

隐身光学窗口多光谱隐身技术研究综述

巩硕华^{1,2} 远国勤^{1*} 刘展宇³

1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国·吉林 长春 130033

2.中国科学院大学, 中国·北京 100049

3.空军装备部驻长春地区军事代表室, 中国·吉林 长春 130033

摘要: 现代空战雷达、红外、可见光、激光联合侦察体系日趋成熟, 飞行器外露红外光学窗口受高速气动加热产生强烈热辐射, 是整机隐身最薄弱环节。隐身光学窗口核心设计矛盾为目标红外高透射与自身高温低发射, 同时需兼顾雷达散射抑制、激光对抗多频谱指标。本文系统梳 ZnS、蓝宝石、MgO 三类主流红外透明陶瓷基底的光学、高温服役性能, 重点剖析 ITO 单层低发射膜、FTO/Ag/FTO 复合膜、微纳红外超表面三类改性结构调控机制; 分析了高温性能衰减、散热-隐身冲突、曲面镀膜不均、多指标制衡的相关关系, 并对全电介质耐高温光子膜、热致相变自适应超表面、一体化共形蒙皮的方向进行了展望。

关键词: 隐身光学窗口; 低发射薄膜; 红外透明陶瓷

Review on Multi-Spectral Stealth Technology of Stealth Optical Windows

Gong Shuohua^{1,2}, Yuan Guoqin^{1*}, Liu Zhanyu³

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China Jilin Changchun 130033

2. University of Chinese Academy of Sciences, China Beijing 100049

3. Air Force Equipment Department Military Representative Office in Changchun Region, China Jilin Changchun 130033

Abstract: Modern air combat reconnaissance systems that combine radar, infrared, visible light, and laser are becoming increasingly advanced. The exposed infrared optical windows on aircraft produce strong thermal radiation due to high-speed aerodynamic heating, which is the weakest link in overall stealth. The main design challenge for stealth optical windows is achieving high infrared transmission while keeping the window itself at high temperature with low emission, all while also considering radar scattering suppression and multi-spectral laser countermeasures. This article systematically reviews the optical and high-temperature service performance of three mainstream infrared-transparent ceramic substrates: ZnS, sapphire, and MgO. It focuses on analyzing three types of modified structures: single-layer low-emission ITO films, FTO/Ag/FTO composite films, and micro-nano infrared metasurfaces. It also examines the relationships between high-temperature performance degradation, the conflict between heat dissipation and stealth, uneven coating on curved surfaces, and multi-parameter trade-offs. Finally, it looks ahead to directions like all-dielectric high-temperature photonic films, thermally adaptive phase-change metasurfaces, and integrated conformal skins.

Keywords: Stealth optical window; Low-emissivity film; Infrared transparent ceramic

0 引言

红外无源探测具备全天候、抗电磁干扰优势, 3~5 μm 中波、8~14 μm 长波红外大气窗口是制导、告警设备核心工作波段。飞行器高速飞行时窗口气动加热温度可达 300~1200K, 依据斯特藩-玻尔兹曼定律, 辐射能量与温度四次方成正比, 未改性裸窗口红外发射率可达 0.7 以上, 极易被红外装备远距离捕获。隐身光学窗口通过基底选材、表面功能膜协同设计, 在保证成像透光前提下抑制自身热辐射, 同时实现雷达兼容, 是当前光电隐身核心研究方向。

1 隐身光学窗口红外隐身机理

飞行器头部激波、气流摩擦持续向窗口传递热量, 整体温度大幅上升; 金属安装边框形成热桥, 产生局部离散高温区。双重机制加剧红外特征: 一是黑体辐射随温度四次方激增; 二是高温诱导陶瓷晶格振动增强, 本征红外吸收上升, 发射率同步抬升。

由于辐射能量与温度四次方成正比, 未改性裸窗口工作过程中辐射能力极强, 极易被红外装备远距离捕获, 李家科等^[3]在 ZnS 陶瓷高温光谱测试中证实: 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上 ZnS 内部硫空位缺陷大量生成, 8~12 μm 透过率下降 20%

以上，红外发射率显著攀升，因此无法用于高超音速高温工况，因此红外隐身光窗需要开展光谱调控技术研究。

1.1 光谱双向调控物理机理

热平衡环境中，材料对红外光仅存在吸收、反射、透射三种作用，如公式（1）所示。

$$\alpha(\lambda)+\rho(\lambda)+\tau(\lambda)=1$$
 (1)

式（1）中 $\alpha(\lambda)$ 为光谱吸收率， $\rho(\lambda)$ 为光谱反射率， $\tau(\lambda)$ 为光谱透射率。同时材料对红外光的吸收率等于其热辐射发射能力，即：

$$\varepsilon(\lambda)=\alpha(\lambda)$$
 (2)

式（2）中 $\varepsilon(\lambda)$ 为光谱发射率，因此，红外隐身光学窗口需要 $\tau(\lambda)$ 尽可能大以确保探测光顺利透过，同时 $\varepsilon(\lambda)$ 尽可能小以自身少发热辐射，降低被探测发现概率。依据上式，降低自身吸收率 $\alpha(\lambda)$ 、提升透射率 $\tau(\lambda)$ 为红外隐身光学窗口的核心追求目标。

热平衡条件下常规无机陶瓷基底无光谱选择性，对入射红外同步吸收、透射，无法满足隐身光窗要求，需要采用镀膜技术对入射光进行选择性的调控，机理如图 2 所示，采用在基底镀功能薄膜层实现光谱调控，基底决定窗口极限透光区间、耐温上限与力学抗冲击性能，功能薄膜层实现界面吸收、反射、透射调控。由于纯金属膜层红外反射率高但完全阻隔探测光，无法作为光电窗口载体，透明导电氧化物（ITO、FTO）膜层依靠自由载流子实现波段差异化响应，可实现 3~5 μm 、8~14 μm 大气窗口高透射，高反射、低吸收的目的，实现“透外信号、抑内热辐射”双重功能。

胡亚兰等^[1]通过 100~500℃梯度基底溅射试验证实：基底温度升高，ITO 薄膜晶粒尺寸增大、方块电阻下降，8~14 μm 平均发射率可降至 0.18；但温度超过 600℃后载流子大量热扩散，低发射性能永久衰减，因此仅适配亚音速低温平台。

1.2 红外 – 雷达协同工作光谱调控机理

红外光波微米级、雷达微波厘米级，材料光电属性天然对立：高导电层可降低红外发射，但会对 X 波段雷达形成镜面强反射；纯介质基底雷达隐身性能优异，无自由载流子则无法调控红外辐射。王龙等^[2]仿真验证，介质 / 金属 / 梯度分层结构可实现两类波段性能解耦，同步满足红外高透、雷达低反射指标。

2 红外透明基底材料研究现状

基底决定窗口极限透光区间、耐温上限与力学抗冲击性能，当前工程主流基底材料可分为 ZnS 多晶陶瓷、蓝宝

石单晶、MgO 复相陶瓷三大类，李家科^[3]，李恺^[5]等对比了三类材料工艺、光学、高温短板，如下表所示。

表1 三类红外基底综合性能对比

Base type	ZnS Ceramics	Sapphire	MgO Ceramics
transmissive wavelength	0.36~12 μm	3~5 μm Excellent	3~14 μm Full band
Maximum tolerable temperature	≤600K	≤1000K	≥1200K
Compatible Devices	Subsonic air-launched/cruise missile	Medium-wave low-temp detection gear	hypersonic vehicle

2.1 热压 / CVD 硫化锌（ZnS）陶瓷

ZnS 透光区间 0.36~12 μm ，可见光、中红外透过率优异，热压（HP）陶瓷抗弯强度可达 97 MPa，加工性好、成本可控。但缺陷十分突出：600℃高温下产生硫空位，长波红外吸收陡增；CVD 法制备多光谱 ZnS 经 HIP 处理后晶粒粗化，抗弯强度下降 30%，适用于低速战机、巡航导弹低温整流罩^[3]。

2.2 蓝宝石单晶

蓝宝石 3~5 μm 中波透过率 > 85，硬度高、抗风沙，熔点 2045℃，中低温力学稳定性强；但 8 μm 以上晶格产生强吸收截止，无法用于长波红外制导装备，高温下晶格缺陷增多，红外辐射抑制效果大幅下滑^[5]。

2.3 MgO 基复相透明陶瓷

MgO 声子能量低，3~14 μm 全波段无特征吸收，长期 1200℃高温光谱稳定，无硫、氧空位类缺陷；缺点在于烧结致密化难度高，大曲率整流罩成型工艺不成熟，现阶段仅实验室小尺寸样品可实现高透过，是未来高超音速窗口核心研究方向^[5]。

3 红外隐身镀膜技术

裸基底红外发射率过高，必须表面镀膜 / 微纳结构改性，现有成熟技术可分为单层 TCO 膜、介质 / 金属兼容膜、微纳超表面三类。

3.1 ITO 单层低发射复合膜

膜系结构如下图所示，可分为基层、耐磨防护层、到店调控层及介质增透层，依靠自由载流子反射基底内热辐射，制备工艺成熟、可大面积磁控溅射量产^[1]。

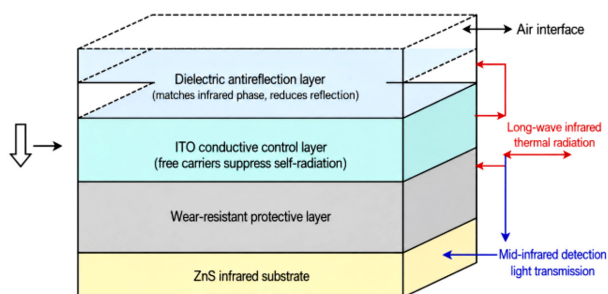


图1 ITO多层低发射膜截面结构

溅射基底温度 300℃时薄膜光电综合性能最优，但 600℃以上载流子迁移、析出，低发射功能失效，因此仅适用于 300~500 K 低温机载平台^[1]。

3.2 FTO/Ag/FTO 多频谱兼容复合膜

单层 ITO 导电层雷达反射截面过大，无法兼顾射频隐身；王龙等设计 40nmFTO/12nm Ag/40nm 三层梯度膜，如下图所示，外层 FTO 保障可见光、红外透光，中间银层抑制内热辐射，整体结构对 8~12GHz 雷达波形成损耗吸收，解决红外 - 雷达性能制衡^[2]。

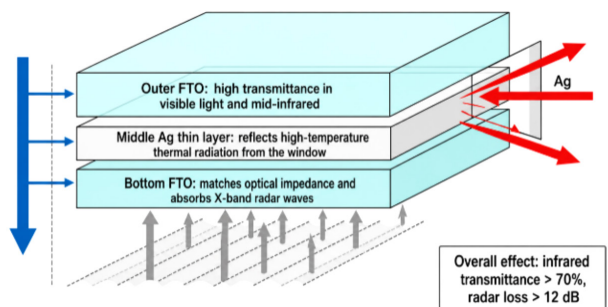


图 2 FTO/Ag/FTO兼容薄膜光谱响应示意图

仿真数据显示，该膜无需牺牲红外成像指标即可实现雷达隐身，但银层高温易氧化，高温工况稳定性不足。

3.3 红外隐身微纳超表面

超表面基于亚波长周期性单元实现精准光谱调控，可分为静态兼容型、VO₂ 热致相变型两类。静态超表面延续介质金属分层思路，通过图案化微单元压缩膜厚；通过发生金属 - 绝缘体可逆相变，低温低发射隐身、高温高发射散热，天然解决隐身与热管理冲突，但大面积光刻均匀性差，目前仅实验室小样品验证。根据相关研究结论，超表面最大优势为光谱可调范围宽，但曲面共形、高温稳定性是核心工程瓶颈^[4]。

4 红外隐身光窗设计准则与发展现状

4.1 设计准则

隐身窗口设计遵循红外性能一票否决原则，所有基底、膜系参数优先保证 3~5 μm、8~14 μm 高透射、低发射，其次优化雷达、可见光、激光透过指标：

(1) 红外 - 雷达兼容：采用 FTO/Ag/FTO 梯度介质金属膜，避免厚金属镜面反射，仿真证实可同步平衡两类波段性能^[2]；

(2) 红外 - 可见光兼容：稀土掺杂介质层修饰反射光谱，消除金属膜银灰色外观，匹配天空、地面可见光伪装；

(3) 红外 - 激光兼容：膜层嵌入 1060nm 谐振吸收层，抑制激光猫眼效应，不劣化中红外透光。

4.2 发展现状与趋势

当前发展现状为：

(1) 高温服役稳定性不足：ITO、Ag 导电层 600℃载流子失效，ZnS 基底 600℃出现疏空位吸收，MgO 陶瓷大尺寸成型工艺缺失，高超音速无成熟材料体系^[1,3,5]；

(2) 隐身与散热天然冲突：低发射膜抑制辐射换热，气动热持续累积造成窗口热畸变、成像漂移；VO₂ 相变区间窄，无法覆盖 300~1200K 全飞行热载荷^[4]；

(3) 曲面保形均匀性差：大曲率整流罩镀膜厚度离散，局部发射率差异大，形成离散红外热点，整机隐身一致性下降^[3]；

(4) 多指标相互制衡：提升雷达吸波性能会引入红外杂质吸收，优化可见光伪装易抬升高波发射，多参数同步最优设计难度极大^[2]。

随着技术的发展，未来发展趋势主要表现在：

(1) 超高温全电介质光子膜：完全去除金属导电层，依靠介质亚波长微结构实现红外选择性反射，耐受 1200~1800℃极端热载荷，从根源解决高温失效问题；

(2) 宽温域离子掺杂相变超表面：离子改性 VO₂ 拓宽相变温度区间 300~1000K，全飞行工况兼顾低温隐身、高温散热；

(3) 一体化共形隐身蒙皮：取消独立分离窗口，红外超表面与机身蒙皮一体成型，消除边框热桥红外热点；

(4) 多参数 AI 协同仿真优化：以红外性能为权重构建仿真算法，同步平衡红外、雷达、可见光指标，大幅缩短膜系迭代周期。

5 结语

红外无源探测是现代空战飞行器核心侦察威胁，外露光学窗口气动热辐射是整机隐身薄弱点。本文系统阐明隐身窗口热辐射基础理论，对比 ZnS、蓝宝石、MgO 三类红外陶瓷服役特性，分析 ITO 单层膜、FTO/Ag/FTO 兼容膜、微纳超表面三类改性技术：ITO 单层膜适配亚音速低温机载平台；FTO/Ag/FTO 梯度膜可同步实现红外 - 雷达兼容隐身；MgO 复相陶瓷是高超音速窗口最优基底材

料；微纳超表面具备自适应调控潜力但工程短板突出。当前高温衰减、曲面镀膜不均、多指标制衡三大瓶颈限制装备迭代，后续重点研发耐高温无金属光子结构、宽温域相变超表面，构建一体化多频谱隐身窗口体系，支撑下一代高速、高超音速光电装备研制。

参考文献：

- [1] 胡亚兰，刁训刚，郝维昌等. 基底温度对 ITO 薄膜红外发射特性的影响[J]. 红外, 2004(1): 21-24.
- [2] 王龙，汪刘应，刘顾等. 基于 FTO/Ag/FTO 构型的高透明红外隐身薄膜设计[J]. 物理学报, 2023,72(24):77-85.
- [3] 李家科，郝浩博，袁强等. ZnS 透明陶瓷的研究进

展及其应用[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 1082-1099.

- [4] 姜鑫鹏，杜特，马汉斯等. 光学微纳结构红外隐身技术研究进展 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 212-225.

- [5] 李恺，范金太，姜本学等. 窗口用红外透明陶瓷概述[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(3): 993-1005.

作者简介：巩硕华（2003.05-），男，汉族，山西晋中，硕士研究生在读，研究方向：航空光电成像。

* 通讯作者：远国勤（1982.03-），男，汉族，河南周口，博士研究生，研究方向：机载成像与测量。