

基于 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 结构的高透光红外隐身薄膜研究

王 龙, 汪刘应, 王文豪, 刘 顾, 葛超群, 王 滨, 许可俊

(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: 为了解决可见光与红外兼容隐身的光学特性选择调控难题, 基于 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 堆叠膜层结构集成诱导透射、辐射抑制等光学效应协同作用, 提出一种可见光高透射与红外低辐射兼容的新型隐身材料, 并开展结构特征对可见光透过率与红外反射率的影响机制研究, 进而优化设计与制备高透光红外隐身薄膜结构, 并对其兼容性隐身性能测试表征。研究表明, 经优化设计的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 结构各膜层厚度为 30/18/35 nm 时, 石英基底样品的可见光平均透射率与中远红外平均反射率分别可达 81.51%、90.78%, 具备高水平的可见光透视与高温红外辐射抑制能力; 柔性 $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$ (PET) 基底样品的可见光平均透射率与中远红外平均反射率分别可达 65.68%、84.46%, 具备较好的透视度、遮阳与红外辐射抑制综合能力, 并有高柔性曲面共形能力。该研究成果可为多频谱兼容光学隐身材料设计及应用提供重要的技术支撑。

关键词: 多频谱兼容隐身; 高透光; 红外低辐射; 膜层结构

中图分类号: TB34; TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)08-2259-08

隐身技术^[1-4]作为现代信息化战争中有效的反探测、反侦察、反制导打击的高新技术, 成为提升战场装备生存能力与突防效能的重要手段。随着红外与可见光的多源联合探测与双模制导技术被广泛应用, 红外与可见光兼容隐身材料已经成为隐身技术领域的重中之重。当前红外隐身^[5-9]主要通过低发射率涂料、烟幕、隔热、降温、诱饵干扰等方法改变目标在 3~5、8~14 μm 红外辐射的传输路径、特性与强度, 意图减少目标与背景环境之间热辐射差异, 降低红外被动探测的发现概率。在 0.38~0.78 μm 波段可见光探测主要取决于目标与背景环境之间的色度、亮度等视觉参数对比特征, 通常采用迷彩涂料、伪装遮蔽等隐身措施^[10-11]。尽管针对红外或可见光单一波段的隐身材料相对成熟, 但实现两者兼容性却是一项重要的技术挑战。当前红外与可见光兼容隐身材料主要是由低发射率填料、粘合剂和着色剂构成的低红外发射率涂料^[12-15], 并利用热图像分割迷彩设计方法, 形成与背景环境融合度较好的红外隐身迷彩涂层。由于低红外发射率涂料在可见光色泽与红外高反射率之间存在冲突关系, 导致其发射率通常在 0.5~0.7 而处于偏高状态, 严重制约了其兼容隐身性能。为解决上述问题, 亟待不断探索新型的、更为有效的多频谱兼容光学隐身新技术。

红外隐身与可见光隐身因实现机理不同, 对光谱响应的诉求和材料设计的要求有所不同, 甚至相互冲突。通过改变传统材料自身属性难以适应多频谱兼容

光学隐身需求, 无法精准操控光波在材料内部的差异化传输特性。然而, 光子晶体、F-P (法布里-珀罗) 腔、频率选择表面等超构材料^[16-21]利用人工微纳构型设计方法, 实现光谱特性与红外辐射选择性调控能力, 达到多频谱兼容光学隐身一体化设计效果, 日渐倍受关注。Qi 等^[22-23]人研究了一种 $\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}$ 复合异质结构, 调节膜层厚度来实现不同的结构色, 且在 3~14 μm 波段的平均反射率高于 95%。此外, 还研发了卡其色、棕色、蓝色、青色等颜色的 ZnS/Ge 膜层结构, 且在 3~5 μm 波段的平均反射率为 95.1%。然而, 这种方法需要构建不同的膜层结构来调控表面颜色, 不利于实际应用。Lefttheriotis 等人^[24]在玻璃基底上制备了 $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}$ 膜层结构, 可见光透过率高达 83.9%, 且在 1.9 μm 处的红外反射率高于 90%。此外, 还发现 ZnS 层可对 Ag 层起到减反射的作用, 还能增强粘附性与高温热稳定性。自此电介质/金属/电介质 (dielectric/metal/dielectric, DMD)^[25-27]3 层膜堆叠结构成为选择性透过薄膜的研究焦点。然而, 当前 DMD 膜层结构红外反射特性研究仅局限于 2.5 μm 之前的近红外波段, 但在 3~5、8~14 μm 中远红外反射特征及其隐身能力的研究报道鲜有。为此, 基于 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 3 层膜堆叠 DMD 结构提出一种新型的可见光/红外兼容隐身体系, 可将高透光低辐射的 DMD 膜层与迷彩涂层相结合, 可无需重新设计涂层, 便能达到对抗红外与可见光联合探

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 陕西省“特支计划”科技创新领军人才项目 (2020TZJH-001); 陕西高校青年创新团队

作者简介: 王 龙, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 火箭军工程大学智剑实验室, 陕西 西安 710025, E-mail: waloxs@163.com

测的应用效果,为红外与可见光兼容隐身防护提供新途径。因此,探究 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构对可见光透过率与红外反射率的调控机制,进而优化设计膜层结构并测试表征其隐身性能。通过利用 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 3 层膜堆叠 DMD 结构与光波相互作用而产生诱导透射、辐射抑制等电磁场行为,为灵活可控设计多频谱兼容隐身材料的光谱特性与红外热辐射特征提供更多自由度。

1 研究方法

电介质/金属/电介质 (DMD) 3 层堆叠膜层结构如图 1 所示。由于 Ag 薄膜在可见光波段的吸收率低于 5%,并具有较高的红外反射率,所以 Ag 薄膜可作为 DMD 膜层结构的中间功能层。同时,DMD 膜层结构两侧的电介质用于调节光波传输的导纳匹配与防护 Ag 薄膜的抗氧化作用,以及增加与基底的附着力。 TiO_2 薄膜具有优良的导电性,较高的可见光透过率,且热稳定性与化学稳定性好,因此遴选为内外电介质层材料。

当前膜层结构光学特性仿真方法主要包括平面波展开法 (plane wave expansion method, PWM)、时域有限差分法 (finite-different time-domain, FDTD) 以及传输矩阵法 (transfer matrix method, TMM) 等。其中,传输矩阵法^[28-29]是以特征矩阵的形式求解麦克斯韦方程。假设膜层结构中每一层级都具备类同的特征参数,用传输矩阵表示相邻层级之间场强的关系,然后将单个层级的参数叠加到整个膜层结构之中。传输矩阵法在计算一维多层薄膜结构光学特性方面最具有优势,可采用较简便的计算流程分析膜层结构的反射与透射光谱,并具备计算量小、精度高等优点。因此,采用传输矩阵法模拟分析 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构特征对可见光透射与红外反射光谱特性的影响机制,并针对兼容隐身性能实行膜层结构优化设计。

鉴于磁控溅射制备技术存在蒸镀速率较快、基片热效应较弱、镀膜材料选择范围较广等优势,采用 Kurt J. Lesker LAB18 型号磁控溅射设备分别在刚性石英片 (quartz plate) 与柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯 ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$)_n,

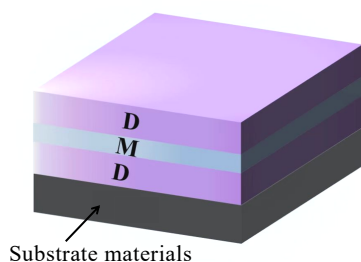


图 1 DMD 膜层结构

Fig.1 DMD multi film structure

PET) 薄膜两种基底上镀制经优化设计后的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件。为了测试分析样件的光学特性,采用紫外-可见光-近红外分光光度计 (岛津 SOLID3700) 测量样件 0.38~0.78 μm 可见光波段的透过率,并采用傅里叶红外光谱仪 (Bruker 80) 测量样件在 3~14 μm 中远红外的反射率。此外,为了验证 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构在不同温度环境下的红外隐身特性,通过 3~5 和 8~14 μm 红外热像仪拍摄不同温度下的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件的热像图并读取其辐射温度。

2 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构对可见光透射与红外反射的光谱特性影响机制

$\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的内外两层电介质 TiO_2 薄膜对可见光透射光谱的影响规律,如图 2 所示。其中,当中间层 Ag 薄膜厚度 M 为 12 nm 且内层 TiO_2 薄膜厚度 D_2 为 30 nm 时,外层 TiO_2 薄膜厚度 D_1 对可见光透射光谱特性的影响如图 2a 所示;当中间层 Ag 薄膜厚度 M 为 15 nm 且外层 TiO_2 薄膜厚度 D_1 为 30 nm 时,内层 TiO_2 薄膜厚度 D_2 对可见光透射光谱特性的影响如图 2b 所示。可见,内外两层电介质 TiO_2 薄膜对可见光透射光谱的影响规律具有相似性。随着外层或内层 TiO_2 薄膜厚度的增加,可见光透过率的峰值向长波方向红移,同时可见光的透过率峰值与平均透过率均先逐渐增大然后又逐渐减小,且在 30~35 nm 之间的透光效果最佳。根据诱导透射原理^[30-31],可调控 DMD 膜层结构两侧电介质层的阻抗匹配来获得最佳透射状态,并且透射光谱峰值对应膜层结构等效导纳匹配的波长位置。外层电介质主要通过膜层导纳与空气导纳匹配来抑制 Ag 金属薄膜对可见光的反射作用,而内层电介质通过匹配金属层的等效导纳而增强可见光的穿透性。另外,随着外层或内层 TiO_2 薄膜厚度的增加,光在金属膜与电介质膜两者上下表面反射的光程差越大,透射峰值对应的波长也就越大。

$\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的内外两层电介质 TiO_2 薄膜对红外反射光谱的影响规律,如图 3 所示。随着外层或内层 TiO_2 薄膜厚度的增加,红外反射率几乎没有变化。这是因为红外反射率主要取决于 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构中间的 Ag 金属层,而电介质 TiO_2 膜层对红外反射光谱的影响完全可忽略不计,因此在固定 Ag 薄膜厚度条件下的红外反射率基本不会发生明显改变。

当外层与内层 TiO_2 薄膜厚度 D_1 、 D_2 均为 30 nm 时,图 4 展示了 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的中间层金属 Ag 薄膜对可见光透射与红外反射的光谱特性影响规律。如图 4a,随着 Ag 薄膜厚度的增大,可见光透过

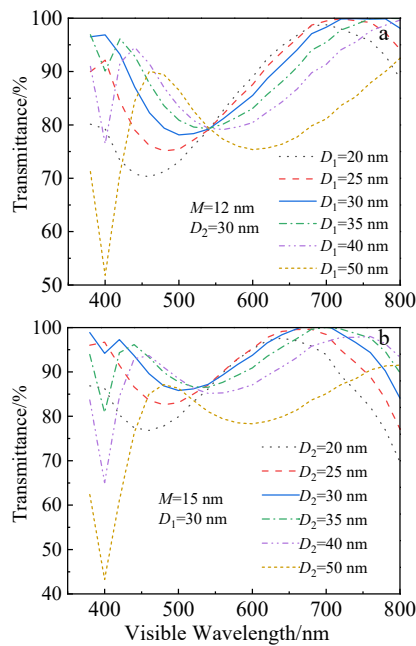


图 2 电介质层对可见光透射光谱的影响

Fig.2 Influence of dielectric layer on the visible light transmission spectrum: (a) outer layer and (b) inner layer

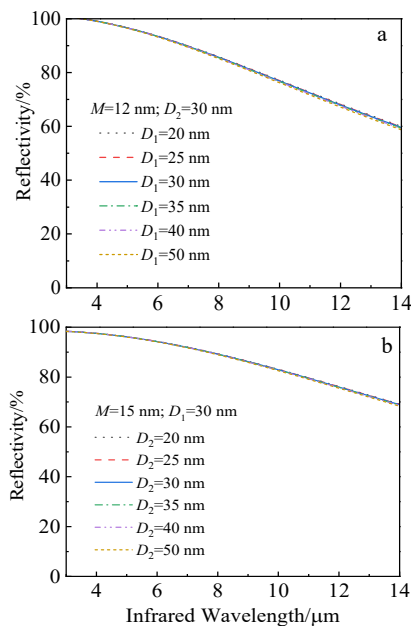


图 3 电介质层对红外反射光谱的影响

Fig.3 Influence of dielectric layer on the infrared reflectance spectrum: (a) outer layer and (b) inner layer

率的峰值向短波方向蓝移。同时, 可见光平均透过率先逐渐增大然后又逐渐减小, 并在 Ag 薄膜厚度为 15 nm 时达到较好的透光效果。这是因为通过 Ag 金属薄膜厚度的变化, 实现与两侧电介质层的阻抗匹配性调控, 从而获得 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构最佳透射状态。如图

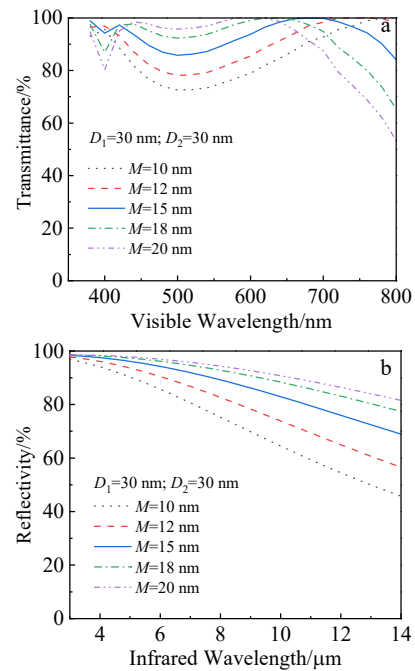


图 4 金属层对光谱特性的影响

Fig.4 Effect of metal layer on spectral characteristics: (a) visible light transmission and (b) infrared reflection

4b, $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的红外反射率随着 Ag 薄膜厚度的增大而增大, 利于降低红外发射率, 但其增大幅度在 Ag 薄膜厚度大于 18 nm 后却有显著变小。这是因为 Ag 薄膜具备红外高反射特征, 是抑制红外辐射的功能层; 因此随着 Ag 薄膜厚度越大, 对红外反射效果越显著。

当 TiO_2 、Ag 薄膜厚度分别为 30、18 nm 时, 图 5 展示了 $[\text{TiO}_2/\text{Ag}]^T/\text{TiO}_2$ (即 $[\text{DM}]^T\text{D}$ 构型) 膜层结构的周期数 T 对可见光透射与红外反射的光谱特性影响规律。如图 5a, 可见光透过率随着膜层结构周期数的增大而显著减小。同时, 可见光透过率的峰值不断向短波方向蓝移。这是因为随着 $[\text{DM}]^T\text{D}$ 构型膜层结构的周期数越大, 对可见光的干涉增强作用的反射越强, 同时介质膜层数的增多也会增强对可见光的吸收, 从而导致可见光透过率的降低。如图 5b, 随着周期数由 1 个增加至 2 个时, 即膜层结构的红外反射率最初有较大增加, 利于降低红外发射率。然而, 之后随着周期数的增加, 对红外反射率的影响很微弱。综上, 兼顾膜层结构 $[\text{DM}]^T\text{D}$ 周期数对可见光透过率和红外反射率的影响, 膜层结构 $[\text{TiO}_2/\text{Ag}]^T/\text{TiO}_2$ 的周期数 T 选择 1 个时, 最能贴合高透光低红外辐射隐身需求。同时, 随着周期数增加, 实际镀膜工艺中各膜层的累积制造误差越大, 将使得实际样件光谱性质与仿真计算结果的偏差也就越远。

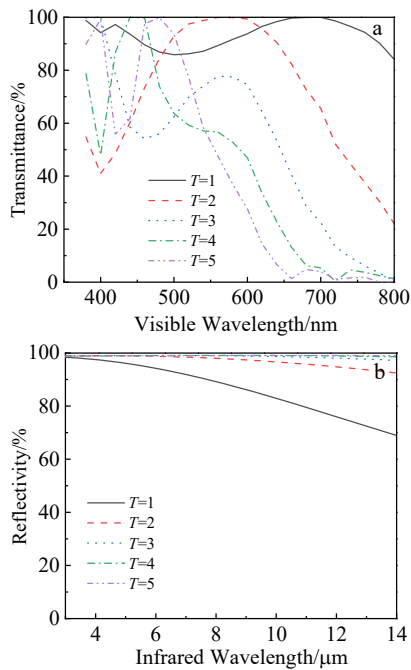
图 5 [DM]^{TD}膜层结构周期数对光谱特性的影响

Fig.5 Effect of the number of cycles on its spectral characteristics: (a) visible light transmission and (b) infrared reflection

3 高透光红外隐身薄膜 TiO₂/Ag/TiO₂ 的结构优化设计

为了满足在可见光波段高透射以及红外波段高反射的要求,对 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构实行进一步的优化。因此,可定义一个膜层性能优化函数 Z :

$$Z = T_{\text{vis}} \cdot [1 - \varepsilon(T)] \quad (1)$$

其中, T_{vis} 为 0.38~0.78 μm 可见光积分透射率,表达式如下:

$$T_{\text{vis}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} T(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} D_{\lambda} V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{\lambda=0.38}^{0.78} T(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=0.38}^{0.78} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

其中, $T(\lambda)$ 为膜层结构的光谱透射率, D_{λ} 为 D65 标准光源的相对光谱功率分布, $V(\lambda)$ 为人眼的视见系数。

$\varepsilon(T)$ 为 3~14 μm 常温红外积分发射率,公式如下:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_3^{14} [1 - R(\lambda)] E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_3^{14} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (4)$$

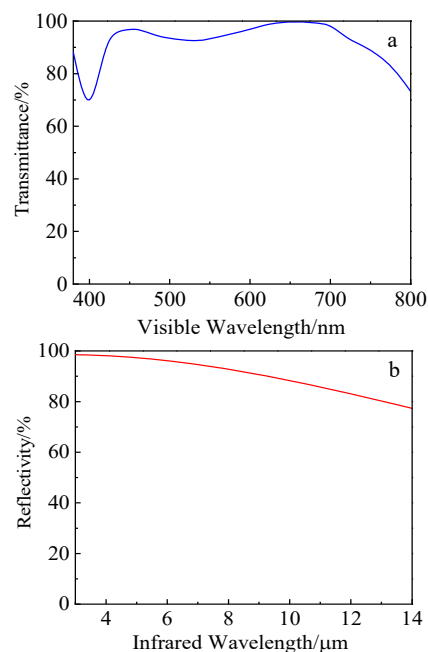
其中, $R(\lambda)$ 为膜层结构的光谱反射率, $E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ 为黑体光谱发射功率, $C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, $C_2 = 1.439 \times 10^4 \text{ μm} \cdot \text{K}$, 温度 T 取 300 K。

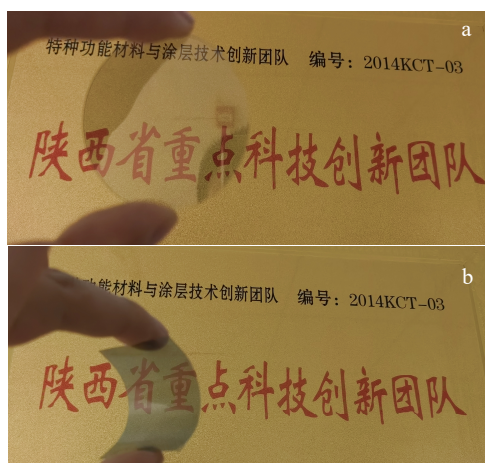
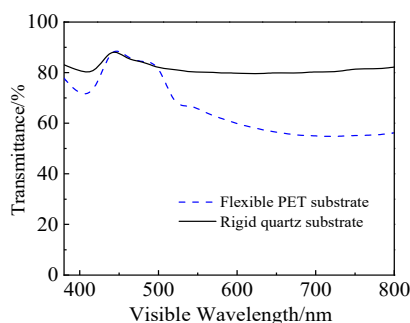
利用最速下降法对于膜层性能优化函数 Z 进行优化计算,得到 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构各层的厚度为 30/18/35 nm,在可见光透射与红外反射的光谱特性如图 6 所示。该膜层结构呈现出宽域的可见光高透射与宽域的红外高反射特征,在可见光波段具有高达 91.86% 的平均透过率,且在 3~14 μm 波段具有高达 90.66% 的反射率,满足高透光与高红外反射的兼容隐身需求。

4 红外与可见光兼容隐身性能分析

在刚性石英基底与柔性 PET 基底表面采用磁控溅射工艺镀制优化设计的 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构,两者的透光视觉宏观效果如图 7 所示,且可见光透射光谱如图 8 所示。两类基底镀制的 DMD 超构薄膜总体上具备较好的可见光透视效果。然而,受基底材料透光性质的影响,刚性石英基底比柔性 PET 基底的透光能力强,两者在 0.38~0.78 μm 可见光波段的平均透射率分别为 81.51%、65.68%。由于 PET 基底的高柔性可折曲,利于将 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构隐身薄膜共形贴附应用于装备异型曲面结构。

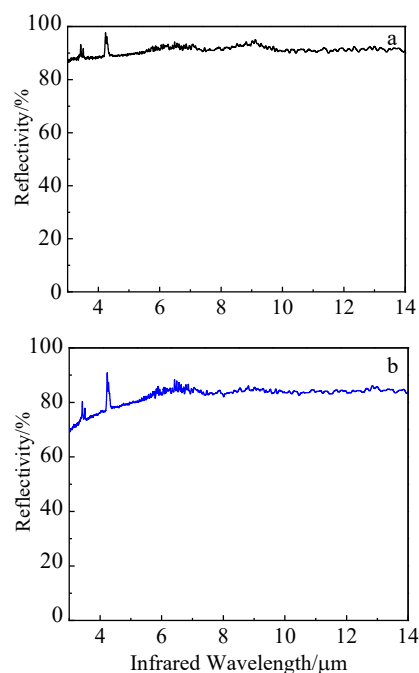
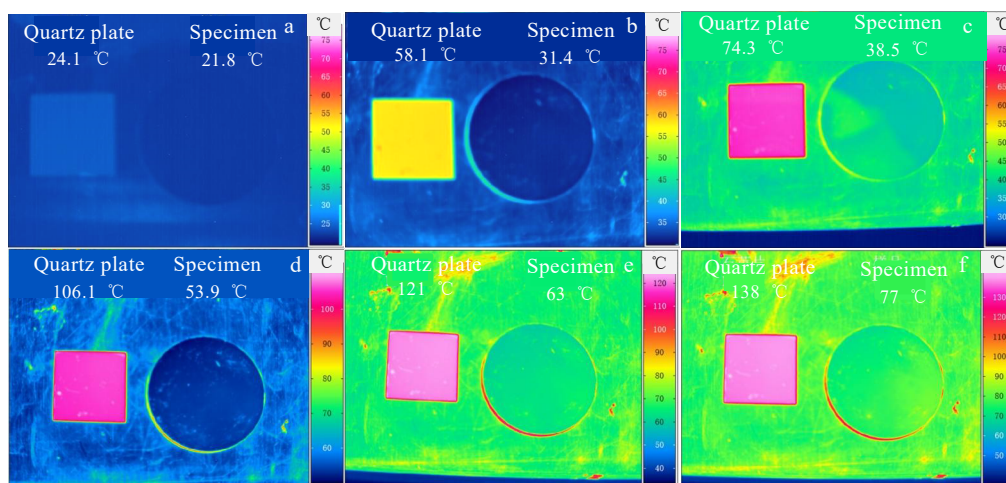
TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构在 3~14 μm 的中远红外反射光谱特性如图 9 所示。刚性石英基底和柔性 PET 基底的 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层结构在中远红外波段的平均反射率分别为 90.78%、84.46%,具备全波段宽域红外高反射特征,利于确保较低的红外发射率来抑制红外热

图 6 优化设计后 TiO₂/Ag/TiO₂ 膜层的光谱特性Fig.6 Spectral characteristics of TiO₂/Ag/TiO₂ film after optimized design: (a) visible light transmission and (b) infrared reflection

图 7 不同基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层的透光效果Fig.7 Transparency effects of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film with different substrate: (a) rigid quartz and (b) flexible PET图 8 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层的可见光透射光谱Fig.8 Visible light transmission spectra of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film

辐射, 从而实现中远红外隐身功能。

为了进一步研究 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样品的高温红外隐身特性, 利用加热平台从室温加热到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在不同环境温度下拍摄刚性石英基底样品在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 中红外与 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 远红外的热像图分别如图 10 与图 11 所示, 而拍摄柔性 PET 基底样品在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 中红外和 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 远红外的热像图分别如图 12 与图 13 所示。

图 9 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的红外反射光谱Fig.9 Infrared reflectance spectrum of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film: (a) rigid quartz substrate and (b) flexible PET substrate图 10 刚性石英基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 薄膜在不同环境温度下 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 中红外热像图Fig.10 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ mid-infrared thermal images of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film on the rigid quartz substrate at different ambient temperatures: (a) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, (d) $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, (e) $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, and (f) $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

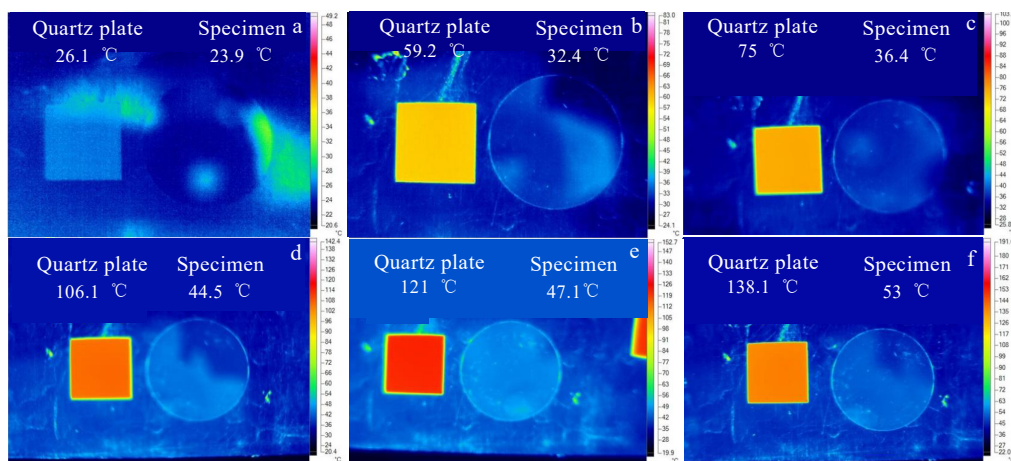


图 11 刚性石英基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 薄膜在不同环境温度下 8~14 μm 远红外热像图

Fig.11 8-14 μm far-infrared thermal images of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film on the rigid quartz substrate at different ambient temperatures:

(a) 25 °C, (b) 60 °C, (c) 80 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C, and (f) 150 °C

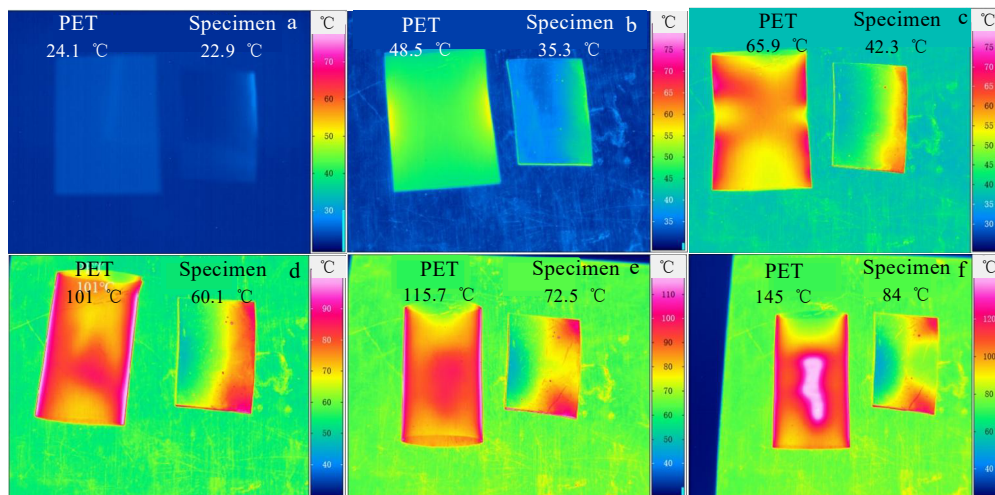


图 12 柔性 PET 基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 薄膜在不同环境温度下 3~5 μm 中红外热像图

Fig.12 3-5 μm mid-infrared thermal images of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film on the flexible PET substrate at different ambient temperatures:

(a) 25 °C, (b) 60 °C, (c) 80 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C, and (f) 150 °C

其中, 刚性石英基底的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件与石英片形成对照组, 而柔性 PET 基底的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件与柔性 PET 薄膜形成对照组。可见, 在室温状态下, 3~5 和 8~14 μm 波段 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件和石英片、PET 薄膜的辐射温度基本相同。然而, 随着温度升高, 样件与基底材料对照组之间的温差逐渐增大。这说明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, 3~5 和 8~14 μm 波段两者红外辐射温度的变化趋势基本相似。由于热辐射波长随着温度的增大会产生蓝移现象, 从而导致 3~5 和 8~14 μm 2 个红外波段之间的辐射温度差逐渐增大。如图 10f 与图 11f 所示, 到 150 °C 时, 3~5 μm

波段的刚性 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件辐射温度为 77 °C, 比石英片的辐射温度低 61 °C; 而 8~14 μm 波段的刚性 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件辐射温度仅为 53 °C, 比石英片的辐射温度低 85 °C。如图 12f 与图 13f 所示, 到 150 °C 时, 3~5 μm 波段的柔性 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件辐射温度为 84 °C, 比 PET 薄膜的辐射温度低 61 °C; 而 8~14 μm 波段的柔性 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件辐射温度为 54.5 °C, 比 PET 薄膜的辐射温度低 96.5 °C。显然, 两类 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构样件都具备较好的高温红外热辐射抑制能力, 具备良好的红外隐身特性。

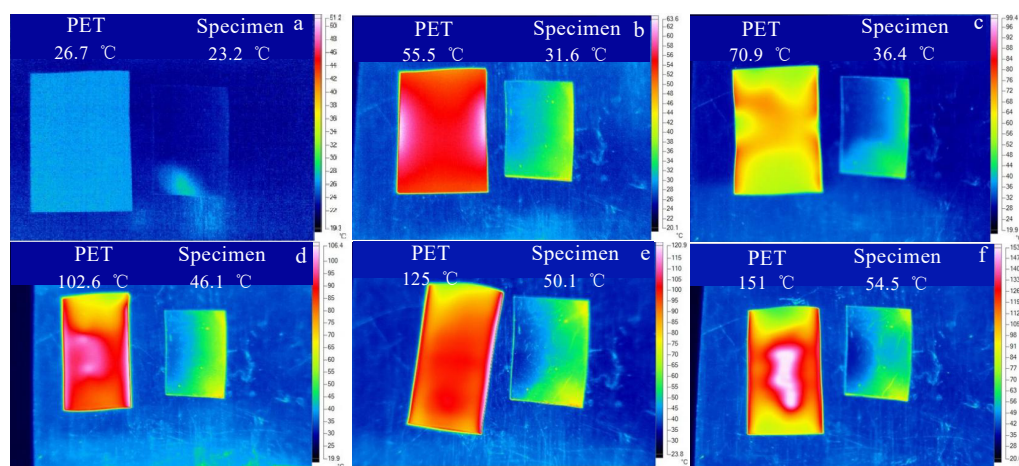


图 13 柔性 PET 基底 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 薄膜在不同环境温度下 8~14 μm 远红外热像图

Fig.13 8-14 μm far-infrared thermal images of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ film on the flexible PET substrate at different ambient temperatures: (a) 25 $^{\circ}\text{C}$, (b) 60 $^{\circ}\text{C}$, (c) 80 $^{\circ}\text{C}$, (d) 110 $^{\circ}\text{C}$, (e) 130 $^{\circ}\text{C}$, and (f) 150 $^{\circ}\text{C}$

5 结 论

1) 开展了 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构特征对可见光透射与红外反射的影响机制研究。 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构的红外光谱特性主要取决于中间层 Ag 薄膜, 而内外电介质层主要通过等效导纳匹配来增强可见光透射程度。可见光透射峰值位置随着电介质层 TiO_2 薄膜厚度的增大而向长波方向红移, 但随着 Ag 薄膜厚度的增大而向短波方向蓝移。同时, 可见光平均透过率随着各膜层厚度的增大而先增大再逐渐减小。此外, 红外反射率随着 Ag 薄膜厚度的增大而增大, 但在 Ag 薄膜厚度大于 18 nm 后变化幅度显著减小。

2) 构建了兼顾可见光高透射与红外高反射双功能光学隐身需求的膜层性能优化函数, 优化设计了 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 各层厚度为 30/18/35 nm 的高透光红外隐身薄膜结构, 呈现宽域的可见光高透射与红外高反射特征。

3) 在刚性石英片基底与柔性 PET 基底上镀制了优化设计的 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 膜层结构, 其可见光平均透射率分别可达 81.51%、65.68%, 具备较好的可见光透视能力。同时, 中远红外平均反射率分别为 90.78%、84.46%, 具备宽域红外高反射特征, 并能保持高温红外辐射抑制效果, 从而实现红外隐身能力。此外, 得益于 PET 基底的高柔性可折曲, 使得高透光红外隐身薄膜可共形贴附应用于装备异型曲面结构。

参考文献 References

[1] Chen Luping, Ren Zhiyu, Liu Xiaoming *et al.* *Optics Communications*[J], 2021, 482(5): 126608

[2] Gao Zhiqiang, Xu Cuilian, Tian Xiaoxia *et al.* *Optics Communications*[J], 2021, 500: 127327

[3] Wang Wenhao, Wang Long, Wang liuying *et al.* *Infrared Physics & Technology*[J], 2024, 140: 105383

[4] Hu Jiaheng, Hu Yan, Ye Yinghua *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2023, 452: 139147

[5] Jing Lyu, Liu Zengwei, Wu Xiaohan *et al.* *ACS Nano*[J], 2019, 13(2): 2236

[6] Fang Shuaijun, Wang Wei, Yu Xili *et al.* *Materials Letters*[J], 2015, 143: 120

[7] Peng Liang(彭 亮). *Design, Fabrication and Characterization of the Multilayer Film Based Spectrally Selective Emission Material for Infrared Stealth*(光谱选择性发射红外隐身多层膜的设计、制备与性能研究)[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2019

[8] Zhu Ying, Zhang Lei, Wang Jun *et al.* *Ceramics International*[J], 2023, 49(15): 25576

[9] Huang Sining, Fan Qi, Xu Cuilian *et al.* *Infrared Physics & Technology*[J], 2020, 111(3): 103524

[10] Wang Long(王 龙), Xu Kejun(许可俊), Wang Liuying(汪刘应) *et al.* *Modern Defence Technology*(现代防御技术)[J], 2020, 48(6): 96

[11] Xu Wenlan(徐文兰), Zhang Shuanqin(张栓勤), Xu Yi(徐 怡). *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2004, 53(9): 5

[12] Liu Kai(刘 凯). *Research on Preparation and Properties of Chroma Compatible with Low Infrared Emission Coatings*(色度与红外低发射率性能兼容涂层制备及性能研究)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

- 2016
- [13] Qiao Mingtao, Tian Yurui, Li Jiaxin *et al. Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2022, 609: 330
- [14] Biswas P K, De A, Pramanik N C *et al. Materials Letters*[J], 2003, 57(15): 2326
- [15] Hallberg T, Niinimäki-Heikkilä T, Hedborg-Karlsson E *et al. Development of Low-emissive Camouflage Paint*[M]. Sweden: Swedish Defence Research Agency, 2005
- [16] Liu Biao, Shi Jiaming, Zhang Jikui *et al. Optical Materials*[J], 2021, 111(2): 110689
- [17] Yang Yun, Tan Shujuan, Cui Yihua *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 858: 158208
- [18] Wang Xinfei(王新飞), Liu Dongqing(刘东青), Peng Liang(彭亮) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2021, 41(5): 1
- [19] Gao Zhiqiang, Fan Qi, Tian Xiaoxia *et al. Optical Materials*[J], 2021, 112(3): 110793
- [20] Zhao Yuechao, Fang Fei. *ACS Applied Electronic Materials*[J], 2021, 3(6): 2694
- [21] Wang Zhixun, Cheng Yongzhi, Nie Yan *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2014, 116(5): 54905
- [22] Qi Dong, Wang Xian, Chen Fu *et al. Materials*[J], 2018, 11(9): 1594
- [23] Qi Dong, Wang Xian, Cheng Yongzhi *et al. Optical Materials*[J], 2016, 62: 52
- [24] Leftheriotis G, Yianoulis P, Patrikios D. *Thin Solid Films*[J], 1997, 306(1): 92
- [25] Liu Xuanjie, Cai Xun, Mao Jifang *et al. Applied Surface Science*[J], 2001, 183(1-2): 103
- [26] Liu Xuanjie, Cai Xun, Qiao Jinshuo *et al. Thin Solid Films*[J], 2003, 441(1-2): 200
- [27] Leng Jian, Yu Zhinong, Xue Wei *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2010, 108(7): 073109
- [28] Wang Long(王龙), Wang Liuying(汪刘应), Xu Kejun(许可俊) *et al. Acta Optica Sinica*(光学学报)[J], 2021, 41(5): 177
- [29] Liu Ruihuang(刘瑞煌), Zhao Dapeng(赵大鹏), Zhang Jikui(张继魁) *et al. Acta Optica Sinica*(光学学报)[J], 2018, 38(8): 390
- [30] Macleod H. *Journal of Modern Optics*[J], 1978, 25(2): 93
- [31] Allen T, Decorby R. *Journal of the Optical Society of America B*[J], 2011, 28(10): 2529

High Transmittance Infrared Stealth Thin Films Based on TiO₂/Ag/TiO₂ Structure

Wang Long, Wang Liuying, Wang Wenhao, Liu Gu, Ge Chaoqun, Wang Bin, Xu Kejun
(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To solve the problem of selecting and controlling the optical characteristics of visible and infrared compatible stealth, a new type of visible light high transmission and infrared low radiation compatible stealth material was proposed, based on the synergistic effect of optical effects such as induced transmission and radiation suppression of TiO₂/Ag/TiO₂ film structure integration. The mechanism of the influence of structural features on visible light transmittance and infrared reflectance was investigated, the optimization design and preparation of high transmittance infrared stealth film structures was implemented, and its compatibility stealth performance was tested and characterized. The results show that when the thickness of each film layer in the optimized TiO₂/Ag/TiO₂ structure is 30/18/35 nm, the average visible light transmittance and mid-far infrared reflectance of the quartz substrate sample can reach 81.51% and 90.78%, respectively, indicating high levels of visible light perspective and high-temperature infrared radiation suppression ability. The average visible light transmittance and mid-far infrared reflectance of the flexible PET substrate sample can reach 65.68% and 84.46%, respectively. It has good comprehensive capabilities in perspective, shading, and infrared radiation suppression, and has high flexible surface conformal ability. The results can provide important technical support for the design and application of multi-spectral compatible optical stealth materials.

Key words: multi-spectrum compatible stealth; high transparency; infrared low radiation; film structure

Corresponding author: Wang Long, Ph. D., Associate Professor, Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, P. R. China, E-mail: waloxs@163.com