

面向空间通信的大入射角高面形精度分光镜研究

毕英涵 顾朔源 段微波 王奔 付秀华 刘欣瑶 熊仕富

Research on high surface figure accuracy beam splitters with large incident angle for space communication

BI Ying-han, GU Shuo-yuan, DUAN Wei-bo, WANG Ben, FU Xiu-hua, LIU Xin-yao, XIONG Shi-fu

引用本文:

毕英涵, 顾朔源, 段微波, 王奔, 付秀华, 刘欣瑶, 熊仕富. 面向空间通信的大入射角高面形精度分光镜研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0104

BI Ying-han, GU Shuo-yuan, DUAN Wei-bo, WANG Ben, FU Xiu-hua, LIU Xin-yao, XIONG Shi-fu. Research on high surface figure accuracy beam splitters with large incident angle for space communication[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0104

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0104>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星间通信系统高精度分光镜的研制

Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 334 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0100>

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>

基于金属-介质-金属的可调谐窄带完美吸收的研究

Tunable narrow-band perfect absorber based on metal-dielectric-metal

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 263 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0125>

全圆锥入射下基于一维共振波导光栅的入射角调谐滤波器

Incident angle-tuned filter based on 1D resonant waveguide grating in full conical mounting

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 493 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0030>

空间激光通信组网技术与应用研究进展

Research progress of space laser communication networking technology

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 429 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0140>

干涉星敏感器测角精度影响因素的研究

Influencing factors of angle measurement accuracy of an interferometer star tracker

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1433 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0232>

面向空间通信的大入射角高面形精度分光镜研究

毕英涵^{1†}, 顾朔源^{1†}, 段微波^{2*}, 王 奔^{3*}, 付秀华³, 刘欣瑶¹, 熊仕富^{1*}

(1. 天津理工大学功能晶体研究院, 晶体材料全国重点实验室, 天津市功能晶体材料

重点实验室, 天津 300384;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海市光学薄膜与光谱调控重点实验室, 上海 200083;

3. 长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528436)

† 共同第一作者

摘要:随着低轨卫星轨道的快速发展, 卫星通信在全球覆盖和高速数据传输中的作用日益凸显, 数据传输精度要求不断提高。分光镜作为空间卫星通信光学系统的核心元件, 其光谱特性和面形精度直接影响整个通信系统的传输精度。本文依据光学薄膜干涉理论, 选取合适的基底和镀膜材料, 以带通结构为基础膜系完成 45°大入射角 1550 nm 高反射、1565 nm 高透过分光镜的设计, 并采用离子辅助电子束蒸发完成薄膜制备。结合镀膜设备实际配置, 在传统单波长直接光控基础上, 提出一种双波长监控方法, 获得各膜层监控误差均小于 1% 的监控方案。基于双面应力平衡原则选择面形修正材料, 通过建立基底矢高和面形修正层厚度的数学关系, 精确计算面形修正层厚度, 修正分光镜的面形。测试结果表明, 在 1550 nm 处波长透射率为 1.71%, 1565 nm 处波长透射率为 98.51%, 面形精度 RMS 达到 0.0148 λ , 优于 $\lambda/60$ ($\lambda=632.8$ nm), 满足空间光通信系统应用需求。本文为具有入射角度高面形精度的分光镜膜系设计与制备提供一种有效方案, 也对空间光通信光学系统优化具有重要意义。

关键词:薄膜; 空间通信; 大入射角; 光谱特性; 面形精度

中图分类号: O484

文献标志码: A

doi: 10.3724/CO.2026-0104

CSTR: 32171.14.CO.2026-0104

收稿日期: 2026-06-10; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目:国家自然科学基金 (No.62304152); 上海市光学薄膜与光谱调控重点实验室开放基金 (No.OCSM202503); 天津理工大学校级大学生创新创业训练计划项目 (No.202510060152)

National Natural Science Foundation of China (No.62304152); Open Fund of Shanghai Key Laboratory of Optical Coatings and Spectral Modulation (No.OCSM202503); Tianjin University of Technology Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program Project (No.202510060152)

Research on high surface figure accuracy beam splitters with large incident angle for space communication

BI Ying-han^{1†}, GU Shuo-yuan^{1†}, DUAN Wei-bo^{2*}, WANG Ben^{3*}, FU Xiu-hua³,
LIU Xin-yao¹, XIONG Shi-fu^{1*}

(1. State Key Laboratory of Crystal Materials, Tianjin Key Laboratory of Functional Crystal Materials, Institute of Functional Crystals, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Optical Coatings and Spectral Modulation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528436, China)

† These authors contributed equally to this work

* Corresponding author, E-mail: duanweibo@email.sitp.ac.cn; benwang.cust@outlook.com;
xsf_optics@126.com

Abstract: With the rapid development of low Earth orbit satellites, satellite communication plays an increasingly prominent role in global coverage and high-speed data transmission, demanding ever-higher precision in data transfer. As a core component of space satellite communication optical systems, the spectral characteristics and surface figure accuracy of beam splitters directly affect the overall transmission performance of the system. Based on optical thin-film interference theory, this study selects suitable substrate and coating materials, and designs a dichroic beam splitter for 1 550 nm high reflectance and 1 565 nm high transmittance at a large incident angle of 45° using a bandpass structure as the base multilayer design. The film is deposited via ion-assisted electron-beam evaporation. Considering the actual configuration of the coating equipment, a dual-wavelength monitoring method is proposed to improve upon traditional single-wavelength direct light control, achieving monitoring errors of less than 1% for each layer. By applying the principle of double-sided stress balance, appropriate figure correction materials are selected, and a mathematical relationship between substrate height deviation and correction layer thickness is established to precisely calculate the thickness of the figure correction layer. Corrected the surface figure accuracy of the beam splitter. Test results show that it achieves a transmittance of 1.71% at the 1 550 nm wavelength, 98.51% at the 1 565 nm wavelength, and a surface figure accuracy RMS of 0.0148 λ , which is better than $\lambda/60$ at 632.8 nm, meeting the application requirements of space optical communication systems. This work provides an effective solution for designing and fabricating beam splitters with high surface figure accuracy under large incident angles, and holds significant implications for optimizing optical systems in space optical communications.

Key words: thin film; space communication; large incident angle; spectral characteristics; surface figure accuracy

1 引言

随着 5G、6G 技术的推进和低轨卫星轨道的快速发展,星间激光通信技术因其传输带宽大、

抗干扰性强和终端小型化等突出优势,已成为空间信息传输的研究热点^[1-2]。近年来,基于自由空间光通信的高速数据传输技术不断发展,通过波分复用、偏振复用以及频率微梳等技术,可实现 Tb/s 量级的数据传输,为未来空间高速信息网络

提供了重要技术支撑^[3]。高面形分光镜作为空间激光通信系统中的关键光学元件,在信号分离、光路调控以及系统稳定性保障方面发挥重要作用。随着空间通信系统对器件小型化和集成度要求的提高,新型光子集成平台上的光学频率梳和多功能光电器件研究正快速推进^[4]。这对分光镜等基础光学元件在宽光谱、高稳定性和与有源器件兼容性方面提出了更高的要求。为了提升通信链路传输速率与降低误码率,要求分光镜能够在极端环境下实现双波长的高效分光,同时维持高面形精度以保障光束波前质量。然而,传统分光镜设计受限于 22.5°入射角设计,迫使卫星以年均 1200 次频繁调整姿态,导致单星能耗增加 15~20%^[5]。为解决此类问题,近年来研究者也在探索基于可重构微纳光学器件的轻量化光束控制方案,以期减少对重型机械转台的依赖^[6]。随着低轨卫星通信系统对分光镜性能需求的提升,分光镜入射角度从传统的 22.5°扩展至 45°已成为重要研究方向。这一变化对膜系设计、材料选择及工艺控制提出了更高要求,需解决大角度入射条件下偏振效应、膜层应力以及结构稳定性等问题。

近年来,国内外学者在波长分离膜和高面形薄膜方面进行了一系列研究。2019 年, Begou 等^[7]对不同类型的滤波器的设计方法做了系统分析,并应用 Stoney 公式计算了多层膜的应力,通过在背面镀制一定厚度的 SiO₂ 实现应力补偿,得到面型优于 $\lambda/6$ 的陷波滤波器。2021 年,李阳等^[8]采用有限元分析法,对高反射镜镀膜后面型变化及膜层应力展开分析,通过调整薄膜层数和镀膜温度调控面型,白金林等^[9]基于应力预补偿机制,通过将基底预加工成与形变方向相反面形的方式调控面形。2023 年,李波等^[10]通过调整离子源加速电压、辐照角度及后处理等工艺参数来调控面形。2024 年,王忠连等^[11]使用 BK7 作为基底,使用 Nb₂O₅ 和 SiO₂ 分别作为高、低折射率材料,750~800 nm 波段实现带宽为 50 nm 截止深度优于 OD6 且 PV 值优于 $\lambda/10$ 的陷波滤波器。2025 年,余德明等^[12]研究了不同沉积条件对 Nb₂O₅、SiO₂ 薄膜应力特性的影响,采用薄膜应力补偿技术研制出 50°入射,400~800 nm 波段平均反射率大于 98%,1064 nm 反射率约为 5%,均方根粗糙度优于 $\lambda/40$ 的分光镜。Zhang Y.X.等^[13]

通过建立单层高、低折射率材料薄膜的应力随物理厚度变化的四次多项式模型,应用对称膜系法的双面镀膜设计,研制出 0~14°入射,430~680 nm、835~870 nm 的波段范围平均透过率大于 93.31%、94.51%,700~820 nm 波段范围内截止深度优于 OD6 的陷波滤波器。

本文需要研制一款大入射角高面形精度分光镜,针对 45°大入射角导致的偏振敏感性和双波段分光矛盾,通过多目标优化算法与等效层理论,抑制大角度偏振敏感性,减小 S/P 偏振分光比差异,实现 1550 nm 高反射、1565 nm 高透射分光膜的理论设计。在后表面设计中,依据双面应力平衡原则合理选择面形修正材料,通过拟合基底矢高和面形修正层厚度的数学关系,精确计算面形修正层厚度后,实现分光镜的面形修正。

2 大入射角分光膜的理论设计及制备

根据系统的使用要求,大角度高面形精度分光镜具体参数指标如表 1 所示。

表 1 分光镜技术参数

Tab. 1 Technical parameters

Parameter	Specification
Substrate	JGS1
Incident angle /°	45
Reflection wavelength /nm	1550
Reflectance /%	≥95
Transmission wavelength /nm	1565
Transmittance /%	≥95

JGS1 基底具有热膨胀系数小,耐高温,化学性质稳定等特点,用来作为分光镜的基底材料。Ta₂O₅ 在近红外波段具有较高的折射率、较宽的光学透明区、且具有较高的机械硬度和耐用性,适用于太空极端环境^[14],因此选取 Ta₂O₅ 为高折射率材料。SiO₂ 相较其它低折射率材料具有较宽的透明区、吸收小、膜层牢固且抗磨耐腐蚀等特性,且与 Ta₂O₅ 同属氧化物,有较好的应力匹配,因此选择 SiO₂ 为低折射率材料。

根据光学薄膜基础理论^[15],薄膜特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{sub} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 j 为第 j 层薄膜, δ_j 为第 j 层膜的相位厚度, η_j 为第 j 层膜的等效导纳。

透过率为

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

其中 $\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2}$, $T_0 = \frac{T_1 \cdot T_2}{(1 - \bar{R})^2}$, $F = \frac{4\bar{R}}{(1 - \bar{R})^2}$, $\theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$, 式中 T_0 为基底与膜层无吸收时的理论最大透射率, T_1 、 T_2 为界面 1 和界面 2 的透射率, θ 为折射角, $\bar{R}$ 为平均反射率, R_1 、 R_2 为界面 1 和界面 2 的反射率, φ_1 和 φ_2 为界面 1 和界面 2 的相位, F 为精细度系数, 如图 1 所示。当 $T_0 \approx 1$, $R_1 \approx R_2$, 且 $\sin^2 \theta \approx 0$ ($\theta \approx m\pi$, $m=0,1,2,\dots$) 时, 透射率约

等于 100%, 即全部透过。

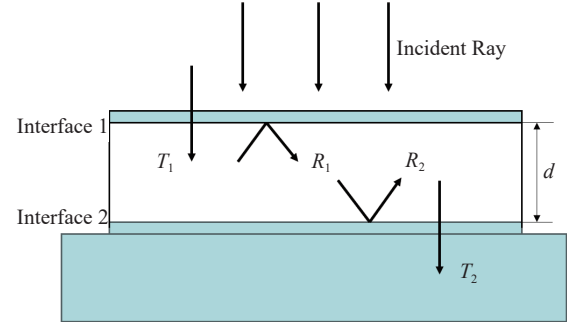


图 1 法布里-珀洛(F-P)标准具薄膜形式

Fig. 1 Schematic diagram of the Fabry-Perot etalon in a thin-film configuration

对于 45° 入射条件下 1550 nm 高反射、1565 nm 高透射的分光指标, 通常可采用长波通膜系和带通膜系两种设计方案实现, 其对应的初始膜系结构分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。

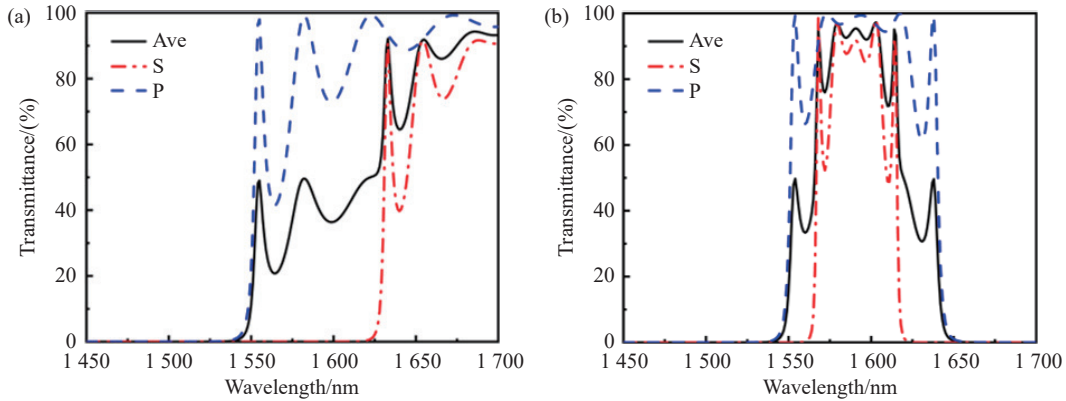


图 2 (a)长波通和(b)带通初始膜系设计

Fig. 2 (a)Long-pass and (b)bandpass initial membrane system designs

由图 2 可以看出, 45° 大角度入射情况下, 两种膜系在过渡带出现了不同程度的偏振分离, 带宽分别约 75 nm 和 15 nm, 长波通作为基础膜系时影响更大。因此本文采用带通结构作为基础膜系来设计大入射角分光膜。基础结构为 $\text{Sub} | (\text{HLHLH } 2m\text{L HLHLH L})^{S_0} | \text{Air}$, 其中 Sub 代表 JGS1 基底, H 和 L 分别代表 Ta_2O_5 和 SiO_2 的 $\lambda/4$ 光学厚度, Air 代表空气, λ 代表参考波长, m 为干涉级次, S_0 为反射膜与间隔层的重复周期数。随着干涉级次和重复周期数的改变, 带通宽度和截止透过的效果也会发生相应的改变。因而可以通过调整干涉级次和重复周期数来实现所需分光和

消除偏振影响。经过数次模拟可知, 当 $m_0=1$, $S_0=6$ 时, 所需波段内出现偏振分离现象较弱, 膜系参数与指标基本匹配, 初始膜系设定为 $\text{Sub} | (\text{HLHLH } 2\text{L HLHLH L})^6 | \text{Air}$ 。将初始膜系导入 Essential Macleod 软件, 设定好优化目标及限定条件, 采用 Simplex 算法进行优化, 得到膜系 $\text{Sub} | 0.9318\text{H } 1.0119\text{L } 0.9538\text{H } 1.0622\text{L} \cdots 0.9454\text{H } 1.0133\text{L } 0.9415\text{H } 1.2963\text{L} | \text{Air}$, 共计 72 层, 总物理厚度 20.22 μm , 优化后的理论透射光谱如图 3(a) 所示, 1550 nm 透过率为 0.32%, 1565 nm 的透过率为 99.51%。各膜层物理厚度如图 3(b) 所示, 最薄膜层为 197.71 nm, 最厚膜层为 510.54 nm, 膜层

厚度分布均匀, 未出现极薄或极厚膜层。

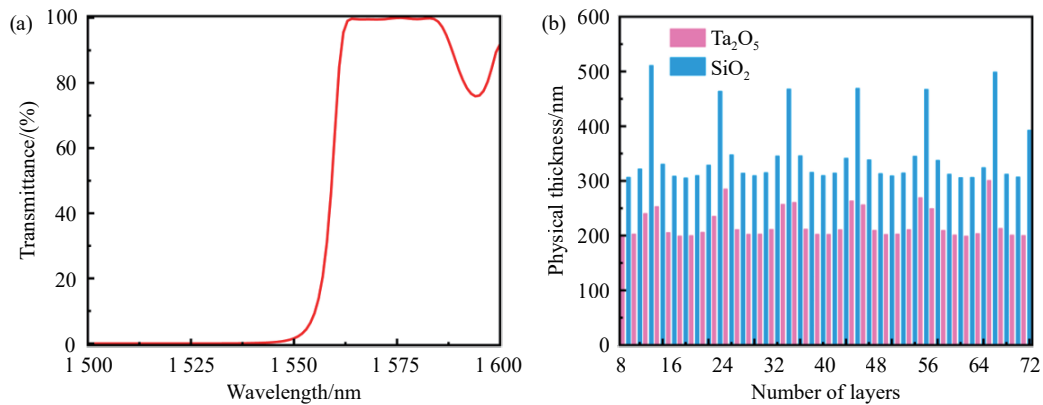


图 3 (a) 优化后理论透射光谱; (b) 膜层物理厚度

Fig. 3 (a) Transmission spectrum of the optimized design; (b) Physical thickness of the membrane layer

采用莱宝 SYRUSpro 1110 电子束蒸发真空镀膜机进行实验, 该设备配置为行星工件盘、双“e”型电子枪、APS 离子源、石英晶控系统和 OMS5100 光控系统, 薄膜沉积工艺参数如表 2 所示。

表 2 薄膜沉积工艺参数

Tab. 2 Thin film deposition process parameters

Material	Substrate Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Vacuum Degree /mbar	Deposition Rate / $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$	Flow Rate of O_2 /sccm	
				APS	HPE
Ta_2O_5	180	5×10^{-6}	0.3	15	35
SiO_2			0.7	15	15

本文对薄膜厚度控制采取光学监控的方式^[16], 光学监控法是利用薄膜干涉导致的透射光或反射

光的光强变化或偏振态变化, 能给出薄膜折射率, 反演得到薄膜光学厚度, 对膜厚误差有自动补偿机理。将设计参数导入 MCalc 软件中, 对监控波长进行优化, 以确定最优监控方案。

经过模拟分析, 当选择监控波长为 672 nm 时, 膜层误差不能控制在 1% 以内层数较少, 光学信号随厚度变化如图 4 所示, 其中高折射率材料用蓝色标记, 低折射率材料用绿色标记, 当出现误差不能控制在 1% 以内时的膜层用红色标记。图 4(a) 是第 1~36 层, 图 4(b) 是第 37~72 层, 此时红色标记膜层为第 43 层、第 51 层、第 52 层和第 68 层, 在实际制备过程中极容易出现多镀或者少镀的状况, 不可精确控制, 因此该监控方案工程可实施性较差。

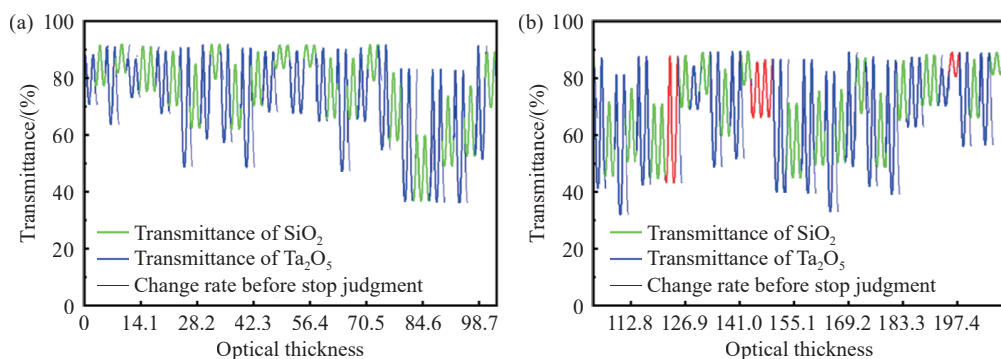


图 4 光学信号随膜层光学厚度变化曲线

Fig. 4 The curve of optical signal variation with the optical thickness of the film layer

为进一步降低膜厚监控误差, 基于直接光控系统单波长监控法, 提出一种双波长监控法, 根据

膜系结构特点, 将膜层划分为不同监控阶段, 在各阶段分别采用不同的监控波长, 以提高关键膜层

的监控灵敏度。设透过率为

$$T_{measure}^{(p)}(d_1, \dots, d_p; \lambda_1) = T_{ideal}^{(p)}(d_1^*, \dots, d_p^*; \lambda_1) + \sum_{j=1}^p \frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_j} \delta d_j, \quad (3)$$

$$d_p = d_p^* + \delta d_p, \quad (4)$$

其中 d_p 为第 p 层实际物理厚度, d_p^* 为第 p 层膜层理论物理厚度, $T^{(1)}(d_1; \lambda_1)$ 为第一层为 d_1 时的透过率, $T^{(2)}(d_1, d_2; \lambda_1)$ 为前两层膜厚为 d_1, d_2 时的透过率, 并以此类推。 $T_{measure}^{(p)}(d_1, \dots, d_p; \lambda_1)$ 为薄膜透过率的实际测量值, $T_{ideal}^{(p)}(d_1^*, \dots, d_p^*; \lambda_1)$ 对应薄膜在理想膜厚下的透过率, δd_p 表示理论厚度与实际厚度之差。

在制备过程中, 透过率误差主要由膜厚误差 δd_p 决定。膜层本身厚度误差也是服从正态分布的随机误差, 因此 $\overline{\delta d_p} = 0$ 。透过率误差 δT 也是随机误差, 因此 $\overline{\delta T} = 0$ 。

在光控系统中, 第 p 层理论的终止透过率为

$$T_{measure}^{(p)}(d_1^{(1)}, \dots, d_p^{(1)}; \lambda_1) = T_{ideal}^{(p)}(d_1^{(1)*}, \dots, d_p^{(1)*}; \lambda_1) + \sum_{j=1}^p \frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_j} \delta d_j. \quad (5)$$

$d_p^{(1)}$ 为监测 p 层实际物理厚度的第一个监测波长, $d_p^{(1)*}$ 为监测 p 层理论物理厚度的第一个监测波长, 透射率偏差 $\delta T^{(p)}(\lambda_1)$ 为

$$\delta T^{(p)}(\lambda_1) = T_{measure}^{(p)}(d_1^{(1)}, \dots, d_p^{(1)}; \lambda_1) - T_{ideal}^{(p)}(d_1^{(1)*}, \dots, d_p^{(1)*}; \lambda_1), \quad (6)$$

在实验过程中, 采用单波长监测来监测薄膜的光学厚度。因此只考虑膜层厚度对选择的监测波长的影响^[17], 公式 (6) 表明实际制备过程中产生的透过率误差是由实际膜层厚度与理论膜层厚度之差引起的, 代入公式 (5), 可得

$$\delta T^{(p)}(\lambda_1) = \sum_{j=1}^p \frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_1), \quad (7)$$

根据式 (7) 可计算前 p 层的薄膜厚度的标准偏差。 $\delta d_p(\lambda_1)$ 为在第一个监测波长在第 p 层的

厚度误差。

$$\delta d_p(\lambda_1) = \left(\frac{1}{\partial T^{(p)} / \partial d_p} \right) \left(\delta T^{(p)}(\lambda_1) - \sum_{j=1}^{p-1} \frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_1) \right), \quad (8)$$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left(\delta d_j(\lambda_1) - \overline{\delta d_j} \right)^2, \quad (9)$$

由于 δd_j 服从正态分布, 因此遵循 $\overline{\delta d_j} = 0$, 可得

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left(\delta d_j(\lambda_1) \right)^2, \quad (10)$$

根据方程 (8), 将上述方程展开, 得到

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left(\left(\frac{1}{\partial T^{(k)} / \partial d_k} \right) \left(\delta T^{(k)}(\lambda_1) - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\partial T^{(k)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_1) \right) \right)^2, \quad (11)$$

标准偏差 σ_p 可用下式表示

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left(\left(\frac{1}{\partial T^{(k)} / \partial d_k} \right) \left(\delta T^{(k)}(\lambda_1) - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\partial T^{(k)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_1) \right) \right)^2}, \quad (12)$$

根据公式 (12), p 表示第一个监测波长监测的总层数, k 是变量。针对单一监测波长制备膜层误差较大的问题, 在实验中引入了第二监测波长, 对第一光控片控制外的其它膜层进行监控, 将这种引入新的光控波长的方法称为双波长监测方法。在这种方法中, 第一监测波长下各膜层的厚度误差会影响第二监测波长的监测精度, 因此, 在计算由第二监测波长监测的第 $(p+q)$ 层的膜层厚度偏差时, 需要考虑所有先前层的厚度误差的综合影响, 其中第一监测波长控制前 p 层, 第二监测波长监测后续的 q 层, 且 $(p+q)$ 表示由第一光控波长及第二光控波长监测的总层数。通过计算这种累积效应, 可以更准确地评估膜层厚度误差对透过率的影响, 确保双波长监测方法在控制膜层厚度和提高透过率性能方面有效。当选择 λ_1 时, $\frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_p}$ 的值越大, 标准偏差 σ_p 变得越小。

然而, 也必须考虑前 $p-1$ 层对 σ_p 的影响。根据上述公式, 对于第二监测波长 λ_2

$$T_{measure}^{(p+q)}(d_1^{(2)}, \dots, d_{p+q}^{(2)}; \lambda_2) = T_{ideal}^{(p+q)}(d_1^{(2)*}, \dots, d_{p+q}^{(2)*}; \lambda_2) + \sum_{j=p+1}^{p+q} \frac{\partial T^{(p+q)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_2) + C, \quad (13)$$

在公式(13)中由第一监测波长 λ_1 引起的累积误差值 $\sum_{j=1}^p \frac{\partial T^{(p)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_1)$ 在切换监测波长后保持不

变, 可以视为常数 C 。

$$\delta T^{(p+q)}(\lambda_2) = \sum_{j=p+1}^{p+q} \frac{\partial T^{(p+q)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_2) + C, \quad (14)$$

其中 p 为切换监测波长的膜层数, 引入第二监测波长后第 $p+q$ 层的误差方差为

$$\delta d_{p+q}(\lambda_2) = \left(\frac{1}{\partial T^{(p+q)} / \partial d_{p+q}} \right) \left(\delta T^{(p+q)}(\lambda_2) - \sum_{j=p+1}^{p+q-1} \frac{\partial T^{(p+q)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_2) - C \right), \quad (15)$$

公式(15)与公式(12)的不同之处在于, 它考虑了第一监测波长的误差对第二监测波长对膜层

厚度监测的影响。在双波长监测方法中, C 值越大, 对第二监测波长的控制精度影响越显著。

$$\sigma_{p+q} = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{k=p+1}^{p+q} \left(\left(\frac{1}{\partial T^{(k)} / \partial d_k} \right) \left(\delta T^{(k)}(\lambda_2) - \sum_{j=p+1}^{k-1} \frac{\partial T^{(k)}}{\partial d_j} \delta d_j(\lambda_2) - C \right) \right)^2}, \quad (16)$$

根据公式(16), 在理想状态下, 可以通过给定监测方案的材料折射率和透射率来估算不同监测波长下的厚度误差, 从而确定沉积误差。

由式(16)可知, α_i 与 $\partial T / \partial d$ 成反比例关系。监控波长应该在 550~900 nm 范围内选取, 并结合式(15)、(16)确定监控波长。同时, 第一个监控波

长产生的误差将影响第二个监控波长的监控精度, 采用 672 nm 和 864 nm 分别监控第 1~42 层和第 43~72 层, 在第 43 层处切换监控波长, 切换后光学信号随膜层光学厚度变化的曲线如图 5(a) 所示。

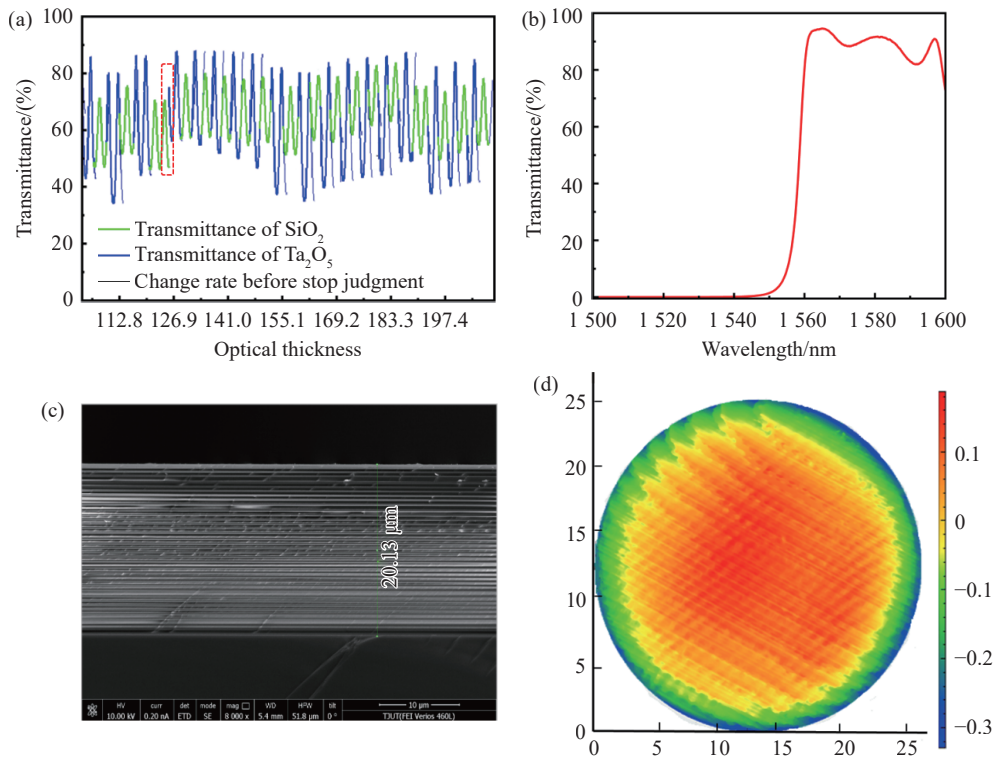


图 5 (a) 双波长光学监控方案;(b) 透射光谱;(c) SEM 截面图;(d) 反射面形图

Fig. 5 (a) Dual-wavelength optical monitoring scheme;(b) Transmittance spectrum;(c) SEM cross-sectional image;(d) Reflective surface shape diagram

按双波长监控方案完成分光膜制备,使用安捷伦公司生产的 Cary 7000 分光光度计对实验样品进行透过率测试,结果如图 5(b) 所示,在 1550 nm 波长处透过率为 1.4381%, 1565 nm 波长处透过率为 94.6673%。采用高分辨场发射扫描电镜测试截面形貌及厚度,测试结果如图 5(c) 所示,薄膜样品具有密集排列的层状结构,结构致密。实际测试薄膜物理厚度为 20.13 μm , 与理论物理厚度的相对误差为 0.44 %, 薄膜厚度与设计误差较小,膜厚监控精确,结果也验证了双波长监控方案的可靠性。用激光干涉仪测试薄膜样品

反射面形,如图 5(d) 所示,RMS 从 0.0079 λ 变为 0.1082 λ , 镀完分光膜后反射面形精度已劣于 $\lambda/10$ 。

3 分光镜面形修正

为了抑制后表面的反射,需在后表面镀制减反射膜,针对本文所设计的光分膜系,后表面设计了 1400 ~ 1600 nm 的减反射膜系 Sub|0.7346H 0.8947L 1.4208H 2.2507L|Air, 共 4 层膜,物理厚度约为 796.68 nm, 透过率光谱曲线如图 6(a) 所示。

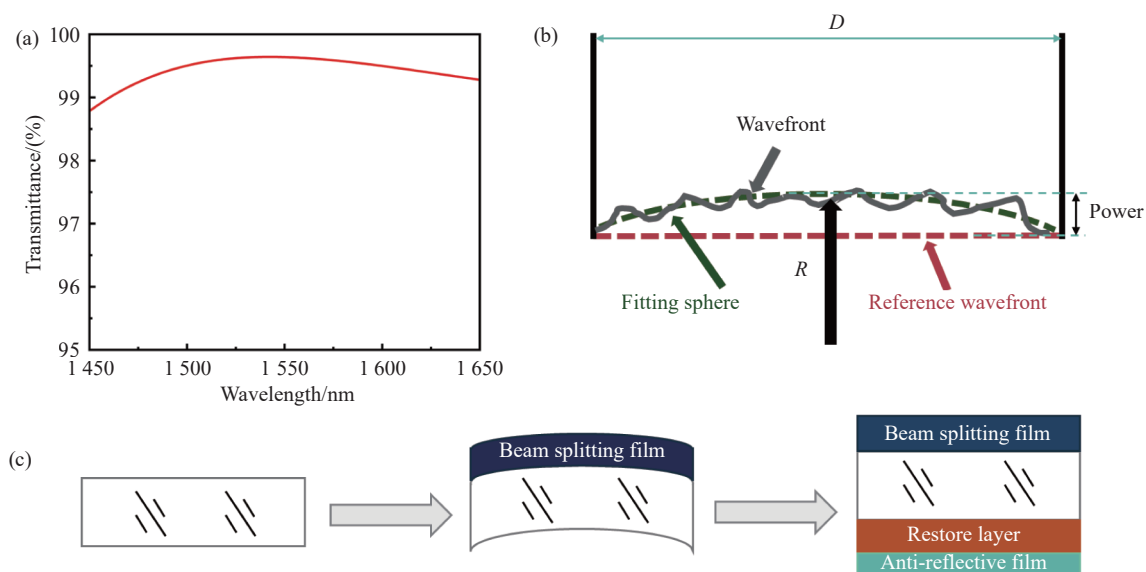


图 6 (a) 后表面减反膜设计透射光谱;(b) 基底的矢高与曲率半径示意图;(c) 面形修正示意图

Fig. 6 (a) Transmittance spectrum of the anti-reflection coating on the rear surface;(b) Diagram of the height and curvature radius of the substrate;(c) Diagram of surface shape correction

图 6(b) 为沉积薄膜后基底矢高与曲率半径关系示意图,红色虚线表示理想状态下的参考波前,绿色虚线表示拟合球面,Power 为表征基底表面形变的宏观型变量,D 表示基底直径,R 表示曲率半径。根据分光镜的面形要求,为实现分光镜面形精度调控,本文根据添加缓冲层实现面形修正的方法,在基底后表面添加一定厚度的面形修正层抵消薄膜形变,从而实现分光镜面形修正,示意图如图 6(c) 所示。

根据式 Stoney 公式^[18-19] 结合曲率半径计算薄膜的应力为

$$\sigma = \frac{E_s t_s^2}{6 t_f R}, \quad (17)$$

式中 σ 为薄膜的残余应力, E_s 为基底杨氏模量, t_s 和 t_f 分别为基底的厚度和膜层的厚度, R 为薄膜-基底系统的曲率半径。

由图 6(b) 可知,基底的曲率半径与分光镜直径存在以下几何关系

$$R^2 = (R - \text{Power})^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2, \quad (18)$$

由于分光镜的 Power 值远小于基底的直径 D, 因此可以忽略 Power 的 2 次方项, 进一步简化得到 Power 与曲率半径的关系为

$$P = \frac{D^2}{8R}, \quad (19)$$

结合 (17) 式, 得到薄膜应力为

$$\sigma = \frac{4E_s}{3(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{D^2} \frac{\Delta P}{t_f}, \quad (20)$$

式中 E_s 为基底杨氏模量, ν_s 为基底泊松比, t_s 和 t_f 分别为基底的厚度和膜层的厚度, ΔP 为沉积薄膜前后矢高值的改变量。当应力为正时为张应力, 表现在基底两端受拉; 应力为负时为压应力, 表现在基底两端受压。

由 (20) 式可知, 为测得前表面膜层应力类型和大小, 只需通过测得沉积前表面膜系前后矢高值的改变量, 即可求得前表面膜层应力。

对完成大角度分光膜镀制的薄膜样品进行面形检测, 由表 3 可知, 样品沉积大角度分光膜前后的 Power 值分别为 0.0198λ , -0.3356λ , 则 ΔP 为 -0.3554λ , 将其代入 (9) 式, 求得前表面膜层应力为 -49.69 MPa , 呈现为压应力。因此在后表面添

加一定厚度应力类型为压应力的面形修正层可以降低或抵消基底形变量^[20]。

表 3 样品沉积分光膜前表面前后的面形数据

Tab.3 Surface profile data from the front and back surfaces of the sample before integration with film

Category	RMS / λ	Power / λ
Before depositing	0.0079	0.0198
After depositing	0.1082	-0.3356

SiO_2 是应用最为广泛的低折射率材料, 与 JGS1 熔融石基底表现出相近的光学和机械特性, 故在后表面基底和减反射膜之间沉积单层 SiO_2 对膜系的光谱特性影响较小, 如图 7(a) 所示。因此如果单层 SiO_2 薄膜应力类型呈现为压应力, 则单层 SiO_2 可被选定为面形修正层。

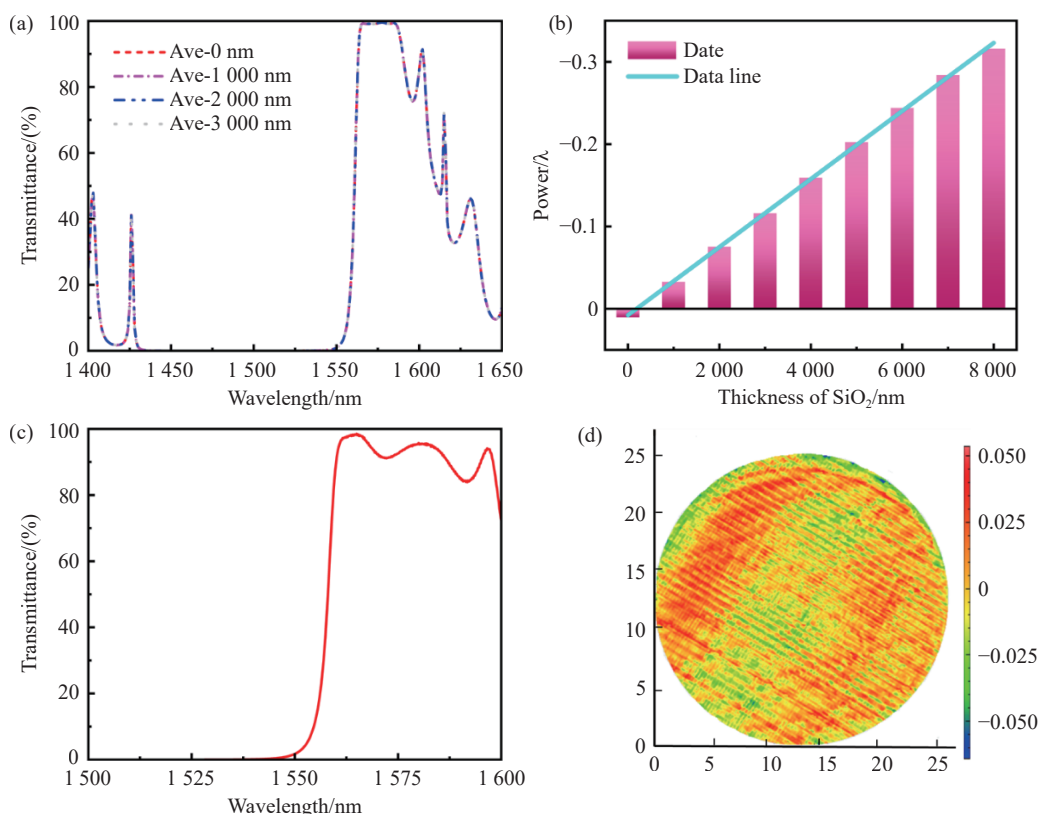


图 7 (a) 添加不同厚度 SiO_2 的透射光谱;(b) 基底矢高随 SiO_2 厚度变化拟合曲线;(c) 分光镜透过率光谱;(d) 分光镜反射面形

Fig. 7 (a)Transmittance spectrum of SiO_2 layers of varying thicknesses;(b)Fitted curve of substrate profile height as a function of SiO_2 thickness;(c)Transmittance spectrum of the beam splitter;(d)Reflective surface profile of the beam splitter

为研究单层 SiO_2 的应力类型以及 SiO_2 对 JGS1 基底矢高的影响, 在同一 JGS1 基底以 1000 nm 为厚度梯度依次沉积单层 SiO_2 , 每次镀

膜后测试面形并计算薄膜应力, 面形测试结果如表 4 所示。

表 4 沉积不同厚度 SiO₂ 基底面形精度变化数据
Tab. 4 Data on changes in surface profile accuracy of SiO₂ substrates with varying thicknesses

Thickness of SiO ₂ /nm	RMS /λ	Power /λ	Film stress /MPa
0	0.0069	0.0103	
1000	0.0200	-0.0327	-123.41
2000	0.0287	-0.0753	-122.76
3000	0.0393	-0.1159	-120.63
4000	0.0527	-0.1592	-121.58
5000	0.0692	-0.2024	-122.01
6000	0.0789	-0.2439	-121.54
7000	0.0911	-0.2839	-120.62
8000	0.1092	-0.3159	-121.49

由表 4 可知, 沉积在 JGS1 基底的单层 SiO₂ 薄膜应力类型为压应力, 符合前后表面应力平衡原则, 因此本文选择单层 SiO₂ 作为面形修正层。由图 7(b) 可知, 对于 JGS1 基底, 在同一工艺条件下 SiO₂ 沉积厚度 t_f 与基底矢高 P 接近线性关系, 其拟合方程为

$$P = at_f + b$$

其中 a 为线性因子, b 为基底初始矢高。最终拟合结果为

$$P = -4.24 \times 10^{-5} t_f - 9.88 \times 10^{-3}$$

通过沉积 SiO₂ 所需修正的基底矢高可表示为

$$P' = P_A + P_B$$

式中 Power 的取值以分光膜面为准, P' 是通过沉积 SiO₂ 所需修正的 Power, P_A 是沉积分光膜前后 Power 的改变量, P_B 为沉积减反射膜前后 Power 的改变量。

为求得 P_B , 在 JGS1 基底表面沉积减反射膜并对镀膜前后的基底进行面形检测, 沉积减反射膜前后面形测试图如图 7(d) 所示, 面形测试结果如表 5 所示, 求得 $P_B = 0.0207\lambda$ 。

由表 3 可知, 样品沉积分光膜前后的 Power 值分别为 -0.0198λ , -0.3356λ , 求得 $P_A = -0.3158\lambda$, 由表 5 求得 $P_B = 0.0207\lambda$ 。将 P_A 、 P_B 代入 (13) 式, 求得通过沉积 SiO₂ 所需修正的基底矢高 $P' = -0.2951\lambda$ 。将所需修正的基底矢高值 $P' =$

-0.2951λ 代入 SiO₂ 沉积厚度 t_f 与基底矢高 P 的关系式, 求得所需沉积的 SiO₂ 厚度 $t_f = 7293\text{ nm}$ 。

表 5 基底沉积减反射膜前后的面形数据
Tab. 5 Surface profile data before and after the application of the anti-reflective coating

Category	RMS /λ	Power /λ
Before depositing	0.0066	0.0165
After depositing	0.1253	0.0372

在样品后表面分别沉积厚度为 7293 nm 的单层 SiO₂ 以及减反射膜, 并对样品进行透过率测试和面形检测, 检测结果如图 7(c) 和 (d) 所示。

测试结果表明, 所制备的实验样品在 45° 入射时, 截止区域 1550 nm 处透过率为 1.71%, 在透过区域 1565 nm 处透过率为 98.51%。制备完成的分光镜反射面形 RMS 值为 0.0148 λ, 优于 λ/60。对制备的分光镜样品进行 GJB 2485A-2019 光学膜层通用规范标准中的附着力和温度冲击测试。

(1) 用粘性强度不低于 2.74 N/cm² 的 3M 胶带紧贴薄膜样品表面, 确保无气泡, 迅速拉起胶带, 重复 15 次, 未出脱膜现象。

(2) 将样品放在高低温试验箱, 设置高温 71 °C 和低温 -46 °C, 进行三个温度极值冲击循环, 恢复常温后取出, 未出现起皮、裂纹等现象。

4 结 论

本文针对空间通信系统的实际应用需求, 基于 F-P 膜系结构的低偏振分离特性, 完成了大角度分光膜的理论设计。通过分析光控波长对膜厚期望误差的影响, 提出了一种双波长监控方法, 减小膜层的误差积累对光谱曲线的影响, 精确控制膜层厚度。根据面形精度需求, 通过建立基底矢高与修正层厚度的精确数学关系模型, 实现了面形精准修正。制备的分光镜在 1550 nm 处透过率为 1.71%, 在 1565 nm 处透过率为 98.51%, 反射波前 RMS 值达到 0.0148 λ, 优于 λ/60。同时通过模拟极端环境的环境测试, 具有良好的环境稳定性, 满足使用需求。虽然实现了 45° 工作入射条件下高光谱性能和高面形精度分光镜的制备, 但修正层厚度仍然较大, 且未与减反膜进行一体

化协同优化, 后续将研究高应力低厚度修正工艺 合性能并增强工程应用能力。
及修正层和减反膜协同设计方法, 以提升器件综

参考文献:

- [1] 王振宇, 付秀华, 林兆文, 等. 星间通信系统高精度分光镜的研制[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(2): 334-341.
WANG ZH Y, FU X H, LIN ZH W, *et al.*. Development of high-precision beam splitter for inter-satellite communication system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 334-341. (in Chinese).
- [2] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 20220393.
LI R, LIN B J, LIU Y CH, *et al.*. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220393. (in Chinese).
- [3] WANG W T, LIU H, WU J G, *et al.*. Free-space terabit/s coherent optical links via platicon frequency microcombs[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 8.
- [4] NIE B B, LV X M, YANG CH, *et al.*. Soliton microcombs in X-cut LiNbO₃ microresonators[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 15.
- [5] LI J X, TU J J, ZHU Y N. Study on 55°, 905 nm, high reflectivity and visible range beam splitter in cemented cube[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(S1): S10407.
- [6] MA W ZH, FU Y W, HAN D D, *et al.*. Reconfigurable SiC gratings in PDMS: a portable approach for atmospheric optical communication networks[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 393.
- [7] BEGOU T, LEMARCHAND F, LEMARQUIS F, *et al.*. High-performance thin-film optical filters with stress compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(11): C113-C121.
- [8] 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).
- [9] 白金林, 姜玉刚, 王利栓, 等. 超低面形宽带高反射薄膜设计及制备技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200413.
BAI J L, JIANG Y G, WANG L SH, *et al.*. Study on the design and preparation technology of ultra-low profile wideband high reflection thin films[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200413. (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 王忠连, 任少鹏, 高鹏, 等. 用于荧光内窥镜的陷波滤光片的研制[J]. *光子学报*, 2024, 53(1): 0131001.
WANG ZH L, REN SH P, GAO P, *et al.*. Investigation of notch filters for fluorescent endoscopes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(1): 0131001. (in Chinese).
- [12] 余德明, 李大琪, 刘保剑, 等. 星载激光雷达用高面形精度分光镜的设计与制备 (特邀)[J]. *光学学报 (网络版)*, 2025, 2(21): 2114002.
YU D M, LI D Q, LIU B J, *et al.*. Design and fabrication of high surface shape accuracy dichroic beam splitter used for spaceborne lidar (invited)[J]. *Acta Optica Sinica (Online)*, 2025, 2(21): 2114002. (in Chinese).
- [13] ZHANG Y X, CAO X Y, GUO H L, *et al.*. Investigation into deep-cutoff notch filters for fluorescence endoscope imaging[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2025, 67: 101474.
- [14] 陈星聿, 付秀华, 朱忠尧, 等. 用于 5G 分光器件低损耗滤光膜的研究[J]. *长春理工大学学报 (自然科学版)*, 2022, 45(5): 26-31.
CHEN X Y, FU X H, ZHU ZH Y, *et al.*. Research on low-loss filter film for 5G optical splitters[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(5): 26-31. (in Chinese).
- [15] 张静, 刘海成, 付秀华, 等. 5G 通信 LWDM 窄带滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1903101.
ZHANG J, LIU H CH, FU X H, *et al.*. Development of LWDM narrow-band filter membrane for 5G communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1903101. (in Chinese).
- [16] XIN Y W, PENG Y CH, ZHANG Y X, *et al.*. Investigation of 980/1550 nm dual-bandpass wide-cutoff filter in laser communication system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 150: 105945.
- [17] TIKHONRAVOV A V, TRUBETSKOV M K, AMOTCHKINA T V. Statistical approach to choosing a strategy of

- monochromatic monitoring of optical coating production[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(30): 7863-7870.
- [18] CAMMARATA R C, TRIMBLE T M, SROLOVITZ D J. Surface stress model for intrinsic stresses in thin films[J]. *Journal of Materials Research*, 2000, 15(11): 2468-2474.
- [19] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1909, 82(553): 172-175.
- [20] LONG G Y, ZHANG Y P, ZHOU H, *et al.*. Ultra-low stress and high laser damage threshold optical coatings for large-aperture component[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 184: 112297.

作者简介:



毕英涵(2002—), 男, 吉林白城人, 硕士研究生。2020 年于辽宁科技大学获得学士学位, 2024 年入学天津理工大学, 主要从事精密光学薄膜器件方面的研究。E-mail: byh_optics@stud.tjut.edu.cn



顾朔源(2004—), 男, 山东潍坊人, 本科生。2022 年入学天津理工大学, 主要从事光学薄膜技术方面的研究。E-mail: sy_optics@163.com



熊仕富(1988—), 男, 湖北十堰人, 博士, 助理研究员。2018 年 6 月于长春理工大学获得工学博士学位, 7 月入职天津理工大学, 晶体镀膜实验室负责人, 主要从事精密光学薄膜器件研究、光电功能晶体镀膜研究及性能表征方面的研究。E-mail: xsf_optics@126.com