

# 人工结构红外选择辐射体研究进展

王 军<sup>1,2</sup>, 张 雷<sup>1,2\*</sup>, 桂博恒<sup>1,2</sup>, 朱 颖<sup>1,2</sup>, 屈绍波<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省人工结构功能材料与器件重点实验室, 西安, 710051; 2. 空军工程大学基础部, 西安, 710051)

**摘要** 人工结构红外选择辐射体,是指通过技术手段调控光谱发射率分布特征和幅值大小以改变自身辐射特性的结构/功能材料。由于其辐射特性可设计的特点,可用于能源、环境和军事等领域,具有丰富的应用前景和重要的应用价值。首先,围绕近年来人工结构红外选择辐射体的研究现状,对其设计方法进行总结分类。其次,介绍了基于亚波长单元结构的超材料、光子晶体和多层膜的红外选择辐射体设计原理及其研究现状,并分别指出了 3 种方法的适用范围及局限性。最后,结合评价体系、工程应用和发展趋势梳理出红外选择辐射体研究领域所面临的技术难点,为下一步发展提供建议并进行展望。

**关键词** 红外选择辐射体;超材料;光子晶体;多层膜

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.001

**中图分类号** TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0002-09

## Research Progress in Artificially-Structured Infrared Selective Radiator

WANG Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2\*</sup>, GUI Boheng<sup>1,2</sup>, ZHU Ying<sup>1,2</sup>, QU Shaobo<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Artificially-Structured Functional and Devices, Xi'an 710051, China;  
2. Department of Basic Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Infrared selective radiator means that the object can effectively change the radiation characteristics of the target by regulating the distribution and amplitude of spectral emissivity through technical means. Due to the designable characteristics of radiation, such a material can be applied in energy, environment and military fields, and has a promising prospect and preferred. Firstly, this paper summarizes and classifies the design methods based on the researches of infrared selective radiators in recent years. Besides, this review introduces the design principles and related researches of selective radiator based on metamaterials, photonic crystals, and multilayers. The application scope and relative merits of the three methods are summarized. Lastly, the technical difficulties of infrared selective radiator development are summarized in three aspects: the evaluation system, engineering applications, and development trends. The suggestions and the outlooks for developments of infrared selective radiator are provided.

**Key words** infrared selective radiator; meta-materials; photonic crystal; multilayer film

红外选择辐射体在能源和环境等领域中,因其等特点而备受关注<sup>[1-3]</sup>。由于传统能源不可再生,各国对新能源尤其是太阳能十分重视,希望通过控制

**收稿日期:** 2021-07-29

**作者简介:** 王 军(1982—),男,陕西渭南人,副教授,研究方向为兼容隐身技术、铁电薄膜功能器件等。E-mail: wangjun563@163.com

**通信作者:** 张 雷(1996—),男,四川宜宾人,硕士生,研究方向为人工功能结构功能材料红外伪装。E-mail: lzhang996@163.com

**引用格式:** 王军,张雷,桂博恒,等.人工结构红外选择辐射体研究进展[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(6):2-10. WANG Jun, ZHANG Lei, GUI Boheng, et al. Research Progress in Artificially-Structured Infrared Selective Radiator[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 2-10.

物体表面吸收率,加强对太阳能的吸收利用<sup>[4]</sup>;在航空航天领域中,为实现有效散热,保障航天器设备性能,通常采用热管理技术,而选择辐射体是实现热管理的有效途径<sup>[5]</sup>。

在军事领域,红外探测器广泛应用于制导技术,在打击精度和抗干扰能力方面发展迅速,给飞行器造成巨大威胁<sup>[6-9]</sup>。普朗克辐射定律指出,任何物体的温度只要大于绝对零度(0 K, -273 °C)都不可避免向外发出热辐射。在战场上,各类军事装备,特别是处于工作状态的目标,其红外热辐射特征明显,更容易暴露在红外探测器下。因此,合理设计的红外选择辐射体有助于目标实现红外伪装,能够有效保护武器装备。

早期研究大多聚焦于低发射率红外隐身材料与技术,较少考虑环境辐射和自身温度等因素影响。研究表明,考虑目标红外隐身与伪装时,不能盲目降低目标表面发射率,随着飞行速度的提高,蒙皮气动生热的温度急剧上升,全光谱低发射抑制热量的耗散反而会加强目标红外辐射信号<sup>[9]</sup>。红外选择辐射体的引入能够更好地实现红外伪装效能。具体而言,针对目标表面的选择性辐射功能需求,实现在红外大气窗口内的低发射率,利于红外伪装;同时,实现大气窗口外的高发射率,利于散热。这无论对保护己方军事装备还是对隐蔽突防而言,都具有十分重要的战略意义。

从设计方法来看,选择辐射体以超材料、光子晶体和多层膜等人工结构为代表。首先,本文主要针对近年来选择辐射体的设计机理与方法进行了总结。其次,对基于超材料、光子晶体和多层膜的选择辐射体的设计原理及相关研究亮点进行重点分析。最后,立足于评价体系、工程应用和发展趋势,剖析红外选择辐射体在进一步发展中面临的技术难点,为相关领域的发展方向提供建议并进行展望。

## 1 选择辐射体原理及分类

### 1.1 选择辐射体工作原理

基尔霍夫定律表明,在一定条件下,物体吸收率 $\alpha$ 等于发射率 $\epsilon$ (式(1)),且由斯特藩-玻尔兹曼定律(式(2))可知,物体辐射的能量由表面发射率 $\epsilon$ 和自身温度 $T$ 决定。选择辐射体能够通过设计调制光谱发射率分布特征和幅值大小,实现特定的波长选择辐射的功能。由维恩位移定律(式(3))可知,物体光谱辐射出射度 $E$ 的峰值对应波长 $\lambda$ 与物体热力学温度 $T$ 成反比。因此,常规技术手段实现对特定频段内辐射出射度 $E$ 的调控具有一定难度。

$$\alpha = \epsilon \quad (1)$$

$$E = k\epsilon T^4 \quad (2)$$

$$\lambda T = b \quad (3)$$

式中: $k$ 为玻尔兹曼常数; $b$ 为维恩位移常数。

### 1.2 设计原理及分类

近年来,国内外研究团队设计选择辐射体的方法十分丰富<sup>[20-77]</sup>,如基于亚波长单元结构的超材料<sup>[20-38]</sup>、光子晶体<sup>[39-55]</sup>、多层膜<sup>[56-63,73-77]</sup>,基于n型量子阱的发射率调制方法<sup>[70]</sup>等。本文重点介绍基于亚波长单元结构的超材料、光子晶体和多层膜的设计机理与方法。

超材料(metamaterials)作为一类新型人工电磁媒质,由亚波长单元结构按照周期、准周期或者随机的排布方式构成,继承了自然材料的部分特性并获得超越自然材料的电磁特性。自2008年Landy提出超材料完美吸波体,超材料可设计的电磁调制特性激发了研究者在各个领域的探索兴趣。在红外波段,通过超材料等效电磁参数的设计可实现对吸收率的灵活调控<sup>[10]</sup>。

光子晶体(photonic crystal)是由具有不同折射率的介质材料在空间按一定的周期排列所形成的一种人工结构晶体,其光子禁带对入射电磁波具有高反射率,能够有效改变目标的辐射特性<sup>[11]</sup>。按照介质材料排列的空间结构,可分为一维、二维和三维光子晶体<sup>[12-18]</sup>。

多层膜(multilayer film)由不同介质按照一维非周期的形式叠加而成。依据机理不同,可有不同的设计方案,具有膜层厚度可设计性强、结构简单、便于大尺寸制备等特点。例如,通过对层数及膜系材料的优化设计,可增强进入膜内的电磁波,并结合法布里-珀罗谐振腔原理,当红外波段电磁波进入多层膜后,在层内金属膜之间不断反射,从而使特定波段处电磁波发生干涉相消的现象,导致该波段处反射率极低,产生吸收峰<sup>[19]</sup>。

## 2 红外选择辐射体研究现状

### 2.1 基于亚波长单元结构的超材料红外选择辐射体

2010年,美国波士顿大学Liu等首次提出并验证了红外超材料完美吸波器。小组利用十字结构调节电场,并控制亚波长单元结构与底层金属背板之间的距离而独立调控磁场,通过调控电磁谐振的幅度与频率位置,实现吸波体与自由空间的阻抗匹配,并成功在6 $\mu\text{m}$ 处调制出高吸收峰<sup>[20]</sup>,其结构图及吸收效果如图1所示。2011年,该小组利用面内多尺寸结构设计理念,在一个单元结构内,设计了2种

尺寸的十字结构,成功在  $6.18 \mu\text{m}$  和  $8.32 \mu\text{m}$  处调制出 2 个窄带吸收峰,实现多峰调制<sup>[21]</sup>。

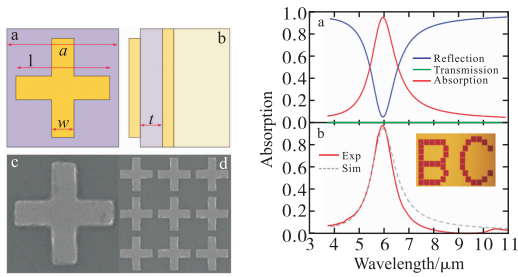
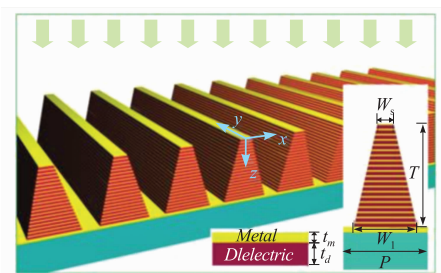
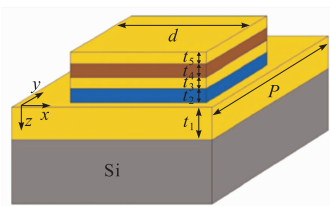


图1 首个红外超材料吸波器结构及效果示意图<sup>[20]</sup>

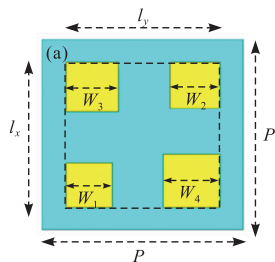
2012年,Cui等提出了一种三维锯齿状的各向异性超材料宽带红外吸波体,见图2(a),较长波长的红外吸收对应锯齿的下部,较短波长的红外吸收对应锯齿的上部,叠加以实现宽带红外吸收<sup>[22]</sup>。2015年,电子科技大学邓龙江团队根据等效电路模型,利用不同折射率的介质在纵向上构成夹层超材料结构,见图2(b),提出一种大角度宽带红外选择辐射/吸收体<sup>[23]</sup>。2017年,本课题组利用氮化硅进行面内多尺寸结构设计,见图2(c),实现了广角极化不敏感的选择性辐射功能,其在  $5.5 \sim 7.6 \mu\text{m}$  为高发射,其余中红外波段为低发射<sup>[24]</sup>。



(a) 三维锯齿形超材料宽带选择辐射体



(b) 三维夹层超材料宽带选择辐射体



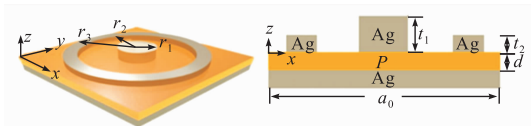
(c) 面内多尺寸超材料宽带选择辐射体

图2 基于亚波长单元结构的超材料宽带选择辐射体

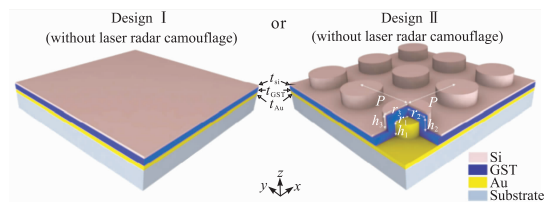
2016年,日本国际材料纳米结构中心基于局域等离激元超材料思想,利用钼和氧化铝,设计并制备了耐高温红外选择辐射体。温度在  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  真空环境中,其位于  $6 \mu\text{m}$  处的发射峰保持稳定,并且可通过改变结构参数,实现在  $3 \sim 8 \mu\text{m}$  范围内发射峰调控<sup>[25]</sup>。

2017年,韩国延世大学设计了基于 Ag/PI/Ag 的面内亚波长单元结构周期阵列,见图3(a),利用局域等离激元效应和磁偶极子谐振实现了在  $1.54 \mu\text{m}$  和  $6.2 \mu\text{m}$  处的双波段选择辐射效果<sup>[26]</sup>。2017年,罗先刚团队利用局域表面等离激元谐振与亥姆霍兹谐振效应,提出了可在  $1.06 \mu\text{m}$  和  $10.64 \mu\text{m}$  处大角度吸波且红外探测波段为低发射的设计,给出了激光-红外兼容隐身的方案<sup>[27]</sup>。2018年,哈尔滨工业大学提出了基于全金属可实现红外和激光兼容隐身的三维立体结构设计方案<sup>[28]</sup>。2020年,浙江大学李强和西湖大学仇旻团队提出了一种基于 Si/GST/Au 的简单光子结构,见图3(b),实现了辐射冷却并在可见光、 $10.6 \mu\text{m}$  激光处和大气窗口多个波段内实现兼容伪装<sup>[29]</sup>。

2018年,韩国延世大学团队利用分层超材料概念,运用金、硫化锌、FR-4 和铜,分别研制红外选择辐射体和微波频选,见图3(c),整合后实现了红外和微波兼容吸波<sup>[30]</sup>。2019年,其团队设计和制备了一种基于 Au/ZnS/Au 的面内亚波长单元结构周期阵列的红外伪装选择辐射体,并从热平衡与辐射能量比的角度提出了选择辐射体红外伪装性能评价体系。此评价体系可实现最优化伪装效果的超材料红外选择辐射体设计<sup>[31]</sup>。同年,罗先刚院士团队利用 ITO 薄膜和 PVC 基板,研制出柔性透明的红外雷达兼容隐身结构,其微波吸波的角度稳定性在  $0^\circ \sim 40^\circ$ ,  $7.7 \sim 18 \text{ GHz}$  的反射率均在  $-10 \text{ dB}$  以下,通过设计 ITO 薄膜的占空比,使红外波段发射率整体小于 0.23,实现了红外隐身效果<sup>[32]</sup>。



(a) 激光-红外兼容超材料单元结构



(b) 可见光-红外-激光兼容单元结构

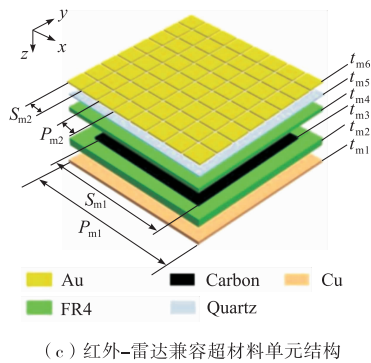


图 3 多波段兼容伪装结构及效果对比图

基于亚波长单元结构的超材料红外选择辐射体的发展趋势由宽带沿高温、多频谱兼容以及动态可调的方向发展<sup>[33-36]</sup>。2017年,印度科技研究所则利用ITO薄膜与VO<sub>2</sub>的相变特性,实现了发射率幅值大范围调控的功能<sup>[37]</sup>。2018年,美国中央佛罗里达大学提出了基于相变材料VO<sub>2</sub>的自适应多波段红外伪装方法,并首次提出红外编码加密技术<sup>[38]</sup>。

## 2.2 基于光子晶体的红外选择辐射体

1987年,Yablonvitch<sup>[39]</sup>发现了光子带隙(PBG)并建立了相关理论基础,John<sup>[40]</sup>随后基于此提出光子晶体这一概念,通过对不同折射率的材料进行周期性排列实现对材料光子带隙的调制,可得到具有特定禁带的功能型光子晶体。光子晶体根据其结构单元的空间维度可以分为一维、二维和三维光子晶体。

国外关于光子晶体的研究早于国内,1998年Fink等<sup>[41]</sup>利用聚苯乙烯薄膜与碲薄膜周期性的交错堆叠制备出一维光子晶体,其禁带被设计在10~15 μm,首次通过一维光子晶体实现了人工结构的宽带选择辐射体。在红外伪装方面,2001年,Temelkuran等<sup>[42]</sup>利用聚乙烯和碲薄膜制备了一维光子晶体,其两个光子禁带分别在4.5~5.5 μm和8~12 μm实现高反射,得到了双波段红外伪装选择辐射体。2013年,Arpin等<sup>[43]</sup>用钨(W)和硼化铪(HfB<sub>2</sub>)制备得到反蛋白石结构的三维光子晶体,在2~5 μm设计了低发射率,其在1400℃高温下仍具有较好的热稳定性,成果将光子晶体的研究推广到高温红外伪装领域。2015年,德国汉堡理工大学Eich团队利用钨(W)和二氧化铪(HfO<sub>2</sub>)的一维光子晶体结构制备了一种用于热光伏系统的选择辐射体,验证了其在1000℃下的光谱性能<sup>[44]</sup>。其团队在2019年对此结构进行设计与制备等方面的改进,耐温可达1400℃,为耐高温一维光子晶体的发展奠定了基础<sup>[45]</sup>。Teyssier<sup>[46]</sup>在2015年发现变色龙皮肤微结构排列呈现光子晶体的特性,从仿生的角

度解释了变色龙皮肤随周围环境改变而改变的主动伪装行为,同时证明了光子晶体在多频谱伪装领域的潜力。

国内红外伪装选择辐射体发展较慢,通过对材料工艺的不断摸索,确定了一系列以ZnS、ZnSe和Ge等宽带红外透波材料为主的光子晶体材料体系,常用红外透波材料参数如表1所示。表1对常用的红外透过材料的能隙、短波截止极限以及通带做了一个简要的总结,其中,短波截止限 $\lambda_{\min}$ 可以根据 $\lambda_{\min}=1.24/E_g$ 计算得到, $E_g$ 为能隙。

表 1 常见红外透波材料

材料	能带/eV	短波截止极限/μm	通带/μm
ZnS	3.50	0.350	0.35~13
ZnSe	2.70	0.450	0.50~20
Si	1.12	1.100	1.10~9
Ge	0.70	1.800	1.80~23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.00	0.140	0.14~6
MgF <sub>2</sub>	11.80	0.105	0.11~9

2014年,南京航空航天大学徐国跃团队<sup>[47-48]</sup>对ZnS/Ge一维光子晶体的选择辐射特性进行了设计(图4(a)),分别针对单可探测窗口(3~5 μm)和多窗口(3~5 μm和8~14 μm)具有低的平均发射率,并且在5~8 μm非探测窗口实现散热功能。

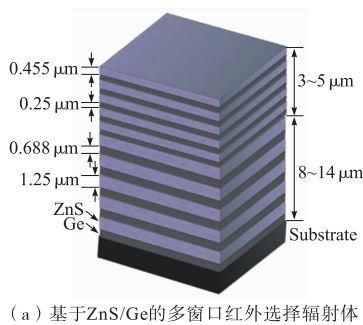
2015年,华中科技大学龚荣洲团队基于ZnS/Ge设计制备了一种一维光子晶体<sup>[49]</sup>,并验证了其具有良好的微波透过特性,为ZnS/Ge材料体系实现多频谱兼容提供思路。2016年,龚荣洲教授团队用ZnS/Ge更轻薄的厚度和灵活控制顶层ZnS厚度制备了不同颜色的工作在3~5 μm波段的红外选择辐射体,以实现与可见光伪装的兼容<sup>[50]</sup>。

2016年,电子对抗学院时家明等通过掺杂Si薄膜的方法提出一种一维掺杂Si膜的ZnSe/Te光子晶体<sup>[51]</sup>实现了针对激光和双可探测窗口的红外伪装选择辐射体(图4(b))。2017年,其团队在Ge/ZnS光子晶体内引入Si薄膜<sup>[52]</sup>提出一种基于一维掺杂结构光子晶体实现了红外-激光-雷达兼容隐身。2019年,其团队对ZnSe/Ge体系进行可见光-红外兼容伪装设计优化<sup>[53]</sup>,提出的双波段红外伪装选择辐射体的厚度被进一步优化到7.8 μm。2021年,华中科技大学龚荣洲团队制备了一种一维类光子晶体并覆盖相变材料薄膜GST,此类光子晶体具有自适应红外伪装的效果<sup>[55]</sup>。

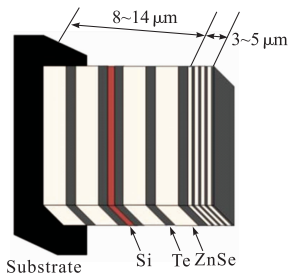
对近年来国内基于一维光子晶体实现红外伪装的人工结构选择辐射体总结见表2。

表 2 基于一维光子晶体实现红外伪装的人工结构材料选择辐射体

文献	材料体系	功能	实现波段/ $\mu\text{m}$	层数	总厚度/ $\mu\text{m}$
[47]	Ge/ZnS	红外伪装	3~5	10	3.525
[48]	Ge/ZnS	红外伪装	3~5, 8~14	20	12.09
[49]	Ge/ZnS	红外伪装	3~5, 8~14	48	29.898
[50]	Ge/ZnS	红外-可见	3~5 和可见光	8	1.9
[51]	Ge/ZnS 掺杂 Si	红外-激光-雷达	8~14	12	20
[52]	Te/ZnSe, Si	红外-激光	3~5, 8~14	18	未说明
[53]	Ge/ZnSe	红外-可见	3~5, 8~14	13	7.8



(a) 基于ZnS/Ge的多窗口红外选择辐射体



(b) 一维掺杂Si膜的ZnSe/Te光子晶体

图 4 一维光子晶体红外选择辐射体结构

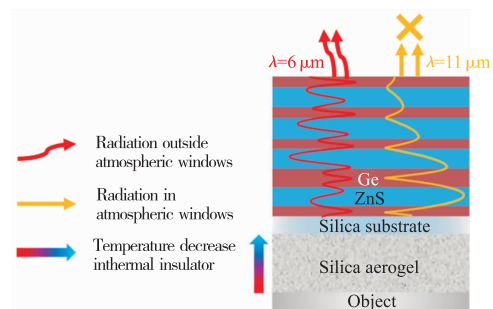
### 2.3 基于多层膜的红外选择辐射体

多层膜基的选择辐射体有两种实现方式,一是与光子晶体类似利用 PBG 设计光子禁带实现选择辐射(不具备周期性结构特点),二是利用波束在谐振腔内的谐振来实现选择辐射特性,常见的谐振腔有金属-介质-金属谐振腔(metal-dielectric-metal cavity)与法布里-珀罗谐振腔(Fabry-Pérot cavity)等<sup>[56-63, 73-77]</sup>。

2018年,龚荣洲团队利用不同顶层厚度的 ZnS 以及四分之一薄膜理论,将 ZnS/Ge 多层膜进行迷彩图案化,实现了一种红外和可见光兼容的迷彩,此多层膜突破了光子晶体周期性堆叠的结构局限<sup>[56]</sup>。2019年,中科院上海技物所利用 PbS/Ge 和 ZnSe/Ge 材料体系设计了一种高效的选择辐射体,8~14  $\mu\text{m}$  平均发射率低于 0.03,5~8  $\mu\text{m}$  发射率峰值可达 0.95<sup>[57]</sup>。2020年,浙江大学李强和西湖大学的仇旻团队基于 Ge/ZnS 多层膜的禁带调制实现了红外伪装和高效热管理,用更少的膜层(图 5(a))实现

了 3~14  $\mu\text{m}$  的双波段红外伪装以及选择辐射,并结合二氧化硅气凝胶的隔热性能进一步降低了目标红外辐射信号<sup>[58]</sup>。此外,其团队在 2021 年基于 Ge/ZnS 的多层膜不仅实现了 3~14  $\mu\text{m}$  的选择辐射伪装,还实现了兼容 10.6  $\mu\text{m}$  的激光吸收和可见光变色伪装,并结合雷达吸波超材料实现了多频谱的兼容伪装<sup>[59]</sup>。

对于选择辐射的设计不限于对光子带隙的调制。2018年,罗先刚院士团队提出用  $\text{CaF}_2/\text{Ge}/\text{Ni-chrome}$  进行选择辐射体的设计(图 5(b)),底层的金属-介质-金属谐振腔实现谐振吸收,结合对上层  $\text{CaF}_2$  和 Ge 两种不同折射率的红外透波材料调制光子禁带实现了优异的宽带选择辐射性能<sup>[60]</sup>。国防科技大学刘东青发现了超薄银膜的特殊辐射特性,利用椭圆偏振仪测得超薄银膜(10 nm)和 Ge 的红外光学参数,设计了一款 4 层膜红外伪装选择辐射体<sup>[61]</sup>。由于超薄 Ag 膜的透过与损耗特性,结合底层的反射 Ag 层(40 nm)形成了 Ag-Ge-Ag 的微谐振腔。Roberts 等基于  $\text{TiN}/\text{MgO}/\text{TiN}/\text{Si}_3\text{N}_4$  4 层膜与法布里-珀罗谐振腔设计并制备了一种工作在近红外波段的难熔红外选择辐射体,该选择辐射体在 1 070 K 以下可以稳定工作<sup>[62]</sup>。2021年,本课题组基于 ITO 透明导电膜的 Drude 模型与 ZnS 介质的透明特性设计了一种透明选择辐射体(图 5(c)),在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  都具有良好的红外伪装效果,可见光波段的平均透过率可达 65% 以上,可实现可见光与红外的兼容伪装,并从辐射能量的角度评估出伪装性能在随温度和厚度等参数的变化方面具有鲁棒性<sup>[63]</sup>。



(a) 光子带隙调制的多层膜

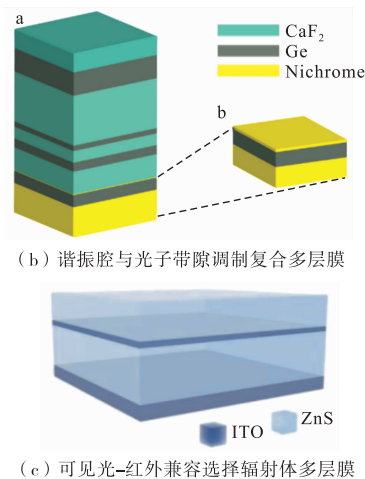


图 5 多层膜选择辐射体结构

对近年来基于多层膜的红外伪装人工结构选择辐射体做以下总结,如表 3 所示。

表 3 基于多层膜实现红外伪装的人工结构材料选择辐射体

文献	材料体系	实现波段/ $\mu\text{m}$	膜层	厚度/ $\mu\text{m}$
[56]	Ge/ZnS	8~14	13 层	11.9
[57]	PbS/ZnSe,	3~5,	20 层,	9.523,
	Ge/ZnSe	8~14	23 层	15.443
[58]	Ge/ZnS	3~5,8~14	9 层	8.975
[59]	Ge/ZnS	3~5,8~14	13 层	6.732
[60]	Ge/GaF <sub>2</sub> / Nichrome	3~5,8~14	10 层	5.354
[61]	Ge/Ag	3~5,8~14	4 层	0.993
[62]	TiN/MgO/ Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.9~1.5	4 层	0.433
[63]	ITO/ZnS	0.4-0.76, 3~5,8~14	4 层	1.95

综上,基于超材料的选择辐射体能够实现对电磁辐射的精确调控,其局限性主要体现为大规模制备工艺复杂和成本较高;基于一维光子晶体的选择辐射体无面内结构,并且适合与微波隐身材料相兼容以实现多频谱兼容,其局限性在于膜层过多,膜层厚度均匀性和层间粘结力需要进一步提高;基于多层膜的选择辐射体具有适合大规模制备的特点,其局限性主要体现在设计的灵活性较低,并且对材料体系的选择有更高的要求。

### 3 当前技术难点及展望

目前通过超材料、光子晶体和多层膜的设计方法,虽然一定程度上实现了控制红外发射率的功能,但立足效果验证、工程应用与发展趋势 3 个角度,选择辐射体仍有以下问题需要解决:

1)从效果验证的角度看,红外选择辐射体的伪

装效果可以在红外摄像机下通过与对应全光谱非选择性发射率材料进行对比得到,具有散热窗口的选择辐射体具有更优越的热伪装性能。通过采用具有更低发射率的非选择性材料同样可以实现减弱红外特征的效果,但是当温度升高又会引起全光谱低发射率材料的伪装性能减弱,因此实际性能的验证上仍需要进一步完善。

2)从工程应用角度看,目前人工结构红外选择辐射体有超材料、光子晶体和多层膜 3 种实现手段。其中,超材料对光谱发射率的调制最为出色,但是亚波长面内结构需要光刻等成本较高的微纳加工技术,成本高且不利于大规模制备;光子晶体的设计方法,不仅需要选择合适材料体系,而且常用的锗等半导体材料价格昂贵,应用成本会大大能加。此外,一维光子晶体膜层较多,大规模制备过程中对膜层稳定性和厚度均匀性提出了更高的要求;多层膜相对较少的层数和较薄的厚度便于大面积制备,具有一定的工程应用前景,在材料体系的遴选、设计和工艺优化等方面需要更深入的研究。

3)从未来发展看,当前红外选择辐射体多是在相应波段实现静态调制,目标光谱特性不会随着环境变化而变化,功能局限性较大。针对不同背景对发射率光谱进行智能化的动态调控(主动/被动)是未来发展方向,尤其是相变材料<sup>[24,31,63-66]</sup>、可调谐超材料<sup>[67-69]</sup>以及电致变发射率器件<sup>[70-72]</sup>在光谱调谐方面已有一定的研究成效,但是将选择辐射体发射率的动态调控应用于红外伪装方面仍需要进一步研究。

### 4 结语

国内外研究团队对选择辐射体研究成果应用广泛,通过超材料、光子晶体及多层膜的设计方法实现了太阳能高效吸收、辐射冷却及红外伪装等功能。随着人工结构红外选择辐射体的进一步研究,其设计和制备成本可以进一步降低,意味着红外选择辐射体可以具有更加普遍的应用。随着未来智能化发展趋势,具有光谱可调特性的人工结构红外选择辐射体有着更丰富的应用前景。

#### 参考文献

- [1] LIN K, HAN J, LI K, et al. Radiative Cooling: Fundamental Physics, Atmospheric Influences, Materials and Structural Engineering, Applications And Beyond [J]. Nano Energy, 2021, 80: 105517.
- [2] ULPIANI G, RANZI G, SHAH K W, et al. On The

- Energy Modulation of Daytime Radiative Coolers: A Review on Infrared Emissivity Dynamic Switch Against Overcooling[J]. *Solar Energy*, 2020, 209: 278-301.
- [3] 嵇海宁,刘东青,张朝阳,等. 二氧化钒在红外伪装隐身技术中的应用研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(11): 4099-4105.
- [4] ZHU L, RAMAN A P, FAN S. Radiative Cooling of Solar Absorbers Using a Visibly Transparent Photonic Crystal Thermal Blackbody[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(40): 12282-12287.
- [5] DEMIRYONT H, MOOREHEAD D. Electrochromic Emissivity Modulator for Spacecraft Thermal Management[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(12): 2075-2078.
- [6] TIAN H, LIU H, CHENG H. A Thin Radar-Infrared Stealth-Compatible Structure: Design, Fabrication, and Characterization[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(2): 333-338.
- [7] 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.
- [8] MENG Z, TIAN C, XU C, et al. Optically Transparent Coding Metasurface with Simultaneously Low Infrared Emissivity and Microwave Scattering Reduction [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27774-27784.
- [9] 曹晨,李江勇,冯博,等. 机载远程红外预警雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
- [10] 沈杨,王甲富,张介秋,等. 基于超材料的雷达吸波材料研究进展[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(6): 39-47.
- [11] 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): 32-41.
- [12] LEE H, WU J. Transmittance Spectra in One-Dimensional Superconductor-Dielectric Photonic Crystal[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(9): 09E149.
- [13] ZI J, WAN J, ZHANG C. Large Frequency Range of Negligible Transmission in One-Dimensional Photonic Quantum Well Structures [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(15): 2084-2086.
- [14] DJURIC Z, PETROVIC R, RANDELOVIC D, et al. One Dimensional Si-SiO<sub>2</sub> Photonic Crystal with Defects Intended for Use in Infrared Spectral Region[C] // 1997 the 21st International Conference on Microelectronics. NI, Yugoslavia; IEEE, 1997: 99-102.
- [15] AMRI R, SAHEL S, GAMRA D, et al. Photonic Band Gap and Defects Modes in Inorganic/Organic Photonic Crystal Based on Si and HMDSO Layers Deposited by Sputtering and PECVD[J]. *Optical Materials*, 2018, 76: 222-230.
- [16] EISSA M F, ALY A H. Improve the Efficiency of Scintillation Detectors Using Reflectors Based on Photonic Crystals Arrays[J]. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2014, 6(2): 25-29.
- [17] LI K, LI X, CHEN P, et al. High Reflector Designed with One-Dimensional Photonic Crystal in 3-5  $\mu\text{m}$  Infrared Region Based on Hetero-Structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 092201.
- [18] ZHANG W, XU G, ZHANG J, et al. Infrared Spectrally Selective Low Emissivity from Ge/ZnS One-Dimensional Heterostructure Photonic Crystal[J]. *Optical Materials*, 2014, 37: 343-346.
- [19] 王彬彬. 多波段兼容隐身膜系结构的设计与制备[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [20] LIU X, STARR T, STARR A F, et al. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 1-4.
- [21] LIU X, TYLER T, STARR T, et al. Taming the Blackbody with Infrared Metamaterials as Selective Thermal Emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 4-7.
- [22] CUI Y, FUNG K H, XU J, et al. Ultrabroadband Light Absorption by a Sawtooth Anisotropic Metamaterial Slab [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [23] ZHANG N, ZHOU P, WANG S, et al. Broadband Absorption in Mid-Infrared Metamaterial Absorbers with Multiple Dielectric Layers[J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 388-392.
- [24] XU C, QU S, PANG Y, et al. Metamaterial Absorber for Frequency Selective Thermal Radiation[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, 88: 133-138.
- [25] YOKOYAMA T, DAO T D, CHEN K, et al. Spectrally Selective Mid-Infrared Thermal Emission from Molybdenum Plasmonic Metamaterial Operated up to 1000°C [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12): 1987-1992.
- [26] KIM J, HAN K, HAHN J W. Selective Dual-Band Metamaterial Perfect Absorber for Infrared Stealth Technology[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-9.
- [27] ZHANG C, HUANG C, PU M, et al. Dual-Band Wide-Angle Metamaterial Perfect Absorber Based on The Combination of Localized Surface Plasmon Resonance and Helmholtz Resonance [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-6.
- [28] ZHAO L, LIU H, HE Z, et al. All-Metal Frequency-Selective Absorber/Emitter for Laser Stealth and Infrared Stealth [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(8): 1757.

- [29] PAN M, 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.
- [30] 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): 1-8.
- [31] LEE N, KIM T, LIM J S, et al. Metamaterial-Selective Emitter for Maximizing Infrared Camouflage Performance with Energy Dissipation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11 23: 21250-21257.
- [32] ZHANG C, WU X, HUANG C, et al. Flexible and Transparent Microwave-Infrared Bistable Structure [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1-8.
- [33] QU Y, LI Q, CAI L, et al. Thermal Camouflage Based on The Phase-Changing Material GST [J]. *Light: Science and Applications*, 2018, 7(1): 1-10.
- [34] WU D, LIU C, XU Z, et al. The Design of Ultra-Broadband Selective Near-Perfect Absorber Based on Photonic Structures to Achieve Near-Ideal Daytime Radiative Cooling[J]. *Materials and Design*, 2018, 139: 104-111.
- [35] XU Q, LIU X, XUAN Y, et al. High-Performance Infrared Thermal Radiation Suppression Metamaterials Enabling Inhibited Infrared Emission and Decreased Temperature Simultaneously[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120318.
- [36] XIAO L, MA H, LIU J, et al. Fast Adaptive Thermal Camouflage Based on Flexible VO<sub>2</sub>/Graphene/CNT Thin Films[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(12): 8365-8370.
- [37] PRADHAN J K, RAMAKRISHNA S A, RAJESWARAN B, et al. High Contrast Switch Ability of VO<sub>2</sub> Based Metamaterial Absorbers with ITO Ground Plane[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9116.
- [38] CHANDRA S, FRANKLIN D, COZART J, et al. Adaptive Multispectral Infrared Camouflage [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4513-4519.
- [39] YABLONOVITCH E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58 20: 2059-2062.
- [40] JOHN S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58 23: 2486-2489.
- [41] FINK Y, WINN J N, FAN S, et al. A Dielectric Omnidirectional Reflector[J]. *Science*, 1998, 282(5394): 1679-1682.
- [42] TEMELKURAN B, THOMAS E L, JOANNOPOULOS J, et al. Low-Loss Infrared Dielectric Material System for Broadband Dual-Range Omnidirectional Reflectivity[J]. *Optics letters*, 2001, 26 17: 1370-1372.
- [43] ARPIN K A, LOSEGO M, CLOUD A, et al. Three-Dimensional Self-Assembled Photonic Crystals with High Temperature Stability for Thermal Emission Modification [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2630.
- [44] DYACHENKO P, MOLESKY S, PETROV A, et al. Controlling Thermal Emission with Refractory Epsilon-Near-Zero Metamaterials via Topological Transitions[J]. *Nature Communications*, 2016, 7:11809.
- [45] CHIRUMAMILLA M, KRISHNAMURTHY G V, KNOPP K, et al. Metamaterial Emitter for Thermophotovoltaics Stable up to 1400°C[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-11.
- [46] TEYSSIER J, SAENKO S V, VAN DER MAREL D, et al. Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6 (1):1-7.
- [47] ZHANG W, XU G, SHI F, et al. Ultra-Low Infrared Emissivity at the Wavelength of 3-5  $\mu\text{m}$  from Ge/ZnS One-Dimensional Photonic Crystal[J]. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 2015, 14: 46-51.
- [48] ZHANG W, XU G, ZHANG J, et al. Infrared Spectrally Selective Low Emissivity from Ge/ZnS One-Dimensional Heterostructure Photonic Crystal[J]. *Optical Materials*, 2014, 37: 343-346.
- [49] WANG Z, CHENG Y, NIE Y, et al. Design and Realization of One-Dimensional Double Hetero-Structure Photonic Crystals for Infrared-Radar Stealth-Compatible Materials Applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 54905.
- [50] QI D, WANG X, CHENG Y, et al. Design and Characterization of One-Dimensional Photonic Crystals Based on ZnS/Ge For Infrared-Visible Compatible Stealth Applications[J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 52-56.
- [51] MIAO L, SHI J, WANG J, et al. Heterogeneous Doped One-Dimensional Photonic Crystal with Low Emissivity in Infrared Atmospheric Window[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 057101.
- [52] ZHANG J, SHI J, ZHAO D, et al. Realization of Compatible Stealth Material for Infrared, Laser and Radar Based on One-Dimensional Doping-Structure Photonic Crystals[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 62-65.
- [53] ZHANG J K, LIU R, ZHAO D, et al. Design, Fabrication and Characterization of a Thin Infrared-Visible Bi-Stealth Film Based on One-Dimensional Photonic Crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9:



- 195-202.
- [54] QIAO Y, MENG Z, WANG P, et al. Research Progress of Bionic Adaptive Camouflage Materials[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8:79.
- [55] SU Y, DENG Z, QIN W, et al. Adaptive Infrared Camouflage Based on Quasi-Photonic Crystal with  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127203.
- [56] 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.
- [57] ZHAO Z, LI G, SU T, et al. Selectively Thermal Radiation Control in Long-Wavelength Infrared with Broadband All-Dielectric Absorber [J]. *Optics Express*, 2019, 27 24: 35088-35095.
- [58] ZHU H, LI Q, ZHENG C, et al. High-Temperature Infrared Camouflage with Efficient Thermal Management[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-8.
- [59] ZHU H, LI Q, TAO C, et al. Multispectral Camouflage for Infrared, Visible, Lasers and Microwave with Radiative Cooling[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):1-8.
- [60] HUANG Y, PU M, ZHAO Z, et al. Broadband Metamaterial as an Invisible Radiative Cooling Coat [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 204-207.
- [61] PENG L, LIU D, CHENG H, et al. A Multilayer Film Based Selective Thermal Emitter for Infrared Stealth Technology[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6: 1801006.
- [62] ROBERTS A S, CHIRUMAMILLA M, WANG D, et al. Ultra-Thin Titanium Nitride Films for Refractory Spectral Selectivity [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8: 3717-3728.
- [63] 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*, 2021, 9(42), 15018-15025.
- [64] WANG J, XIONG B, PENG R, et al. Flexible Phase Change Materials for Electrically-Tuned Active Absorbers[J]. *Small*, 2021, 17(31):2101282.
- [65] GUO Z, YANG X, SHEN F, et al. Active-Tuning and Polarization-Independent Absorber and Sensor in the Infrared Region Based on the Phase Change Material of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST)[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [66] LONG L, TAYLOR S, YING X, et al. Thermally-Switchable Spectrally-Selective Infrared Metamaterial Absorber/Emitter by Tuning Magnetic Polariton with a Phase-Change  $\text{VO}_2$  Layer[J]. *Materials Today Energy*, 2019, 13: 214-220.
- [67] LOU J, LIANG J, YU Y, et al. Silicon-Based Terahertz Meta-Devices for Electrical Modulation of Fano Resonance and Transmission Amplitude[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(19): 2000449.
- [68] DONG B, MA H, WANG J, et al. A Thermally Tunable Thz Metamaterial Frequency-Selective Surface Based on Barium Strontium Titanate Thin Film[J]. *Journal of Physics D*, 2019, 52(4): 45301.
- [69] 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.
- [70] INOUE T, DE ZOYSA M, ASANO T, et al. Realization of Dynamic Thermal Emission Control[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(10): 928-931.
- [71] LI M, LIU D, CHENG H, et al. Manipulating Metals for Adaptive Thermal Camouflage[J]. *Science Advances*, 2020, 6(22): eaba3494.
- [72] LI M, LIU D, CHENG H, et al. Graphene-Based Reversible Metal Electrodeposition for Dynamic Infrared Modulation [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(25): 8538-8545.
- [73] PARK S H, LEE S M, KO E H, et al. Roll-to-Roll Sputtered ITO/Cu/ITO Multilayer Electrode for Flexible, Transparent Thin Film Heaters and Electrochromic Applications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-12.
- [74] YANG C, JI C, SHEN W, et al. Compact Multilayer Film Structures for Ultrabroadband, Omnidirectional, and Efficient Absorption[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3 (4): 590-596.
- [75] HUANG Y, PU M, GAO P, et al. Ultra-Broadband Large-Scale Infrared Perfect Absorber with Optical Transparency[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10 (11): 112601.
- [76] ZHANG L, WANG J, WANG J, et al. Infrared Absorber Based on Ti/ZnS Composite Multilayer Film [C]//Global Intelligent Industry Conference 2020. [S.l.]:SPIE, 2021: 117800Z.
- [77] MIAO D, JIANG S, SHANG S, et al. Highly Transparent and Infrared Reflective AZO/Ag/AZO Multilayer Film Prepared on PET Substrate by RF Magnetron Sputtering[J]. *Vacuum*, 2014, 106: 1-4.

(编辑:徐楠楠)