

基于 FTO/Ag/FTO 构型的高透明红外隐身薄膜设计*

王龙[†] 汪刘应 刘颀 唐修检 葛超群 王滨
许可俊 王新军

(中国人民解放军火箭军工程大学智剑实验室, 西安 710025)

(2023 年 7 月 3 日收到; 2023 年 8 月 27 日收到修改稿)

红外隐身与可见光隐身对光谱响应的诉求不同, 导致两者功能耦合材料设计难以调和, 因此发展光学特征选择性调控技术至关重要. 基于 FTO/Ag/FTO 堆叠膜层结构提出一种可见光与红外兼容隐身超构薄膜, 建立可见光高透射与红外低辐射一体化协同设计方法, 诠释微结构特征对可见光透射光谱与红外反射光谱的影响机制, 进而优化设计高透明红外隐身薄膜, 并对其兼容性隐身性能测试表征. 研究表明, 可见光透射取决于半导体介质层与金属层耦合匹配作用, 而红外辐射抑制主要取决于金属层. 经优化设计的 FTO/Ag/FTO 膜层结构厚度为 40/12/40 nm 时, 具备高水平的背景透视复现与高温红外辐射抑制能力. 该研究可为可见光与红外兼容隐身材料设计及应用提供新途径.

关键词: 多频谱兼容隐身, 高透明, 红外低辐射, 材料设计

PACS: 42.70.-a, 42.25.Bs, 81.05.-t

DOI: 10.7498/aps.72.20231084

1 引言

随着热红外、可见光、激光、雷达等探测技术的快速发展与联合应用^[1-4], 单一频段的隐身材料技术已经在规避探测、识别与打击领域显得举步维艰, 而多频谱兼容隐身材料已成为势在必行的发展趋势. 然而, 多频谱兼容隐身材料设计通常存在不同频段隐身原理冲突的技术瓶颈, 譬如红外高反射与可见光高透视、激光低反射等光谱响应诉求都存在截然相反的相互制约关系. 当前红外与可见光兼容隐身材料已经成为光电隐身技术领域的重中之重, 且主要实现途径是采用着色的低红外发射率涂料^[5,6], 但其发射率偏高, 且色调过亮而难以融合于背景. 韩超^[7]将添加不同着色颜料的铝粉印制于织

物而呈现不同色彩, 并在铝粉含量为 25% 时的发射率可低至 0.554. 王自荣等^[8]发现 SnO₂ 含量为 5% 时 ITO 颜色涂层在 8—14 μm 波段的发射率最低为 0.6.

超构材料^[9-14]具有可见光谱-红外辐射-微波吸透特性的选择性调控能力, 为多频谱兼容隐身一体化设计提供了重要途径, 日渐倍受关注. Xiong 等^[15,16]设计了一类具备光学透明与宽带微波吸收特性的多层超材料吸收体 (multilayer metamaterial absorber, MMA), 由氧化铟锡 (ITO) 基频率选择表面、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 与低电阻率 ITO 反射层构成的“三明治”层状结构, 其微波吸收有效带宽可扩展覆盖 2.64—18 GHz, 并在 400—800 nm 可见光波段的平均透射率不低于 50%. 黎思睿等^[17]基于 Ge₂Sb₂Te₅ 相变材料开展了红外

* 陕西省“特支计划”科技创新领军人才项目 (批准号: 2020TZJH-001) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: waloxs@163.com

隐身薄膜结构设计及其光学性能研究, 形成结构色与红外吸收率的动态调控功能, 从而实现可见光与红外兼容隐身效果. 牛帅等^[18]设计了一种基于超材料的宽带微波/红外兼容隐身结构器件, 可在 2—18.6 GHz 微波吸收率高达 90% 且红外发射率低于 0.3. 朱恒正^[19]利用波长选择性吸收超表面的分层结构, 通过表面 ZnS 减反层、Ge/ZnS 光子晶体以及 Cu-ITO-Cu 三层结构吸波超材料的耦合作用, 实现在中远红外辐射率低至 0.12, 微波 X 波段吸收率大于 0.9, 并且可呈现多种颜色的多频谱兼容隐身性能. 基于微结构的光学特性选择调控材料研究尚停留在机理研究、结构设计与性能验证阶段, 仍亟待寻求更多新技术途径去破解多频谱兼容隐身难题.

为了解决可见光隐身与红外隐身对光谱响应诉求和材料设计要求有所不同的技术难题, 利用层状薄膜构型设计方法实现可见光/红外兼容隐身已经成为新途径. 电介质/金属/电介质 (dielectric-metal-dielectric, DMD) 结构^[20–22]是一类人工设计的新颖薄膜材料, 当前大都局限于被应用在光电器件的透明导电薄膜. 通过把高反射金属层嵌入到两电介质层中间时, DMD 结构可抑制来自金属层的可见光反射特性, 达到一种选择性透射增强的效果. Daeil^[23]设计的 $\text{TiO}_2/\text{Au}/\text{TiO}_2$ 在 550 nm 波长处实现光学透射率达到 76%. 与 Au 相比, Ag 在可见光范围内具有更好的光透过性. Liu 等^[24]制备了 ZnS/Ag/ZnS 膜层结构, 在 500 nm 波长处可见光透射率与 1.7 μm 波长处近红外反射率都高达 90%. 尽管 DMD 膜层结构具有优异的可见光透射特性, 但有关红外反射特性的研究仅局限在 2.5 μm 之前的近红外波段, 却在热红外探测常用的中远红外波段光学特性及其红外隐身方面的研究报道十分鲜见. 为此, 基于 FTO/Ag/FTO 三层膜堆叠 DMD 结构的多重光学效应耦合机制, 提出一种新型的可见光高透视/红外低辐射兼容隐身体系, 可贴附于特种车辆的迷彩涂层表面实现红外与可见光兼容隐身防护, 并能用于驾驶舱窗户确保不影响视野前提下实现隔热控温与红外隐身的效果. 因此, 本文所开展的 FTO/Ag/FTO 构型复合薄膜的光谱特性与红外辐射选择性调控机制、高透明红外隐身薄膜设计及其性能实验验证等内容研究, 为多频谱兼容光学隐身材料设计及应用提供新思路.

2 FTO/Ag/FTO 构型复合薄膜的设计方法

2.1 膜层结构的光学特性仿真方法

In_2O_3 基、 SnO_2 基、ZnO 基三类半导体薄膜的可见光透射性能较好, 且在近红外波段的反射性能良好, 但对 3—5 μm , 8—14 μm 中远红外辐射抑制能力却十分有限. Au, Ag, Cu 等金属薄膜在红外辐射抑制作用强, 但透光性与热稳定性较差. 因此, 通过在金属膜上下各叠加一层光学透射率高且热稳定好的半导体介质层构成减反射层/红外低辐射层/干涉层的复合薄膜, 形成图 1 所示三层堆叠的电介质/金属/电介质 (DMD) 结构, 利用膜层材料体系设计来获得最佳光学性能, 实现可见光透射诱导、红外辐射抑制等光学效应协同增益作用. 鉴于 Ag 薄膜的可见光波段吸收率低于 5%, 并具有宽域的高红外反射率, 因此遴选 Ag 薄膜 DMD 结构的中间功能层. 由于 Ag 膜层厚度过薄 (<10 nm) 时难以生长为连续薄膜形式, 同时 Ag 膜层增大至 20 nm 时可见光波段的反射与吸收均有较大程度增强而影响透光性能, 因此 Ag 膜层厚度设计在 10—20 nm 时最为合宜. 由于 FTO (掺杂氟的 SnO_2) 具有成本低、制备简单、光学性能适宜、热稳定性好等优点, 因此用于 DMD 结构介质层实现导纳匹配而增强透射, 并保护 Ag 薄膜的抗氧化作用. 综上, 基于 DMD 构型的 FTO/Ag/FTO 复合薄膜研发一种可见光高透明与红外低辐射双功能兼容型隐身薄膜材料, 使之覆盖于迷彩隐身结构表面, 便能达到红外/可见光兼容隐身防护效能.

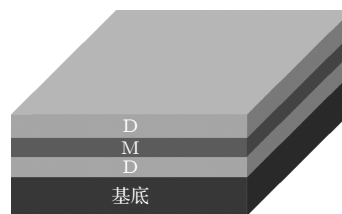


图 1 DMD 膜层结构

Fig. 1. DMD film structure.

根据薄膜光学理论, 采用传输矩阵理论计算方法分析 FTO/Ag/FTO 三层堆叠薄膜结构特征对可见光透射与红外反射光谱的影响机制. 若波长为 λ 的光波以入射角度 θ_0 从折射率为 n_0 的空气层进入 FTO/Ag/FTO 复合薄膜结构, 在薄膜介质层中传输的光波可视为下行波与上行波的相互叠加.

若 d_l , n_l , θ_l 分别为第 l 层介质的厚度、折射率与折射角时, 则光波在第 l 层介质中传输的特征矩阵 M_l 为^[25]

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos\theta_l}{\lambda}\right) & j \frac{\sin\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos\theta_l}{\lambda}\right)}{\eta_l} \\ j\eta_l \sin\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos\theta_l}{\lambda}\right) & \cos\left(2\pi n_l d_l \frac{\cos\theta_l}{\lambda}\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, 导纳 η_l 为^[25]

$$\eta_l = \begin{cases} n_l/\cos\theta_l, & \text{TM波,} \\ n_l\cos\theta_l, & \text{TE波.} \end{cases} \quad (2)$$

同时, 膜层结构中各层的 n_l 和 θ_l 符合 Snell 定律, 即:

$$n_l \sin\theta_l = n_0 \sin\theta_0. \quad (3)$$

三层堆叠的 DMD 结构的特征矩阵 M_{all} 为

$$M_{\text{all}} = \prod_{l=1}^{l=3} M_l = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若空气导纳为 η_0 , 基底导纳为 η_{k+1} , 则入射 DMD 结构表面的反射率 R 与透射率 T 分别为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1}m_{12} - \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{k+1}m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1}m_{12} + \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{k+1}m_{22})} \right|^2, \quad (5)$$

$$T = \frac{4 \operatorname{Re}(\eta_{k+1}\eta_0^{-1})}{|m_{11} + \eta_{k+1}m_{12} + \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{k+1}m_{22})|^2}. \quad (6)$$

2.2 双功能兼容膜层结构的优化设计方法

根据 FTO/Ag/FTO 构型隐身薄膜对可见光高透明与红外低辐射双功能兼容的目标需求, 构建一个表达式 (7) 所示的膜层结构性能优化函数 Z , 利于对其膜层结构实行进一步的优化设计:

$$Z = T_{\text{vis}}(1 - \varepsilon(T)), \quad (7)$$

式中 T_{vis} 为 0.38—0.78 μm 可见光积分透射率, 可表达为^[26]

$$T_{\text{vis}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} T(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} D_{\lambda} V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{\lambda=0.38}^{0.78} T(\lambda) D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=0.38}^{0.78} D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (8)$$

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 红外积分发射率, 可表达为^[26]

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_3^{14} (1 - R(\lambda)) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_3^{14} E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}, \quad (9)$$

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \quad (10)$$

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, $C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$, $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 温度 T 取 300 K.

3 FTO/Ag/FTO 构型复合薄膜光学特性的仿真分析

3.1 可见光透射光谱的影响机制

基于传输矩阵理论计算方法分析 FTO/Ag/FTO 复合薄膜结构特征对可见光透射光谱的影响规律. FTO/Ag/FTO 膜层结构中半导体介质 FTO 薄膜厚度对 380—780 nm 波段可见光透射光谱的影响规律, 如图 2 所示. 当 Ag 薄膜与内层 FTO 薄膜的厚度分别为 15 nm 和 30 nm 时, 外层 FTO 薄膜厚度对可见光透射光谱的影响如图 2(a); 当外层 FTO 薄膜与 Ag 薄膜的厚度分别为 30 nm 和 12 nm 时, 内层 FTO 薄膜厚度对可见光透射光谱的影响如图 2(b). 显然, 内外两层半导体介质 FTO 薄膜对可见光透射光谱的影响规律具有相似性. FTO/Ag/FTO 膜层结构在半导体介质层厚度较薄时, 在可见光中波段的透射率相对较高, 并且透射光谱曲线呈现为凸峰状. 随着半导体介质层厚度的增大, 在中波的透射率逐渐有所降低, 但在长波、短波的透射率逐渐增大, 且长波处的透射峰值产生红移, 使得可见光透射光谱曲线趋于平整化, 因此高透射频域逐渐变宽. 同时, 随着 FTO 薄膜厚度增大, 可见光平均透射率先不断增大然后逐渐减小. 总体而言, FTO 薄膜厚度为 35—40 nm 时的整个可见光波段透光效果较佳, 并与 12—15 nm 厚度的 Ag 薄膜构成的 FTO/Ag/FTO 膜层结构等效导纳匹配性较好, 诱导透射效应较为显著. 此外, 随着 FTO 薄膜厚度的增大, 导致光在膜层结构中干涉作用的光程差增大, 导致透射峰值趋于长波方向偏移.

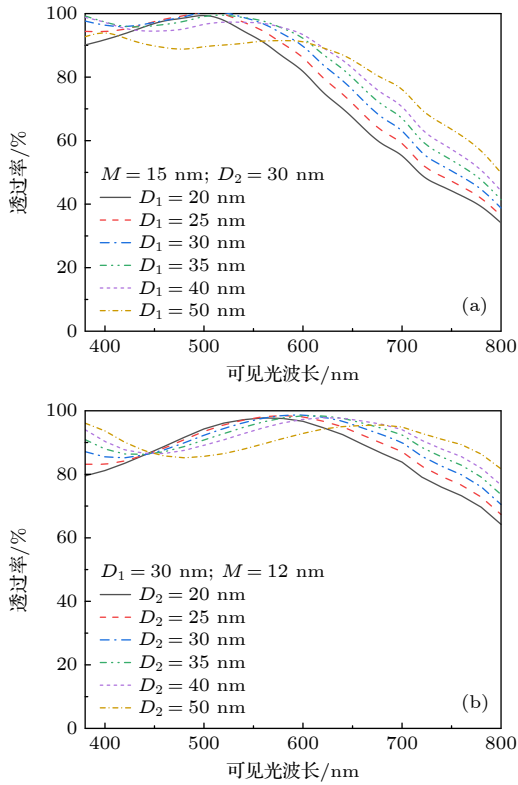


图 2 半导体介质层对可见光透射光谱的影响 (a) 外层; (b) 内层

Fig. 2. Effect of semiconductor dielectric layer on visible transmission spectrum: (a) Outer layer; (b) inner layer.

当内外两层 FTO 薄膜厚度均为 30 nm 时, 中间 Ag 薄膜厚度对 FTO/Ag/FTO 膜层结构可见光透射光谱的影响规律如图 3 所示. Ag 薄膜层对可见光透射的影响程度明显大于 FTO 半导体介质层. 随着 Ag 薄膜层厚度逐渐增大, 可见光的透射峰值向短波方向蓝移, 且短波段透射率逐渐增大, 但长波段透射率却不断显著降低. 因此, 可见光透射光谱曲线由“宽频域”高透射的相对平整状态转变为“高频化”高透射的凸峰状, 使得可见光透射频域逐渐变窄且平均透射率逐渐变差. 这是因为 Ag 薄膜厚度越大, 对可见光的吸收与反射作用都会增强, 进而导致透过程度减弱. 同时, 由于 Ag 薄膜材料介电常数的频散特性, 导致可见光长波段的透射特性恶化影响程度更显著.

当 FTO/Ag/FTO 膜层结构各层厚度为 30/15/30 nm 时, $[FTO/Ag]^T/FTO$ (即 $[DM]^TD$ 构型) 膜系结构的周期数 T 对可见光透射光谱的影响规律如图 4 所示. 随着周期数的增大, 可见光透射峰值向短波方向逐渐蓝移, 且透射光谱曲线由“宽频域”高透射状态向“高频化”高透射状态转变, 导致

可见光透射状态不断变差. 尤其, 当膜系结构周期数由 1 增至 2 时, 导致可见光透射状态显著性变差. 这是因为随着 $[DM]^TD$ 构型膜层结构的周期数越大, 相消干涉的光波越多, 同时可见光吸收也随介质膜层增加而增强, 从而导致可见光透射状态变差.

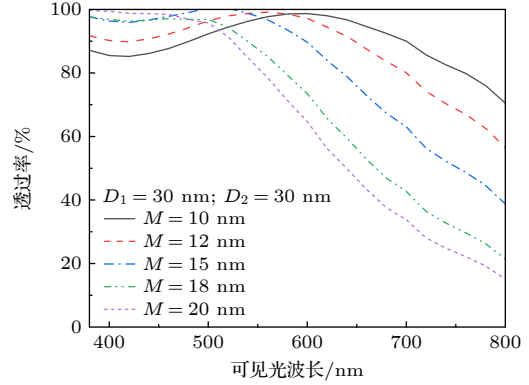


图 3 金属层对可见光透射光谱的影响

Fig. 3. Effect of metal layer on visible transmission spectrum.

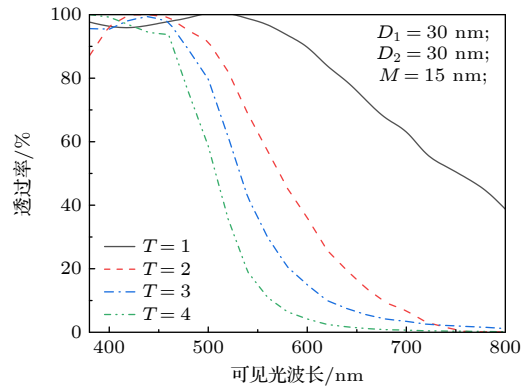


图 4 膜系结构周期数对可见光透射光谱的影响

Fig. 4. Effect of the cycle number of film structure on visible transmission spectrum.

3.2 红外反射光谱的影响机制

基于传输矩阵理论计算方法分析 FTO/Ag/FTO 复合薄膜结构特征对红外反射光谱的影响规律. 图 5 展示了中间层 Ag 薄膜厚度对 FTO/Ag/FTO 膜层结构在 3—14 μm 中远红外反射光谱的影响规律. 红外反射率随着 Ag 薄膜厚度的增大而增大, 越利于降低红外发射率, 但在 Ag 薄膜厚度大于 18 nm 后的变化幅度却显著变小. 这是得益于 Ag 薄膜自身的红外高反射特性, 是抑制红外辐射的功能层, 因此其厚度越大则红外反射作用越强.

半导体介质层 FTO 薄膜厚度对 FTO/Ag/FTO 膜层结构红外反射光谱的影响规律如图 6 所

示. 尽管红外反射率随着 FTO 薄膜厚度的增大而稍微略有增大, 但其变化程度几乎可以忽略不计. FTO/Ag/FTO 膜层结构的红外发射率主要取决于中间的 Ag 薄膜层, 而 FTO 薄膜对中远红外反射率的作用较弱, 因此在恒定厚度的 Ag 薄膜时的红外辐射抑制功能不会发生显著性变化.

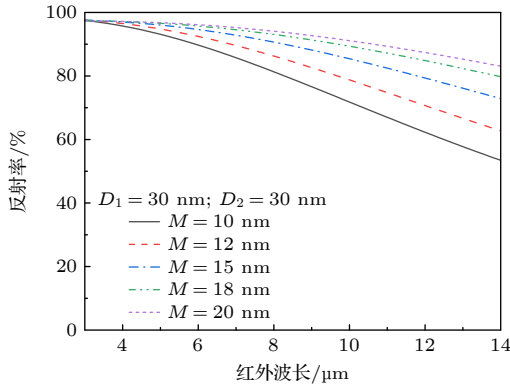


图 5 金属层对红外反射光谱的影响

Fig. 5. Effect of metal layer on infrared reflection spectrum.

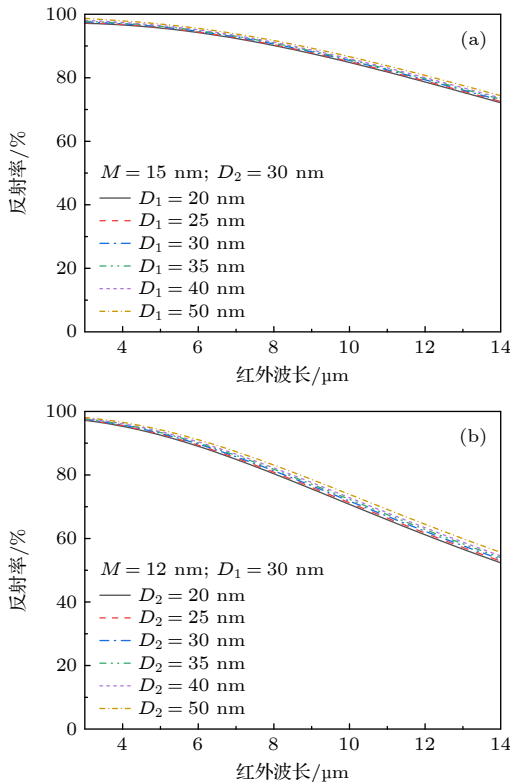


图 6 半导体介质层对红外反射光谱的影响 (a) 外层; (b) 内层

Fig. 6. Effect of semiconductor dielectric layer on infrared reflection spectrum: (a) Outer layer; (b) inner layer.

[FTO/Ag]^T/FTO(即 [DM]^TD 构型) 膜系结构的周期数 T 对红外反射光谱的影响规律如图 7

所示. 随着周期数由 1 个增至 2 个时, 红外反射率最初有大幅度增加, 并在 3—14 μm 全波段均达到 >95% 高反射状态, 利于降低膜系结构的红外发射率. 然而, 之后随着周期数的增加, 对红外反射率的影响已经十分微弱. 这是因为随着周期数的增大, 导致 Ag 薄膜的层数增多, 使得红外反射效果越好. 同时, 当 Ag 薄膜的层数为 2 时反射率已接近 1, 使得反射率增长幅度变小. 鉴于膜系结构的周期数增长至 2 时可见光透射急剧变差而不适合高透光功能需求, 但在周期数为 1 时却能兼顾可见光高透明与红外低辐射的双功能需求, 因此遴选膜层结构为单层 Ag 薄膜的 FTO/Ag/FTO 构型最合宜.

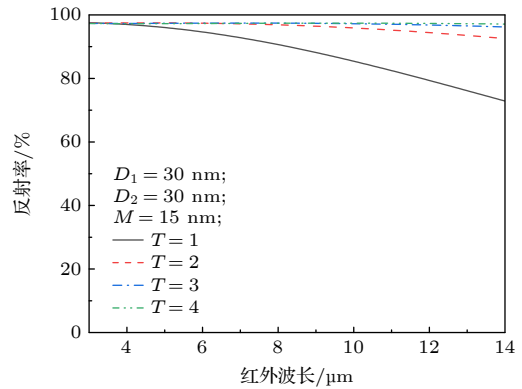


图 7 膜系结构周期数对红外反射光谱的影响

Fig. 7. Effect of the cycle number of film structure on infrared reflection spectrum.

3.3 高透明红外隐身薄膜结构的优化设计

运用最速下降法以性能优化函数 Z 进行膜层结构优化计算, 最终获得优化后的 FTO/Ag/FTO 膜层结构各层的厚度为 40/12/40 nm, 且其可见光透射与红外反射的光谱特性如图 8 所示. 该膜层结构呈现出宽域的可见光高透射与红外高反射特征. 在理论计算层面, 可实现 380—780 nm 波段可见光平均透射率为 93.31%, 且 3—14 μm 波段红外平均反射率为 85.39%, 满足高透明红外低辐射隐身的需求.

4 实验验证

鉴于磁控溅射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 型号磁控溅射仪器在石英片

基底上镀制结构优化后的 FTO/Ag/FTO (各层厚度 40/12/40 nm) 薄膜样件. 采用岛津 SOLID3700 型号紫外-可见光-近红外分光光度计测量样件 0.38—0.78 μm 可见光透射光谱. 首先设置波长范围为可见光波段, 采样间隔为 1 nm, 并设置积分球附件狭缝宽为 20 nm, 采用双光束模式和标准 S/R 转换, 之后利用 BaSO₄ 标准白板测量基线, 并以空气的透射率为 100%, 再将待测样品固定在样品台上测试其透射率. 采用 Bruker 80 型号傅里叶红外光谱仪测量样件在 3—14 μm 中远红外反射光谱. 首先设置分辨率 4 cm^{-1} , 扫描速率 2.5 kHz, 光阑设置 6 mm, 采用 RT-DLaTGS 检测器和 KBr 分束器, 之后积分球采用标准金基底进行基线扫描, 最后再将样品固定在样品上进行测量其红外反射光谱. 此外, 为了验证 FTO/Ag/FTO 薄膜样件在不同温度环境下的红外隐身特性, 利用加热平台从室温加热至 50, 90, 110, 130, 150 $^{\circ}\text{C}$ 等环境温度下拍摄样件的 3—5 μm 和 8—14 μm 热像图.

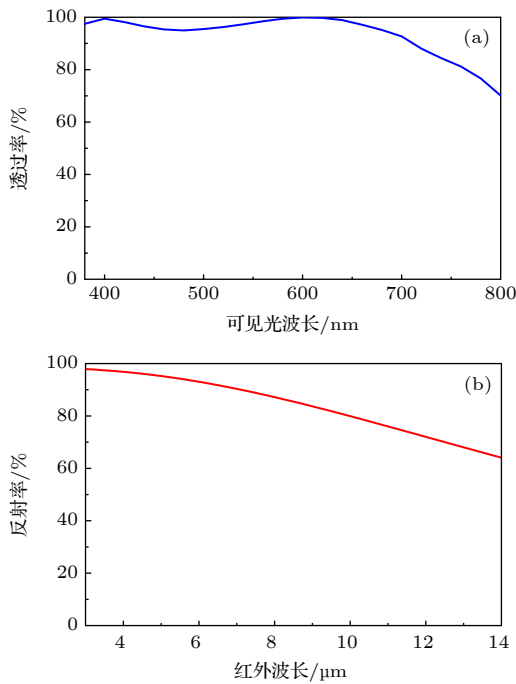


图 8 优化后 FTO/Ag/FTO 膜层结构的光谱特性 (a) 可见光透射; (b) 红外反射

Fig. 8. Spectral characteristics of optimized FTO/Ag/FTO film structure: (a) Visible light transmission; (b) infrared reflection.

图 9 展示了 FTO/Ag/FTO 薄膜样件的宏观透光效果及其光谱特性. 该实物具备高透明的视觉效果, 如图 9(a), 完全可以将背景无色差的体现出来, 即能贴附于装备的迷彩隐身结构表面而与可见

光隐身兼容, 也能用于装备驾驶窗户而不影响人员视野. 可见光透射光谱如图 9(b) 所示, 在 0.38—0.78 μm 可见光波段的透射率大都高于 80%, 且平均透射率为 82.52%, 能实现可见光全波段的宽域高透射效果, 能确保背景色泽能被透视准确复现到薄膜样件另一侧端. 红外反射光谱如图 9(c) 所示, 在 3—14 μm 的中远红外反射率大都高于 80%, 且其平均反射率为 81.46%, 具备宽域红外高反射特征, 能确保较低的红外发射率, 从而实现中远红外隐身功能. 综上, 尽管受限于镀膜制备误差、仿真折射率及其频散特性偏差、基底光学属性的综合影响, 导致实物样件的光学特性与仿真设计结果存在一定程度的偏差, 但该实物样件依旧能保证可见光高透射、红外高反射的双功能兼容隐身目标需求, 充分验证了仿真优化设计方法的可靠性与有效性.

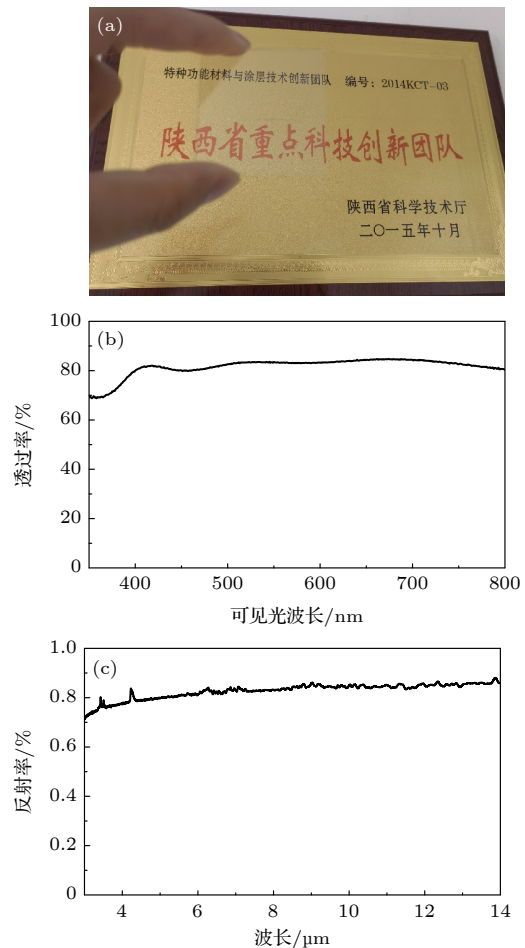


图 9 样件的光学特性 (a) 实物透光效果; (b) 可见光透射光谱; (c) 红外反射光谱

Fig. 9. Optical characteristics of sample: (a) Physical transparency effect; (b) visible transmission spectrum; (c) infrared reflectance spectrum.

在不同环境温度下 FTO/Ag/FTO 薄膜样件的 3—5 μm 和 8—14 μm 热像图分别如图 10 和图 11 所示, 并得到样件表面平均热辐射温度的变化如图 12 所示. 其中, 采用石英片基底作为 FTO/Ag/FTO 薄膜样件的对照组. 可见, 在最初的室温状态下, 样件和石英片在 3—5 μm 和 8—14 μm 波段的辐射温度基本一致. 然而, 样件与石英片之间的温差随着温度升高而逐步增大, 因此样件越加表现出优异的红外低辐射隐身特性. 同时, 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 μm 和 8—14 μm 两个红外波段之间的辐射温度差也逐渐增大. 到 150 $^{\circ}\text{C}$ 时, 3—5 μm 波段的样件辐射温度为 91 $^{\circ}\text{C}$, 比石英片的辐射温度低 49 $^{\circ}\text{C}$; 而 8—14 μm 波段的样件辐射温度为 63.8 $^{\circ}\text{C}$, 比石英片的辐射温度低 75.8 $^{\circ}\text{C}$. 因此样件的远红外隐身效果更佳. 综上, FTO/Ag/FTO 薄膜样件具备较好的高温红外热辐射抑制能力, 在 3—5 μm 中红外与 8—14 μm 远红外均具备较好的隐身特性.

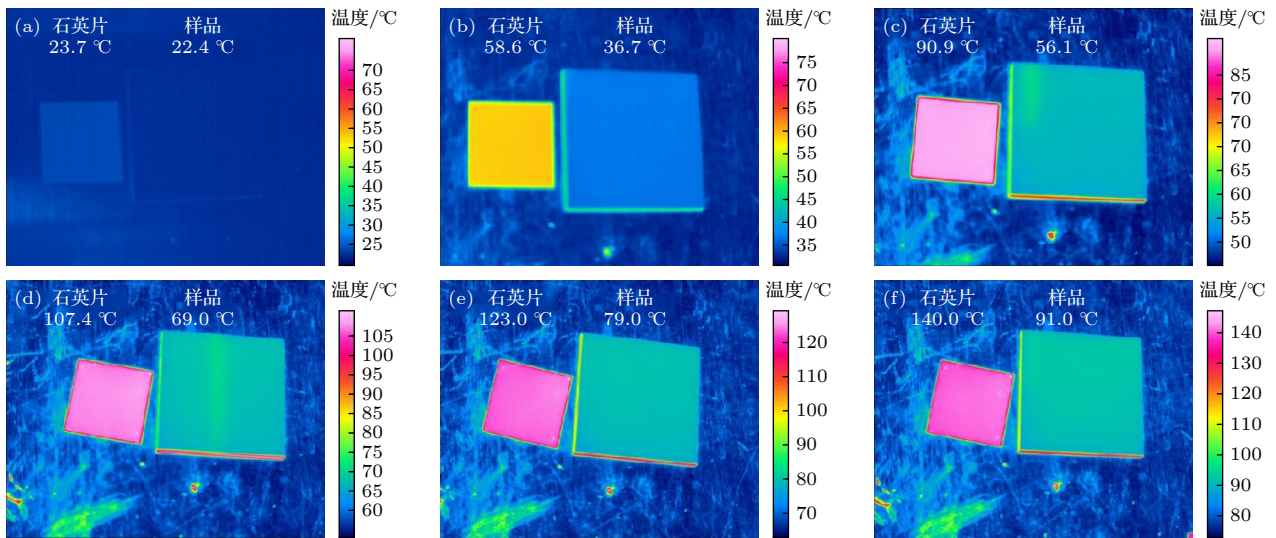


图 10 FTO/Ag/FTO 复合薄膜在不同环境温度下的 3—5 μm 中红外热像图 (a) 24 $^{\circ}\text{C}$; (b) 50 $^{\circ}\text{C}$; (c) 90 $^{\circ}\text{C}$; (d) 110 $^{\circ}\text{C}$; (e) 130 $^{\circ}\text{C}$; (f) 150 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 10. 3–5 μm mid-infrared thermal image of FTO/Ag/FTO composite films at different environmental temperatures: (a) 24 $^{\circ}\text{C}$; (b) 50 $^{\circ}\text{C}$; (c) 90 $^{\circ}\text{C}$; (d) 110 $^{\circ}\text{C}$; (e) 130 $^{\circ}\text{C}$; (f) 150 $^{\circ}\text{C}$.

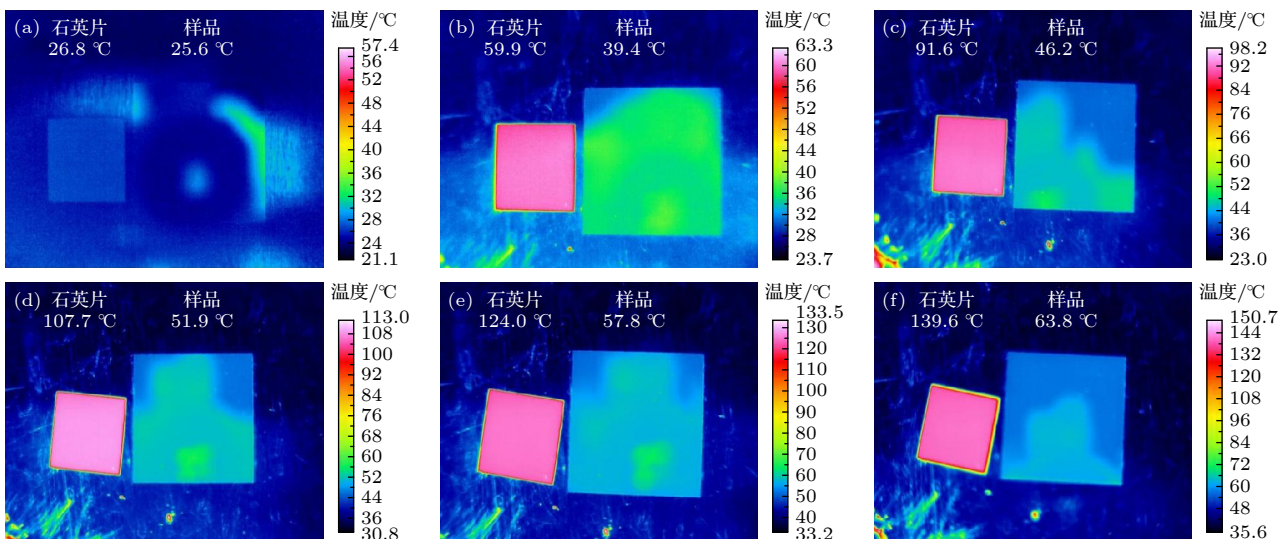


图 11 FTO/Ag/FTO 复合薄膜在不同环境温度下的 8—14 μm 远红外热像图 (a) 24 $^{\circ}\text{C}$; (b) 50 $^{\circ}\text{C}$; (c) 90 $^{\circ}\text{C}$; (d) 110 $^{\circ}\text{C}$; (e) 130 $^{\circ}\text{C}$; (f) 150 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 11. 8–14 μm far-infrared thermal image of FTO/Ag/FTO composite films at different environmental temperatures: (a) 24 $^{\circ}\text{C}$; (b) 50 $^{\circ}\text{C}$; (c) 90 $^{\circ}\text{C}$; (d) 110 $^{\circ}\text{C}$; (e) 130 $^{\circ}\text{C}$; (f) 150 $^{\circ}\text{C}$.

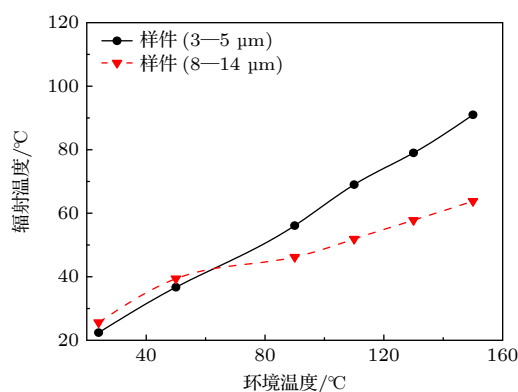


图 12 样件在中远红外的辐射温度变化

Fig. 12. Radiation temperature changes of the sample in the mid-far infrared band.

5 结 论

基于 FTO/Ag/FTO 三层堆叠结构有效协同可见光透射诱导、红外辐射抑制等光学效应, 提出了一种可见光高透射与红外高反射双功能兼容的新型隐身薄膜. 首先, 建立了 DMD 构型高透明红外隐身复合薄膜仿真设计与优化方法, 分析了 FTO/Ag/FTO 膜层结构特征对可见光透射与红外反射的影响机制. 可见光透射取决于半导体介质层与金属层耦合匹配作用, 而红外辐射抑制主要取决于金属层. 此外, 随着 $[\text{FTO}/\text{Ag}]^T/\text{FTO}$ 膜系结构的周期数增大, 虽利于红外反射增强, 但可见光透射显著性变差. 继而, 以高透明与红外隐身双功能兼容目标需求为牵引, 经最优化设计后的 FTO/Ag/FTO 膜层结构各层厚度为 40/12/40 nm. 最后, 从实验角度验证了设计方法的有效性. FTO/Ag/FTO 薄膜样件具备全波段可见光高透射且宽域红外高反射特征, 即能确保背景色泽被透视复现, 还能确保高温红外低辐射能力, 利于实现可见光与红外兼容隐身功能.

参考文献

[1] Wang H, Yao Ne Z, Wang B, Wang X S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 134703 (in Chinese) [王浩, 姚能智, 王斌, 王学生 2022 物理学报 **71** 134703]

[2] Zhu R C, Wang J F, Xu C L, Feng M D, Sui S, Wang J, Qiu T S, Zhang L, Jia Y X, Zhang Z T, Qu S B 2020 *Infrared Phys. Techn.* **111** 103546

[3] Huang S N, Fan Q, Xu C L, Wang B K, Wang J F, Yang B Y, Tian C H, Meng Z 2020 *Infrared Phys. Techn.* **111** 103524

[4] Zhong S M, Wu L J, Liu T J, Huang J F, Jiang W, Ma, Y G 2018 *Opt. Express* **26** 16466

[5] Ren Z Y, Chen L P, Liu X M, Li G J, Wang K, Wang Q 2020 *Infrared Phys. Techn.* **111** 103472

[6] Liu K 2016 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [刘凯 2016 硕士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]

[7] Han C 2015 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University) (in Chinese) [韩超 2015 硕士学位论文 (杭州: 浙江理工大学)]

[8] Wang Z R, Yu D B, Sun X Q 2000 *Aerospace Shanghai* **17** 24 (in Chinese) [王自荣, 余大斌, 孙晓泉 2000 上海航天 **17** 24]

[9] Feng K S, Li N, Li T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 034101 (in Chinese) [冯奎胜, 李娜, 李桐 2022 物理学报 **71** 034101]

[10] Liu B, Chen Z S, Li Z G, Shi J M, Wang H 2020 *Opt. Eng.* **59** 127107

[11] Shim H B, Han K, Song J, Hahn J W 2022 *Adv. Opt. Mater.* **6** 10

[12] Chen T H, Zheng B, Qian C, Chen H S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 154104 (in Chinese) [陈天航, 郑斌, 钱超, 陈红胜 2020 物理学报 **69** 154104]

[13] Zhao Y C, Fang F 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 2694

[14] Qi D, Chen F, Wang X, Luo H, Cheng Y Z, Niu X Y, Gong R Z 2018 *Opt. Lett.* **43** 5323

[15] Xiong Y, Chen F, Cheng Y Z, Luo H 2022 *J. Alloy Compd.* **920** 166008

[16] Xiong Y, Chen F, Cheng Y Z, Luo H 2022 *Opt. Mater.* **132** 112745

[17] Li S R, Li J, Liu K, Huang Y J, Li L, Zhou X L 2021 *J. Sichuan Univ.* **6** 115 (in Chinese) [黎思睿, 李佳, 刘科, 黄奕嘉, 李玲, 周晓林 2021 四川大学学报 **6** 115]

[18] Niu S, Yang C, Chang H C, Xiao L, Guo N, Qu Y C, Li G H 2022 *J. Infrared Millim. W.* **41** 745 (in Chinese) [牛帅, 杨昌, 常慧聪, 肖林, 郭楠, 曲彦臣, 李国华 2022 红外与毫米波学报 **41** 745]

[19] Zhu H Z 2021 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [朱桓正 2021 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]

[20] Leftheriotis G, Yianoulis P, Patrikios D 1997 *Thin Solid Films* **306** 92

[21] Leng J, Yu Z N, Xue W, Zhang T, Jiang Y R, Zhang J, Zhang D P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 073109

[22] Wu C C, Chen P S, Peng C H, Wang C C 2013 *J. Mater. Sci-Mater. El.* **24** 2461

[23] Daeil K 2010 *Appl. Surf. Sci.* **257** 704

[24] Liu X J, Cai X, Qiao J S, Mao J F, Jiang N 2003 *Thin Solid Films* **441** 200

[25] Wang L, Wang W H, Wang L Y, Liu G, Ge C Q, Yang N J, Li P 2022 *J. Opt.* **51** 874

[26] Wang Z J 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王子君 2018 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

Design of high transparent infrared stealth thin films based on FTO/Ag/FTO structure^{*}

Wang Long[†] Wang Liu-Ying Liu Gu Tang Xiu-Jian Ge Chao-Qun
Wang Bin Xu Ke-Jun Wang Xin-Jun

(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

(Received 3 July 2023; revised manuscript received 27 August 2023)

Abstract

Multi-spectral compatible stealth materials have become an imperative development trend, especially visible and infrared compatible stealth materials have become the most important in the field of optoelectronic stealth technology. However, infrared stealth and visible stealth have different requirements for spectral response, which makes it difficult to reconcile the design of functional coupling materials. Therefore, it is very important to develop selective control technology of optical characteristics. A visible and infrared compatible stealth superstructure thin film is proposed based on the FTO/Ag/FTO stacked film structure. A collaborative design method for high visible transmission and low infrared radiation is established, and the mechanism of microstructure characteristics affecting visible transmission and infrared reflection spectra is explained. The infrared stealth thin film with high transparency is optimized, and its compatibility stealth performance is tested and characterized by visible light transmission spectrum, infrared reflection spectrum, and thermal imaging characterization technology. It is shown that visible transmission depends on the coupling and matching effect between the semiconductor dielectric layer and the metal layer, while infrared radiation suppression mainly relies on the metal layer. As the thickness of FTO film increases, the visible transmission peak undergoes a red shift, leading the transmission spectrum curve to flatten, the average transmission first increases and then gradually decreases. As the thickness of Ag thin film layer increases, the transmission peak of visible light undergoes a blue shift, causing the transmission spectrum curve to tend to a high-frequency transmission state, narrowing the frequency domain of visible light transmission and gradually reducing the average transmittance decreases gradually. At the same time, the infrared reflectance increases with the Ag film thickness increasing, but the change of amplitude significantly decreasing when the Ag film thickness is greater than 18 nm. When the thickness of the optimized FTO/Ag/FTO film structure is 40/12/40 nm, it has a high level of background perspective reproduction and high ability to suppress high-temperature infrared radiation. The average transmittance of 0.38–0.78 μm visible light band is 82.52%, and the average reflectance of 3–14 μm mid-far infrared band is 81.46%. The radiation temperature of the sample is 49 $^{\circ}\text{C}$ lower in the mid infrared range and 75.8 $^{\circ}\text{C}$ lower in far infrared range than that of the quartz sheet at 150 $^{\circ}\text{C}$, respectively. The new stealth film can be attached to the camouflage coating surface of special vehicle to achieve visible and infrared compatible stealth, and can be used for cockpit windows to ensure thermal insulation, temperature control, and infrared stealth without affecting the field of view. This study can provide a new approach for designing and utilizing the visible and infrared compatible stealth materials.

Keywords: multispectral compatible stealth, high transparency, infrared low radiation, material design

PACS: 42.70.-a, 42.25.Bs, 81.05.-t

DOI: 10.7498/aps.72.20231084

^{*} Project supported by the Shaanxi Province “Special Support Plan” Science and Technology Innovation Leading Talent Project, China (Grant No. 2020TZJH-001).

[†] Corresponding author. E-mail: waloxx@163.com

基于FTO/Ag/FTO构型的高透明红外隐身薄膜设计

王龙 汪刘应 刘顾 唐修检 葛超群 王滨 许可俊 王新军

Design of high transparent infrared stealth thin films based on FTO/Ag/FTO structure

Wang Long Wang Liu-Ying Liu Gu Tang Xiu-Jian Ge Chao-Qun Wang Bin Xu Ke-Jun Wang Xin-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 244202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231084

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231084>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于红外多光谱相机分析长后焦距对无热化设计的影响

Analysis of influence of long back focal length on athermal design based on infrared multispectral camera

物理学报. 2021, 70(18): 184201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210217>

基于Au/TiO₂/FTO结构忆阻器的开关特性与机理研究

Resistive switching characteristics and resistive switching mechanism of Au/TiO₂/FTO memristor

物理学报. 2018, 67(15): 157302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180425>

磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计

Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability

物理学报. 2022, 71(3): 037202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211265>

Ag@SiO₂耦合结构设计及其对薄膜太阳电池的响应调控

Ag@SiO₂ coupled structure's design and regulation and control of response to thin film solar cells

物理学报. 2020, 69(18): 188801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200334>

流动隐身衣的均匀化设计与减阻特性

Homogenization design and drag reduction characteristics of hydrodynamic cloaks

物理学报. 2022, 71(13): 134703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220346>

基于石墨烯振幅可调的宽带类电磁诱导透明超材料设计

Tunable graphene amplitude based broadband electromagnetically-induced-transparency-like metamaterial

物理学报. 2018, 67(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180114>