

透视/遮阳/控温/红外隐身多功能集成序构薄膜研究

王 龙*, 汪刘应, 刘 顾, 葛超群, 王 滨, 许可俊, 王文豪, 胡灵杰
(中国人民解放军火箭军工程大学 智剑实验室, 陕西 西安 710025)

摘要:为了解决光学材料多功能耦合与集成的光谱诉求及其材料设计冲突难题,本文提出一种基于 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜开展可见光透射诱导与红外辐射抑制的协同设计方法,诠释序构薄膜材料多功能耦合的新原理与新机制,并对其光学兼容性能测试表征。研究表明,构筑的 $[\text{TiAlN}$ (厚度 30 nm)/ Ag (厚度 15 nm)]²/ TiAlN (厚度 30 nm)序构复合薄膜具备带通状选择性透射与中远红外低辐射的光学特性,可较好实现透视、遮阳、低辐射控温与红外隐身多功能兼容效果,在军用车辆、绿色建筑等特种玻璃的辐射控温与红外隐身领域有应用潜力。

关 键 词:多功能集成;序构薄膜;可见光透射诱导;红外辐射抑制

中图分类号:O432;TJ765.5 文献标识码:A

Study on the multifunctional sequential structure film of perspective/shading/temperature control/infrared stealth

WANG Long*, WANG Liu-Ying, LIU Gu, GE Chao-Qun, WANG Bin, XU Ke-Jun,
WANG Wen-Hao, HU Ling-Jie
(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To solve the spectral demand and material design conflicts of multifunctional coupling and integration of optical materials, a collaborative design method based on $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ sequential structure film for visible transmission induction and infrared radiation suppression is proposed, interpreting the new principles and mechanisms of multifunctional coupling of sequential structure film materials. Meanwhile, its optical compatibility performance is characterized. It shows that the $[\text{TiAlN}$ (thickness 30 nm)/ Ag (thickness 15 nm)]²/ TiAlN (thickness 30 nm) sequential composite film has the optical characteristics of band-pass selective transmission and mid-far infrared low radiation, which can better realize the multifunctional compatibility effects of perspective, shading, low radiation temperature control, and infrared stealth, and can be used in the radiation temperature control and infrared stealth application fields of special glasses such as military vehicles and green buildings.

Key words: multifunctional integration, sequential structure film, visible transmission induction, infrared radiation suppression

引言

传统材料与结构在操纵光波传输特性方面倍显乏力,不能按照人为意愿选择性调控材料的光谱特性与红外辐射特征,难以实现多频谱差异化光学功能集成目标。然而,绿色建筑、光伏新能源、军事光电对抗等新兴领域对光学特性选择调控的新材

料与新结构有着迫切需求^[1-5],以多功能集成驱动的材料逆向设计新策略成为研究热点,依赖于微纳构型设计手段解决多功能集成导致不同频段光谱诉求及其材料设计的冲突难题,形成具有奇异光学功能组合的新概念材料。光子晶体、频率选择表面、光栅等有序结构(简称序构)材料可在不同尺度下

收稿日期:2023-07-21,修回日期:2023-12-29

Received date:2023-07-21, Revised date:2023-12-29

基金项目:陕西省“特支计划”科技创新领军人才项目(2020TZJH-001),陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-291)

Foundation items: Supported by the Shaanxi Province "Special Support Plan" Science and Technology Innovation Leading Talent Project (2020TZJH-001), the Shaanxi Province Natural Science Basic Research Plan Surface Project (2024JC-YBMS-291)

作者简介(Biography):王龙(1989—),男,湖南邵阳人,副教授,博士学位,主要研究领域为光谱特性与红外辐射选择调控超构材料. E-mail: waloxs@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: waloxs@163.com

实现光波、微波等电磁波传输特性选择调控^[6-11],为光电材料多功能集成与器件设计提供技术手段。Rephaeli 等^[12]采用二维光子晶体、Ag 薄膜与 $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ 多层膜构成超材料实现可见光高反射与红外窗口高辐射,可用于辐射制冷。Hossain 等^[13]将介质/金属多层膜与阵列超材料结合实现红外选择性吸收,从而达到红外辐射特征选择调控效果。张继魁等^[14-15]运用传输矩阵法模拟分析掺入缺陷层后一维光子晶体的红外特性,实现近中远红外波段与 $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $1.54\ \mu\text{m}$ 、 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的兼容隐身结构设计。Kim 等^[16]基于频率选择表面设计出一种分层超材料,在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 远红外波段与 $2.5\sim 3.8\ \text{cm}$ 微波波段的辐射强度分别降低 95%、99%,并在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 波段实现较好的辐射散热效果,满足红外/雷达隐身与辐射制冷的兼容需求。刘东青等^[17-18]利用 Fabry-Perot 腔结构与超表面设计了在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 中远红外低发射率的选择性辐射隐身新材料体系。总体而言,当前基于微结构的光电磁特性选择调控新材料的构型大多较复杂,因受限于微纳制造难度,许多研究尚处于机理研究与仿真设计阶段,因此未来光学特性选择调控材料应该趋向于制造工艺简单、多功能集成以及高耐候性的发展方向。

鉴于仅仅利用材料本征性质难以达到理想的光谱特性和辐射特征选择调控效果,将不同的电介质膜或金属膜规则性排列构成序构薄膜,成为一种具备多功能集成的光学超材料设计方案,并且便于采用物理沉积或化学沉积等工艺简易制备。因此,本文提出一种基于双 Ag 型序构复合薄膜 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^T/\text{TiAlN}$ 堆叠结构,利用功能材料与微纳结构的耦合作用,操纵光波在膜系结构内部传输特性,攻克透光与遮阳、可见光透射与红外反射之间的原理冲突矛盾问题,达到透视、遮阳、低辐射控温与红外隐身多功能兼容效果,以满足光电隐身、绿色建筑等新兴应用领域对多功能集成光学材料的高性能需求,并为光学特性选择调控薄膜材料研究提供重要的技术途径。

1 序构薄膜结构特征对光谱特性的影响机制

将电介质膜层 D 与金属膜层 M 组成循环次数 T 的序构复合薄膜构型 $[\text{DM}]^T\text{D}$,如图 1 所示,研究该序构复合薄膜与光波相互作用产生的可见光透射诱导、红外辐射控制等电磁场行为。由于 Ag 薄膜对

可见光波段的吸收率低于 5%,并具有较高的红外反射,因此遴选 Ag 薄膜作为膜系结构的红外辐射抑制功能层。同时,通过在膜系结构中 Ag 薄膜两侧电介质层的阻抗匹配来操纵可见光透射诱导行为,解决透光与遮阳、可见光透射与红外反射等光谱诉求冲突难题,并起到保护 Ag 薄膜的抗氧化作用。TiAlN 陶瓷薄膜有较好的光学透过特性,并具备耐磨性、高抗氧化性、膜基结合强等优势,因此被遴选作为高耐候性的电介质层材料。通过采用光谱椭圆仪测量沉积于石英片基底的待测单层薄膜样品,并且结合 Lorentz 色散模型拟合单层膜在 $0.38\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段光谱范围内的折射率和消光系数,最终获得 Ag 与 TiAlN 的光学常数,如图 2 所示。根据薄膜光学理论,采用光波传输矩阵计算方法^[19-20]分析 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^T/\text{TiAlN}$ 膜系结构特征对可见光透射与红外反射光谱特性的影响机制,并遴选较好综合性能的透视/遮阳/控温/红外隐身多功能一体薄膜结构。

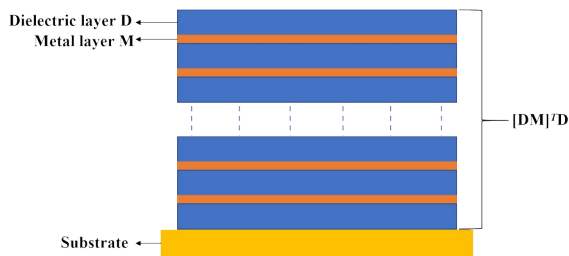


图 1 序构复合薄膜

Fig. 1 Sequential composite film

当电介质 TiAlN 膜层厚度为 $40\ \text{nm}$ 且金属 Ag 膜层厚度为 $15\ \text{nm}$ 时,图 3 为 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^T/\text{TiAlN}$ 异质膜系结构的周期数 T 对光谱特性的影响规律。可见光透射光谱如图 3(a) 所示。当周期数为 1 时,可见光透射光谱曲线较平整,呈现全域高透射状态。然而,随着周期数增大,可见光透射光谱曲线转变为单峰型带通状态,且可见光透射峰值所在波长位置逐步蓝移,同时可见光长波段的透射率不断变差,导致可见光透射状态迅速变差,进而使得遮阳能力提升。红外反射光谱如图 3(b) 所示。当周期数由 1 增加至 2 时,中远红外反射率发生显著性增强,反射光谱曲线转变为全域高反射的平整化状态,利于抑制红外热辐射作用。此后,随着膜系结构周期数的继续增长,红外发射率缓慢增强且逐渐接近 1。显然,随着周期数增大,异质膜系结构的薄膜层数增多,导致对光波的反射率增强,因此削弱了可见光

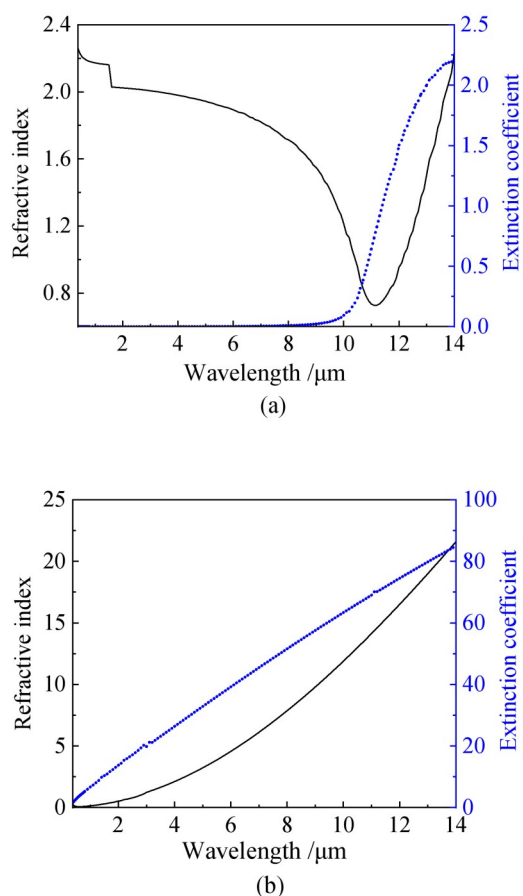


图2 光学常数:(a) TiAlN;(b) Ag

Fig. 2 Optical constant:(a) TiAlN;(b) Ag

透射率与增强了红外反射率。总体而言,TiAlN/Ag/TiAlN 薄膜结构(即周期数 $T=1$)可兼具高透视与低红外辐射功能。图4所示双 Ag 型 TiAlN/Ag/TiAlN/Ag/TiAlN 薄膜结构(即周期数 $T=2$)能呈现单峰型宽域带通状选择性可见光透射与全域高红外反射状态,满足透视、遮阳、低辐射控温与红外隐身多功能兼容需求。之后,当周期数继续增加时,对红外辐射抑制并没有明显的增强效果,反而使得透视效果迅速变差。因此,遴选双 Ag 型序构复合薄膜作为透视/遮阳/控温/红外隐身多功能集成材料设计方案。

当电介质 TiAlN 薄膜厚度为 40 nm 时,图5为双 Ag 型 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜中金属 Ag 薄膜厚度对光谱特性的影响规律。如图5(a)所示,随着 Ag 薄膜厚度的增大,可见光透射峰值逐渐减小且其所在波长位置逐步蓝移,同时可见光平均透射率逐渐减小,导致可见光透射状态逐渐变差。当 Ag 薄膜厚度少于 15 nm 时,还能在保证较好的可见光透射程度基础上,序构复合薄膜的遮阳能力随着 Ag 薄

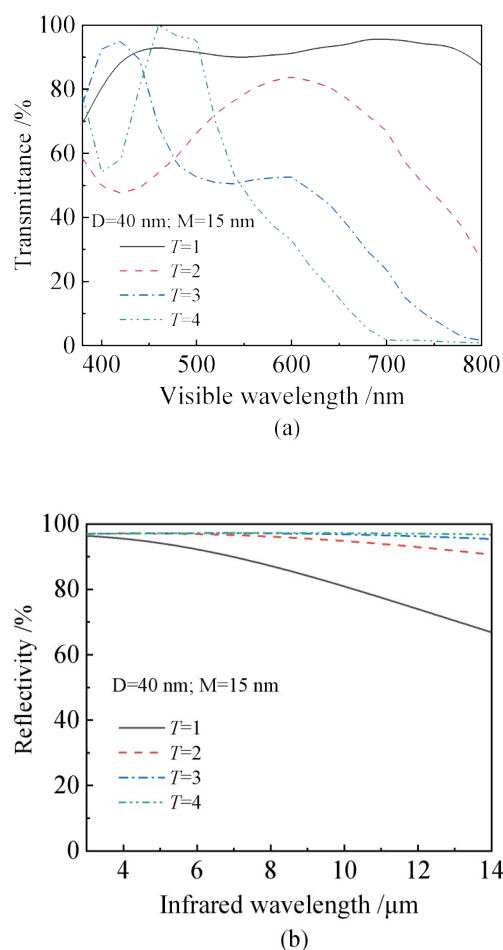


图3 膜系结构周期数对光学特性的影响:(a)可见光透射;(b)红外反射

Fig. 3 Effect of the cycle number of film structure on optical properties:(a) visible transmission;(b) infrared reflection



图4 双 Ag 型序构复合薄膜

Fig. 4 Double Ag sequential composite film

膜厚度增加而提升。然而,当 Ag 薄膜厚度大于 15 nm 之后,继续增加 Ag 薄膜厚度将造成可见光平均透射率过低而限制透视能力。如图5(b)所示,红外反射率随着 Ag 薄膜厚度的增加而增大,并逐渐接近 1;然而,在 Ag 薄膜厚度大于 15 nm 后其增大幅度却非常微小。显然,随着 Ag 薄膜厚度的增加,对可见光波与红外光波的反射作用均会增强,进而衰减了可见光透射,增强了红外辐射抑制效果。综上,当 Ag 薄膜层厚度为 15 nm 时能较好地满足透视、遮阳

与低红外辐射多功能兼容需求。

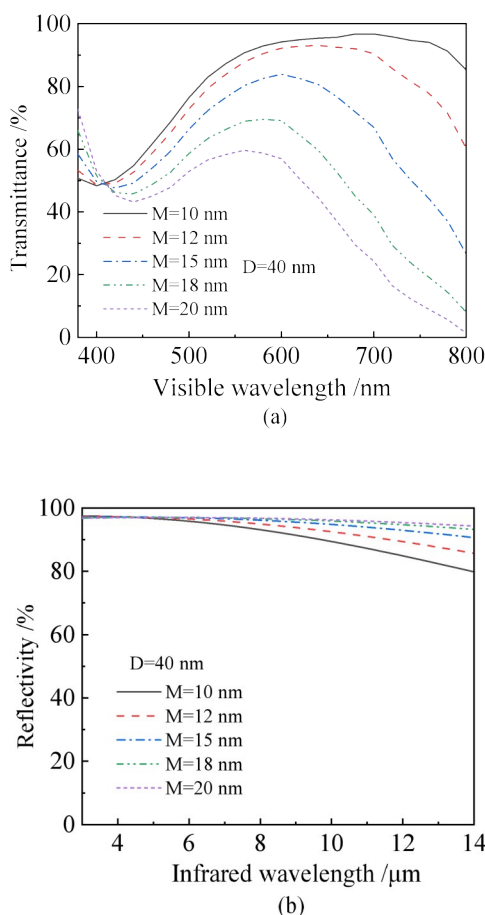


图5 金属层厚度对光谱特性的影响:(a)可见光透射;(b)红外反射

Fig. 5 Effect of metal layer thickness on spectral characteristics:(a) visible light transmission;(b) infrared reflection

当金属 Ag 薄膜厚度为 15 nm 时,图 6 为双 Ag 型 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜中电介质 TiAlN 薄膜厚度对光谱特性的影响规律。如图 6(a) 所示,随着 TiAlN 薄膜厚度的增加,可见光透射峰值逐渐减小且其所在波长位置逐步红移,导致可见光平均透射率先逐渐增大然后又逐渐减小,进而使得整体透射状态先变好然后再变差。如图 6(b) 所示,电介质 TiAlN 薄膜厚度变化对红外反射率的影响可忽略不计。这是因为 TiAlN 薄膜厚度变化能改变等效阻抗匹配来调控可见光透射状态。然而,红外反射率却主要取决于 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 膜系结构的 Ag 金属层,因此在恒定的 Ag 薄膜厚度条件下的红外反射率并不会随电介质层发生明显改变。

为了确保透视、遮阳与低红外辐射多功能于一

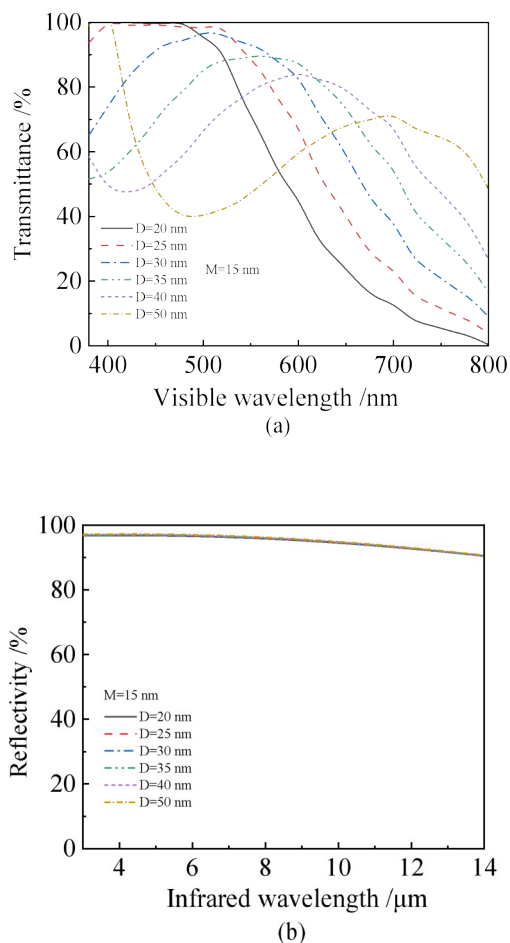


图6 电介质层厚度对光谱特性的影响规律:(a)可见光透射;(b)红外反射

Fig. 6 Effect of dielectric layer thickness on spectral characteristics:(a) visible transmission;(b) infrared reflection

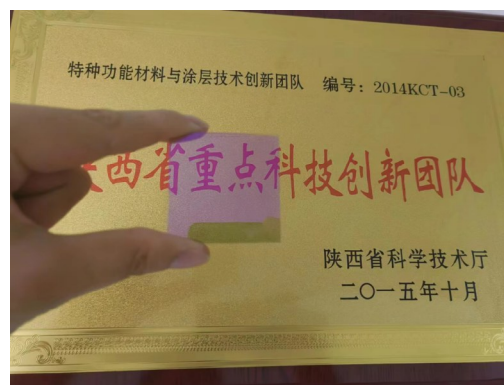
体的兼容效果,可见光波段平均透射率一般介于 50%~70%,可见光透射峰值高于 80% 且处于 500~550 nm 波段,利于确保清晰视野基础上隔断接近紫外与红外波段的光能透过;同时具备全域红外高反射特性,利于抑制红外热辐射,形成好的控温隔热与红外隐身效能。鉴于此,遴选 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 复合薄膜结构的 Ag 膜层厚度为 15 nm, TiAlN 膜层厚度为 30 nm。该复合薄膜结构的可见光透射光谱呈现为带通类型,如图 6(a) 所示,在 420~600 nm 可见光波段具备高达 80% 以上透射率,且透射峰值处于 500 nm 附近。380~780 nm 可见光波段的平均透射率为 66.8%,并且在 ≥ 660 nm 的可见光与近红外波段的透射率很低,因此在保证较好透视效果基础上实现一定程度遮阳能力。红外反射光谱如图 6(b) 所示,在 3~14 μm 中远红外波段具备全域的红外

高反射特征。可见,遴选的该序构复合薄膜从理论层次具备较好的透视、遮阳与低红外辐射多功能集成的综合性能。

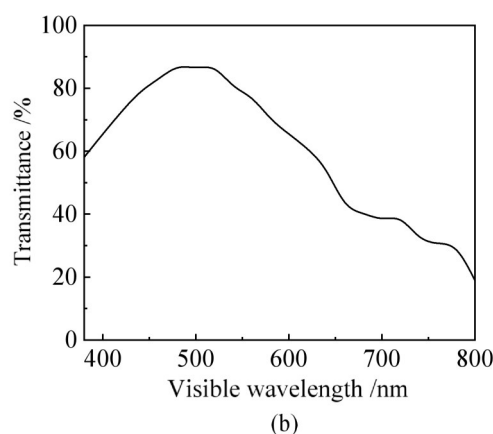
2 光学性能实验验证

采用 Kurt J. Lesker LAB18 型号磁控溅射设备在石英片基底镀制 $[\text{TiAlN}(\text{厚度 } 30 \text{ nm})/\text{Ag}(\text{厚度 } 15 \text{ nm})]^2/\text{TiAlN}(\text{厚度 } 30 \text{ nm})$ 序构复合薄膜样件,并采用岛津 SOLID3700 型号紫外-可见光-近红外分光光度计、Bruker 80 型号傅里叶红外光谱仪分别测量样件在 $0.38\sim 0.78 \mu\text{m}$ 可见光波段透射光谱与 $3\sim 14 \mu\text{m}$ 中远红外反射光谱,如图 7 所示。透光视觉宏观效果如图 7(a)所示,该序构复合薄膜表现出较好的可见光透视与遮阳折中兼容性效果,即能清晰透视背侧场景,又具备一定程度衰减光波透射的遮阳能力。可见光透射光谱测试结果如图 7(b)所示,可见光高透射率区间处于 $420\sim 580 \text{ nm}$,并在 $380\sim 780 \text{ nm}$ 可见光波段的平均透射率为 56.96% ,从而保证了其较好的透视效果。同时,在 660 nm 之后的透射率较低,在有限程度可控地牺牲透光效果,达到了透视与遮阳的兼容目标。红外反射光谱测试结果如图 7(c)所示,样件具备全波段宽域红外高反射特征,中远红外波段的平均反射率高达 87.39% ,可形成较低的红外发射率。此外,尽管样件受到基底材质、镀膜制备误差等因素的综合影响,导致其实物测试与仿真计算存在一定程度的偏差,但总体程度上依旧能较好保持一致性,也能验证仿真设计方法的可靠性。

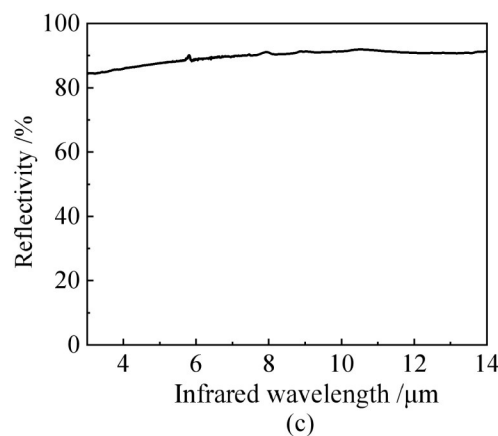
此外,为了验证 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜样件的控温隔热与红外隐身性能,通过 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 红外热像仪检测不同环境温度下的热像图及其平均热辐射温度,如图 8 与图 9 所示。其中,样件与石英片基底材料形成对照组。可见, $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 波段,两者红外辐射温度的变化趋势基本相似。随着温度升高,样件与石英片之间的温差逐渐增大,因此样件的红外辐射抑制效果随环境温度升高而越加显著。同时,由于热辐射波长随着温度升高产生蓝移现象,从而导致样件 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 两个红外波段之间的辐射温度差逐渐增大。直至 140°C 时,样件热辐射效果如图 8(e)所示,在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 两波段的辐射温度分别为 65°C 、 46°C ,比石英片的辐射温度分别相差 79°C 、 94°C 。综上所述,序构复合薄膜样件具备较高水平的高温



(a)



(b)



(c)

图 7 样件的光学特性:(a)透光效果;(b)可见光透射光谱;(c)红外反射光谱

Fig. 7 Optical characteristics of the sample: (a) transmittance effect; (b) visible transmission spectrum; (c) infrared reflection spectrum

红外热辐射抑制能力,达到了优异的控温隔热与红外隐身性能。

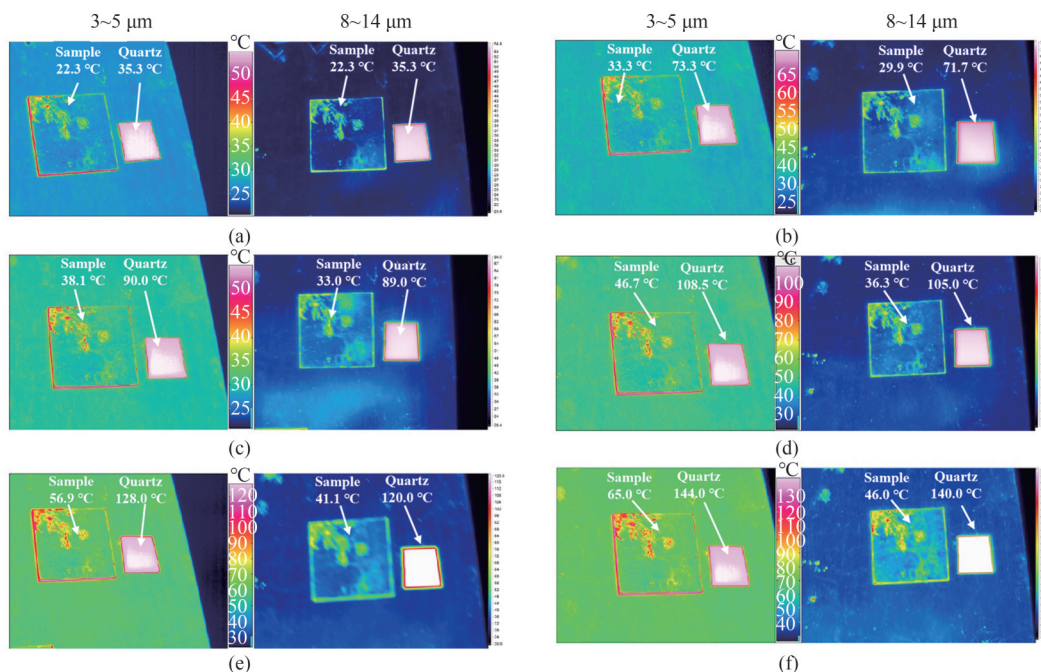


图8 样件在不同环境温度下的红外热像图:(a) 30 °C;(b) 60 °C;(c) 80 °C;(d) 100 °C;(e) 120 °C;(f) 140 °C

Fig. 8 Infrared thermal images of the sample at different environmental temperatures: (a) 30 °C; (b) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C

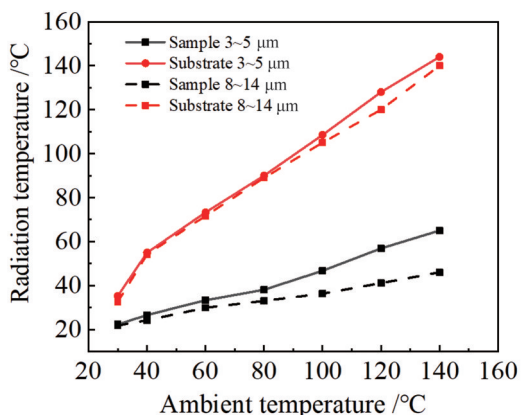


图9 样件红外辐射温度随环境温度的变化

Fig. 9 Changes in infrared radiation temperature of the sample with environmental temperature

3 结论

(1)提出一种基于 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜开展可见光透射诱导与红外辐射抑制的协同设计方法,研发透视、遮阳、低辐射控温与红外隐身多功能集成的新型薄膜材料,为光学特性选择调控薄膜材料设计提供新方法。

(2)研究序构薄膜结构特征对可见光透射光谱与红外反射光谱的影响机制。随着膜系结构 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^T/\text{TiAlN}$ 的周期数 T 增大,导致可见光透

射衰减与红外反射率增强。尤其,周期数从1增长至2时,导致可见光透射光谱从“全域高透”转变为“带通状选择性透射”状态的质变。对于双Ag型 $[\text{TiAlN}/\text{Ag}]^2/\text{TiAlN}$ 序构复合薄膜,随着Ag薄膜厚度增加,导致可见光透射衰减与红外辐射抑制增强;TiAlN薄膜厚度变化对红外反射影响微弱,但能通过等效阻抗匹配调控可见光透射状态。

(3)采用光谱测试与热成像手段表征分析 $[\text{TiAlN}$ (厚度为30 nm)/Ag(厚度为15 nm)] $^2/\text{TiAlN}$ (厚度为30 nm)序构复合薄膜的光学性能,证实了样件具备较高水平的透视、遮阳、低辐射控温与红外隐身多功能集成效能。

References

- [1] Li B W, Qi D, Wang X, *et al.* Enhanced spectra selectivity of solar absorber film with $\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ photonic structures[J]. *Materials Letters*, 2017, **201**: 5–8.
- [2] Qi D, Cheng Y, Wang X, *et al.* Multi-layer composite structure covered polytetrafluoroethylene for visible–infrared–radar spectral compatibility[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, **50**: 505108.
- [3] WANG Xin-fei, LIU Dong-qing, PENG Liang, *et al.* Research progress on spectrally selective radiation infrared stealth materials [J]. *Journal of Aeronautical Materials* (王新飞, 刘东青, 彭亮, 等. 光谱选择性辐射红外隐身材料研究进展[J]. *航空材料学报*), 2021, **41**(5): 1–13.
- [4] NIU Shuai, YANG Chang, CHANG Hui-Cong, *et al.* An

- ultralight broadband radar and thermal infrared compatible stealth structure based on metamaterials[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (牛帅, 杨昌, 常慧聪, 等. 一种基于超材料的轻质宽带雷达/红外兼容隐身结构[J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(4): 745–750.
- [5] Wen K H, Han T C, Lu H P, *et al.* Experimental demonstration of an ultra-thin radar-infrared bi-stealth rasorber [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(6): 8872–8879.
- [6] Xu C L, Qu S B, Wang J F, *et al.* Dual atmospheric windows infrared stealth research based on frequency selective surface [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(3): 315–319.
- [7] ZHANG Rui-Rong, QIU Gui-Hua, HAN Jian-Long, *et al.* Preparation and infrared stealth properties of three-dimensional ordered photonic crystals [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (张瑞蓉, 邱桂花, 韩建龙, 等. 三维有序光子晶体制备及其红外隐身性能[J]. *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(6): 739–743.
- [8] Ma Y, Wang J B, Shi L H, *et al.* Ultra-wideband, optically transparent, and flexible microwave metasurface absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2021, **11**(7): 2206–2218.
- [9] Liu B, Shi J M, Zhang J K, *et al.* Infrared stealth performance analysis of photonic crystal with high heat dissipation [J]. *Optical Materials*, 2021, **111**(2): 110689.
- [10] Chalimah S, Yao Y, Ikeda N, *et al.* Mid-infrared angle-resolved spectral characteristics of photonic crystal slabs for application in surface-emitting quantum cascade lasers [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2022, **31**(4): 2250017.
- [11] Yuan Q, Jiang J, Li Y, *et al.* The compatible method of designing the transparent ultra-broadband radar absorber with low infrared emissivity[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2022, **123**: 104114.
- [12] Rephaeli E, Raman A, Fan S. Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(4): 1457–1461.
- [13] Hossain M M, Jia B, Gu M. A metamaterial emitter for highly efficient radiative cooling[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(8): 1047–1051.
- [14] Zhang J K, Shi J M, Zhao D P, *et al.* Realization of compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 62–65.
- [15] Zhang J K, Zhao D P, Chen Z S, *et al.* One dimensional photonic crystal based multilayer film with low IR and visible signatures[J]. *Optical Materials*, 2019, **91**: 261–267.
- [16] 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.
- [17] 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**(23): 1801006.
- [18] Peng L, Liu D, Cheng H. Ultrathin continuous silver film for efficient infrared emission [J]. *Materials Today Communications*, 2019, **20**: 100592.
- [19] YI Yi, DENG Lianwen, LUO Heng, *et al.* Design of infrared and laser band compatible camouflage structure based on photonic crystals [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)* (易怡, 邓联文, 罗衡, 等. 基于光子晶体的红外光与激光兼容伪装材料结构设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*), 2017, **48**(11): 2966–2971.
- [20] Wang L, Wang W H, Wang L Y, *et al.* Study on fine structure and optical response characteristics of wing scales of *Papilio paris* [J]. *Journal of Optics*, 2022, **51**: 874–883.