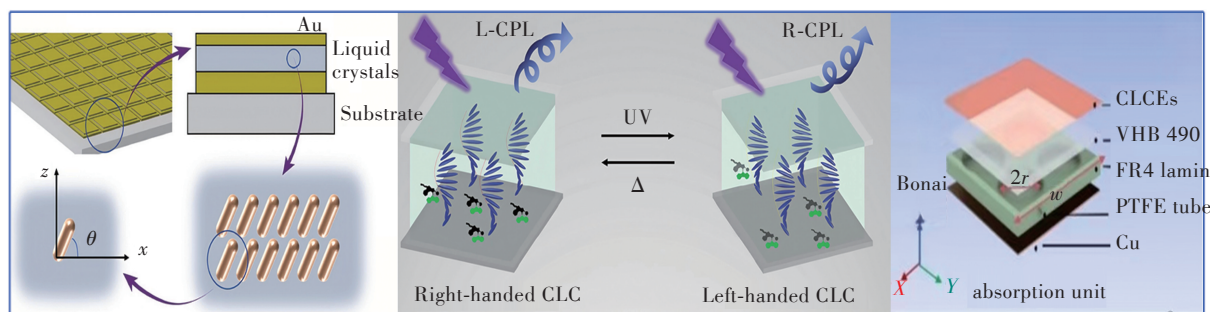
图7 晶体相变调控技术

Figure 7 Crystalline phase transition control technology

基于分子取向调控的动态隐身以液晶为核心,这类各向异性材料的分子排列在外场下可发生可逆变化,进而调控等效光学参数,兼具响应快和易集成的特点。向列相和胆甾相液晶展现了高效的电控能力。如图8(a)所示,Liu等人将向列相液晶与金属-液晶-金属(Metal-Liquid-Crystal-Metal,ML-CM)辐射超表面集成,通过电压调控液晶分子取向实现了 $6\sim 20\ \mu\text{m}$ 发射率 $0.81\sim 0.98$ 的动态调整,并能消除IR热点实现动态热伪装<sup>[47]</sup>;如图8(b)所示,Bao等人借助胆甾相液晶的螺旋超结构,通过掺杂光响应分子马达(Molecular Motor,MM)达成了光控圆偏振发光(Circularly Polarized Luminescence,CPL)手性与强度动态调控,显示出电场与光场协同调控潜力<sup>[48]</sup>,这类电场驱动液晶器件的共性挑战在于光学调控幅度受限于材料本身的介电与光学各向异性,难以实现极端发射率,与之相比,液晶

弹性体开辟了机械应变驱动的新路径;如图8(c)所示,Yang等人则开发了流体驱动的液晶弹性体器件,通过应变调控螺旋间距,同步实现了IR、VIS与微波的多频谱兼容隐身,并具备像素化编程能力<sup>[49]</sup>。但受限于机械驱动方式,系统效能偏低,且经过循环形变后光学耐久性出现衰减。

电子密度调控机制通过电场等手段改变材料载流子浓度,进而动态调控材料的介电特性与IR辐射。该机制不依赖相变过程,以快速响应和非相变特性展现出独特优势。石墨烯、透明导电氧化物(如ITO、AZO)和半导体(如InAs、InSb)是其中的代表性材料。如图9(a)所示,Salihoglu等人基于多层石墨烯(Multilayer Graphene,MLG)设计了3层电致变色器件,通过离子插层调控费米能级,在MWIR和LWIR波段实现了 $0.5$ 的发射率调制幅度<sup>[4]</sup>;Li等人利用钛酸锂(LTO)薄膜的电化学过程,在 $3\sim 5$

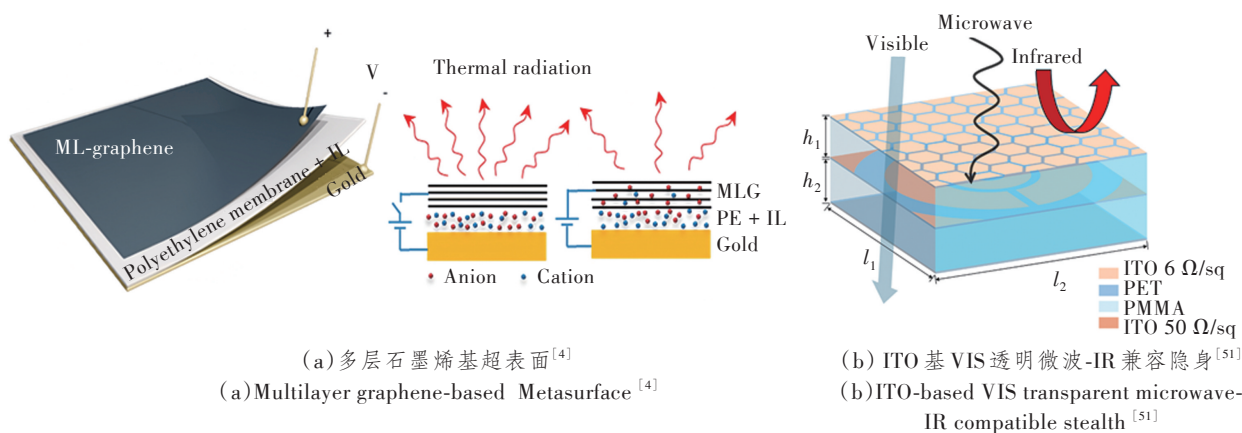


(a)电调MLCM辐射元表面架构<sup>[47]</sup> (b)光控CPL手性反转<sup>[48]</sup> (c)流体驱动隐身结构<sup>[49]</sup>  
 (a)Electrically tuned MLCM radiative metasurface architecture<sup>[47]</sup> (b)Photo-controlled CPL chiral inversion<sup>[48]</sup> (c)Fluid-actuated stealth metasurface<sup>[49]</sup>

注:CLC为胆甾相液晶;CLCEs为手性液晶弹性体;PTFE为聚四氟乙烯;VHB 490-为丙烯酸酯介电弹性体;UV为紫外。

图8 分子取向调控技术

Figure 8 Molecular orientation regulation technology



(a)多层石墨烯基超表面<sup>[4]</sup> (b)ITO基VIS透明微波-IR兼容隐身<sup>[51]</sup>  
 (a)Multilayer graphene-based Metasurface<sup>[4]</sup> (b)ITO-based VIS transparent microwave-IR compatible stealth<sup>[51]</sup>

注:PE为多孔聚乙烯;IL为离子液体。

图9 电子密度调控技术

Figure 9 Carrier density modulation technology

和 8~14  $\mu\text{m}$  波段实现了透射率从 0.7 至近零的可逆切换<sup>[50]</sup>;在透明隐身方面,如图 9(b)所示,Tan 等人构建了 ITO 基 3 层复合结构,通过优化掺杂与图案设计,在 VIS 波段保持约 0.6 透射率的同时,实现了 IR 低发射率与微波高吸收的兼容<sup>[51]</sup>;Zhang 等人则利用 InAs 超表面在磁场下产生的非互易辐射效应,打破了传统热辐射定律的限制,为 IR 隐身提供了新思路<sup>[52]</sup>。然而,基于电子密度调控的技术仍面临诸多源自材料本征特性的共同瓶颈:材料本征载流子运输能力限制了发射率调制范围,难以实现极端发射率的跨越;电化学等驱动方案依赖复杂器件结构与离子介质,存在循环寿命和封装稳定性的问题。

除了单一的调控机制,通过多种机制的协同设计可以实现更智能和更自适应的隐身效果。Chen 等人近期研发的自适应“元皮肤”,通过将分子取向调控与结构调控(MXene 褶皱)协同,巧妙地融合了

被动无源自适应与主动非易失控制的优点,为克服单一机制的局限性提供了新思路<sup>[53]</sup>。上述各类动态调控策略支撑了自适应隐身技术的发展,而迈向智能化和系统化是该技术的必然发展趋势。Wang 等人基于机械形变的动态超材料与 IR 传感、微处理器和驱动电机集成,构建了一个闭环反馈的自主隐身系统,实现了表观温度 27  $^{\circ}\text{C}$  范围的自主调控,响应时间为 1.56 s,并在动态隐身中保持了 VIS 结构色的稳定<sup>[54]</sup>。

相比于传统隐身技术,动态自适应隐身对环境的及时响应和动态调整进一步提升了隐身技术的实用性和智能水平。随着新型功能材料、调控手段和微纳制备技术的出现,该技术将重点聚焦于多功能协同、能效管理和柔性共形设计等系统性工程的突破。综上所述,基于相变材料和液晶等新型功能材料的动态调控,为多波段兼容技术提供了多样化的实现路径。

根据以上分析,表1总结了典型多波段兼容隐身器件的技术路径、性能对比与技术优势,涵盖了正向设计、智能逆向设计以及基于相变材料、液晶和石

墨烯等动态调控机制的代表性工作,为后续研究提供了参考依据。

表1 多波段兼容隐身器件的技术路径与性能对比

Table 1 Comparison of technical routes and performance for multispectral compatible stealth devices

技术类型	隐身特点	结构	调控机制	核心指标	技术优势	参考文献
正向设计	IR-微波	分层集成超表面	MDM 磁共振 欧姆损耗	$\epsilon_{5\sim 8\mu\text{m}}=0.920, \epsilon_{8\sim 12\mu\text{m}}=0.140$ $\epsilon_{\text{X}}<0.940$	隐身可靠性高	[32]
正向设计	H-K-MWIR-LWIR	多层薄膜	抗反射共振 本征损耗	$\epsilon_{\text{H}}=0.839$ $\epsilon_{\text{K}}=0.633,$ $\epsilon_{\text{MWIR,LWIR}}<0.14$	适用太空隐身	[29]
正向设计	IR-微波	分层集成超表面	材料特性匹配 欧姆损耗	$\epsilon_{7.6\sim 16.4\text{GHz}}>0.900$ $\epsilon_{3\sim 5\mu\text{m}}=0.304, \epsilon_{8\sim 14\mu\text{m}}=0.364$	性能精准平衡 鲁棒性强	[35]
逆向设计 DL 优化算法	微波	超表面 斗篷	反射相位调控	15 ms 响应 RCS 降低 85% 以上	空海陆两栖动态隐身	[41]
逆向设计 DL 差分优化 逆向设计	微波宽带 远程隐身	3层谐振 超表面	反射相位调控	8~18 GHz 远程隐身	突破传统限制 远程隐身	[42]
GA、有限域 差分	VIS-IR	多层超表面	MDM 共振 LSPR 共振	$T_{\text{VIS}}=0.81$ $\epsilon_{\text{MWIR}}=0.150$	多波段协同 设计效率高	[37]
相变材料 调控	IR 多波段动态 切换	VO <sub>2</sub> 与准晶 体、光子晶体 集成	热致相变	$\epsilon_{2.5\sim 4.0\mu\text{m}}=0\sim 0.700$	温致相变调控 宽窄带切换	[45]
液晶分子 取向调控	MWIR 波段	MLCM 超 表面	电压控 LC 取向	$\epsilon_{8\sim 13\mu\text{m}}(\theta=0^\circ, 20.5\% \text{ 应变})=$ 0.400 $\Delta T$ (目标-背景, 自适应 后) $\leq 1^\circ\text{C}$	多频谱兼容 像素化编程	[48]
石墨烯电子 调控	IR 动态隐身	3层电致 变色器件	离子插层调控 费米能级	$\epsilon_{10\mu\text{m}}(0\text{ V, MLG})=0.760$ $\epsilon_{10\mu\text{m}}(3.5\text{ V, MLG})=0.330$	非相变调控 响应速度快	[4]

注:MDM为金属-介质-金属。

### 3 结束语

本文系统综述了IR兼容多波段隐身技术的前沿研究进展,重点分析了隐身技术中薄膜干涉、等离子共振及多种动态调控等核心物理机制,介绍了智能算法在微结构隐身器件逆向设计中的应用,并探讨了多波段兼容、多功能集成和自适应隐身等领域的代表性成果。面向下一代大带宽、高灵敏和智能化的探测技术,未来隐身技术可重点关注以下方向:

#### ①高性能全频谱兼容隐身

当前技术的核心挑战在于大气吸收波段高温散热能力不足,且IR低发射率与激光高吸收的性能平衡难以达成。未来可通过物理信息NN和贝叶

斯优化等智能算法,结合多层异质膜系与多尺度超构表面等结构,构建逼近理想光谱响应。同时需深入揭示微纳结构跨波段电磁耦合与解耦机制,为全频谱均衡隐身提供理论基石。高性能全频谱兼容隐身技术的实现,将大幅提升未来空天地海一体化系统中关键电子信息装备的生存能力与隐蔽突防效能,为全域安全防护与信息对抗系统的构建提供关键支撑。

#### ②决策型智能隐身系统

现有基于相变材料和液晶等介质的动态调控技术已取得重要进展,但集环境感知、决策与隐身响应于一体的闭环系统仍处于起步阶段。未来需融合光学传感、信息处理与外场调控技术,构建可实时调整

光学特性的智能隐身平台,突破多学科交叉技术瓶颈。决策型智能隐身系统将有望深刻改变未来低成本和小型化的无人机集群协同控制和智慧城市电磁空间管理等应用体系的运行效率。

### ③极端环境适应型隐身

为了满足高空长航时无人机、极地科考装备、太空在轨平台以及深海潜航器等领域的迫切需要,需克服高温、强腐蚀、强辐照、高速和高寒等极端环境对隐身性能与结构完整性的严重影响。未来应结合相应领域的新型功能材料或复合材料,实现隐身技术在极端环境中的可靠性与耐久性突破。

#### 参考文献:

- [1] 陈建光,梁晓莉,王聪,等. 2018年美军天基信息支援装备技术综述[J]. 中国航天, 2019(5): 27-29.  
Chen J G, Liang X L, Wang C, et al. Survey of US Military's Space-based Information Support Equipment and Technology in 2018[J]. Aerospace China, 2019(5): 27-29.
- [2] 刘鹏,殷举航,罗雄光,等. 高温红外隐身涂层材料研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(1): 57-67.  
Liu P, Yin J H, Luo X G, et al. Research Progress of High Temperature Infrared Stealth Coating Materials[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(1): 57-67.
- [3] 郑万里,杨萍,闫少强,等. 军事伪装技术研究现状及发展趋势分析[J]. 现代防御技术, 2022, 50(1): 81-86.  
Zheng W L, Yang P, Yan S Q, et al. Analysis on the Research Status and Development Trend of Military Camouflage Technology[J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(1): 81-86.
- [4] Salihoglu O, Uzlu H B, Yakar O, et al. Graphene-based Adaptive Thermal Camouflage [J]. Nano Letters, 2018, 18(7): 4541-4548.
- [5] Cao H M, Yang J F. The Process of Camouflage Painting for Polysulfonamide Fabric with Disperse Dyes[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1048: 313-317.
- [6] Walser R M. Electromagnetic Metamaterials [C]// Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics. San Diego, US:SPIE, 2001: 432921.
- [7] Zhong S, Wu L, Liu T, et al. Transparent Transmission-Selective Radar-Infrared Bi-Stealth Structure[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16466-16476.
- [8] Yeh P, Hendry M. Optical Waves in Layered Media[J]. Physics Today, 1990, 43(1): 77-78.
- [9] Wang B Y, Liu S B, Bian B R, et al. A Novel Ultra-thin and Broadband Microwave Metamaterial Absorber[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(9): 094504.
- [10] Macleod H A. Thin-Film Optical Filters (4th Edition)[M]. Florida, USA: CRC Press, 2010.
- [11] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface Plasmon Subwavelength Optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [12] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, et al. Plasmonics for Extreme Light Concentration and Manipulation [J]. Nature Materials, 2010, 9(3): 193-204.
- [13] Chen Y, Sun M. Plexcitonics: Plasmon-Exciton Coupling for Enhancing Spectroscopy, Optical Chirality, and Nonlinearity [J]. Nanoscale, 2023, 15(28): 11834-11851.
- [14] Wen X, Deng S. Plasmonic Nanostructure Lattices for High-Performance Sensing[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(16): 2300401.
- [15] 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.
- [16] 李飞. 大气传输对中长波红外辐射衰减分析[J]. 红外技术, 2019, 41(4): 311-316.  
Li F. Analysis of Atmospheric Transmission Impact on Mid-Wave and Long-Wave Infrared Radiation[J]. Infrared Technology, 2019, 41(4): 311-316.
- [17] Taylor S, Long L, McBurney R, et al. Spectrally-Selective Vanadium Dioxide based Tunable Metafilm Emitter for Dynamic Radiative Cooling[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 217: 110739.
- [18] 刘晓明,任志宇,陈陆平,等. 红外隐身超材料[J]. 材料工程, 2020, 48(6): 1-11.  
Liu X M, Ren Z Y, Chen L P, et al. Infrared Stealth Metamaterials [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(6): 1-11.
- [19] Yu D, Wang X, Ma Y, et al. Dual-Dielectric Fabry-Perot Film for Visible-Infrared Compatible Stealth and Radiative Heat Dissipation [J]. Optics Communications, 2025, 574: 131173.
- [20] Sansone L, Loffredo F, Cilento F, et al. Recent Advances in Graphene Adaptive Thermal Camouflage Devices[J]. Nanomaterials, 2024, 14(17): 1394.
- [21] Du J, Wang B, Liu Y, et al. Dynamic Multiband Compatible Stealth and Thermal Management Metasurface based on Phase-Change Material[J]. Optics Communications, 2025, 586: 131900.
- [22] Tan C, Wen Z, Zhang J, et al. Deep-Subwavelength

- Multilayered Meta-Coatings for Visible-Infrared Compatible Camouflage[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(13): 2391–2400.
- [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] 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.
- [25] Luo M, Xie T, Li X, et al. Compatible Camouflage for Dual-Band Guided-Laser Radar and Infrared Via a Metamaterial Perfect Absorber [J]. *Optics Express*, 2024, 32(7): 11221–11240.
- [26] Huang L, Zhang W, Wei Y, et al. Flexible Ge/Cu/ZnSe Multilayer Photonic Structures for Triple-Band Infrared Camouflage, Visible Camouflage, and Radiative Cooling [J]. *Optics Express*, 2024, 32(21): 37295–37309.
- [27] Li W, Cheng S, Yi Z, et al. Advanced Optical Reinforcement Materials based on Three-Dimensional Four-Way Weaving Structure and Metasurface Technology [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(3): 033503.
- [28] Qin B, Zhu H, Zhu R, et al. Space-to-Ground Infrared Camouflage with Radiative Heat Dissipation [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 137.
- [29] Baranwal N, Mahulikar S P. Review of Infrared Signature Suppression Systems Using Optical Blocking Method[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(3): 432–439.
- [30] Xu R, Wang W, Yu D. Preparation of Silver-Plated Hollow Glass Microspheres and Its Application in Infrared Stealth Coating Fabrics [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 131: 1–10.
- [31] Cui Y, Wang J, Sun H, et al. Visible Transparent Wideband Microwave Meta-Absorber with Designable Digital Infrared Camouflage[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(4): 2301712.
- [32] 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.
- [33] Ge J, Wang X, Li B, et al. Optically Transparent Metasurface with Multispectral-Compatible Camouflage and Millimeter-Wave Transmission Window[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(9): 5686–5695.
- [34] Holland J H. Genetic Algorithms[J]. *Scientific American*, 1992, 267(1): 66–72.
- [35] Nong J, Jiang X, Wei X, et al. Optical Transparent Metamaterial with Multi-Band Compatible Camouflage based on Inverse Design[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 33622–33637.
- [36] Ma W, Liu Z, Kudyshev Z A, et al. Deep Learning for the Design of Photonic Structures [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 77–90.
- [37] So S, Badloe T, Noh J, et al. Deep Learning Enabled Inverse Design in Nanophotonics [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1041–1057.
- [38] Qian C, Zheng B, Shen Y, et al. Deep-Learning-Enabled Self-Adaptive Microwave Cloak without Human Intervention[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 383–390.
- [39] Qian C, Jia Y, Wang Z, et al. Autonomous Aeroamphibious Invisibility Cloak with Stochastic-Evolution Learning [J]. *Advanced Photonics*, 2024, 6(1): 016001.
- [40] Lu H, Zhao J, Zhu P, et al. Neural Network-Assisted Metasurface Design for Broadband Remote Invisibility[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(45): 2506085.
- [41] Liu D, Tan Y, Khoram E, et al. Training Deep Neural Networks for the Inverse Design of Nanophotonic Structures [C]// *CLEO: Applications and Technology 2019*. San Jose, California, US:OSA, 2019: JF2F.4.
- [42] Wang L, Dong J, Zhang W, et al. Inverse Design for Laser-Compatible Infrared Camouflage Metasurface Enabled by Physics-Driven Neural Network and Genetic Algorithm[J]. *Optical Materials*, 2024, 153: 115639.
- [43] Yu S, Zhou P, Xi W, et al. General Deep Learning Framework for Emissivity Engineering[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 291.
- [44] Li W, Cheng S, Zhang H, et al. Multi-Functional Metasurface: Ultra-Wideband/Multi-Band Absorption Switching by Adjusting Guided-Mode Resonance and Local Surface Plasmon Resonance Effects[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2024, 76(6): 065701.
- [45] Liu Y, Chen J X, Hou B Q, et al. Phase-Change-Material-based Flexible Metasurfaces for Electrically Tuned Broadband Infrared Image Steganography [J]. *Physical Review Applied*, 2025, 23: 014039.
- [46] Kang D, Kim Y, Lee M. Laser Dynamic Control of the Thermal Emissivity of a Planar Cavity Structure based on a Phase-Change Material[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(4): 4925–4933.

- [47] Liu Y, Song J, Zhao W, et al. Dynamic Thermal Camouflage via a Liquid-Crystal-based Radiative Metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 855–863.
- [48] Bao J, Lan R, Shen C, et al. Modulation of Chirality and Intensity of Circularly Polarized Luminescence Emitting from Cholesteric Liquid Crystals Triggered by Photoresponsive Molecular Motor[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(3): 2101910.
- [49] Yang X, Liang L, Li C, et al. Fluid-Actuated Nano - Micro - Macro Structure Morphing Enables Smart Multispectrum Compatible Stealth [J]. *Nano Letters*, 2025, 25(1): 569–577.
- [50] Li M, Gould T, Su Z, et al. Electrochromic Properties of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ : From Visible to Infrared Spectrum [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 073902.
- [51] Tan J, Luo H, Cheng Y, et al. Visible - Transparent Metamaterial Absorber for Microwave - Infrared Compatible Stealth based on Indium Tin Oxide[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(25): 45489–45497.
- [52] Zhang B, Wang B, Chamoli S K. Wide-Angle Camouflage Detectors by Manipulating Emissivity Using a Non-Reciprocal Metasurface Array [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 26(5): 4011–4020.
- [53] Chen Q, Zhao S, Han Y, et al. Adaptive Metaskins for Active and Passive Thermal Camouflage [J/OL]. *Advanced Materials*. (2025 - 08 - 164) [2025 - 09 - 30]. <https://doi.org/10.1002/adma.202506934>
- [54] Wang P, Sun Y, Zhang Y, et al. Programmable Wire Metamaterials for Visible and Self - Adaptive Infrared Camouflage [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(30): 2503587.