

面向热敏感基底的低温高性能镀膜工艺研发

林柏竹 叶明

Development of a Low-Temperature, High-Performance Coating Process for Heat-Sensitive Substrates

LIN Bai-zhu, YE Ming

引用本文:

林柏竹, 叶明. 面向热敏感基底的低温高性能镀膜工艺研发[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0139

LIN Bai-zhu, YE Ming. Development of a Low-Temperature, High-Performance Coating Process for Heat-Sensitive Substrates[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0139

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高性能中波红外陷波滤光片设计与研制

Theoretical design and preparation of high performance MWiR notch filter

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 904 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0193>

具有高防冰性能的飞秒激光加工无涂层超疏水金属表面

High anti-icing performance of coating-free superhydrophobic metal surfaces via femtosecond laser processing

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1506 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0013>

生物荧光系统中多通道负滤光膜的研制

Development of multi-channel negative filter film in bioluminescence system

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1044 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0144>

机载宽温域CO₂激光器温控方法

Temperature control method of CO₂ laser operating in airborne wide temperature range

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 390 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0089>

星载低温光学系统热控设计与飞行验证

Thermal control design and flight test of a satellite-borne cryogenic optical system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 542 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0200>

机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计

Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 578 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0194>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

面向热敏感基底的低温高性能镀膜工艺研发

林柏竹, 叶明

(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对热敏感基底(如环氧胶粘接结构件)在镀膜过程中的温升控制难题, 本文提出一种低温电子束蒸发镀膜工艺。通过分段沉积-冷却循环的动态热管理策略, 系统研究了该工艺在金属反射膜(以银膜为研究对象)的应力、附着力及光学等核心性能方面的表现, 并结合环氧胶热失效阈值优化沉积流程。实验结果表明, 在基片温度严格受控的条件下, 该工艺使得反射膜残余应力显著降低, 界面附着力满足国家标准中最严苛的 03 严酷等级(GB/T 26332.4-2015/ISO 9211-4: 2012), 可见光波段平均反射率与传统连续镀膜工艺相当($>99\%$ @450–900 nm), 且基片温升始终低于环氧胶临界阈值。通过离子辅助沉积与介质层封装协同作用, 银膜抗氧化性与环境耐受性显著提升, 满足航天光学器件在极端多物理场耦合环境下的长寿命服役要求。进一步理论分析表明, 该工艺的热弛豫机制与结构调控原理具备跨场景适用性, 为低温敏感基材的高性能镀膜提供了兼顾航天可靠性及工业普适性的创新解决方案。

关键词: 电子束蒸发; 离子辅助沉积; 热敏感基底; 分段控温; 动态热管理策略; 金属反射膜; 膜层应力

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0139 CSTR: 32171.14.CO.2025-0139

Development of a Low-Temperature, High-Performance Coating Process for Heat-Sensitive Substrates

LIN Bai-zhu, YE Ming

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: To address the challenge of temperature rise control during the coating process for thermally sensitive substrates (e.g., epoxy adhesive-bonded structural components), this paper proposes a low-temperature electron beam evaporation coating process. Through a dynamic thermal management strategy featuring segmented deposition-cooling cycles, the performance of this process in terms of the core properties (i.e., stress, adhesion, and optical performance) of metallic reflective films—with silver films as the research subject—was systematically investigated, and the deposition process was optimized by integrating the thermal failure threshold of the epoxy adhesive. Experimental results demonstrate that under strictly controlled substrate temperature conditions, this process not only significantly reduces the residual stress of the reflective film, but also ensures that the interfacial adhesion meets the strictest Class 03 severity level specified in the nation-

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 智能轻型超大幅宽高分辨遥感卫星及数据处理技术(No. 2025JLJG0013GX); 长光卫星技术股份有限公司光学镀膜均匀性修正程序开发项目(No. ZYGAFKY02024101002)

Supported by Intelligent Lightweight Ultra-Wide Swath High-Resolution Remote Sensing Satellite and Data Processing Technology (No. 2025JLJG0013GX); Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. Optical Coating Uniformity Correction Procedure Development Project (No. ZYGAFKY02024101002)

al standard (GB/T 26332.4-2015/ISO 9211-4:2012), the average reflectivity in the visible wavelength range is comparable to that of the traditional continuous coating process ($>99\% @ 450-900 \text{ nm}$), and the substrate temperature rise remains consistently below the critical threshold of the epoxy adhesive. Through the synergistic effect of Ion-Assisted Deposition (IAD) and dielectric encapsulation, the oxidation resistance and environmental durability of the silver film are significantly improved, satisfying the long-term service requirements of aerospace optical devices under extreme multi-physics field coupled environments. Further theoretical analysis reveals that the thermal relaxation mechanisms and structural regulation principles of this process exhibit cross-scenario applicability, providing an innovative solution for high-performance coating of low-temperature-sensitive substrates that balances aerospace reliability and industrial universality.

Key words: electron beam evaporation; ion-assisted deposition; thermally sensitive substrates; segmented temperature control; dynamic thermal management strategy; metallic reflective coatings; coating stress

1 引言

在精密光学系统中,反射镜作为核心组件,其表面金属反射膜的性能直接决定系统效能。为防止镀膜后粘接过程引入面形畸变,航天级光学反射镜通常采用“带结构镀膜”方案,即镜体与背板通过环氧胶粘接。然而,环氧胶在高温下会发生失效,可能导致反射镜变形甚至胶层脱落。现有实验数据表明,传统连续式电子束蒸发镀膜工艺在薄膜沉积过程中,因能量持续输入导致基片累积温升普遍超过 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 甚至更大(以银反射膜为例),这种热效应对环氧胶粘接界面构成严峻挑战——当温度接近或超过胶粘剂玻璃化转变温度时,将引发内应力释放、蠕变变形甚至界面脱粘,最终造成反射镜面形精度恶化^[1-3]。

为突破热累积与膜层质量之间的制约,现有技术路径主要面临两种困境:一是采用更大腔体尺寸的镀膜设备,通过增加热辐射表面积提升散热效率,有效减少热量积累。但此类设备成本显著增加,目前市场上腔体直径大于 1.80 m 的镀膜设备价格高昂。二是通过减小材料沉积速率以及电子枪束流、离子源电压、电流等降低沉积温度的方法虽能减缓基片温升,但往往以牺牲金属膜结晶质量、增加表面粗糙度为代价^[4-6],导致反射率与光谱稳定性难以满足航天级光学系统要求。因此,如何在确保环氧胶工作温度阈值的前提下,同步实现膜层致密性与光学性能的优化,成为突破复合结构反射镜镀膜过程中性能稳定性的关键

技术瓶颈。

为此,本研究提出一种分段控温镀膜工艺。该工艺通过动态调控沉积厚度增量与基片冷却时序,旨在抑制热累积的同时,优化薄膜生长的动力学条件,最终在环氧胶安全工作温度范围内制备出兼具低应力、高附着力与优异光谱性能的金属反射膜,为航天器及高可靠性光学系统提供了创新的工艺解决方案。

2 镀膜系统核心原理与热管理关联

本研究所用镀膜系统集成了电子束蒸发、离子源辅助沉积、精密温控及基片旋转等核心模块。其工作原理与本研究提出的动态热管理策略直接相关,下文将重点阐述与热源产生及控制密切相关的核心机制。

2.1 核心热源: 电子束蒸发原理

电子束蒸发是本研究中的主要沉积方式与核心热源。其原理是通过高能电子束(能量通常为数千电子伏特)轰击靶材,使其局部瞬间达到极高温(可超过 $3000 \text{ }^\circ\text{C}$)并蒸发,随后气态材料在真空环境中沉积到基片表面形成薄膜^[7]。在此过程中,电子束的动能不仅转化为靶材的蒸发热,其残余能量及沉积原子携带的动能亦是导致基片温升的主要因素。膜厚由石英晶振仪实时监控,通过反馈调节电子枪功率以控制蒸发速率。

2.2 辅助热源与性能调控: 离子源辅助沉积原理为提升薄膜致密度与附着力^[8-10],本研究引入离子源辅助沉积。其核心过程包括:

a. 离子预处理:

镀膜前, 通入反应气体(如氩气、氧气)产生高能离子束, 轰击基片表面以清除污染物并活化表面。

b. 离子辅助沉积:

在蒸发沉积的同时, 以较低能量的离子束持续轰击生长中的薄膜。离子轰击通过动量传递效应, 可增加沉积原子的表面迁移率, 从而促进形成致密、低应力的膜层结构。

需要着重指出的是, 离子轰击在优化薄膜性能的同时, 其能量会直接传递给基片与生长中的薄膜, 因而构成了沉积过程中的另一个重要热源。因此, 电子束功率与离子源参数的协同控制, 是实现有效热管理的关键。

2.3 热管理基础: 温度监测与基片处理

基片温度通过设备自带的热电偶进行监测。为应对热敏感基底, 系统配备了强效水冷循环系统, 可在沉积间歇快速导走热量。基片均匀旋转确保了膜厚一致性, 同时也利于热场的均匀分布。

3 温度控制策略设计

3.1 初始温度设定

在分段控温电子束蒸发镀膜工艺中, 初始温度的设定需综合考虑材料热力学特性及工艺可重复性。本研究将初始温度统一设定为 30 °C(温度控制器示数), 其核心依据源于以下多维度分析与实验验证:

a. 材料热力学兼容性

针对金属靶材(如 Al、Ag)与光学基片(如玻璃、Si), 适当提高初始温度能有效缓解热膨胀系数差异带来的界面应力^[11]。以一个典型的应用场景为例——在玻璃基底上沉积 Al 薄膜, 通过建立热-力耦合模型, 模拟对比了从环境温度(22 °C)与本工艺设定基准温度(30 °C)两种初始条件开始沉积后的基片面形与应力状态, 如图 1 所示。

结果显示, 两种初始条件下的面形精度(PV 与 RMS 值)差异在纳米级以内(PV 值分别为 1.7e-11 与 1.72e-11, RMS 值分别为 3.58e-6 与 3.57e-6)。这一现象可从热应力产生的物理机制进行解释: 薄膜沉积过程中的热应力, 主要源于膜层与基底热膨胀系数不匹配, 在从沉积温度冷却

至室温过程中产生的应变约束^[12-13]。对于本研究中的特定材料体系(玻璃/Al)和给定的沉积总温升, 初始温度 8 °C 的差异, 相对于数百摄氏度的沉积温升而言, 占比很小, 因此对最终冷却后的总热应变(进而表现为宏观面形)影响有限。

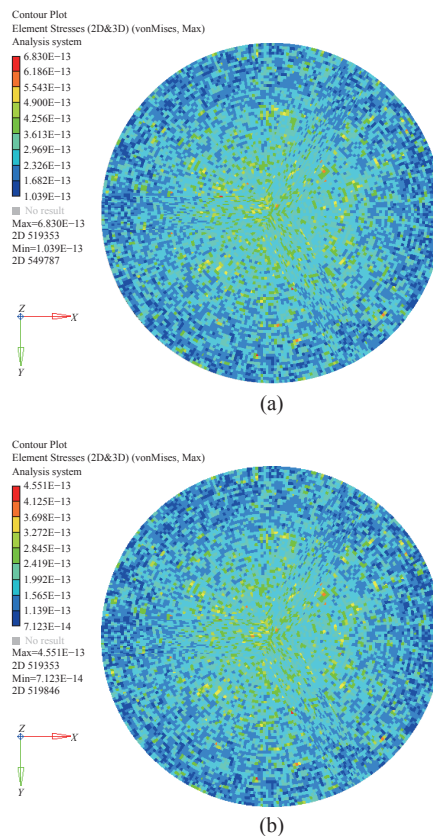


图 1 初始温度分别为(a)22 °C 和(b)30 °C 下的表面应力云图

Fig. 1 Contour plots of surface stress at initial temperatures of (a) 22 °C and (b) 30 °C

然而, 这一看似微小的初始温度差异, 在动态沉积过程中对热应力的产生与演化具有关键影响。因此, 将初始温度设定并稳定在 30 °C, 其核心意义远不止于改善最终静态面形, 更在于实现对工艺过程的有效控制。这是一种主动的热管理策略: 通过在沉积起始阶段提供一个更“友好”的热环境, 能够缓冲沉积初期的热冲击、压缩高温暴露的风险窗口, 从而在整个动态过程中更有效地抑制热应力累积, 最终显著增强薄膜在复杂热历程下的结构完整性与界面可靠性。

b. 工艺标准化与设备协同

从工艺标准化的视角出发, 将初始温度统一设定为 30 °C 是实现高度可重复、稳定镀膜工艺

的关键。具体而言,首先,确保了温升轨迹的一致性。使整个工艺过程中的温度变化曲线具有高度的可预测性和可比性,这是获得批次间薄膜性能一致的核心保障。其次,该设定主动优化了温度控制窗口。30 °C 的起点显著低于环氧胶等关键材料的温度阈值,为沉积过程中必然产生的温升预留了充足的安全裕度。最后,显著缓解了温度监测的系统性误差影响。在实际工艺中,特别是使用离子源辅助时,热电偶测量的温度与基片表面的真实温度可能存在差异(因离子能量直接作用于基片而非热电偶)。设定较低的初始温度意味着在温升过程的早期,这种测量误差的绝对值及其对最终温度预测的影响被最小化。如果初始温度过高,同样的测量误差可能导致基片表面实际温度在工艺后期更易意外接近或超过安全阈值。

因此,30 °C 的设定通过提供一个安全、可控且受测量误差干扰最小的起点,最大程度地保证了工艺参数的稳定性和结果的可重复性。这一定量化的初始条件,是构建标准化、高可靠性电子束蒸发镀膜工艺的关键要素。

3.2 沉积间隔调控

在涉及环氧胶(本研究以光学元件常用的环氧胶 3M-EC 2216 为例)连接组件的结构设计中,从结构安全冗余考量,将本研究中的温度耐受阈值设定为 60 °C。传统连续镀膜方式易因累积热效应导致基片超温失效,本研究以典型的航天光学系统中常用的高反射银(Ag)膜膜系为例(其基本结构为基底(Sub)/介质连接层/Ag 反射层/介质保护层),提出分段沉积间隔调控策略,通过实验确定关键介质层的温升规律,设计镀膜-冷却循环时序,确保全程温度低于环氧胶阈值。

传统连续镀膜工艺中,电子束蒸发源的高能轰击与材料沉积放热导致基片温度持续上升。以目标膜系为例,连续镀膜时基片温度峰值可达 93.52 °C,远超环氧胶耐受极限,如图 2 所示。因此,需通过沉积间隔调控实现以下目标:

- 1) 单层材料温升建模: 量化关键介质层在单位厚度沉积时的温升速率;
- 2) 分段冷却时序设计: 根据温升阈值划分镀膜-冷却间隔周期;
- 3) 完整膜系工艺验证: 确保总镀膜温度全程 ≤ 60 °C。

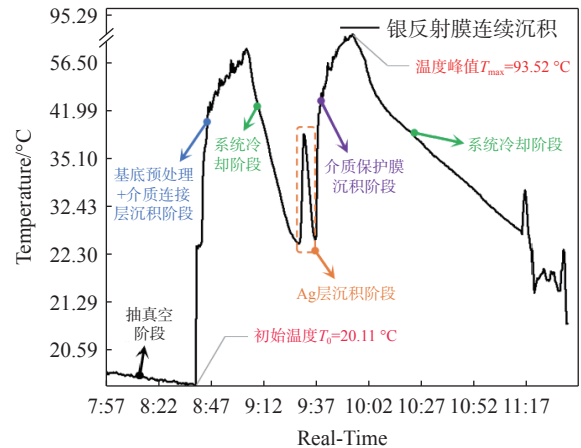


图 2 连续镀膜过程实时温度监测曲线

Fig. 2 Real-time temperature monitoring curve of the continuous coating process

3.2.1 单层介质膜温升规律实验

本研究选取光学镀膜领域常用的两种高低折射率材料,为明确 SiO₂ 与 TiO₂ 两种材料的温升特性,首先通过单层镀膜实验量化其温度累积效应。实验在恒温恒湿厂房中进行(22 °C、40%),采用耐高温数据储存测温模块与耐高温热电偶实时监测温度变化。

本研究旨在确定沉积厚度接近温度阈值时的临界值,为此,对于 SiO₂ 介质层,设置四组对照实验,沉积厚度分别为 75 nm、90 nm、120 nm 和 135 nm。实验结果显示,当沉积厚度达到 120 nm 时,基片温度从 25.66 °C(此时温度控制器示数为 30 °C)升至 57.81 °C(耐高温数据储存测温模块实际测得的温度数据)。数据显示即使在相同的设备显示温度下,实际初始温度也存在约 ± 1.3 °C 的轻微波动。在离子源持续辅助沉积过程中,观察到延长离子辅助时间会加剧温升。虽然实际温度变化可能存在非单调性,但为简化建模,本工作将其温升规律视为单调递增开展分析。因此 SiO₂ 的温升速率约为 0.27 °C/nm,如图 3(a)所示。这一温和的温升特性主要得益于 SiO₂ 以升华的方式进行沉积。

相较之下, TiO₂ 的温升行为显著不同。设置四组沉积厚度分别为 30 nm、33 nm、35 nm 和 40 nm,实验发现,仅连续镀制 30.0 nm 时,基片温度即从初始的 24.63 °C(此时温度控制器示数接近 30 °C)升至 59.34 °C(耐高温数据储存测温模块实际测得的温度数据),温升速率高达 1.16 °C/nm,如图 3(b)所示。这一现象与 TiO₂ 蒸发焓较高、

且镀膜过程需要高温融化成液态后进行蒸发的方式密切相关, 其热量在基片表面快速积聚, 导致温升速率约为 SiO_2 的 4.3 倍。

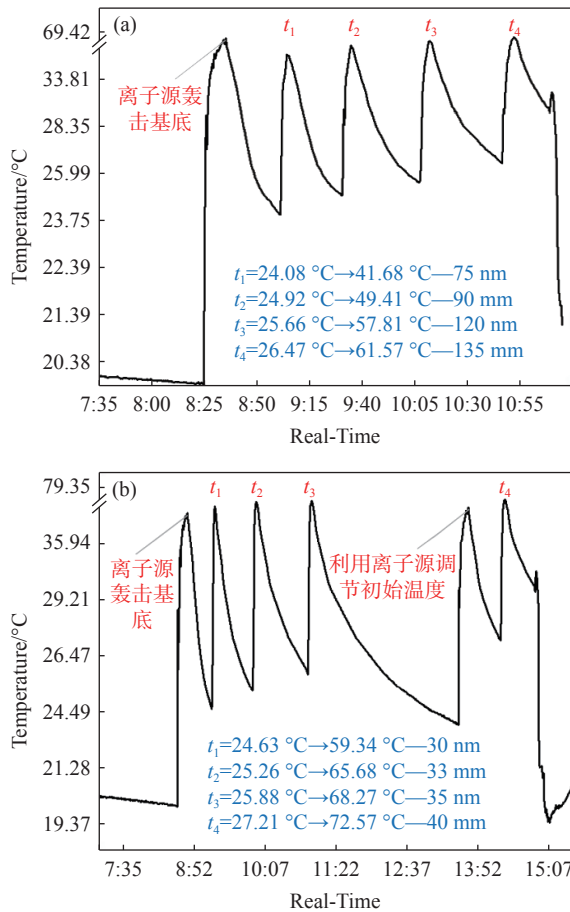


图 3 单层介质膜镀膜实时温升曲线: (a) SiO_2 和 (b) TiO_2 的温升-厚度关系

Fig. 3 Real-time temperature rise as a function of film thickness during the deposition of single-layer dielectric films: (a) SiO_2 and (b) TiO_2

上述差异揭示了材料性质对镀膜温控的关键影响。 SiO_2 的较低蒸发功率与其蒸发沉积方式使其具备较低的温升表现, 而 TiO_2 的高蒸发功率与其蒸发沉积方式则显著加剧了温升效应, 这一发现为后续分段策略的设计提供了定量依据。

3.2.2 沉积间隔调控策略设计

基于单层介质膜温升规律实验, 本研究明确了 SiO_2 与 TiO_2 在环氧胶温度阈值下的最大连续沉积厚度: 即温控表示数显示的初始温度为 30°C 时, SiO_2 可连续镀制 120 nm, 而 TiO_2 则不能超过 30 nm。根据银反射膜膜系中 SiO_2 与 TiO_2 的理论设计厚度, 需差异化设计沉积间隔策略。

若材料理论膜厚超过其单层最大连续沉积厚

度, 则需启动分段镀膜-冷却循环。每段沉积后, 基片温度需通过热辐射与水冷系统回降至 30°C 以下, 避免热量累积。同时, 冷却过程中维持真空度 $\leq 5 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 防止界面污染。对于 SiO_2 层, 鉴于理论设计膜厚远低于环氧胶温度阈值内所允许的最大沉积厚度, 因此可进行单层连续沉积。对于 TiO_2 层, 结合理论设计膜厚, 需采用分段策略: 可每镀制 30.0 nm 后暂停, 待冷却至 30°C 再开始下一层的沉积。每层厚度可根据总膜厚需求进行动态调整, 保持分段温控逻辑不变。

3.3 膜层性能关键指标表征

分段控温镀膜工艺与传统连续镀膜工艺的核心差异在于其引入了间歇式沉积机制。相较于传统工艺的连续性成膜过程, 分段策略通过周期性暂停镀制(如每沉积 26 nm 后冷却复位)实现温度精确控制, 但这种非连续沉积可能导致膜层界面结合强度下降, 理论上面临层间结合力弱于连续镀膜的风险。为系统评估该工艺的可行性, 需重点验证两大核心指标: 其一, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 表征膜层内部结构, 并通过胶粘法评估膜层界面结合力; 其二, 结合分光光度计检测其目标波段内的反射光谱, 确保分段镀膜工艺在温控优势下不牺牲薄膜的功能性表现。

3.3.1 膜层内部结构表征与界面结合力验证

为评估分段控温镀膜工艺对膜层结合力的影响, 首先通过 SEM 电子显微镜对膜层横截面进行高分辨率成像, 如图 4 所示为在薄硅片上连续/分段沉积的单层 SiO_2 和 TiO_2 薄膜的内部结构。

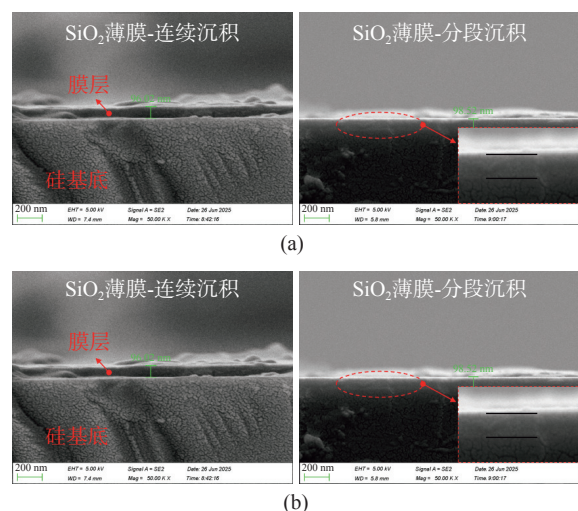


图 4 薄膜内部结构: (a) SiO_2 薄膜和 (b) TiO_2 薄膜

Fig. 4 Internal structure of thin films: (a) SiO_2 and (b) TiO_2

选择薄硅片进行横截面微观表征与结合力测试, 主要因其机械性能优异, 易于精密切割, 可获得平整、无损伤的断面, 是确保扫描电子显微镜能够对膜层内部结构、厚度及膜-基界面进行高分辨率真实观测的必要前提。SEM 图像显示, 分段沉积形成的膜层内部结构致密且连续, 未观察到明显的界面分层(如虚线选中区域所示)。这表明, 尽管采用间歇式镀膜策略, 但通过精确的温控复位, 膜层在多次沉积过程中仍保持了良好的结构一致性, 未因温度波动或沉积中断导致界面缺陷。

进一步通过胶粘法检测界面的结合强度。如图 5 所示为按照 GB / T 26332.4-2015 国家标准中的 03 严酷等级, 即以疾速(≥ 25 mm/s)的胶带拉起速率, 通过分段控温工艺沉积的单层 SiO_2 和 TiO_2 薄膜经胶粘前后的显微镜照片。两种材料的薄膜经胶带剥离后膜层表面均无脱落痕迹, 粘接区域边缘完整, 显微镜下观察未发现脱膜或剥离现象。检测结果证明, 分段控温镀膜策略未对界面结合力产生负面影响, 附着力满足使用要求。

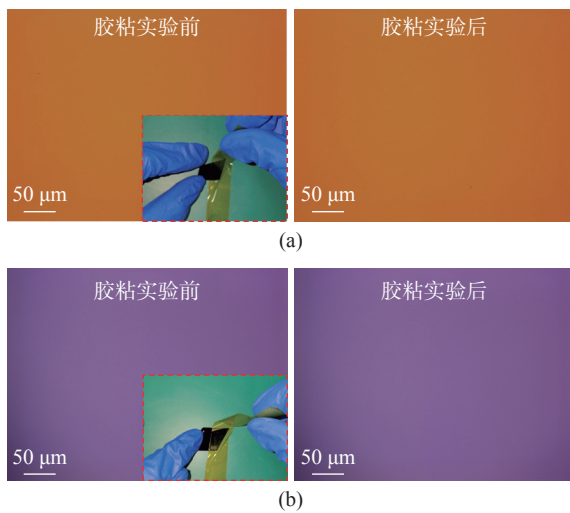


图 5 膜层牢固度检测: (a) SiO_2 薄膜和 (b) TiO_2 薄膜
Fig. 5 Adhesion strength test of the film layers: (a) SiO_2 and (b) TiO_2 thin films

膜层内部结构与力学实验的综合分析表明, 分段控温镀膜工艺通过温控复位抑制了层间热应力积累, 在保证膜层功能性的同时, 维持了与传统工艺相当的界面结合强度, 验证了该工艺在机械性能方面的可靠性。

3.3.2 膜层光学性能验证与功能性评估

为确认分段控温镀膜工艺对薄膜光学性能的保持能力, 采用紫外-可见分光光度计(LAMDA

1050+)对镀膜样品进行光谱分析。实验对象为在 K9 玻璃表面镀制的高反射率银膜, 目标在 450–900 nm 波段实现高反射特性($\geq 95\%$)。选用 K9 玻璃作为基底, 是因其具有优异的光学表面质量与稳定的理化性能, 符合光学薄膜领域的标准测试规范, 可确保光谱数据的准确性与可比性。

仿真光谱如图 6 中蓝色线条所示, 在 450–900 nm 波段内平均反射率为 99.071%(单点峰值达 99.358% @ 601.27 nm), 满足优于 95% 的指标要求, 表明设计合理性。分段控温镀膜工艺镀制的样品反射率如图中橙色线条所示, 在目标波段内平均反射率为 99.08%。关键波长如 532 nm、650 nm 的反射率分别达到 99.29% 和 99.32%, 与理论值高度吻合。

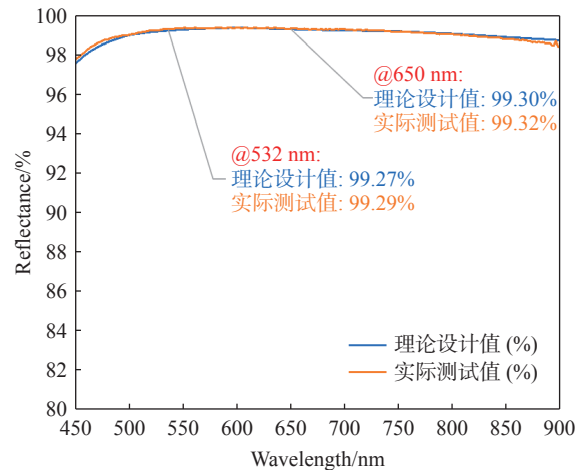


图 6 理论设计/实际镀制反射光谱对比
Fig. 6 Comparison between the theoretically designed and experimentally deposited reflective spectra

实测反射光谱与仿真结果的高度匹配表明, 分段控温策略通过逐层沉积后复位至低温, 有效抑制了膜层因热累积导致的微观形变或晶格畸变, 从而避免了折射率漂移或散射损耗增加。分段控温镀膜工艺在实现精准温控的同时, 未对膜层光学功能产生负面影响, 甚至因热应力控制优化了波段均匀性。结合膜层结构完整性验证(见 3.3.1), 该工艺在功能性镀膜领域具备显著应用潜力。

4 综合性能验证与航天工程应用研究

4.1 温升抑制效果验证

温升控制是电子束蒸发镀膜工艺的核心挑战之一, 尤其针对航天光学元件对热敏感基底(如环

氧胶粘接的复合结构)的严苛要求。本节通过对传统连续镀膜工艺与分段控温工艺的基片温度演化规律,验证分段策略的温控效能。

4.1.1 基片温度演化特性对比

在沉积参数与总膜厚均相同条件下,采用热电偶实时监测两种工艺的基片温度变化。传统连续镀膜工艺下的基片温度演化曲线如图 2 所示,基片温度随沉积时间呈上升趋势,初始温度为 20.11 °C,沉积完成后峰值温度高达 93.52 °C。高温主要源于电子束持续轰击蒸发源的热辐射累积及膜层生长放热效应。

图 7 所示为分段控温镀膜工艺下基片温度演化曲线。采用“沉积固定膜厚→暂停冷却至 30 °C”的循环策略,每段沉积期间升温速率与传统工艺一致,如 3.2.1 和 3.2.2 节中内容所示,但通过间隔冷却将各段峰值温度严格限制在 60 °C 以下。其中, SiO₂ 层按照理论设计膜厚连续沉积, TiO₂ 则采取单层厚度 ≤ 30.0 nm 进行沉积。实测最高温度为 54.59 °C,全程基片温度波动范围为 27.89~54.59 °C,显著降低热暴露强度。

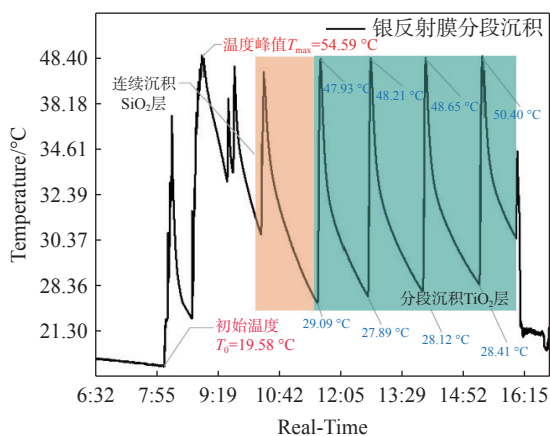


图 7 分段控温镀膜过程实时温度监测曲线

Fig. 7 Real-time temperature monitoring curve for the film deposition process under segmented temperature control

4.2 分段控温/连续镀膜工艺双轨对比

为系统评估分段控温镀膜工艺的工程适用性,从膜层的力学性能及光学性能两个维度开展两种工艺的对比实验,揭示分段控温策略对膜层综合性能的调控机制。

4.2.1 膜层残余应力与界面附着力对比

a、残余应力对比分析

为探究分段控温镀膜工艺对膜层力学性

能的调控作用,采用基片曲率法(基于 Stoney 公式)^[14-16]对两种工艺的残余应力进行量化分析。镀膜过程中残余应力的控制对保证反射镜面形精度、抑制膜层开裂、提升界面耐久性至关重要,其源于沉积热梯度与膜基热膨胀失配的耦合作用。

薄膜应力的 Stoney 公式可表示为:

$$\sigma = \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s)t_f} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right), \quad (1)$$

其中, E_s 为基片的杨氏模量, ν_s 为基片的泊松比, t_s 为基片的厚度, t_f 为薄膜厚度, R_0 和 R 代表镀膜前后基片的曲率半径。

实验使用 Ø100 mm 的薄硅片进行镀膜,薄硅片对应力更敏感,曲率变化易测量。如图 8 所示为使用 Lumphoscan(420 XL)测量两种工艺下镀膜前后的曲率变化。实验数据显示,传统连续沉积工艺的薄膜曲率半径由 69 263.6 mm 变化至 55 751.6 mm,因此残余应力约为 -106.1 MPa,表现为压应力,其成因可归结于电子束持续轰击引发的热累积效应及膜层-基底热膨胀系数差异导致的晶格畸变。而分段工艺通过沉积间隔的强制冷却,将残余应力显著降低至 -63.6 MPa(曲率半径由 111 899.9 mm 变化至 90 601.6 mm),降幅达 40.1%,表明分段策略有效中断了热应力传递路径,抑制了膜层内应力逐段叠加。这一应力抑制机制直接削弱了界面剪切应力集中效应,为膜层抗疲劳性能提供保障。

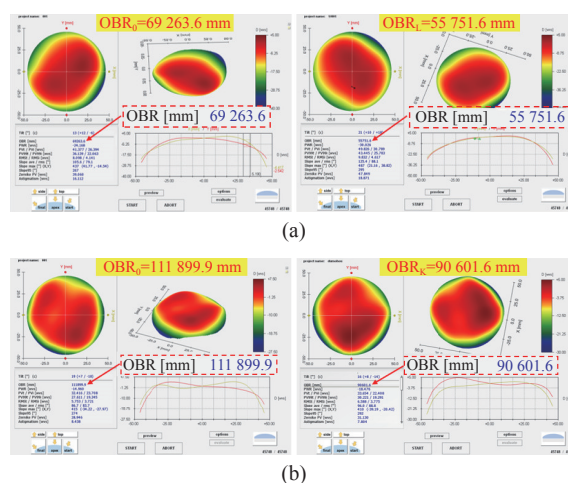


图 8 镀膜前后基片曲率测量: (a) 连续和 (b) 分段镀膜工艺

Fig. 8 Substrate curvature measurements before and after film deposition: (a) continuous and (b) multi-step deposition processes

b、膜层附着力对比分析

进一步通过胶粘法验证膜层结合强度差异,测试膜层为分别通过两种工艺制备的银反射膜,并将国家标准中(GB/T 26332.4-2015/ISO9211-4:2012)的胶带纸更换为粘性更强的聚酰亚胺胶带。使用宽度为 12 mm~13 mm、约 25 mm 长的聚酰亚胺胶带贴于薄膜表面,手指按压保证胶带与薄膜之间无缝隙,垂直迅速拉扯。将数显式推拉力计(SH-500)连接于胶带另一侧,使用拉力计峰值模式记录胶粘过程中的最大拉力。胶粘试验装置如图 9 所示,分别为满足国标测试标准的拉力计、尺寸满足要求的聚酰亚胺胶带、粘接方式、以及拉力计测试结果。

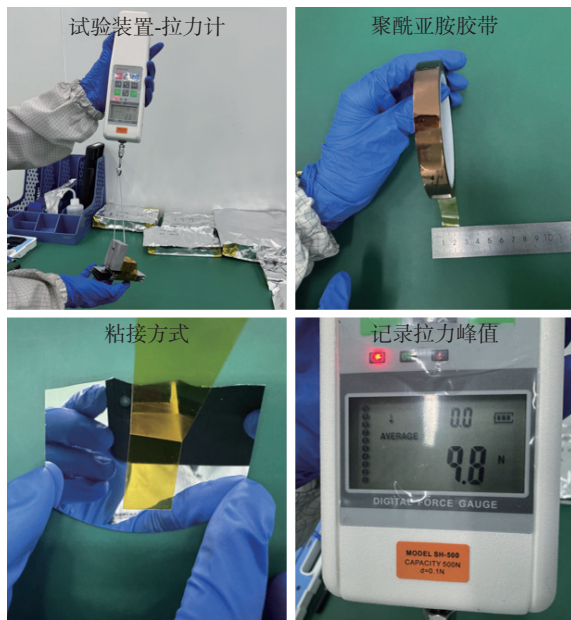


图 9 胶粘试验装置图

Fig. 9 Schematic of the adhesion test apparatus

胶带剥离测试(180°, 拉力 ≥ 9.8 N)结果表明,分别采用两种工艺制备的试样,其膜层表面均未出现任何脱落痕迹或局部剥离现象,粘接区域边缘保持完整。该结果证实两种工艺获得的膜-基界面结合力处于同等水平,满足应用要求的附着力等级。此现象表明,分段控温策略通过其动态热管理机制有效优化了沉积过程中的热历史,在成功抑制基体温升的同时,维持了膜-基界面结合力的本征强度。

4.2.2 光学性能评价对比

为验证分段控温策略对光学功能性的潜在影响,对分别使用两种工艺镀制的银反射膜样品在 450~900 nm 目标波段内进行反射光谱分析,如

图 10 所示。实验数据显示,两组工艺实验片的反射率曲线高度重合:在 532 nm(绿光)、650 nm(红光)及 800 nm(近红外)特征波长处,分段控温工艺的反射率分别为 99.29%、99.32% 和 99.07%,与连续镀膜工艺(99.27%、99.33%、99.07%)差异在 0.2% 以内。这一结果证明,分段控温工艺通过精准的沉积-冷却循环调控,维持了目标波段反射率的稳定性,为航天光学系统抗热致性能衰减提供了工艺基础。

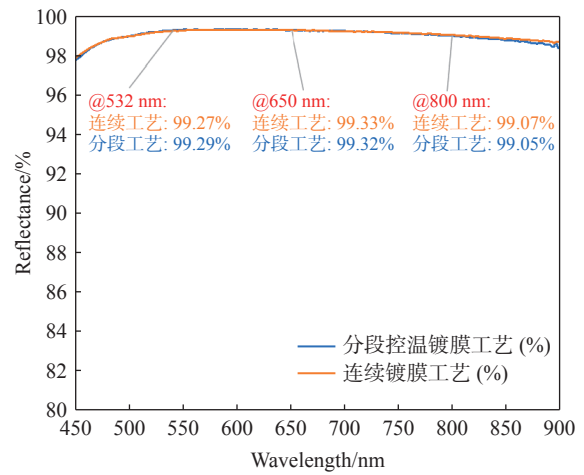


图 10 分段/连续工艺下反射光谱对比图

Fig. 10 Comparison of the reflective spectra under segmented and continuous thin-film deposition processes

双轨对比证实,分段控温策略通过热-结构协同调控,在严格温升约束下实现了与传统工艺等效的光学性能,保证了膜层在极端环境下的功能可靠性。

4.3 航天环境适应性测试

航天光学器件的服役可靠性高度依赖镀膜组件在极端多物理场环境下的性能稳定性。本节通过热-力-湿综合耐受性验证与低地球轨道(LEO)原子氧侵蚀效应评估两类典型工况,系统性对比分段控温工艺与连续镀膜工艺的膜层环境适应性差异。

4.3.1 多物理场耦合环境模拟:热-力-湿综合耐受性验证

依据《GB/T 26332.4-2015 光学和光子学 光学薄膜 第 4 部分:规定的试验方法》,对两种工艺镀制的银反射膜样品施加多物理场耦合载荷:1) 高低温循环实验(-30 °C~90 °C/保持 2 h,升温速率为 3~4 °C/min, 9.5 个循环周期);2) 振动实验(正

弦扫描振动: XYZ 三轴各 76 s, 随机振动: XYZ 三轴各 300 s, 12 Grms); 3) 恒定高温试验(63 °C/35% RH/16 小时); 4) 温湿度试验(50 °C/97%RH/24 小时), 试验前后光谱变化及脱膜情况如表 1 所示。

表 1 多物理场耦合环境模拟试验前后光谱变化和膜层情况汇总

Tab. 1 Summary of spectral changes and film condition before and after the multi-physics coupled environment simulation test

	连续镀膜工艺(样品编号: 1#, 2#, 3#, 4#)		分段控温镀膜工艺(样品编号: 5#, 6#, 7#, 8#)	
	ΔR	脱膜情况	ΔR	脱膜情况
高低温循环实验	0.11%	否	0.08%	否
振动实验	0.08%	否	0.04%	否
恒定高温试验	0.11%	否	0.10%	否
温湿度试验	0.12%	否	0.12%	否

经检测, 经历上述多物理场耦合环境模拟试验的分段控温与连续镀膜工艺样品, 膜层均未发生脱膜或结构损伤现象。反射光谱分析表明, 两者在目标波段(450–900 nm)的平均反射率变化量(ΔR)处于同一量级, 仅呈现符合设计预期的微量光谱漂移特征, 证实分段控温工艺在极端环境下的膜层功能稳定性与传统工艺等效。

4.3.2 原子氧侵蚀效应专项评估: 低地球轨道(LEO)环境模拟实验

本节专项评估的目的在于依据国家标准方法, 定性与半定量地考察经分段控温工艺制备的薄膜在模拟原子氧环境下的性能保持能力, 并与传统工艺进行对比。

为全面评估两种工艺在复杂空间环境中的抗原子氧侵蚀能力, 本研究模拟了 535 km(等效 24.6 年)与 500 km(等效 1 年)+411 km(等效 4 年)两种轨道工况叠加条件, 通过射频等离子体源(能量 5 eV, 通量 5.76×10^{21} AO/cm², 剂量率 0.95×10^{16} AO/cm²·s)对样品进行累计 169 h 辐照(第一阶段 55 h 模拟 535 km, 第二阶段 114 h 模拟 500 km+411 km 复合暴露), 等效主镜侧面迎风(攻角 90°)在 340 km 轨道服役 8 年的原子氧通量。上述轨道高度与等效年限的对应关系、原子氧能量、剂量率及等效暴露时间等核心考核参数的设计与计算, 均严格依据现行国家标准《GB/T 40519—2021 航天器原子氧防护设计要求》中规定的模拟

试验方法与环境等效模型进行。

图 11 展示了各阶段膜层表面形貌的演变情况: (a)为原子氧侵蚀考核试验前的初始状态; (b)为经历第一阶段原子氧侵蚀后的表面形貌; (c)为在第一阶段基础上叠加第二阶段侵蚀后的最终表观状态。实验中, 1#和 2#实验片采用分段控温工艺镀膜, 3#和 4#实验片则采用连续镀膜工艺, 其余试样作为对照组。表观形貌与反射光谱分析表明, 两种工艺的银金属层均未发生脱膜、腐蚀或氧化斑点, 如图 11 所示。证实外层介质保护膜有效阻隔了原子氧对银金属层的直接侵蚀, 且两种工艺的样品表现出同样的抗原子氧侵蚀效果。其中, 6#实验片表面膜层损伤系粘贴过程中人为操作失误所致, 而非原子氧考核试验造成。

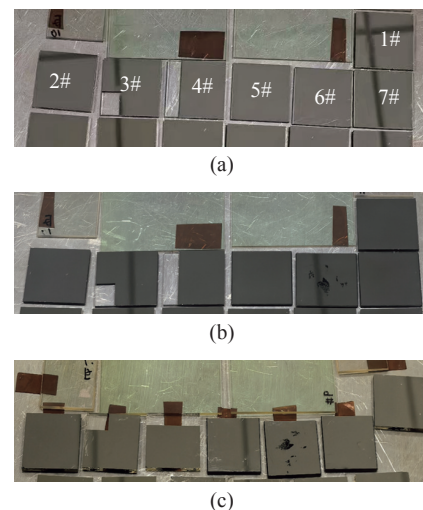


图 11 各阶段膜层表面形貌: (a) 试验前; (b) 第一阶段试验后; (c) 第二阶段试验后

Fig. 11 Surface morphology of the film at different stages: (a) before the test; (b) after the first stage of the test; (c) after the second stage of the test

如图 12 所示为两种考核工况叠加试验前后的光谱对比曲线, 反射光谱在 450–900 nm 波段均呈现轻微红移现象, 理论分析其原因为原子氧作用于介质层氧空位, 填补缺陷后导致最外层介质层 TiO₂ 折射率升高, 进而引发相长干涉条件偏移。尽管如此, 两种工艺的平均反射率衰减量(ΔR)均小于 1.0%(分段: 1#(0.63%)、2#(0.65%); 连续: 3#(0.29%)、4#(0.70%)), 且在 650 nm 特征波长处反射率保留率均大于 97%, 表明膜系设计通过介质层优化实现了对银金属层的双重防护(物理屏蔽+化学钝化)。

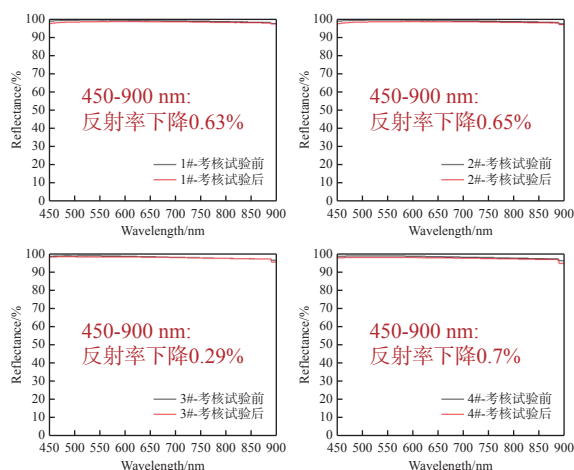


图 12 原子氧试验前后反射光谱对比曲线

Fig. 12 Comparison of the reflective spectra before and after atomic oxygen exposure tests

原子氧多工况模拟实验证实,两种工艺均通过介质层优化实现了对银金属膜的有效防护(无脱膜/腐蚀),且反射率衰减量与红移效应处于可控范围内,满足长寿命航天光学系统的在轨性能稳定性需求。因此,分段控温镀膜工艺可为后续高可靠性光学载荷研制提供工艺优选路径。

5 结 论

本研究成功研发的分段控温电子束蒸发镀膜

参考文献:

- [1] CÔTÉ P, DESNOYERS N. Thermal stress failure criteria for a structural epoxy[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8125: 81250K.
- [2] <https://multimedia.3m.com/mws/media/5941180/3m-scotch-weld-epoxy-adhesive-ec-2216-b-a.pdf?&fn=EC-2216BA.pdf>(请补充完整本条文献信息).
- [3] 沈凯. 低温冷光学反射镜的支撑技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
SHEN K. *Research on support technology of cryogenic optical mirror*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).
- [4] 李晓雪, 黄玲程, 郝永芹. 离子束辅助电子束蒸镀 H4 膜工艺及其抗激光损伤特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 1931001.
LI X X, HUANG L CH, HAO Y Q. Preparing H4 films and their laser damage resistance deposited using ion-beam-assisted electron beam evaporation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 1931001. (in Chinese).
- [5] 王英剑, 李庆国, 范正修. 电子束、离子辅助和离子束溅射三种工艺对光学薄膜性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(9): 841-844.
WANG Y J, LI Q G, FAN ZH X. Property comparison of optical thin films prepared by E-beam, ion assisted deposition and ion beam sputtering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(9): 841-844. (in Chinese).
- [6] 李兆营. 蒸发速率对硅衬底电子束蒸发钛薄膜性能的影响[J]. *电镀与涂饰*, 2023, 42(1): 31-34.
LI ZH Y. Effect of evaporation rate on properties of Ti film prepared by electron beam evaporation on silicon wafer[J]. *Electroplating & Finishing*, 2023, 42(1): 31-34. (in Chinese).

工艺,通过“沉积-冷却”循环策略实现了基片温升的有效抑制,同时确保了膜层综合性能与传统连续镀膜工艺的一致性。试验表明,分段控温工艺在严格限制基片温度波动范围的前提下,银反射膜的光学性能(目标波段反射率、光谱稳定性)及力学性能(界面结合强度、环境耐受性)均与传统工艺等效,且未因间歇性沉积引入界面缺陷或功能衰减。针对航天应用场景的极端环境考核证实,控温工艺镀膜组件在长期热暴露、力学振动及空间侵蚀条件下,膜层完整性、光学反射率等关键指标均满足航天光学系统在轨服役的严苛要求。

尽管当前试验主要针对航天级银反射膜展开,但分段控温工艺的核心逻辑——通过动态热管理抑制温升并维持膜层性能——具有跨场景的理论可行性。对于地面光学器件,其镀膜过程同样面临热累积导致的基底热变形等挑战。基于本工艺的热弛豫机制与结构调控原理,可推测其在解决此类问题中具备潜在优势,未来需通过专项试验进一步验证其地面适用性。这一技术路径的通用性表明,分段控温策略不仅为航天级镀膜提供了可靠方案,也为光学镀膜领域的共性热管理难题提供了创新解决思路。

- [7] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese).
- [8] 任翼. 真空辅助镀膜离子源的设计及其对沉积膜层影响的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2024.
REN Y. *Design of auxiliary ion source for vacuum coating and research of its influence on deposited film*[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2024. (in Chinese).
- [9] 荆建行. 离子束辅助低损耗 TiO₂ 光学薄膜研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2021.
JING J X. *Study on lon assisted deposition low loss TiO₂ optical thin film*[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).
- [10] 张大伟, 黄元申, 贺洪波, 等. 阶段离子束辅助法制备基频减反膜[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1463-1468.
ZHANG D W, HUANG Y SH, HE H B, *et al.*. Antireflective film prepared by periodic ion beam assisted deposition[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1463-1468. (in Chinese).
- [11] 田晓习. 光学薄膜技术中的基片与薄膜热力学匹配问题研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2020.
TIAN X X. *Study on thermodynamic matching between substrate and films in optical thin film technology*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Science, 2020. (in Chinese).
- [12] 李波, 王超, 闫涛, 等. 多层高反膜的应力研究[J]. *真空与低温*, 2023, 29(2): 146-152.
LI B, WANG CH, YAN T, *et al.*. Stress study of multi-layer high reflection films[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2023, 29(2): 146-152. (in Chinese).
- [13] 李阳, 徐均琪, 刘政, 等. 残余应力对介质高反膜面型影响的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(5): 484-490.
LI Y, XU J Q, LIU ZH, *et al.*. Study on the influence of residual stress on dielectric high reflection films[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(5): 484-490. (in Chinese).
- [14] 樊彦峥. 大口径镜面高反射膜制备及面形控制技术[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
FAN Y ZH. *Deposition and surface shape control technology of large-aperture mirror high-reflection film*[D]. Xian: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese).
- [15] 王振宇. 利用 PEALD/MLD 技术实现柔性有机电致发光器件的有机无机杂化薄膜封装[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
WANG ZH Y. *Organic-inorganic hybrid film encapsulation of flexible organic light emitting diodes by PEALD/MLD technology*[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese).
- [16] WANG ZH Y, CHEN Z Q, WANG J T, *et al.*. Realization of an autonomously controllable process for atomic layer deposition and its encapsulation application in flexible organic light-emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 21672-21688.

作者简介:



林柏竹(1994—),女,吉林长春人,博士,工程师,2022年于吉林大学获得博士学位,现为长光卫星技术股份有限公司光学加工技术研究室员工,主要从事光学薄膜的设计、研制和空间应用方面的研究工作。E-mail: linbaizhu@jl.cn