

# 多波段大口径全介质高反膜的设计与制备

师云云<sup>1</sup>, 徐均琪<sup>1</sup>, 刘政<sup>2</sup>, 张凯锋<sup>3</sup>, 苏俊宏<sup>1</sup>, 袁松松<sup>1</sup>, 刘祺<sup>1</sup>

(1.西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021;  
2.西安光学精密机械研究所 先进光学制造技术联合实验室, 西安 710119;  
3.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** **目的** 研究多波段全介质高反射薄膜的光谱性能、应力特性以及膜层的抗激光损伤性能, 获取应力状态良好的大口径薄膜样片。**方法** 选用  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  高低折射率材料, 设计并制备 500~650 nm、780~830 nm、1 050~1 080 nm 3 波段兼容的介质高反膜。研究单层膜工艺参数, 监控波长为 560 nm, 基于电场强度分布, 膜系结构优化为  $G/(\text{HL})^8\text{H}(2\text{L})^4(1.4\text{H}1.4\text{L})^8\text{H}2\text{L}(1.9\text{H}1.9\text{L})^81.9\text{H}/\text{A}$ 。在不同膜堆之间添加低折射率层来抑制虚设问题, 平滑反射光谱, 通过离子束辅助电子束蒸发技术在  $\phi 220\text{ mm}$  的大口径基底上成功制备出性能良好的宽波段大尺寸多层高反射薄膜。**结果** 其反射光谱在可见光 500~650 nm 波段范围内, 平均反射率为 99.5%, 峰值反射率为 99.9%, 最低反射率为 95.1%; 在 780~830 nm 波段内, 峰值反射率为 99.9%, 平均反射率为 99.8%, 最低反射率为 99.6%; 在 1 050~1 080 nm 波段内, 其平均反射率能够达到 99.8%, 峰值反射率达到 99.9%, 最低反射率达到 99.7%。大口径薄膜样片不同位置的反射光谱一致性较高。膜层的抗激光损伤阈值为  $7.1\text{ J}/\text{cm}^2$ , 残余应力为  $-293.59\text{ MPa}$ 。**结论** 大口径薄膜样片膜厚均匀性良好, 成膜致密, 无起皱、龟裂、脱落等现象出现, 膜层牢固性较高, 具备优良的激光防护性能。

**关键词:** 薄膜; 大口径; 多波段; 残余应力; 激光损伤阈值

**中图分类号:** O484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)04-0335-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.035

## Design and Preparation of Large Aperture High Reflective Films Composed Entirely of Dielectric Materials for Multi-band Application

SHI Yun-yun<sup>1</sup>, XU Jun-qi<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>2</sup>, ZHANG Kai-feng<sup>3</sup>,  
SU Jun-hong<sup>1</sup>, YUAN Song-song<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Province Thin Films Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Advanced Optical Manufacturing Technology Joint Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China; 3. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-10-22

Received: 2021-05-17; Revised: 2021-10-22

基金项目: 装备预研重点实验室基金 (6142207190407); 陕西省国际科技合作与交流计划资助项目 (2018KWZ-02)

Fund: Key Laboratory for Equipment Pre-research (6142207190407); International Science and Technology Cooperation and Exchange Plan Project of Shaanxi Province (2018KWZ-02)

作者简介: 师云云 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为薄膜技术。

Biography: SHI Yun-yun (1994—), Female, Postgraduate, Research focus: film processing technique.

通讯作者: 徐均琪 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为薄膜技术。

Corresponding author: XU Jun-qi (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: film processing technique.

引文格式: 师云云, 徐均琪, 刘政, 等. 多波段大口径全介质高反膜的设计与制备[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 335-341.

SHI Yun-yun, XU Jun-qi, LIU Zheng, et al. Design and Preparation of Large Aperture High Reflective Films Composed Entirely of Dielectric Materials for Multi-band Application[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 335-341.

**ABSTRACT:** This paper aims to select  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  high and low refractive index materials, design and prepare 500~650 nm, 780~830 nm, 1 050~1 080 nm three-band compatible dielectric high reflective films. The spectral properties, stress characteristics and laser damage resistance of high reflective films composed entirely of dielectric materials for multi-band application are studied, and the large aperture film samples with good stress state are obtained. The process parameters of monolayer films were studied, with the monitoring wavelength 560 nm, based on the electric field intensity distribution, and film structure was optimized to be  $G/(\text{HL})^8\text{H}(2\text{L})^4(1.4\text{H}1.4\text{L})^8\text{H}2\text{L}(1.9\text{H}1.9\text{L})^81.9\text{H}/\text{A}$ . Low refractive index layers were added between different film stacks to suppress the nominal problem, and the reflectance spectral was smoothed, wide-band large-size multilayer high reflective film with good performance was successfully prepared on a large aperture substrate of  $\phi 220$  mm by ion beam assisted electron beam evaporation technology. Its reflectance spectral was in the visible light range of 500~650 nm, with the average reflectivity of 99.5%, the peak reflectivity of 99.9%, the minimum reflectivity was 95.1%; within the scope of 780~830 nm, the peak reflectivity was 99.9%, and the average reflectivity was 99.8%, and the minimum reflectivity was 99.6%; in the 1 050~1 080 nm band, its average reflectivity could reach 99.8%, and the peak reflectivity reached 99.9%, and the minimum reflectivity reached 99.7%; reflectance spectral of large aperture film sample at different positions were high consistent. The laser-induced damage threshold of film was  $7.1\text{ J}/\text{cm}^2$ , and the residual stress was  $-293.59\text{ MPa}$ . The film thickness uniformity of large aperture film sample is good, and the film is compact without wrinkle, crack and falling off phenomena, with higher fastness and excellent laser protection performance.

**KEY WORDS:** thin films; large aperture; multi-band; residual stress; laser-induced damage threshold

随着战场环境的多变与严峻,对现代军用电光仪器的要求日益增高,传统的单波段器件已难满足实际需求,取而代之的是多波段光学系统的应用<sup>[1-2]</sup>。新型一代的光电系统应集可见光目视成像探测、测距瞄准与红外追踪攻击多功能为一体,通过设计多波段多功能的器件来确保激光通信的高效能。目前大口径反射膜的研制通常是金属膜与介质膜的组合镀制<sup>[3]</sup>,然而金属膜存在理化稳定性差、光损耗吸收大等不足,不适于高能激光系统的使用。由高低折射率交替蒸镀的全介质膜层则能实现更高的反射率和微弱的吸收损失,在高能激光系统中应用的大口径高反膜只能限定为全介质材料<sup>[4]</sup>。

随着空间探测、对地遥感、天文观测等学科领域发展的新需求出现,相关光电设备为实现更高的分辨率和成像质量、更大的视场,大口径反射镜的应用亟待解决。口径越大,集光能力越强,探测能力越强。高性能大型光学系统所需的大口径薄膜是提高峰值功率激光光束质量的核心器件<sup>[5]</sup>。多波段多功能的介质膜目前大多镀制在小口径基底上<sup>[6]</sup>,然而,较高反射率期望下需要更多全介质膜层堆叠来实现,膜厚变大导致的粘附性降低、应力放大、损耗增加、易脱落等一系列问题限制其反射率的进一步提高,因此要针对全介质膜层的应力问题进行深入研究。薄膜在制备过程中应力的产生机制是极为繁杂的,主要包括膜层结构缺陷引起的本征应力以及热膨胀系数失配导致的热应力<sup>[7]</sup>。在应力调节方面,通过掺杂改善膜层应力是卓有成效的<sup>[8-9]</sup>。Haider 团队<sup>[10]</sup>所做的工作是在  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  2 个压缩应力材料之间加镀拉伸应力的 Cr 层,以此达到膜层总应力的调整改良。从装夹方式与基底方面考虑,蜂窝状中空结构的夹具能够以较

小的接触应力实现对大口径光学元件的柔性装夹与清洁装配<sup>[11]</sup>。此外。白金林等<sup>[12]</sup>在理论模拟得到膜层应力形变前提下,指出将基底的待镀膜面预加工出与该方向相反的面形能够进行薄膜应力的补偿与控制。

相比于小口径较为成熟的镀膜工艺而言,大口径衬底上沉积的多层全介质高反射薄膜却因膜层牢固性和均匀性差、膜层厚、应力大造成的基板变形及膜层破裂等问题阻滞了大口径镀膜技术的进一步提升,是目前薄膜制备领域关注的焦点之一。通过设计优化夹具、修正挡板来不断改善大口径膜层品质,将膜厚均匀性控制在很好的范围内<sup>[13-14]</sup>。徐旭<sup>[15]</sup>另辟蹊径采用逆向蒸镀方式将镜面置上,镀膜材料朝下蒸发,成功制备了口径为  $\phi 500\text{ mm}$  的银加介质保护高反射镜样片,在面形改善方面,该技术行之有效。从分析单层  $\text{HfO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  的残余应力规律出发,通过不断调整离子源的工艺参数,实现 2 种膜料的应力状态相匹配。此外,应用于强激光系统中的高反射薄膜,除了要满足需求的光学特性之外,更加注重的是其抗激光损伤性能。目前高反膜的抗激光损伤阈值较低,因此从影响薄膜抗激光损伤能力的因素着手,研究膜料选定、膜系设计以及制备工艺优化等,围绕提高其抗激光损伤阈值所开展的工作是不可或缺的。采用将离子后处理与热退火相结合的方法<sup>[16-17]</sup>,被证实能够有效去除薄膜表面缺陷<sup>[18]</sup>,释放残余应力,进一步提高膜层的抗激光损伤能力<sup>[19]</sup>。现今,全介质高反膜的这些问题亟待解决,方有望突破激光器高功率输出的瓶颈期。

本文在完成主镜 3 波段高反膜的设计制备前提下,对膜层的光谱、抗激光损伤性能以及应力特性进行表征分析,能够实现可见波段目标物的识别、808 nm 激光追踪标定、1 064 nm 激光出射,集目标捕获、定

位跟踪以及激光攻击多功能一体化。对于多波段全介质大口径高反射薄膜的研究能够弥补高功率激光系统领域存在的光谱探测波段单一、高反膜激光防护性能薄弱、大口径薄膜沉积应力状态欠佳等不足。

1 试验

试验  $\phi 220\text{ mm}$  大口径薄膜样片的制备在型号 ARES 1350、腔体直径 1.2 m 的莱宝镀膜机上完成,膜层厚度的精准控制采用晶控片,直接监控薄膜的沉积速率,起伏波动非常小,能够获得稳定的膜层折射率,实时显示电子枪的束流以及当前所镀膜层的物理厚度,精准控制薄膜的光学性能。基底材料为 K9 ( $\phi 220\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ),高低折射率材料选择  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 。

制备的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  薄膜均为非晶结构,通过 M-2000UI 椭偏仪对其折射率进行测量。薄膜样片光谱反射性能的测试基于 PerkinElmer Lambda 950 分光光度计的通用反射率附件 (Universal Reflectance Accessory, URA) 进行的。借助 PGI OPTICS 型超精细粗糙轮廓仪测量基底在镀膜前后的曲率半径,通过式 (1) 拟合计算得到曲率半径参量,代入表 1 中薄膜以及基底材料的物理力学性能参数,从而达到对多层膜残余应力表征的目的。

$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \tag{1}$$

式中:  $\sigma$  为薄膜残余应力;  $t_s$ 、 $t_f$  为基底、薄膜的厚度;  $E_s$ 、 $\nu_s$  为基底杨氏模量、泊松比;  $R_1$ 、 $R_2$  为基底在镀膜前后的曲率半径。

采用输出波长为 1 064 nm 的调 Q Nd: YAG 脉冲激光器,依据 ISO 21254-1 中单发脉冲只辐照 1 个测试点的 1-on-1 方法对薄膜的激光损伤阈值进行检测。

表 1 材料的物理与力学性能参数  
Tab.1 Physical and mechanical performance parameters of materials

Materials	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Coefficients of thermal expansion/( $10^{-6}\text{ K}^{-1}$ )
$\text{TiO}_2$	230	0.27	9.19
$\text{SiO}_2$	73.1	0.17	0.55
K9	79.7	0.21	7.2

2 结果与讨论

2.1 膜系设计

3 波段不同反射率要求的膜系设计综合性较强,要设计出一个膜系,一方面能够满足光学系统的设计要求;另一方面还要具备工艺可实现性,考虑膜厚增加引起的应力放大问题以及场强分布问题等。反射光谱要求满足:  $13^\circ$  斜入射,可见光 500~650 nm 波段内,光波的反射率  $R>95\%$ ; 近红外 808 nm 波长点处,  $R>85\%$ ; 激光工作波长(1 064 $\pm$ 40) nm 处,实现反射率  $R>99\%$ 。

理想的梳状膜系,在分别实现 3 个单波段反射率的前提下,同时需考虑除这 3 个波段以外其余波段的反射率抑制、截止度情况,薄膜沉积难以实现预期反射率指标。将膜系优化为具有较宽反射带的结构方法证明是卓有成效的。表 2 列举了膜系  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  对应的材料、设计波长以及膜层物理厚度。在 550 nm 波长点下,利用 APS (Advanced Plasma Source) 离子源辅助沉积的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  薄膜折射率分别为 2.37 和 1.46,消光系数分别为  $1.02\times 10^{-2}$ 、 $7.68\times 10^{-4}$ 。通过 TFC 光学薄膜设计软件,模拟了 3 种膜系的反射光谱,如图 1 所示。

表 2 膜系参数  
Tab.2 Parameters of film systems

Film system	Symbol	Central wavelength/nm	Materials	Thickness/nm
G/(HL) <sup>8</sup> H (1.4H1.4L) <sup>8</sup> H (1.9H1.9L) <sup>8</sup> /A	$S_1$	570	$\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$	5 557.69
G/(HL) <sup>8</sup> H 2L (1.4H1.4L) <sup>8</sup> H 2L (1.9H1.9L) <sup>8</sup> /A	$S_2$	570	$\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$	5 949.77
G/(HL) <sup>8</sup> H (2L) <sup>4</sup> (1.4H1.4L) <sup>8</sup> H 2L (1.9H1.9L) <sup>8</sup> /A	$S_3$	570	$\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$	6 537.88
G/(HL) <sup>8</sup> H (2L) <sup>4</sup> (1.4H1.4L) <sup>8</sup> H 2L (1.9H1.9L) <sup>8</sup> 1.9H/A	$S_4$	560	$\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$	6 651.98

Note: G: Glass, H: High refractive index, L: Ligh refractive index, A: Air; 1.4, 1.9 and 2 represent multiples of 560 nm relative to the monitoring wavelength.

从图 1 能够直观看出,  $S_1$  膜系在不同膜堆之间由于前一个膜堆最后一层高折射率薄膜与后一个膜堆的第一层高折射率薄膜,二者会形成虚设层,导致此波长点处的透射率很高,膜堆之间反射率降低,光谱曲线下陷。为了解决这一问题,在膜堆之间添加低折射率层 2L 来抑制虚设,平滑反射光谱。改进的膜系  $S_2$  很好地改善了虚设问题,在可见与近红外膜堆之间,曲线仍然下陷。通过继续在前 2 个膜堆之间增加

低折射率膜层数,膜系变为  $S_3$ ,膜堆之间杂乱的波谷大幅降低,光谱曲线更为平滑,平均反射率能够达到 99% 以上。理论上膜层数增多,界面对膜层应力的影响被放大<sup>[20]</sup>。

$S_3$  膜系电场强度分布曲线图 2a 所示,横坐标表示基底、膜层以及空气界面的位置,纵坐标为归一化电场强度(电磁波在薄膜内部的振幅与入射场振幅比值的平方)。膜层与空气界面处的电场强度为 3.993,

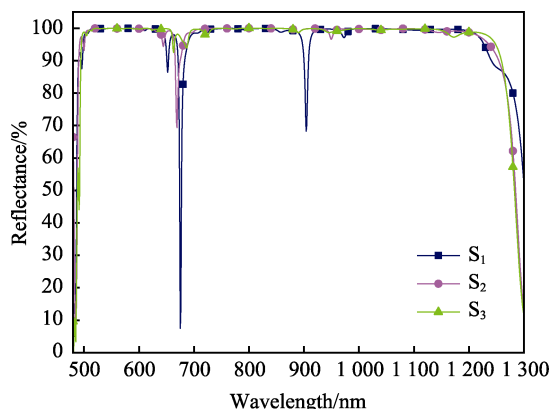


图1 TFC模拟的改进3波段兼容反射率光谱曲线  
Fig.1 Improved three-band compatible reflectance spectrum curve simulated by TFC

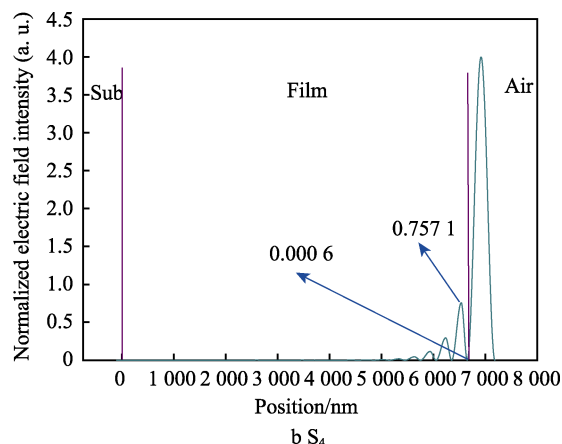
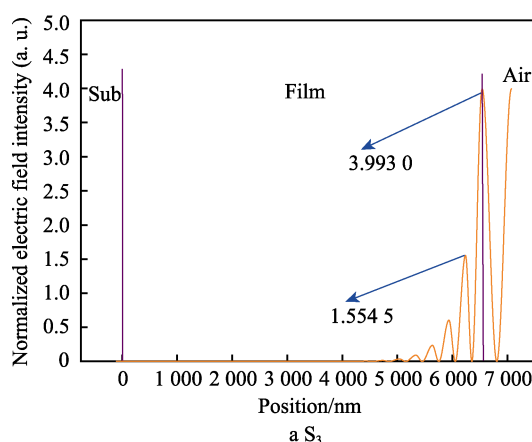


图2 膜系电场强度分布  
Fig.2 Electric field intensity distribution of film systems

## 2.2 大口径薄膜制备

按照表3中的工艺参数进行口径 $\phi$  220 mm 基底

上宽波段多层高反射薄膜的沉积。图3为在 $\phi$  220 mm 口径上成功制备的宽带高反薄膜样片，膜层致密均匀，无起皱龟裂脱落现象出现。

表3 单层膜的工艺参数  
Tab.3 Process parameters of monolayer films

Materials	Electron beam current/mA	Deposition rate/(nm·s <sup>-1</sup> )	Working pressure/(10 <sup>-2</sup> Pa)	Oxygen flow rate/(mL·min <sup>-1</sup> )	Ion source parameters		Substrate temperature/°C
					Anode voltage/V	Cathodic current/A	
TiO <sub>2</sub>	348	0.35	2.3	50	135	55	160
SiO <sub>2</sub>	80	0.8	1.4	—	16	50	160



图3 宽波段高反薄膜样品  
Fig.3 Physical image of wide-band high reflective film sample

膜层内的峰值电场强度为 1.554 5。最后一层膜与空气界面处的电场强度很大,使得膜层在激光辐照下非常容易发生损伤,通过将膜系调整为  $S_4: G/(HL)^8H (2L)^4 (1.4H1.4L)^8H 2L (1.9H1.9L)^81.9H/A$ , 高折射率膜层作为整个膜系的最外层,相比低折射率材料而言,吸收损耗更低,应力更小,且损伤防护性能更好<sup>[21-22]</sup>。在反射光谱几乎保持不变的前提下,将电场强度峰值位置转移到膜层中间,避免其处于膜层与空气界面处,能够大幅降低膜层与空气界面处的电场强度(如图2b所示),该值仅有 0.000 6,理论上具备较为优良的激光防护性能。膜系  $S_1-S_4$ ,膜层总厚度增大,膜层数的变化引起的应力变化需与膜系的电场强度分布综合考虑。

## 2.3 光谱一致性

实测的宽波段反射率曲线如图4所示。测试结果表明,在 13°斜入射情况下,在可见光 500~650 nm 波段内,平均反射率为 99.5%,最低反射率为 95.1%,峰值反射率为 99.9%;在 780~830 nm 内,最低反射率为 99.6%,峰值反射率为 99.9%,平均反射率为 99.8%;在 1 050~1 080 nm 波段内,其平均反射率能够达到 99.8%,最低反射率是 99.7%,峰值反射率达到 99.9%。

不同膜堆之间仍然存在小幅度的波谷,其相互影响,始终不能通过加镀低折射率层完全抑制消除。相

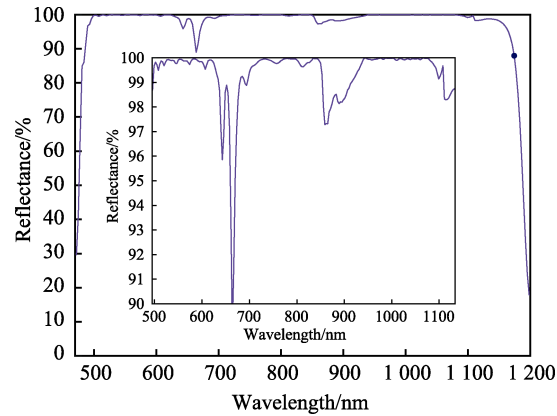


图 4 实测的宽波段反射率曲线  
Fig.4 Measured wide-band reflectivity curve

比梳状膜系而言, 这种宽波段的反射光谱是稍能容易实现, 无需考虑除 500~650 nm、780~830 nm 以及

1 050~1 080 nm 这 3 个波段以外波段的反射率要求。  
膜层的牢固性和膜厚均匀性是大口径反射镜镀膜的重点<sup>[23]</sup>, 镀制宽带高反膜之前, 在工件架的开孔盘中心  $r=0$  处, 以及从上到下沿直径  $r=\pm 75$  mm 分别放置 3 个裸片。通过对比 3 个位置的反射光谱 (见图 5), 来研究大口径膜厚的均匀性, 多层膜光谱曲线的漂移情况就直接反映了膜层的厚度问题。  
从图 5 中 3 个插图能够看出, 3 个位置的反射率光谱相比较而言, 上面位置的曲线稍微有向短波方向漂移的情况, 下面位置的反射光谱有往长波方向偏移的情况, 上面位置膜层厚度稍薄, 下面位置膜层厚度稍厚, 尚不能通过基片的公转完全消除。膜厚不同时, 样片表面会呈现出不同的颜色, 而制备的宽带高反膜样片表面颜色一致, 且不同位置反射光谱近乎重合, 因此足够认为大口径薄膜样片的膜厚均匀性较为良好。

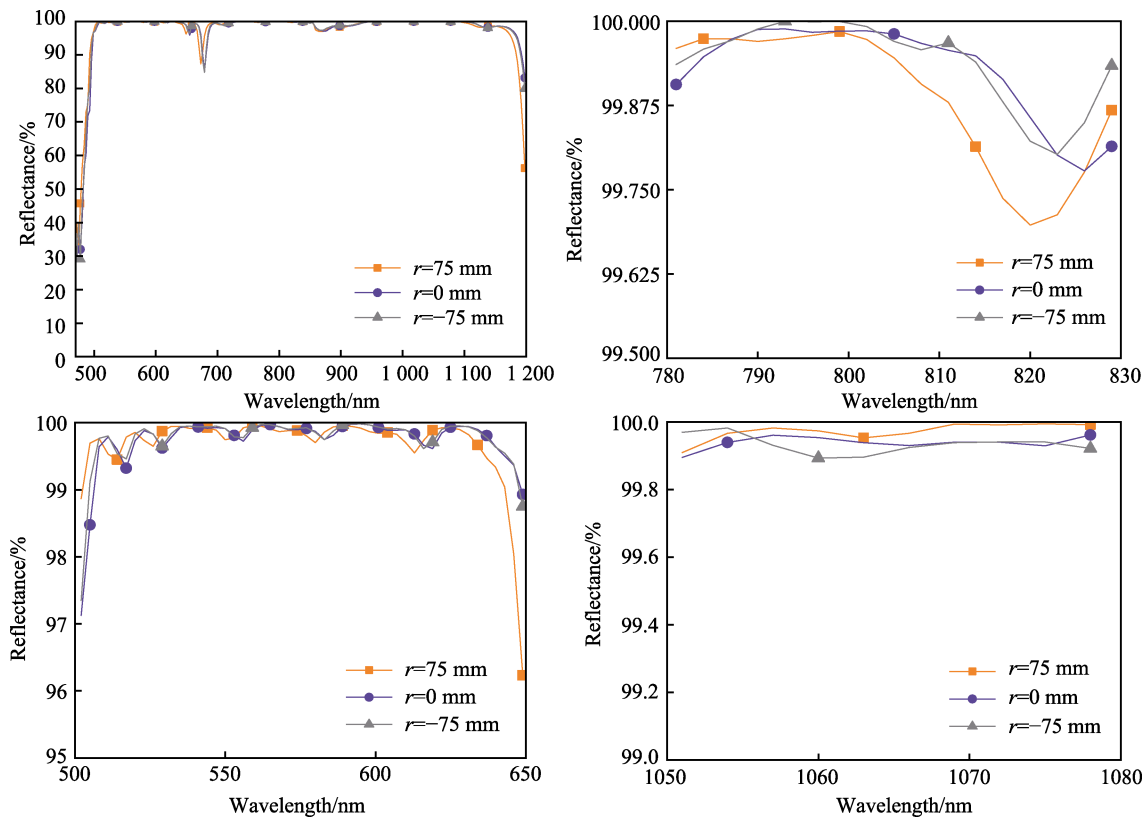


图 5 3 个位置的光谱反射率曲线  
Fig. 5 Spectral reflectance curves of the three positions

## 2.4 抗激光损伤性能

对制备的宽波段多层高反膜进行抗激光损伤性能的测试, 通过损伤数据的原始线性拟合 (见图 6) 得到薄膜的抗激光损伤阈值。拟合直线方程为  $y=12.02x-426.59$ , 其中,  $x$  为激光能量,  $y$  为损伤几率。零几率损伤对应的最小能量  $Q_{\min}=35.49$  mJ, 则宽带高反膜的抗激光损伤阈值 LIDT (Laser-induced

Damage Threshold) 为  $7.1$  J/cm<sup>2</sup>。  
为了进一步证实上述结果, 研究中用远高于其零几率能量的激光能量辐照薄膜表面, 在激光作用下, 薄膜表面出现损伤。在显微镜下获取 50 mJ 激光能量辐照下的损伤形貌, 如图 7 所示。虽然在高能激光的作用下薄膜样品发生了损伤, 但宽带高反膜并未从基底上脱落, 薄膜样品的膜基结合力较好, 成膜致密, 激光防护性能较为优异。

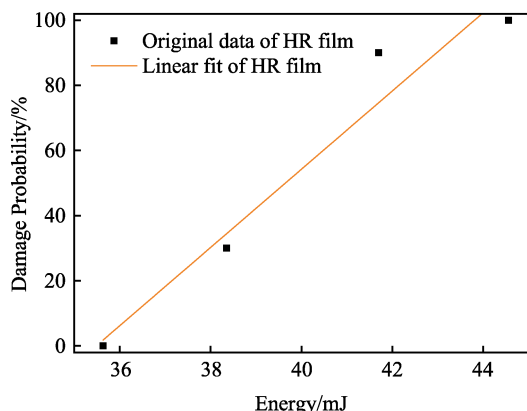


图6 宽波段高反膜的损伤数据拟合

Fig.6 Fitting of damage data of wide-band high reflective film

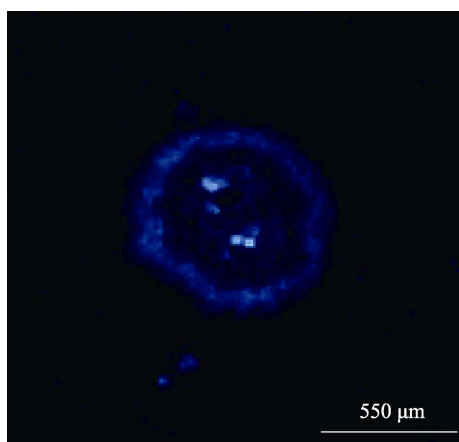


图7 宽波段高反膜的激光损伤形貌

Fig.7 Laser damage morphology of wide-band high reflective film

## 2.5 应力特性分析

基底在镀膜前后的弯曲曲线如图8所示。面形为凸时,曲率半径为负值,凹的面形对应正曲率半径<sup>[24]</sup>。基底在未镀膜前的曲率半径为 $-1.58 \times 10^9 \mu\text{m}$ ,宽带高反射薄膜沉积完成之后,基底的曲率半径变为 $-5.64 \times 10^8 \mu\text{m}$ 。多层膜的总厚度为6 651.98 nm,基底厚度为10 mm,代入表1中基底材料的杨氏模量以及泊松比,根据修正的Stoney公式(1)计算得到膜层的残余应力为-293.59 MPa,应力状态表现为压应力。

一方面,离子源的使用致使成膜较为致密,致密度越高,薄膜往往表现出较高的压应力状态<sup>[25]</sup>;另一方面,设计的宽波段高反射薄膜从500~1 100 nm其光谱平均反射率为99.4%,峰值反射率达到99.9%,这就需要增加膜层数来满足光谱性能要求,膜层数的增多可能会引起应力增大。多层膜应力状态均表现为压应力的原因是,在高低折射率组合镀制的多层膜中,氧化硅薄膜呈现压应力状态,且氧化硅薄膜的成分较多,低折射率材料膜层数比较多,膜厚相比高折射率膜层厚度大很多,占据总体膜厚的比例较大,所以多层膜均表现的是压应力。

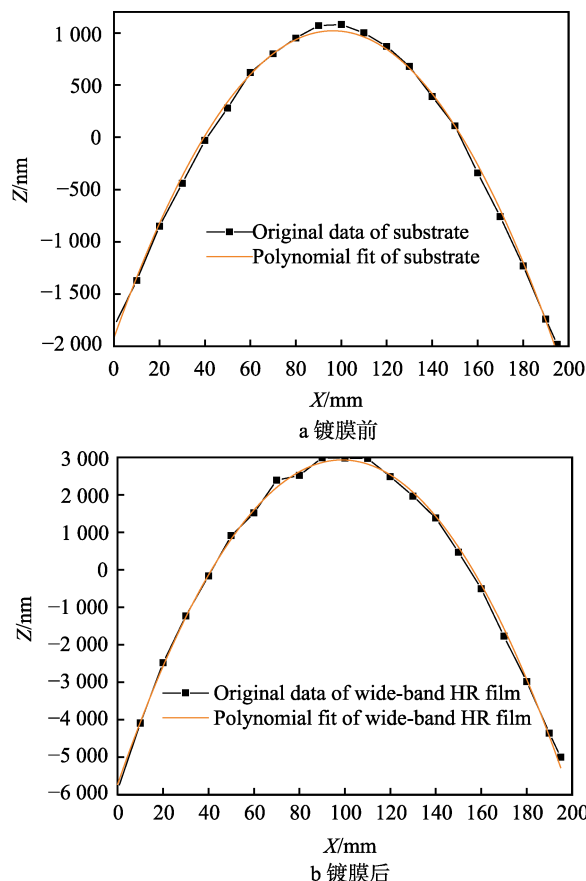


图8 宽波段多层高反膜弯曲曲线的拟合

Fig.8 Fitting of bending curves of multi-layer high reflective film in wide band: a) before deposition; b) after deposition

## 3 结论

采用 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 膜料组合,最终设计优化的膜系为 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}(2\text{L})^4(1.4\text{H}1.4\text{L})^8\text{H}2\text{L}(1.9\text{H}1.9\text{L})^81.9\text{H}/\text{A}$ ,成功在 $\phi 220 \text{ mm}$ 大口径基底上制备得到多波段高反射薄膜样片,反射光谱平滑。在500~650 nm、780~830 nm、1050~1080 nm 3个波段内,该膜系满足反射率要求。高反射膜层致密度高,抗激光损伤阈值为 $7.1 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,残余应力测量为-293.59 MPa。大尺寸薄膜其膜层牢固性以及膜厚均匀性良好,无起皱、龟裂、脱落等现象出现。

## 参考文献:

- [1] 查家明, 徐武松, 李斯成, 等. 0.45~12  $\mu\text{m}$  多波段减反射膜的研制[J]. 光学仪器, 2014, 36(2): 175-181.  
ZHA Jia-ming, XU Wu-song, LI Si-cheng, et al. Manufacture of 0.45-12  $\mu\text{m}$  Multiband Spectrum Anti-Reflection Coating[J]. Optical Instruments, 2014, 36(2): 175-181.
- [2] 米高园, 张建付, 韩俊, 等. 电视、激光、中波红外多波段增透膜研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 593-596.  
MI Gao-yuan, ZHANG Jian-fu, HAN Jun, et al. Research



- on Antireflection Coating for TV, laser, mid-Infrared Wavebands[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(5): 593-596.
- [3] ZUO Hui, HE Si-yuan. FPCB Masked One-Step Etching Large Aperture Mirror for LiDAR[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, 29(4): 571-584.
- [4] FIELD E S, KLETECKA D E. Impact of Contamination and Aging Effects on the Long-Term Laser Damage Resistance of  $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2/\text{TiO}_2$  High Reflection Coatings for 1054 nm[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 105105.
- [5] CAMPBELL J H, HAWLEY-FEDDER R A, STOLZ C J, et al. NIF Optical Materials and Fabrication Technologies: An Overview[C]//*Proc SPIE 5341*. [s.l.]: Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory II: the National Ignition Facility, 2004.
- [6] COSAR M B, AYDOGDU G H, BATMAN H, et al. A Solution to Adhesion Problem of Oxide Thin Films on Zinc Selenide Optical Substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 314: 118-124.
- [7] SHUGUROV A R, PANIN A V. Mechanisms of Stress Generation in Thin Films and Coatings[J]. *Technical Physics*, 2020, 65(12): 1881-1904.
- [8] 张而耕, 牛帅, 陈强, 等. Cu 掺杂类金刚石薄膜应力降低机制的第一性原理研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 295-300.
- ZHANG Er-geng, NIU Shuai, CHEN Qiang, et al. First-Principles on Stress Reduction Mechanism of Copper Doped Diamond-Like Carbon Films[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 295-300.
- [9] OLIVER J B. Evaporated  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  Optical Coatings and Modifications for High-Power Laser Applications[D]. New York: University of Rochester, 2012.
- [10] HAIDER M L, ULLAH A, ALI B. Stress Optimization for a MEMS Multilayer Fixed-Fixed Beam[J]. *Optik*, 2018, 157: 988-992.
- [11] WANG Hui, LONG Kai, ZHANG Zheng, et al. Investigation of a Low-Stress and Low-Contamination Clamping Method for Large-Aperture Optics[J]. *Science Progress*, 2020, 103(1): 003685041988010.
- [12] 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 Jin-lin, JIANG Yu-gang, WANG Li-shuan, 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.
- [13] 石澎, 张宁, 王丽荣, 等. 大口径反射镜片镀膜技术研究[J]. *冶金与材料*, 2018, 38(6): 39-40.
- SHI Peng, ZHANG Ning, WANG Li-rong, et al. Study on Coating Technology of Large Aperture Mirror[J]. *Metallurgy and Materials*, 2018, 38(6): 39-40.
- [14] 艾万君, 熊胜明. 离子束辅助沉积大口径光学薄膜[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 183-188.
- AI Wan-jun, XIONG Sheng-ming. Large Optical Coatings Fabricated by Ion Assisted Technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 183-188.
- [15] 徐旭. 大口径主镜薄膜制备及其特性研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2018: 97-113.
- XU Xu. Study on Preparation and Characterization of Optical Coatings for Large-Aperture Primary Mirrors[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 97-113.
- [16] MAO Si-da, FAN Jie, ZOU Yong-gang, et al. Effect of Two-Step Post-Treatment on Optical Properties, Microstructure, and Nanosecond Laser Damage Threshold of  $\text{HfO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  Multilayer High Reflection Films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2019, 37(6): 061503.
- [17] 肖来荣, 聂艳春, 赵小军, 等.  $\text{MoSi}_2$  涂层残余应力和结合强度的有限元分析[J]. *表面技术*, 2020, 49(8): 203-209.
- XIAO Lai-rong, NIE Yan-chun, ZHAO Xiao-jun, et al. Finite Element Analysis of Residual Stress and Bonding Strength of  $\text{MoSi}_2$  Coating[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(8): 203-209.
- [18] 马永胜, 杨雨晨, 景泳森, 等. 薄膜缺陷研究进展综述[J]. *表面技术*, 2021, 50(3): 91-100.
- MA Yong-sheng, YANG Yu-chen, JING Yong-miao, et al. Review on the Study Progress in Defects of Coating[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(3): 91-100.
- [19] FANG Mei-hua, TIAN Peng-yu, ZHU Mao-dong, et al. Laser-Induced Damage Threshold in  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  Multilayer Films Irradiated by  $\beta$ -Ray[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(2): 024215.
- [20] WANG Di, LIN Song-sheng, SHI Qian, et al. Microstructure Effects on Fracture Failure Mechanism of  $\text{CrAl}/\text{CrAlN}$  Coating[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(3): 3657-3664.
- [21] CHAWLA V, HOLEC D, MAYRHOFFER P H. Interfacial Coherency Stress Distribution in  $\text{TiN}/\text{AlN}$  Bilayer and Multilayer Films Studied by FEM Analysis[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 55: 211-216.
- [22] LONG Guo-yun, ZHANG Yao-ping. Fabrication and Damage Characteristics of Low Stress HR Films for Femtosecond Laser System[C]//*Second Symposium on Novel Technology of X-Ray Imaging*. [s.l.]: SPIE, 2019, 11068: 345-350.
- [23] CHOI Y M, YOO H, KANG D. Large-Area Thickness Measurement of Transparent Multi-Layer Films Based on Laser Confocal Reflection Sensor[J]. *Measurement*, 2020, 153: 107390.
- [24] ZHANG Long, ZHANG Xiao-min, SONG Ji-yun, et al. Thermo-Induced Curvature and Interlayer Shear Stress Analysis of MEMS Double-Layer Structure[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2020, 32(4): 1127-1139.
- [25] 顾培夫, 郑臻荣, 赵永江, 等.  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  薄膜应力的产生机理及实验探索[J]. *物理学报*, 2006, 55(12): 6459-6463.
- GU Pei-fu, ZHENG Zhen-rong, ZHAO Yong-jiang, et al. Study on the Mechanism and Measurement of Stress of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  Thin-Films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(12): 6459-6463.