

吸波超表面及其在中红外波段的应用

孙雨威¹, 贺楠¹, 张智¹, 徐西南¹, 杨柳¹, 金毅^{1*}, 邢宇心^{2**}, 何赛灵^{1,2}¹浙江大学光电科学与工程学院光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310058;²浙江大学上海高等研究院, 上海 201203

摘要 近年来,随着超材料研究的发展,中红外波段的吸波超表面得到了快速发展,其应用潜力也不断被发掘。本文首先介绍了不同类型的中红外吸波超表面及其工作机理,然后回顾了热辐射源、热隐身和探测器等应用中吸波超表面的应用方式和优势,最后总结现有的挑战并对将来的发展进行了展望。

关键词 探测器; 中红外波段; 超表面; 完美吸收; 热辐射; 热隐身

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1704001

Absorbing Metasurfaces and Their Applications in the Mid-Infrared Band

Sun Yuwei¹, He Nan¹, Zhang Zhi¹, Xu Xinan¹, Yang Liu¹, Jin Yi^{1*}, Xing Yuxin^{2**}, He Sailing^{1,2}¹Centre for Optical and Electromagnetic Research, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;²Shanghai Institute for Advanced Study of Zhejiang University, Shanghai 201203, China

Abstract In recent years, with the advancement of metamaterials, mid-infrared metasurfaces have achieved fast development and their various applications have also been explored. Here, various types of mid-infrared absorbing metasurfaces with their mechanisms are introduced. Then, some application methods and advantages of the absorbing metasurfaces in thermal radiation, thermal camouflage, and detectors are summarized. At last, the existing challenges are summarized and further applications are prospected.

Key words detectors; mid-infrared band; metasurfaces; perfect absorption; thermal radiation; thermal camouflage

1 引言

波长处于 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ 或波数处于 $400\sim 4000\ \text{cm}^{-1}$ 的电磁波通常被称为中红外波段,该波段在气体光谱^[1-3]、生物医学^[4-5]和纳米成像^[6]等领域具有广泛用途。许多共价键的吸收波段在 $600\sim 4000\ \text{cm}^{-1}$ 的中红外波段,由于分子具有不同的官能团,因此可以使用中红外“指纹光谱”来识别分子并表征其结构。很多无机污染气体和挥发性有机物,如 CO_2 、 SO_2 、 CH_4 和 CH_2O 等^[3],在中红外波段才开始出现吸收峰。鉴于中红外波段在气体检测等领域的独特优势,中红外相关的仪器和系统也得到了长足的发展,比如在气体浓度传感仪器“电子鼻”等^[2]的核心器件里,中红外高性能辐射源和探测器的设计就非常依赖于对材料和结构吸波性

能的研究。在军事领域,随着红外探测技术和红外精确制导武器的发展,飞机、坦克、舰艇等军事目标要想在复杂、恶劣的战场中存活下来,必须采用包括红外隐身在内的各种隐身技术来降低自身被探测的概率。近年来,由亚波长结构组成的超材料能实现对电磁波的灵活调控,引起了广泛关注,其中相对便于制备的超表面尤其受到重视。吸波超表面由于其亚波长尺度的厚度和对电磁波幅度、偏振、频率等特性的灵活调控特性,在中红外仪器的应用中具有天然的优势。目前吸波超表面在中红外波段的研究取得了快速发展,本文旨在对常用的中红外吸波超表面结构及其应用进行简要概述,以促进该领域的进一步发展。

本文从中红外吸波超表面的原理和应用两个方面出发,首先对吸波原理和常用的吸波超表面结构进行

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-07-22; 录用日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(91833303, 11621101, 61550110246, 61875174)、国家重点研发计划(2017YFA0205700, 2018YFC1407503)、浙江省重点研发计划(2021C03178)、广东省创新研究团队计划(201001D0104799318)、上海市张江科学城专项发展基金

通信作者: *jinyi_2008@zju.edu.cn; **y.xing@zju.edu.cn

了介绍,并主要从吸收的带宽和动态调控的角度出发,介绍了一些常见的吸波超表面实现方式;其次,阐述吸波超表面在中红外波段的应用,包括中红外辐射源、热辐射隐身和中红外探测器,这三块内容主要关注器件的性能指标,如辐射源的准直性和带宽特性、热辐射隐身器件的集成性和智能性、探测器的响应速率等;最后,探讨了吸波超表面面临的挑战和相应的发展趋势。

2 吸波超表面

基于超表面的吸波器是当前一个热点研究方向^[7]。要想实现对入射电磁波的完美吸收,就需要同时对透射波和反射波进行完美抑制^[8]。超表面的吸收率 $A(\omega)$ 的计算公式通常可以表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

式中: ω 为入射电磁波的角频率; $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示反射率和透射率。大多吸波器采用金属或布拉格反射基底来抑制透射波,同时上层设计结构利用阻抗匹配条件来抑制反射波^[9-12],使得所设计结构的等效阻抗和自由空间阻抗相匹配,即

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{\text{eff}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}}}} = Z_0, \quad (2)$$

式中: Z_1 为结构的等效阻抗; μ_0 和 ϵ_0 为自由空间中的磁导率和介电常数; μ_{eff} 和 ϵ_{eff} 为结构的等效磁导率和等效介电常数; Z_0 为自由空间阻抗。另外,时域耦合模理论的引入也对完美吸收器的设计提供了指导性思路,对于有金属反射背板的单通道结构,这个模型将反射

率和损耗速率联系起来,其计算公式^[13]为

$$r = -1 + \frac{2/\tau_r}{-i(\omega - \omega_0) + 1/\tau_a + 1/\tau_r}, \quad (3)$$

式中: τ_a 和 τ_r 分别表示结构的内部吸收和远场辐射的共振寿命; ω_0 表示结构的共振角频率; ω 表示入射电磁波的角频率。当 $\tau_a = \tau_r$, 即吸收损耗等于辐射损耗的时候,达到临界耦合状态,吸收率可以在共振频率处达到 100%, 通过研究结构参数和损耗速率的关系,就可以对实际器件进行优化设计以实现完美吸收。经典的结构为 MIM(金属基底/介质/金属)结构,这类结构首先被 Padilla 等提出,通过优化上层的十字形金属结构尺寸和中介质层的厚度,可以实现电共振和磁共振的独立调控,最终与自由空间阻抗匹配,他们在 6 μm 波段做了验证,得到的吸收率高达 97%^[14],如图 1(a)、(b)所示。实际上,利用全金属结构^[15-16],或者在金属反射基底上加亚波长介质/金属粒子阵列^[17-20],或者在金属膜上引入亚波长空穴阵列^[21],利用局域共振同样可以实现完美吸波,典型的全金属结构如图 1(c)、(d)所示, Yong 等^[15]通过在单元结构内设计多个相互靠近的金属柱,利用金属柱间隙的高 Q 值小体积的模式实现了窄带完美吸波。这些实现吸波的方式在中红外波段都得到了相应的验证^[21-23],后来也发现无需引入反射基底,单纯利用高折射率介质粒子阵列或光子晶体平板就可以实现完美吸波^[24],如图 1(e)、(f)所示,它们分别通过双局域共振模式^[25-27]和双泄漏导波模式^[28]使得正向散射和背向散射同时被干涉相消,形成了另一类吸波器。

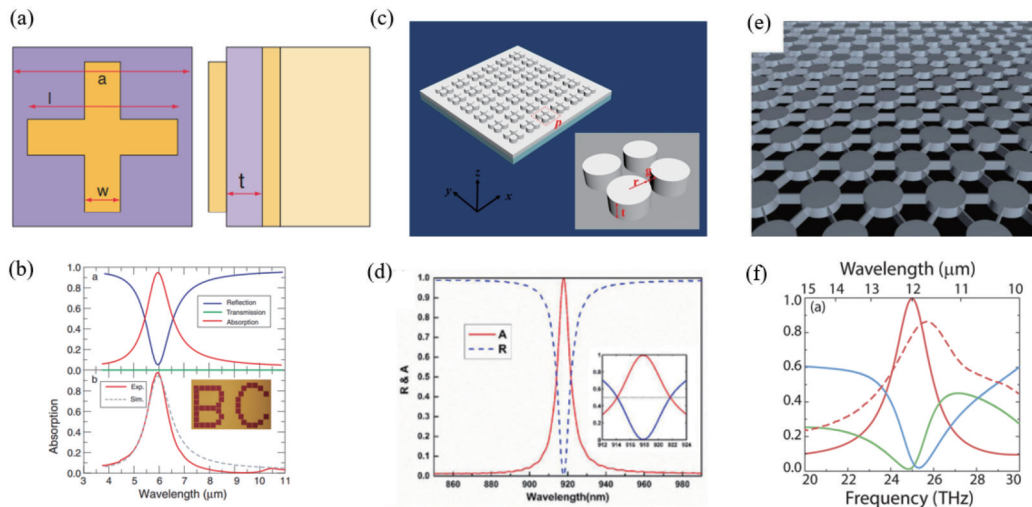


图 1 窄带超材料吸波器。(a)(b)金属/介质/金属结构完美吸波器^[14];(c)(d)基于金属圆柱阵列的窄带完美吸波器^[15];(e)(f)全介质完美吸波器^[24]

Fig. 1 Narrowband metamaterial absorbers. (a)(b) A perfect absorber with a metal/dielectric/metal structure^[14]; (c)(d) a narrowband perfect absorber consisting of metallic cylinder arrays^[15]; (e)(f) an all-dielectric perfect absorber^[24]

上述方式通过引入共振结构,增强光和物质的相互作用,可以实现近乎完美的吸收,但是大多是窄带的。为了拓宽吸收带宽,形成多波长或者连续宽带吸收,通常会采用两种方案:一种方案是在同一个周期

内设计多种不同响应的共振结构^[29-32]。通过设计不对称的结构,如不对称的十字结构^[29],或者椭圆结构^[30],可以使得两个偏振的入射光产生不同的光谱响应,进而整体上实现双峰吸收。但这种方式下,两个

波长通常较为分立,对带宽的拓展极为有限。如果通过设计使得周期内结构的共振峰相对接近,就会形成近似宽带的吸收效果。如:Cui等^[31]利用不同尺寸的纳米带状结构在 $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 实现了80%以上的吸收;基于Au/SiO₂/Au构型, Ma等^[33]在同一个周期内设计不同尺寸的十字结构,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内实现了大于50%的宽带吸收,如图2(a)、(b)所示。这种在同一个周期内堆叠不同尺寸的结构会导致单元不对称,引起偏振和角度敏感。为此, Bossard等^[34]利用基因算法优化设计了较为复杂的单层结构,在 $1.77\sim 4.81\ \mu\text{m}$ 实现了偏振不敏感的超过98%的宽带吸收,但总体上这种方案可以实现的带宽仍然相对有限。另一种方案是在高度方向设计多层结构,增加额外的

谐振模式,这种方案在拓展吸波带宽方面非常灵活且有效^[35-37]。2010年, Ye等^[38]通过在高度方向上堆叠三层不同尺寸的金属十字结构,在太赫兹波段大于1 THz的带宽内实现了高于97%的吸收,如图2(c)、(d)所示。类似地,2012年, Cui等^[39]通过在高度方向上交替堆叠金属/介质层提出一种金字塔阵列结构,使得不同频率的入射光在不同结构高度处具有零群速度,从而在 $3\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 的带宽内实现了超过95%的强吸收,且对入射角度不敏感,如图2(e)、(f)所示。随后, Dayal等^[40]在类似的设计基础上,在 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段理论实现了宽带吸收。这种结构被拓展到微波波段^[37]、太赫兹波段^[41]和可见光波段^[42-44],并得到了实验验证。

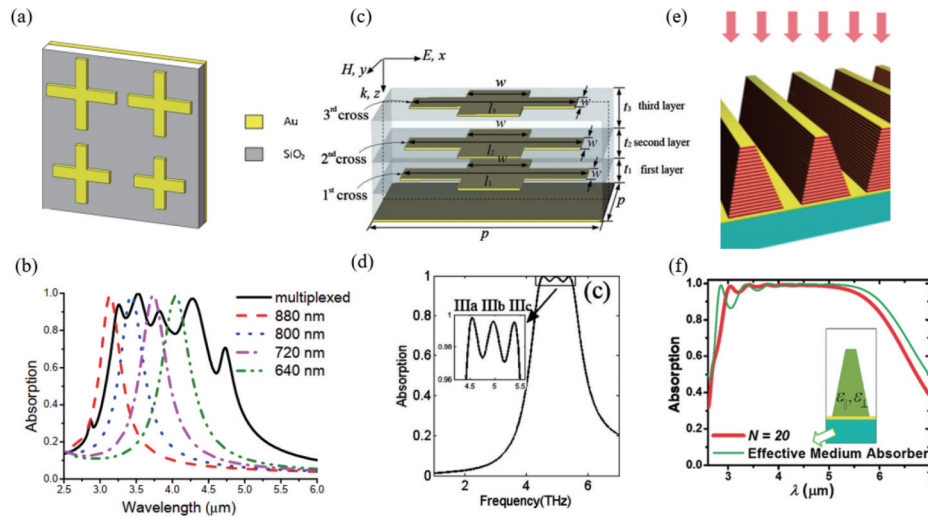


图2 宽带超表面吸波器。(a)(b)基于周期内组合不同尺寸的共振结构的多频宽带吸波器^[33]; (c)(d)基于三层具有不同尺寸的金属十字架结构组合而成的宽带吸波器^[38]; (e)(f)基于慢波效应的宽带吸波器^[39]

Fig. 2 Broadband metasurface absorbers. (a)(b) Multi-wavelength absorbers consisting of structures of different sizes squeezed in one unit^[33]; (c)(d) a broadband absorber based on a 3-layer cross structure with different geometrical parameters^[38]; (e)(f) broadband absorbers based on the slow light effect^[39]

除了引入周期性结构,多层薄膜也是一种实现宽带吸收的很好方式。多层薄膜能支持多个Fabry-Perot(F-P)共振,很容易形成多个吸收峰^[45-47],在材料损耗系数比较大的情况下可通过共振模式的叠加效应实现宽带吸波。在此基本原理的基础上,通过结构设计和优化,多层膜结构能获得更好的宽带吸波效果。最早在1994年, Bly等^[48]在原有Salisbury屏的基础上加了一层介质层,形成介质/金属/介质/金属结构,经过优化设计在 $7\sim 13.5\ \mu\text{m}$ 范围内获得了吸收率超过99%的完美吸波体。另外,基于光子晶体原理,通过对能带进行设计, Corrigan等^[49]使用氟化钡和镍化铬多层堆叠在 $4\sim 100\ \mu\text{m}$ 波段能实现接近90%的吸收,如图3(a)、(b)所示。这种方法也被拓展到其他波段^[50-51],如:2015年Ding等^[50]利用SiO₂和Ti的多层膜结构在整个可见光波段实现了90%以上的吸收,但这种结构对偏振和角度均不敏感,如图3(c)、(d)所示; Jin等^[10]基于零折射率薄膜提出一种实现超薄吸波器的特殊方案,利用零折射率材料中相位传播常数为零

的特性,具有特定入射角的入射波通过激发薄膜所支持的Berreman模式而被完美吸收,后来这种现象分别在微波波段(利用人工构造的等效零介电常数和零磁导率)^[9,11]和中红外波段(利用二氧化硅的天然零介电常数)^[52]得到了实验验证,如图3(e)、(f)所示。

实现对中红外吸波器的动态调控在实际应用中具有重要意义,如热辐射源或中红外隐身等。调控手段有很多种^[53],通常利用微机电系统(MEMS)、二维材料和相变材料等。通过MEMS直接调控结构的形态可以很方便地实现对红外吸波性质的动态调节。Liu等^[54]基于MEMS设计制备了一个Au/Ge/Au的三层结构,顶层Au悬空,通过偏压施加静电力,使得顶层Au和底层接触,进而在 $8.9\ \mu\text{m}$ 附近实现辐射率的调节,吸收率的变化可以达到70%,调制速度可以达到110 kHz,如图4(a)、(b)所示。除了MEMS,石墨烯也被用于吸波调控, Fan等^[55]将单层石墨烯放在金属结构和电介质之间,通过改变电压,在 $8\ \mu\text{m}$ 附近吸收峰实现了数百纳米的移动,但是需要100 V左右的较高

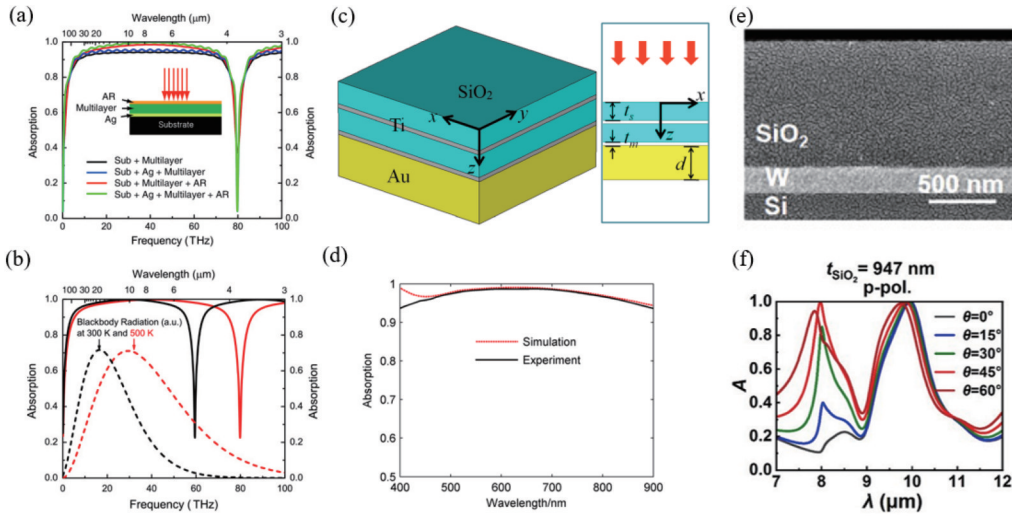


图 3 多层薄膜宽带吸波器。(a)(b)多层 BaF₂/NiCr 堆叠形成的宽带中红外吸波器^[49]; (c)(d) SiO₂/Ti 堆叠形成的宽带可见光吸波器^[50]; (e)(f) 利用 SiO₂ 的零折射率和 Berreman 模式实现中红外波段的双带吸收^[52]
 Fig. 3 Broadband absorbers based on multilayer films. (a)(b) A broadband mid-infrared absorber formed by a multilayer BaF₂/NiCr structure^[49]; (c)(d) a broadband visible light absorber formed by a SiO₂/Ti structure^[50]; (e)(f) dual-band absorption in the mid-infrared band realized by zero refractive index of SiO₂ and Berreman mode^[52]

电压。随后 Zeng 等^[56]将其用作自由空间中红外调制器,改变 10 V 的电压,吸收峰实现了约 1 μm 的移动,在 8.5 μm 附近实现了高达 46.7% 的调制深度,且调制速度超过了 1 GHz,如图 4 (c)、(d) 所示。除了 MEMS 和二维材料,相变材料也是一种重要的调控方式。VO₂ 是一种经典相变材料,当温度达到相变温度时,它会由介质态变为金属态。2015 年, Kocer 等^[57]制备出一种基于 VO₂ 光栅的红外吸波器,其调制幅度可以达到 0.7 左右。为了拓展吸收波长,2016 年, Liu

等^[58]利用 VO₂ 实现了双波段的红外吸波器,通过电流产生的欧姆热引发相变,在 3.05 μm 和 3.9 μm 处同时对吸收率进行调控,如图 4 (e)、(f) 所示。但是, VO₂ 是一种易失性材料,当温度低于临界温度时,又会从金属态变回介质态,需要维持温度来保持状态的稳定,会带来很大的能耗。因此,另一种非易失相变材料 GeSbTe 系列 (GST) 吸引了广泛关注。不同于 VO₂, 介质 GST 的相变是由晶态和非晶态之间的转变引起的,有很大的折射率变化。2018 年, Cao 等^[59]基于

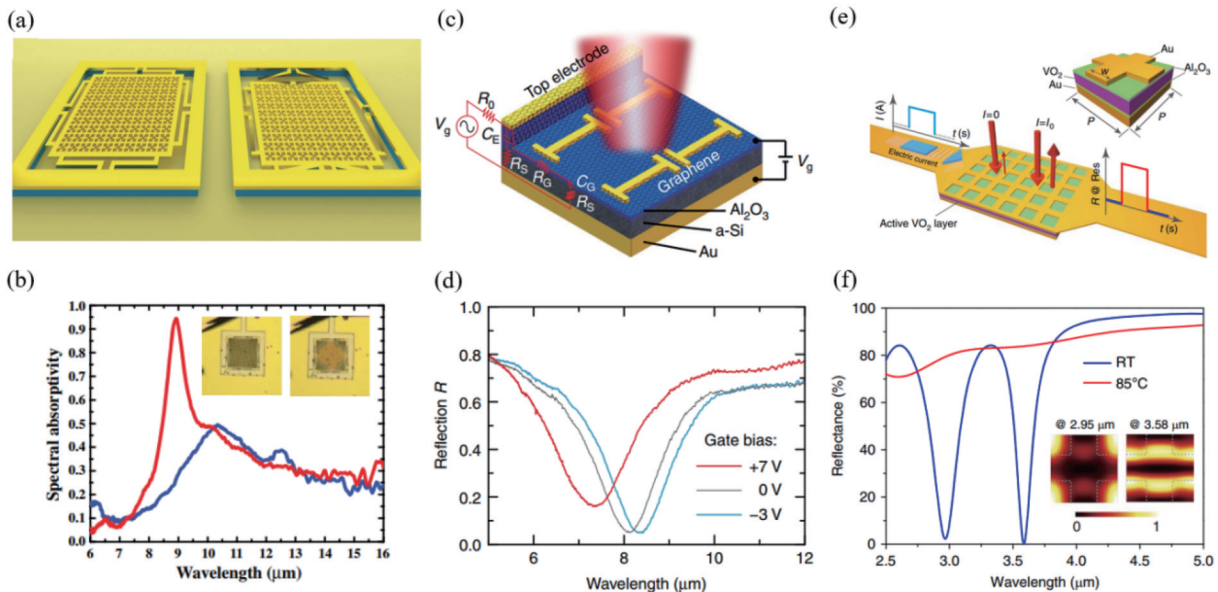


图 4 可调中红外超表面吸波器。(a)(b)基于 MEMS 的可调吸波器^[54]; (c)(d)基于石墨烯的可调吸波器^[55]; (e)(f)基于 VO₂ 的可调吸波器^[58]
 Fig. 4 Tunable mid-infrared absorbers based on metasurfaces. (a)(b) Tunable absorbers based on MEMS^[54]; (c)(d) tunable absorbers based on graphene^[55]; (e)(f) tunable absorbers based on VO₂^[58]

GST 设计了 2~4 μm 的三峰吸收结构,通过激光改变 GST 的晶态,实现了对吸收率的调控。

3 吸波超表面在中红外波段的应用

光被吸波超表面捕获后,其能量通常转化成热能或电能。光捕获后产生的热能可通过热辐射的方式继续以电磁波的方式辐射出去,或者用来直接加热物体;捕获的光也可以通过影响材料的电学特性而产生电能或电信号,如热电阻、太阳能电池和半导体探测器等。在中红外波段,光捕获的常见方式有热辐射光源、热辐射隐身、探测器等。

3.1 中红外热辐射源

热辐射是普遍存在于自然界的物理现象,任何一个绝对温度高于 0 K 的物体都在向外辐射电磁波。热辐射的功率谱可以表示为

$$I(\theta, \lambda, T) = \epsilon(\theta, \lambda, T) I_{\text{BB}}(\lambda, T), \quad (4)$$

$$I_{\text{BB}}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1}, \quad (5)$$

式中: $I_{\text{BB}}(\lambda, T)$ 为黑体辐射功率谱^[60],仅取决于波长和黑体的温度; λ 和 T 分别为辐射波长和黑体温度; h 、 c 、 k 分别为普朗克常数、真空光速和玻尔兹曼常数; $\epsilon(\theta, \lambda, T)$ 为物体的辐射率; θ 为辐射角度。自然界物体的热辐射通常是宽谱的自然光,即具有宽带、非方向性、非偏振以及非相干的特性,吸波超表面的引入为热辐射调控提供了极高的自由度和极大的可行性。由基

尔霍夫定律可知,在热力学平衡的条件下,任何物体的辐射率 $\epsilon(\theta, \lambda, T)$ 与其吸收率 $A(\theta, \lambda, T)$ 相等,所以对吸波超表面的波长、角度、偏振等特性进行设计即可反过来调控热辐射电磁波的特性。吸波超表面在这方面的应用已获得较多研究^[39, 61-63]。

为了满足中红外波段在传感和成像等领域的应用,目前使用较多的窄带光源是价格昂贵的量子级联激光器,但在大部分对光源要求并不十分严格的装置中使用量子级联激光器并无必要,且该激光器价格高昂,不利于仪器的小型化,因此有必要制备相对简单的中红外热辐射源。

在中红外辐射源的光谱带宽调控上,利用微纳结构的窄带共振特性来辅助材料实现窄带吸收,以及利用材料本身的窄带吸收特性实现窄带吸收,是目前最常用的两种实现窄带热辐射的方式。超表面的灵活设计特性使得它支持多种共振模式,比如光子晶体里的导波共振^[64-66]、金属天线阵列^[67-68]以及 Tamm 等离子激元共振^[69-71]等等,实际应用中根据不同的需求可以选取不同的共振结构,甚至可以对不同尺寸的单元结构进行组合,以实现宽带的热辐射^[67, 39]。部分材料如 SiC^[72]、碳纳米管^[73]和多量子阱^[64]在红外波段具有窄的吸收峰,这使得它们天然适合窄带热辐射器的设计。Noda 课题组在这方面进行了较多工作:如图 5(a)、(b)所示,他们把量子阱材料加工成光子晶体,通过重叠量子阱的吸收带与光子晶体的导波共振实现辐射的窄带增强,同时非吸收带达到辐射抑制的效果^[64]。

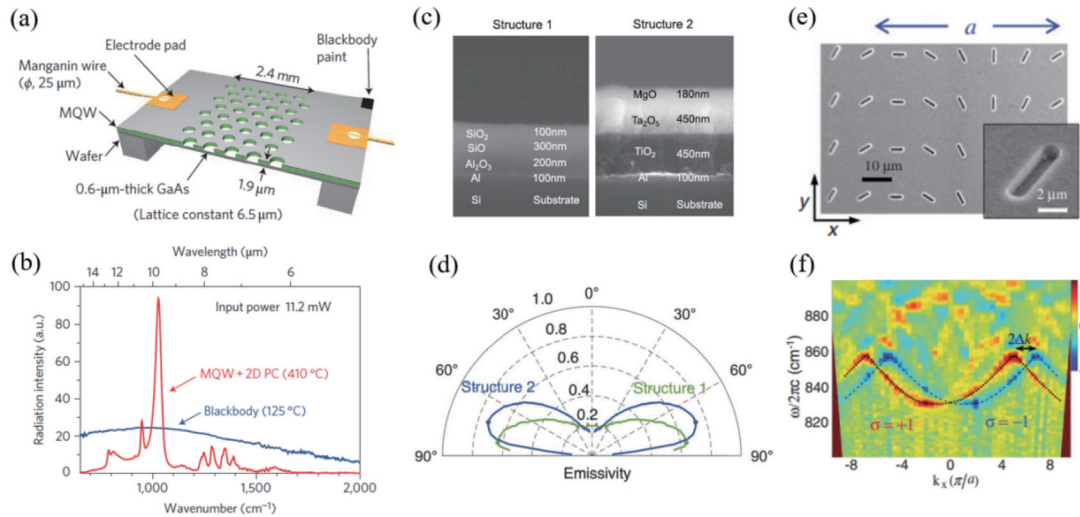


图 5 中红外辐射源的调控方式。(a)(b)利用具有窄吸收带的多量子阱材料制备成光子晶体结构,实现窄带热辐射^[64]; (c)(d)利用膜层结构实现梯度 ENZ 现象,进而控制热辐射的方向性^[80]; (e)(f)周期性缓变的纳米孔阵列及其远场辐射自旋色散谱^[85]
 Fig. 5 Modulations of mid-infrared thermal radiation sources. (a)(b) Using photonic crystals constructed by multiple quantum well materials for narrow-band thermal radiation^[64]; (c)(d) using ENZ materials for directional thermal radiation^[80]; (e)(f) a periodically rotating nanorod array and its spin-projected dispersion spectra in the far filed^[85]

中红外辐射源的方向性也是热辐射调控领域的一个重点。在实际应用中,为了尽可能提高辐射能量的利用率,辐射源的准直性一直是考虑的重点。常用的实现准直的原理是利用光栅耦合,即当辐射角度和波矢满足动量匹配条件时,空间光将与光栅导波模式实

现耦合。由于辐射角与辐射波长之间具有依赖关系,这种光栅在不同的角度上辐射不同的波长。为了降低辐射角与辐射波长之间的依赖关系,可以通过在光栅结构中引入一些在设计波段附近表现出一定金属性的极性材料,如 SiC^[74-76]等,以此实现窄带、窄角的热辐

射。除了利用光栅结构激发导波模式外,利用一些特殊的结构和效应,如牛眼结构^[77]、布儒斯特角^[78]和 ENZ (epsilon near zero) 材料^[79-80],也能实现远场辐射的定向性。以 ENZ 材料为例,2021 年,Xu 等^[80]利用膜层结构设计了 ENZ 频率随空间位置呈梯度变化的材料,如图 5(c)、(d) 所示,在 ENZ 频率附近观察到宽带 Berreman 模式,实现了宽带 (7.7~10.5 μm , 10.0~14.3 μm)、定向性 (70°~85°, 60°~75°) 出射,在保持 ENZ 材料定向性的前提下解决了传统材料窄带宽的局限性。2022 年,Ying 等^[81]在此基础上进一步拓宽了辐射波段,利用多层 ENZ 薄膜在 8~14 μm 的超宽大气窗口内实现了高定向性 (72°~82°) 和高辐射率 (>0.9) 的红外辐射。远场辐射频率与角度的解耦是辐射源走向应用的一大前提,如何实现宽带窄角和窄带窄角的辐射将会是该领域的研究重点之一。

在中红外辐射源的远场偏振态调控上,对于各向异性的结构,利用结构对正交偏振态的吸收差异可以得到不同的远场偏振态,比如镜面对称的金属纳米棒在不同的波长分别激发平行或垂直于纳米棒的共振,于是不同波长的辐射态具有不同的线偏振态^[82]。圆偏振光源在量子光学计算、生物传感、光学全息等领域有重要应用,但目前圆偏振光通常由线偏振光转换得到,不利于器件的小型化和集成化。针对结构进行手性设计可以实现不同旋向圆偏振态的辐射,比如通过逐层旋转叠加得到的三维手性光子晶体,只对其中一个圆偏振态存在光子带隙并将其全部反射,而对另一个圆偏振态进行选择吸收^[83]。对于由两个模式干涉形成的法诺共振,若结构的镜面对称性被打破,该共振模式对两种不同旋向的偏振光将产生不同的响应,体现在辐射率上就是辐射偏振态具有手性特征^[84]。此外,若

超表面的单元结构在空间取向缓慢变化,其所支持的表面波由于受到自旋轨道相互作用的影响,吸收和辐射的自旋态会出现类似于 Doppler 效应的空间分离^[85],如图 5(e)、(f) 所示。

要实现辐射源的辐射率和辐射波长的动态调控,由黑体辐射功率谱[式(5)]可知,最直接的方式是调控辐射体的温度,但这种方式的调制速率受到材料体积和材料热传导速率的限制,通常无法满足高速调制的需求。另一种方式则是固定辐射体的温度,对辐射源的辐射率进行调制,调制方式大体上有调制材料属性、调整结构形变和使用相变材料等。对于一些半导体材料(如 ZnO^[86]和多量子阱材料^[87-88])以及二维材料[如石墨烯^[89]和碳纳米管^[90],见图 6(a)、(b)],通过外部的电子注入能够改变材料的吸收特性,进而对材料的辐射波长和强度进行调制。Noda 教授课题组利用多量子阱制备的光子晶体在外加偏置电压的条件下实现了窄带 ($Q>70$)、辐射率为 0.24~0.72 的大范围调节,调制速率也高达 600 kHz^[88],如图 6(c)、(d) 所示。在不改变材料属性的情况下,Liu 等^[54]将 MEMS 与吸波超表面结合,通过施加不同的外部电压改变底部金属背板与顶部悬空超表面之间的距离,从而达到调制辐射率的效果,这种方式能够实现像素级的调控,可用于热红外图像的显示,调制速率达到 110 kHz。相变材料是近些年的研究热点,相变材料如 VO₂ 和 GST 材料的属性随相态的高速变化使得它们成为可调热辐射器件的核心部件。Kats 等^[91]使用 VO₂ 材料观察到反直觉的现象,在加热器温度从 74.5 °C 升到 100 °C 的条件下通过控制 VO₂ 的相态降低了材料的辐射率,进而实现了辐射功率的降低。Li 课题组在 120 nm 厚的金膜上沉积了 540 nm 的 GST 材料,利用不同温度下的退火方

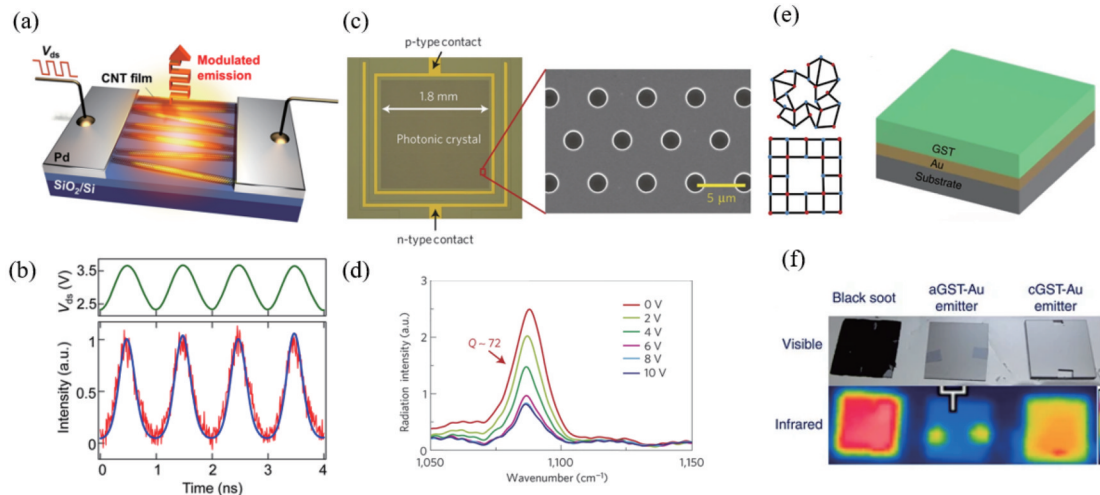


图 6 中红外热辐射源的动态调控。(a)(b)利用极小体积的碳纳米管材料实现对热辐射的超高速动态调控,调制速率达 1 GHz^[90]; (c)(d)通过对多量子阱结构外部注入电子的方式实现热辐射率的高速大范围变化^[88]; (e)(f)利用 GST 材料的不同中间态实现热辐射率和热辐射波长的调控^[92]

Fig. 6 Dynamic modulations of mid-infrared radiation. (a)(b) Using extremely thin carbon nanotube material to achieve an ultra-high-speed dynamic modulation in thermal radiation with the modulation speed up to 1 GHz^[90]; (c)(d) a high-speed and wide-range modulation in thermal radiation by injecting electrons into multiple quantum wells^[88]; (e)(f) using GST to modulate thermal radiation^[92]

式实现了 GST 材料晶态与非晶态转换的各种中间态, 表现为辐射峰值波长在 8~14 μm 的调节^[92]。

3.2 中红外热辐射隐身

热隐身通过控制热辐射, 使指定物体的辐射特征与背景的辐射特征匹配, 从而使红外热成像仪失效, 达到热隐身的效果。红外热成像仪根据物体发射的红外辐射强度计算得到物体的辐射温度。根据斯特藩-玻尔兹曼定律, 黑体的辐射出射度与热力学温度的四次方成正比, 由于常规物体都不是黑体, 辐射率是小于 1 的正数, 因此物体的辐射强度与物体的辐射率和热力学温度有关。由于物体辐射强度正比于物体辐射率和温度的四次方, 因此实现热辐射隐身的两个基本方向为降低被探测物体的温度或降低被探测物体的辐射率。红外隐身要在对波段进行细分基础上进行讨论。1. 4~14 μm 波段对应 200~2000 K 辐射体的辐射峰值, 是红外隐身需重点考虑的波段。根据大气透过率的变化, 可将此波段进一步分为 3 个子波段: 1. 4~2.5 μm 为 1200~2000 K 高温物体热辐射集中的波段, 被称为短波红外; 3~5 μm 为 570~970 K 物体热辐射集中的波段, 被称为中波红外; 8~14 μm 为常温物体热辐射集中波段, 被称为长波红外。余下的 2.5~

3 μm 和 5~8 μm 这两个波段由于大气透过率较低而被称为非探测波段。为优化热辐射隐身, 在大气通过窗口可通过降低物体的表面辐射率(降低红外辐射信号强度)而达到隐身效果; 在非大气通过窗口可通过提高辐射率进行辅助散热, 降低表面温度, 从而提高隐身性能。经过多年的发展, 各国科学家们在红外隐身的理论和实验上有了许多进展, 使得红外隐身的应用场合更加广泛, 可实用性更强。本文重点关注中波红外热辐射隐身, 下面围绕此波段展开阐述。

2018 年, Liu 等^[93]利用锗和银多层膜结构在低温情况下实现了良好的红外隐身效果, 如图 7(a) 所示; Zhao 等^[94]设计了一种由周期狭缝和纳米盘组成的全金属纳米结构, 在 3~5 μm 和 8~14 μm 波长范围内具有低辐射率以便于红外隐身。上述结构中用到的金属在高温时耐热性较差, 红外隐身效果相应地也会降低, 因此需要一种适用于高温情况的红外隐身器件。Wang 课题组利用超薄二维氮化钛薄膜的低中红外辐射率这一特性, 将超过 500 °C 高温的物体辐射温度降低 300 °C 以上, 在高温红外隐身中取得不错的效果^[95]。Qiu 课题组将隔热的二氧化硅气凝胶和由锗和硫化锌组成的多层膜结构结合起来, 在 8~14 μm 大气窗口中

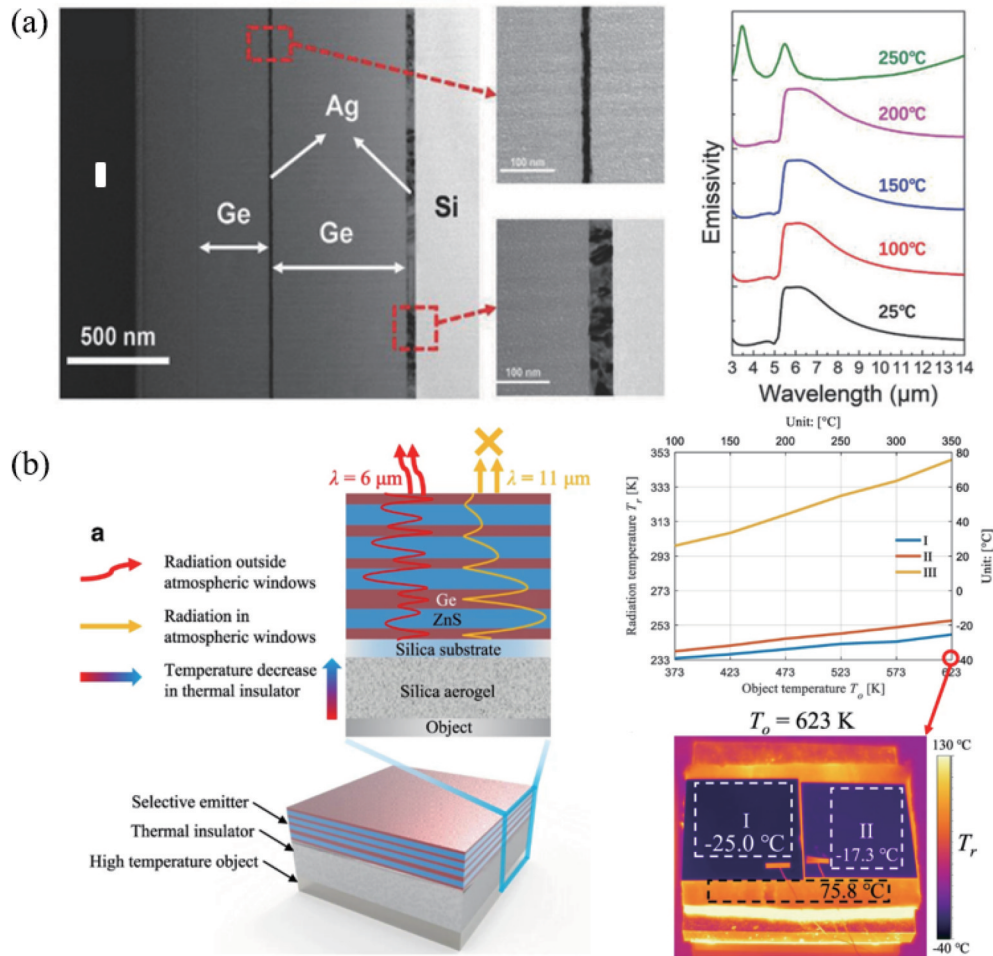


图 7 中红外热辐射隐身。(a) 基于银/锗多层膜的非高温红外隐身^[93]; (b) 通过同时引入冷却和降低辐射率实现高温红外隐身^[96]
 Fig. 7 Mid-infrared radiation camouflage. (a) Low-temperature infrared camouflage based on a silver/germanium multilayer in the range of 25 to 250 °C^[93]; (b) high-temperature infrared camouflage based on thermal cooling and reduced emissivity^[96]

获得低辐射率,实现红外隐身;同时在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 非大气窗口中通过提高发射率进行制冷,该器件在 $623\ \text{K}$ 温度下达到良好的红外隐身效果^[96],如图7(b)所示。

在进行红外隐身时,背景温度往往不是一成不变的,固定的选择性热辐射结构无法在温度变化的复杂环境中使用,因此设计能适应背景温度的可调红外隐身器件成为一个重要的研究方向。相变材料的性质会随温度变化而改变,这个特点使 VO_2 和GST成为可调热隐身器件的热门研究对象。2015年Xiao等^[97]将 VO_2 添加到石墨烯和碳纳米管衬底中,用它来调节结构的热辐射率,所得结构具有良好的柔性,可以适应各

种柔性基板(如纸张、纺织品和塑料等)。Qiu课题组使用基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 的双层薄膜,利用该材料中间态的特性调节装置的发射率,可以在 $30\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 的背景温度下成功实现连续的热隐身,同时在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 角观测下维持良好的效果^[98],如图8(a)所示。2018年Kocabas课题组通过可逆的离子液体插层,能够在不改变表面温度的情况下,对石墨烯的红外发射率进行电调制^[99],如图8(b)所示。该器件能在几秒时间内调节至与背景温度相适应的反射率,同时具有表面密度小($30\ \text{g}/\text{m}^2$)、薄($50\ \mu\text{m}$ 厚)、柔韧且可以大面积制造的优点。

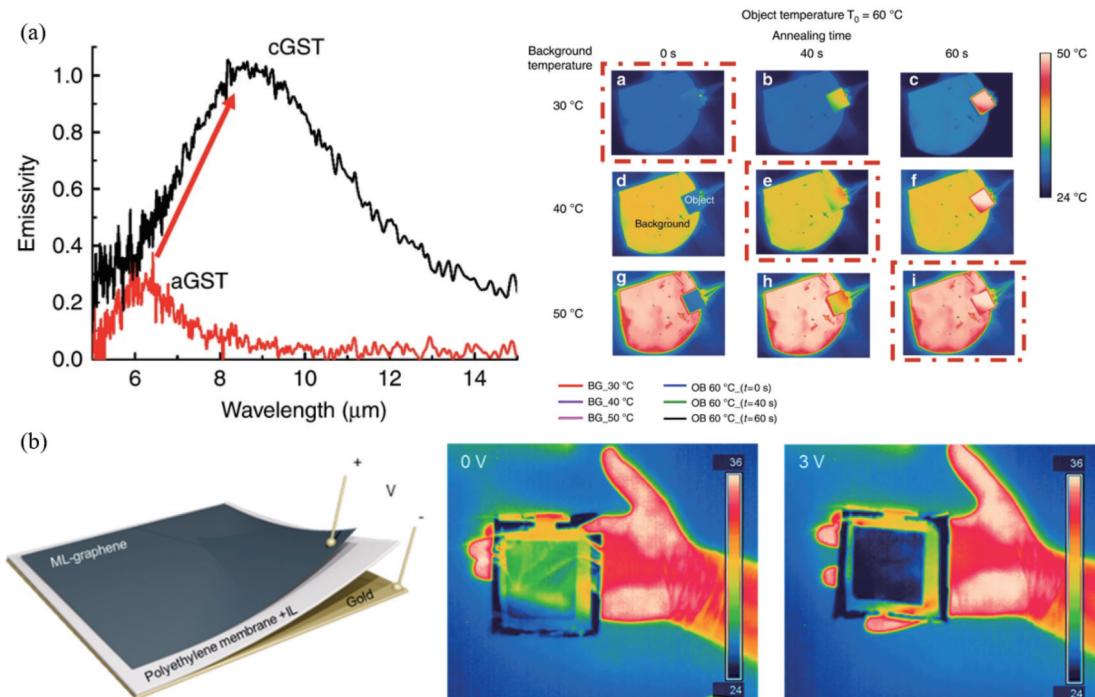


图8 可调中红外热辐射隐身。(a)基于GST的自适应热辐射隐身^[98]; (b)基于石墨烯的自适应热辐射隐身^[99]

Fig. 8 Adjustable mid-infrared radiation camouflage. (a) Adaptive thermal camouflage based on GST^[98]; (b) adaptive thermal camouflage based on graphene^[99]

要使红外隐身设备能够真正实用化,面对不同探测器还能维持隐身效果,就需要多光谱协同的红外隐身设备。针对现有成熟的探测器,多光谱红外隐身需要涵盖3个主要范围:可见光至近红外波段、中红外波段和微波波段。不同波段下的隐身性质也不同:在可见光至近红外波段,需要根据背景实现颜色和反射率匹配;在微波波段,需要降低反射率来应对主动式探测。2019年Kim等^[100]基于 $\text{Au}/\text{ZnS}/\text{Au}$ 的结构设计了红外和微波同时隐身的器件,如图9(a)~(c)所示。图9(b)显示该器件在大气窗口波段内具有较低的辐射率(小于0.2),能够在温度提高的过程中保持较低的辐射温度,达到红外隐身的效果,同时多层膜结构在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 的辐射率比单一的金表面高1570%,显著提高了器件的热稳定性;在 $2\sim 4\ \text{cm}$ 波段吸收率大于90%,微波反射率显著降低,从而实现微波隐身。图9(c)所示为模拟的超音速飞机雷达散射截面。2020年,Li课题组基于GST设计了一种 $\text{Si}/\text{GST}/\text{Au}$

和二维光栅结合的多光谱隐身结构,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 保持低吸收率的同时提高了对 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长中红外光的吸收率,降低被二氧化碳激光器探测到的概率,从而达到多波段同步隐身的效果^[101],如图9(d)所示;2021年他们课题组结合多层 ZnO/Ge 结构和用于微波吸收的 $\text{Cu}/\text{ITO}/\text{Cu}$ 超表面,展示了可见光、中红外光($3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$)、激光($1.55\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$)和微波($8\sim 12\ \text{GHz}$)的多波段隐身,如图9(e)所示,同时在非大气窗口($5\sim 8\ \mu\text{m}$)进行有效的辐射制冷以提高热稳定性,进而提高红外隐身性能^[102]。

3.3 中红外探测器

中红外探测器具有将捕获的中红外辐射光转换为电信号的能力。根据其工作原理,中红外探测器主要分为两大类——制冷的中红外光子型探测器和非制冷的中红外光热型探测器。制冷的中红外光子型探测器通过捕获中红外辐射产生电子-空穴对,并将收集的光生载流子转换为电信号。目前这类探测器主要基于碲

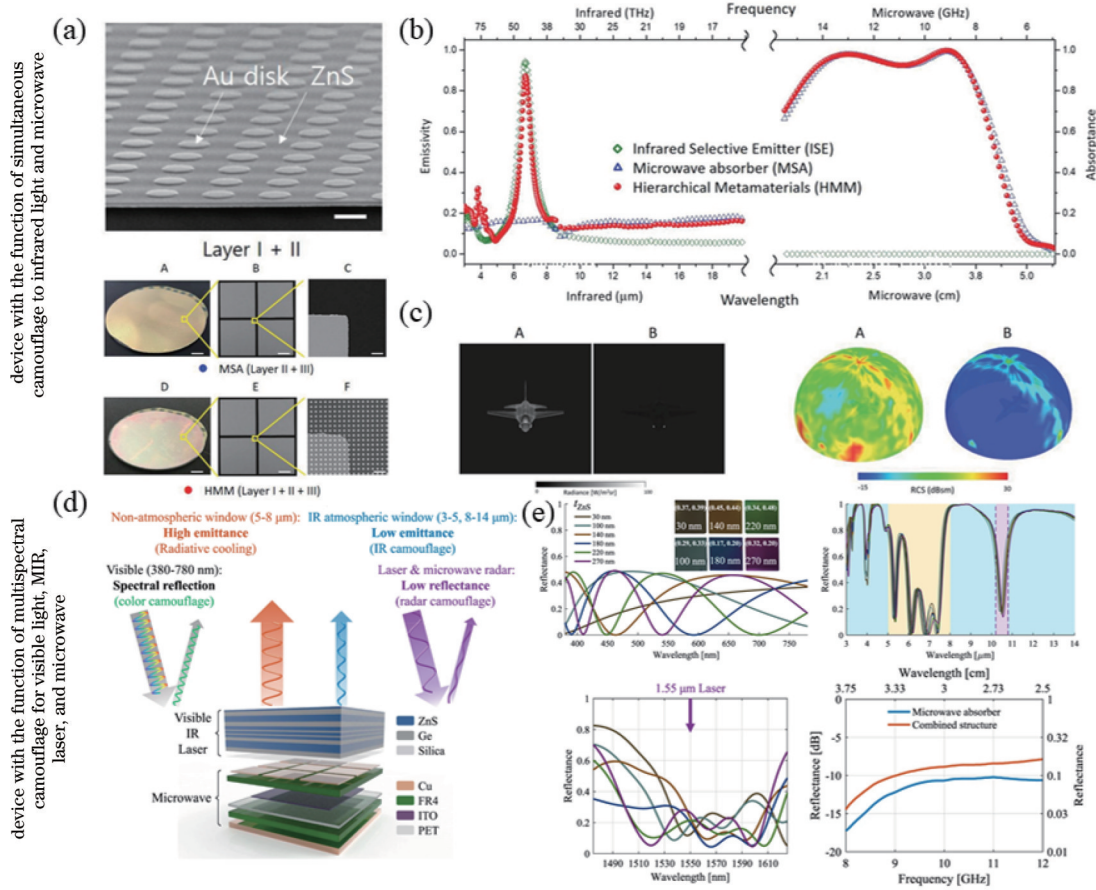


图 9 多光谱协同的中红外热辐射隐身^[100,102]。(a) 器件结构的扫描电子显微镜图像;(b) 红外热辐射光谱和微波吸收光谱;(c) 超音速飞机的红外和微波隐身性能;(d) 多层 ZnO/Ge 结构和 Cu/ITO/Cu 超表面;(e) 在可见光、中红外、激光和微波波段的反射谱
 Fig. 9 Multispectral infrared hybrid camouflage^[100,102]. (a) Scanning electron microscopy images of the device structure; (b) measurements of infrared emissivity spectrum and microwave absorption spectrum; (c) simulated infrared and microwave camouflage performance of a supersonic aircraft; (d) multilayer ZnO/Ge structure and Cu/ITO/Cu metasurfaces; (e) reflection spectra of visible light, mid-infrared band, laser, and microwave

镉汞(HgCdTe)^[103]、二类超晶格^[104]、量子阱^[105]和量子点^[106]等材料,但是需要在液氮低温环境中工作以降低暗电流,因此高成本和大体积限制了这类探测器的应用范围。相比于制冷的红外光子型探测器,非制冷的红外光热型探测器具有能够在室温工作、体积小和质量轻等优势。非制冷的中红外光热探测器通过捕获中红外辐射,使吸收体温度上升,而捕获的中红外辐射通过热电效应转化为电信号。中红外光热探测器主要分为热电堆型^[107]、热释电型^[108]和热敏电阻型^[109]3种。随着微纳结构光子学理论和微纳加工技术的不断进步,第四代中红外探测器具有偏振、波长和相位识别等多维感知能力,这就显著提高了它们在遥感、军事侦察以及探测制导领域的应用能力。传统的中红外探测器需要借助滤光片和偏振片等光学元件才能进行多维感知探测,但增加光学元件会造成系统整体体积大和响应速度慢等。非制冷型红外热电探测器通过将吸波超表面结构集成到探测器上,能明显提高探测器的光收集效率,很好地解决吸收层薄所导致的光捕获率低这一问题,从而降低了器件的体积,提高了响应速度,同时提高了波长选择的自由度。下面将重点阐述吸波超表

面在中红外辐射探测方面的应用潜力。
 目前,主要通过引入周期性MIM结构来增强探测器对光的捕获能力,并能同时明显减小吸收体的厚度,从而提高探测器的响应速度。如图10(a)所示,Dao等^[108]基于MIM结构设计实现了具有不同工作波长的4个热释电探测器,分别在3.522 μm、3.722 μm、3.822 μm和3.922 μm等波长处具有完美吸波能力,其在达到完美吸波的同时作为吸收体的氧化锌材料厚度减小到300 nm,响应的上升时间为16 μs。基于MIM结构的探测器具有波长选择性,对偏离共振波长处的中红外光波的吸收效率大大降低,因此该探测器可用于光谱热成像,还可用于气体探测。如图10(b)所示,Lochbaum等^[107]将MIM结构与热电堆探测器结合,研制出用于探测CO₂气体的气体传感器,该传感器在4.227 μm共振波长处实现近完美吸收,该共振波长与CO₂气体的吸收带吻合。进一步地,气体传感器可以通过改变结构的周期性来改变共振吸收峰的位置,从而适应不同气体的探测^[3]。
 除了上述基于体热电材料制备的非制冷型中红外热电探测器,近年来基于二维材料的非制冷型中红外

探测器成为研究热点^[110]。自从 2004 年石墨烯被发现, 二维材料由于具有独特的光电子性质, 引起了研究人员广泛的研究。单层或者少层的二维材料具有超薄的特性, 具有其他材料无法比拟的柔韧性, 这可用于低暗电流探测器的构造, 也可用于柔性探测器的构造^[111]。但是, 二维材料对中红外辐射的吸收率偏低, 不适合实际应用。为解决此问题, 可引入超表面辅助二维材料获得强吸波能力, 由此能提高相应探测器的响应能力。如图 10(c) 所示, Azar 等^[112]设计了金属牛眼光栅, 并引入光学纳米天线, 使单层石墨烯在 10.84 μm 处的吸收率增强了 558 倍, 响应率增强了 32 倍。

超表面还可辅助中红外探测器实现对线偏振

光^[109,113]和圆偏振光^[114]的有效探测。如图 10(d) 所示, Yi 课题组设计、构建了融合光栅型 MIM 吸波结构的 VO_2 微辐射热计相集成, 在像元层次直接实现了光学滤波和偏振选择的功能^[109]。所制造的探测器在 3~5 μm 和 8~12 μm 这两个波段对 TM 偏振的峰值吸收率在 95% 以上, 平均吸收系数分别为 83.0% 和 79.7%, 偏振消光比分别达到了 41.29 和 44.03。Gu 课题组设计了如图 10(e) 所示的金属手性超表面, 用其增强石墨烯光电探测器在中红外区域对光子自旋角动量的探测能力, 石墨烯的吸收率提高了 17 倍, 相应探测器在 3.8 μm 处具有 60% 的圆二色性和 0.80 $\mu\text{A}/\text{W}$ 的响应度^[115]。

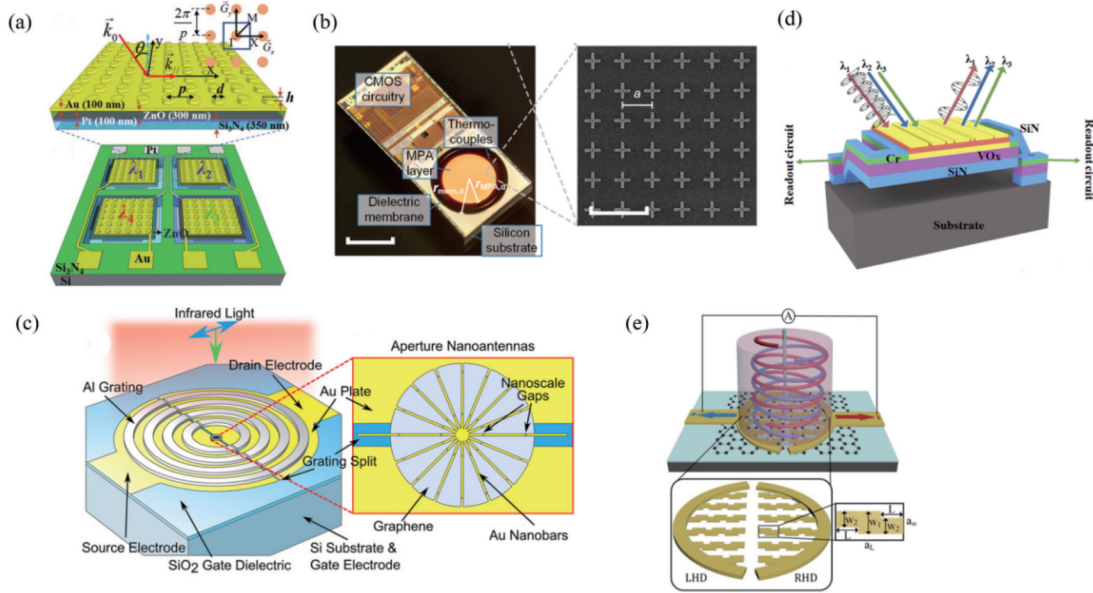


图 10 基于超表面辅助的中红外探测器。(a) 片上四波长薄膜热释电探测器^[108]; (b) 基于层金属交叉型结构的热电堆中红外探测器^[107]; (c) 基于金属牛眼光栅和光学纳米天线混合结构的石墨烯中红外探测器^[112]; (d) 融合光栅型 MIM 吸波结构的 VO_2 微辐射热计^[109]; (e) 基于手性结构的石墨烯中红外探测器^[115]

Fig. 10 Mid-infrared detectors assisted by metasurfaces. (a) An on-chip quad-wavelength membrane pyroelectric detector^[108]; (b) a thermopile mid-infrared detector based on a metal cross array^[107]; (c) a mid-infrared graphene detector based on the combination of a metal bull's eye and an optical nanoantenna^[112]; (d) a VO_2 microbolometer based on a grating-type MIM absorber^[109]; (e) a mid-infrared graphene chiral detector^[115]

4 结 论

本文总结了近中红外吸波超表面在近几年的发展, 介绍了吸波超表面常见的实现方式, 这些结构大部分已在微波波段得到验证, 根据麦克斯韦方程组的缩放属性, 可以应用到中红外波段。利用超表面辅助中红外器件的设计灵活且高效, 在热辐射源的调控中, 能够根据需求实现特定频率带宽、特定角度和特定偏振的辐射, 从而降低了输入功耗并极大地提高了辐射源的集成度; 在中红外隐身中, 超表面能够根据环境的温度对辐射率实现实时调控, 将中红外隐身逐渐推向实用化; 吸波超表面与探测器的集成显著降低了器件体积并提高了探测器的响应度。可以看到, 超表面的加入明显推动了现有中红外器件朝着小型化、集成化、高

性能的方向发展。

相比于其他线性光学元件, 吸波超表面具有更强的频率、角度和偏振调控能力, 这使得它与现有中红外系统的集成成为必然的发展趋势。目前尽管已经取得了巨大的进步, 但仍有一些问题待解决: 1) 在中红外的辐射源设计方面, 辐射源的辐射角度与辐射频率的解耦是一个重要问题, 现有的超表面辐射源很大一部分只关注特定方向上辐射的频率特性, 而实际上在其他辐射方向也会存在非期望的辐射频率的干扰。目前已经提出利用特殊材料如 SiC 等, 或者利用特殊模式如 Berreman 模式, 去实现窄带高方向性和宽带高方向性的辐射, 同时抑制其他方向的辐射, 这也是未来的重要研究方向。2) 在中红外热辐射隐身方面, 现存的问题一是柔性效果差, 可以在柔性衬底上进行结构设计以

及将凝胶、纤维等柔性材料融入热隐身结构中获得更好的柔性效果；二是集成化程度较低，当前已有许多可调热隐身器件，但需要复杂的外部设备进行调控，集成度不够，而通过电可调方式能提高集成度；三是自适应效果差，尽管已经实现了可以根据背景温度进行调节的热隐身设备，但不是自适应调节，通过将热隐身器件和探测器相结合，将探测器获得的数据提供给热隐身器件，从而能够实现高度自适应的热隐身。3) 对于中红外探测器，由于微纳加工技术的原因，超表面与中红外探测器的集成难以实现大面积制备，成本高；超表面结构对入射光的实时调控能力较弱，面对复杂环境下的动态适应与调控能力仍有不足。制备中对探测材料的污染也是探测器性能的重要影响因素，未来随着微纳加工技术的进步，可以实现超表面的大面积制备，同时大大降低制备时对探测材料的污染，提升探测器的性能。

参 考 文 献

- [1] Meléndez J, de Castro A J, López F, et al. Spectrally selective gas cell for electrooptical infrared compact multigas sensor[J]. *Sensors and Actuators A*, 1995, 47(1/2/3): 417-421.
- [2] Xing Y X, Vincent T A, Cole M, et al. Real-time thermal modulation of high bandwidth MOX gas sensors for mobile robot applications[J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1180.
- [3] Tan X C, Zhang H, Li J Y, et al. Non-dispersive infrared multi-gas sensing via nanoantenna integrated narrowband detectors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5245.
- [4] Rodrigo D, Limaj O, Janner D, et al. Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 165-168.
- [5] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [6] Wang L, Wang H M, Wagner M, et al. Nanoscale simultaneous chemical and mechanical imaging via peak force infrared microscopy[J]. *Science Advances*, 2017, 3(6): e1700255.
- [7] Cui Y X, He Y R, Jin Y, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 495-520.
- [8] Alaei R, Albooyeh M, Rockstuhl C. Theory of metasurface based perfect absorbers[J]. *Journal of Physics D*, 2017, 50(50): 503002.
- [9] Zhong S M, He S L. Ultrathin and lightweight microwave absorbers made of mu-near-zero metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2083.
- [10] Jin Y, Xiao S S, Mortensen N A, et al. Arbitrarily thin metamaterial structure for perfect absorption and giant magnification[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11114-11119.
- [11] Zhong S M, Ma Y G, He S L. Perfect absorption in ultrathin anisotropic ϵ -near-zero metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 023504.
- [12] Jiang W, Ma Y G, Yuan J, et al. Deformable broadband metamaterial absorbers engineered with an analytical spatial Kramers-Kronig permittivity profile[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(1): 1600253.
- [13] Qu C, Ma S J, Hao J M, et al. Tailor the functionalities of metasurfaces based on a complete phase diagram[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(23): 235503.
- [14] Liu X L, Starr T, Starr A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 207403.
- [15] Yong Z D, Zhang S L, Gong C S, et al. Narrow band perfect absorber for maximum localized magnetic and electric field enhancement and sensing applications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24063.
- [16] Mo L, Yang L, Nadzeyka A, et al. Enhanced broadband absorption in gold by plasmonic tapered coaxial holes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32233-32244.
- [17] Zhang F, Yang L, Jin Y, et al. Turn a highly-reflective metal into an omnidirectional broadband absorber by coating a purely-dielectric thin layer of grating[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 134: 95-109.
- [18] Chi K Q, Yang L, He S L. Ultrathin nanostructured solar selective absorber based on a two-dimensional hemispherical shell array[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(6): 063903.
- [19] Yang L, Kou P F, He N, et al. Anomalous light trapping enhancement in a two-dimensional gold nanobowl array with an amorphous silicon coating[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14114-14124.
- [20] Yang L, Mo L, Okuno Y, et al. Optimal design of ultra-broadband, omnidirectional, and polarization-insensitive amorphous silicon solar cells with a core-shell nanograting structure[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2013, 21(5): 1077-1086.
- [21] Zhu X Y, Fu J C, Ding F, et al. Angle-insensitive narrowband optical absorption based on high-Q localized resonance[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15240.
- [22] He X, Jie J, Yang J, et al. A mid-infrared narrowband absorber based on a subwavelength fine-structured silicon-gold metagrating[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5022.
- [23] Soydan M C, Ghobadi A, Yildirim D U, et al. Lithography-free random bismuth nanostructures for full solar spectrum harvesting and mid-infrared sensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4): 1901203.
- [24] Fan K B, Shadrivov I V, Miroshnichenko A E, et al. Infrared all-dielectric Kerker metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10518-10526.
- [25] Ming X S, Liu X Y, Sun L Q, et al. Degenerate critical coupling in all-dielectric metasurface absorbers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24658-24669.
- [26] Tian J Y, Luo H, Li Q, et al. Near-infrared super-absorbing all-dielectric metasurface based on single-layer germanium nanostructures[J]. *Laser & Photonics*

- Reviews, 2018, 12(9): 1800076.
- [27] Xu R Y, Takahara J. All-dielectric perfect absorber based on quadrupole modes[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3596-3599.
- [28] Piper J R, Liu V, Fan S H. Total absorption by degenerate critical coupling[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251110.
- [29] Chen K, Adato R, Altug H. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 7998-8006.
- [30] Zhang B X, Zhao Y H, Hao Q Z, et al. Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15221-15228.
- [31] Cui Y X, Xu J, Fung K H, et al. A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 253101.
- [32] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Multiband plasmonic absorber based on transverse phase resonances[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17552-17559.
- [33] Ma W, Wen Y Z, Yu X M. Broadband metamaterial absorber at mid-infrared using multiplexed cross resonators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30724-30730.
- [34] Bossard J A, Lin L, Yun S, et al. Near-ideal optical metamaterial absorbers with super-octave bandwidth[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1517-1524.
- [35] He J L, He S L. Slow propagation of electromagnetic waves in a dielectric slab waveguide with a left-handed material substrate[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(2): 96-98.
- [36] He S L, He Y R, Jin Y. Revealing the truth about 'trapped rainbow' storage of light in metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 583.
- [37] Ding F, Cui Y X, Ge X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [38] Ye Y Q, Jin Y, He S. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 498-504.
- [39] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [40] Dayal G, Ramakrishna S A. Design of multi-band metamaterial perfect absorbers with stacked metal-dielectric disks[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055106.
- [41] He S L, Chen T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(6): 757-763.
- [42] Ding F, Jin Y, Li B, et al. Ultrabroadband strong light absorption based on thin multilayered metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 946-953.
- [43] He S L, Ding F, Mo L, et al. Light absorber with an ultra-broad flat band based on multi-sized slow-wave hyperbolic metamaterial thin-films (invited paper) [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 147: 69-79.
- [44] Ji T, Peng L N, Zhu Y T, et al. Plasmonic broadband absorber by stacking multiple metallic nanoparticle layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 161107.
- [45] Bao Z Y, Wang J C, Hu Z D, et al. Coordinated multi-band angle insensitive selection absorber based on graphene metamaterials[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31435-31445.
- [46] He W J, Feng Y, Hu Z D, et al. Sensors with multifold nanorod metasurfaces array based on hyperbolic metamaterials[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4): 1801-1806.
- [47] Bao Z Y, Wang J C, Hu Z D, et al. Coordination multi-band absorbers with patterned irrelevant graphene patches based on multi-layer film structures[J]. *Journal of Physics D*, 2021, 54(50): 505306.
- [48] Bly V T, Cox J T. Infrared absorber for ferroelectric detectors[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(1): 26-30.
- [49] Corrigan T D, Park D H, Drew H D, et al. Broadband and mid-infrared absorber based on dielectric-thin metal film multilayers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8): 1109-1114.
- [50] Ding F, Mo L, Zhu J F, et al. Lithography-free, broadband, omnidirectional, and polarization-insensitive thin optical absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(6): 061108.
- [51] Wang W Y, Cui Y X, He Y R, et al. Efficient multiband absorber based on one-dimensional periodic metal-dielectric photonic crystal with a reflective substrate[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 331-334.
- [52] Shen H J, Yang L, Jin Y, et al. Perfect mid-infrared dual-band optical absorption realized by a simple lithography-free polar dielectric/metal double-layer nanostructure[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31414-31424.
- [53] Zhou H, Ding F, Jin Y, et al. Terahertz metamaterial modulators based on absorption[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 119: 449-460.
- [54] Liu X Y, Padilla W. Reconfigurable room temperature metamaterial infrared emitter[J]. *Optica*, 2017, 4(4): 430-433.
- [55] Fan K B, Suen J, Wu X Y, et al. Graphene metamaterial modulator for free-space thermal radiation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25189-25201.
- [56] Zeng B B, Huang Z Q, Singh A, et al. Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 51.
- [57] Kocer H, Butun S, Banar B, et al. Thermal tuning of infrared resonant absorbers based on hybrid gold-VO₂ nanostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 161104.
- [58] Liu L, Kang L, Mayer T S, et al. Hybrid metamaterials for electrically triggered multifunctional control[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13236.

- [59] Cao T, Zhang X Y, Dong W L, et al. Tuneable thermal emission using chalcogenide metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800169.
- [60] Planck M. Ueber das gesetz der energieverteilung im normalspectrum[J]. *Annalen Der Physik*, 1901, 309(3): 553-563.
- [61] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application As plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [62] Li W, Fan S H. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15995-16021.
- [63] 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.
- [64] de Zoysa M, Asano T, Mochizuki K, et al. Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 535-539.
- [65] Inoue T, de Zoysa M, Asano T, et al. Single-peak narrow-bandwidth mid-infrared thermal emitters based on quantum wells and photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(19): 191110.
- [66] Guo Y, Fan S H. Narrowband thermal emission from a uniform tungsten surface critically coupled with a photonic crystal guided resonance[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29896-29907.
- [67] Liu X L, Tyler T, Starr T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [68] Liu B A, Gong W, Yu B W, et al. Perfect thermal emission by nanoscale transmission line resonators[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(2): 666-672.
- [69] Yang Z Y, Ishii S, Yokoyama T, et al. Narrowband wavelength selective thermal emitters by confined Tamm plasmon polaritons[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2212-2219.
- [70] Wang Z Y, Clark J K, Ho Y L, et al. Narrowband thermal emission realized through the coupling of cavity and Tamm plasmon resonances[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2446-2452.
- [71] He M Z, Nolen J R, Nordlander J, et al. Deterministic inverse design of Tamm plasmon thermal emitters with multi-resonant control[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(12): 1663-1669.
- [72] Narayanaswamy A, Mayo J, Canetta C. Infrared selective emitters with thin films of polar materials[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(18): 183107.
- [73] Mann D, Kato Y K, Kinkhabwala A, et al. Electrically driven thermal light emission from individual single-walled carbon nanotubes[J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, 2(1): 33-38.
- [74] Greffet J J, Carminati R, Joulain K, et al. Coherent emission of light by thermal sources[J]. *Nature*, 2002, 416(6876): 61-64.
- [75] Chalabi H, Alù A, Brongersma M L. Focused thermal emission from a nanostructured SiC surface[J]. *Physical Review B*, 2016, 94(9): 094307.
- [76] Inampudi S, Cheng J R, Salary M M, et al. Unidirectional thermal radiation from a SiC metasurface[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 35(1): 39-46.
- [77] Park J H, Han S E, Nagpal P, et al. Observation of thermal beaming from tungsten and molybdenum Bull's eyes[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(3): 494-500.
- [78] Argyropoulos C, Le K Q, Mattiucci N, et al. Broadband absorbers and selective emitters based on plasmonic Brewster metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2013, 87(20): 205112.
- [79] Liberal I, Engheta N. Manipulating thermal emission with spatially static fluctuating fields in arbitrarily shaped epsilon-near-zero bodies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(12): 2878-2883.
- [80] Xu J, Mandal J, Raman A P. Broadband directional control of thermal emission[J]. *Science*, 2021, 372(6540): 393-397.
- [81] Ying Y B, Ma B Z, Yu J B, et al. Whole LWIR directional thermal emission based on ENZ thin films[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022: 2200018.
- [82] Schuller J A, Taubner T, Brongersma M L. Optical antenna thermal emitters[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 658-661.
- [83] Lee J C W, Chan C T. Circularly polarized thermal radiation from layer-by-layer photonic crystal structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(5): 051912.
- [84] Wu C, Arju N, Kelp G, et al. Spectrally selective chiral silicon metasurfaces based on infrared Fano resonances[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3892.
- [85] Dahan N, Gorodetski Y, Frischwasser K, et al. Geometric Doppler effect: spin-split dispersion of thermal radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136402.
- [86] Coppens Z J, Valentine J G. Spatial and temporal modulation of thermal emission[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(39): 1701275.
- [87] Inoue T, de Zoysa M, Asano T, et al. Filter-free nondispersive infrared sensing using narrow-bandwidth mid-infrared thermal emitters[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(1): 012103.
- [88] Inoue T, Zoysa M D, Asano T, et al. Realization of dynamic thermal emission control[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(10): 928-931.
- [89] Brar V W, Sherrott M C, Jang M S, et al. Electronic modulation of infrared radiation in graphene plasmonic resonators[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7032.
- [90] Mori T, Yamauchi Y, Honda S, et al. An electrically driven, ultrahigh-speed, on-chip light emitter based on carbon nanotubes[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3277-3283.
- [91] Kats M A, Blanchard R, Zhang S Y, et al. Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial: perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance[J]. *Physical Review X*,

- 2013, 3(4): 041004.
- [92] Du K K, Li Q, Lü Y B, et al. Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase changing material GST[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6: e16194.
- [93] Peng L, Liu D Q, Cheng H F, et al. A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(23): 1801006.
- [94] Zhao L, Liu H, He Z H, et al. All-metal frequency-selective absorber/emitter for laser stealth and infrared stealth[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(8): 1757-1764.
- [95] Li L, Shi M K, Liu X Y, et al. Ultrathin titanium carbide (MXene) films for high - temperature thermal camouflage[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(35): 2101381.
- [96] 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.
- [97] Xiao L, Ma H, Liu J K, et al. Fast adaptive thermal camouflage based on flexible VO₂/graphene/CNT thin films[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(12): 8365-8370.
- [98] 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.
- [99] Salihoglu O, Uzlu H B, Yakar O, et al. Graphene-based adaptive thermal camouflage[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4541-4548.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] Yakushev M V, Brunev D V, Varavin V S, et al. A 288×4 linear-array photodetector based on Hg vacancy-doped HgCdTe with long-wave cutoff wavelength greater than 12 μm[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 69: 107-110.
- [104] Nordin L, Petluru P, Kamboj A, et al. Ultra-thin plasmonic detectors[J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1545-1551.
- [105] Nie X F, Zhen H L, Huang G S, et al. Strongly polarized quantum well infrared photodetector with metallic cavity for narrowband wavelength selective detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(16): 161107.
- [106] Tang X, Wu G F, Lai K W C. Plasmon resonance enhanced colloidal HgSe quantum dot filterless narrowband photodetectors for mid-wave infrared[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(2): 362-369.
- [107] Lochbaum A, Dorodnyy A, Koch U, et al. Compact mid-infrared gas sensing enabled by an all-metamaterial design[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4169-4176.
- [108] Dao T D, Ishii S, Doan A T, et al. An on-chip quad-wavelength pyroelectric sensor for spectroscopic infrared sensing[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(20): 1900579.
- [109] Jiang S, Li J Y, Li J Z, et al. Genetic optimization of plasmonic metamaterial absorber towards dual-band infrared imaging polarimetry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22617-22629.
- [110] Liu C Y, Guo J S, Yu L W, et al. Silicon/2D-material photodetectors: from near-infrared to mid-infrared[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 123.
- [111] Zhang M Y, Yeow J T W. A flexible, scalable, and self-powered mid-infrared detector based on transparent PEDOT: PSS/graphene composite[J]. *Carbon*, 2020, 156: 339-345.
- [112] Azar N S, Shrestha V R, Crozier K B. Bull's eye grating integrated with optical nanoantennas for plasmonic enhancement of graphene long-wave infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(9): 091108.
- [113] Li J Y, Bao L, Jiang S, et al. Inverse design of multifunctional plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8375-8386.
- [114] Li W, Coppens Z J, Besteiro L V, et al. Circularly polarized light detection with hot electrons in chiral plasmonic metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8379.
- [115] Peng J Y, Cumming B P, Gu M. Direct detection of photon spin angular momentum by a chiral graphene mid-infrared photodetector[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 2998-3001.

约稿专家简介:



何赛灵(1966—),博士,教授/博士生导师,教育部首批“长江学者奖励计划”特聘教授(1999年)。1988年毕业于浙江大学,1992年初获瑞典皇家工学院工学博士学位,之后留在瑞典皇家工学院任助理教授、副教授和教授。国际电气电子工程师协会会士(IEEE Fellow),美国光学学会会士(OSA Fellow),国际光学工程学会会士(SPIE Fellow)。现任浙江大学瑞典皇家工学院光子联合研究中心(JORCEP)主任,国家光学仪器工程技术研究中心主任。主要从事先进光电技术研究,具体包括智能感知技术、亚波长微纳光子学、通讯技术等领域的前沿和应用研究,在这些方面曾担任多项国家重大重点项目首席专家(包括国家“973”项目首席科学家和“863”项目首席专家)。发表了700多篇被SCI检索的国际期刊文章,论文的SCI他引频次超过2.8万次,个人h因子为90(Google Scholar)、81(Web of Science),并以第一作者著有一本国际专著及一本中文专著。E-mail:sailing@zju.edu.cn。