

双面镀膜法制备高面形精度滤光片

董莹 陶忠 赵兴梅 师建涛 王冠

Research on high surface shape accuracy filter fabricated by dual-deposition method

DONG Ying, TAO Zhong, ZHAO Xingmei, SHI Jiantao, WANG Guan

引用本文:

董莹, 陶忠, 赵兴梅, 等. 双面镀膜法制备高面形精度滤光片[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 1049–1055. DOI: 10.5768/JAO202445.0505003

DONG Ying, TAO Zhong, ZHAO Xingmei, et al. Research on high surface shape accuracy filter fabricated by dual-deposition method[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 1049–1055. DOI: 10.5768/JAO202445.0505003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0505003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矩形波宽带通滤光膜研究

Research on rectangular-wave broadband pass filter film

应用光学. 2023, 44(1): 188–194 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105002>

微通道板碘化铯膜层抗潮解超薄保护膜层

Anti-deliqescence ultra-thin protective film of cesium iodide film on MCP

应用光学. 2022, 43(6): 1196–1201 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604021>

基于超表面的多通道窄带滤光片研究

Research on multi-channel narrow-band filter based on metasurface

应用光学. 2024, 45(1): 184–191 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0105002>

用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备

Design and preparation of cut-off filter for observation scope

应用光学. 2022, 43(2): 221–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201006>

减反膜的梯度化与激光损伤阈值之间的关系研究

Relationship between gradient of antireflection film and laser induced damage threshold

应用光学. 2019, 40(1): 143–149 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107003>

激光清洗汉白玉表面油漆层的实验研究

Experimental study on laser cleaning of paint layer on white marble surface

应用光学. 2022, 43(2): 352–358 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0207003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-1049-07

双面镀膜法制备高面形精度滤光片

董 莹, 陶 忠, 赵兴梅, 师建涛, 王 冠

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 对双面镀膜法制备高面形精度滤光器件进行研究, 通过在一面沉积带通滤光膜, 另外一面沉积应力/形变匹配膜层的方式, 制备了外径 $\Phi 25$ mm, 径厚比为 10:1 的 HWB900 基底高面形精度带通滤光膜。测试结果显示: 在通带 1215 nm~1265 nm 波段的平均透过率 $\bar{\tau} \geq 92\%$, 截止带 900 nm~1135 nm、1345 nm~1700 nm 内透过率 $\bar{\tau}_{\max} < 1\%$, 镀膜后零件 2 个表面的均方根 (root-mean-square, RMS) 值均优于 $\lambda/20$ 。深入分析双面镀膜时 2 个表面面形的变化规律, 确定了匹配膜层的厚度及该方法的使用特点。该方法实践性强, 制备的光学器件光学性能优异, 面形精度高, 对高面形精度光学器件的制备具有重要参考价值 and 指导意义。

关键词: 带通滤光膜; 表面面形; 膜层应力; 形变量; 匹配层

中图分类号: TN305.8; O484.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0505003

Research on high surface shape accuracy filter fabricated by dual-deposition method

DONG Ying, TAO Zhong, ZHAO Xingmei, SHI Jiantao, WANG Guan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The preparation of high surface shape accuracy bandpass filter by double-sided coating method was studied, and the HWB900 substrate high surface shape accuracy bandpass filter film with outer diameter of $\Phi 25$ mm and diameter-thickness ratio of 10:1 was prepared by dual-deposition. On one side the bandpass filter film was deposited and the matching layer was then coated to eliminate the stress-induced deformation on the other side. The results show that the mean transmittance $\bar{\tau}$ is greater than or equal to 92% in the passband between 1215 nm~1265 nm, the transmittance $\bar{\tau}_{\max}$ is less than 1% in the rejection band between 900 nm~1135 nm and 1345 nm~1700 nm, and the root-mean-square (RMS) values of both side are superior than $\lambda/20$. Following a comprehensive analysis of the deformation law in both side, the thickness of the matching layer and the use characteristics of this method were determined. The described method has high practicality, and the prepared optical devices have excellent optical performance and high surface accuracy, which has important reference value and guiding significance for the preparation of optical devices with high surface shape accuracy.

Key words: bandpass filter film; surface shape; film stress; deformation quantity; matching layer

引言

随着共孔径军用光电装备适用波段的扩展, 光学元件越来越复杂, 元件的径厚比、膜层厚度都不断增大, 膜层应力的影响越来越严重^[1]。高面形精度复杂膜系结构的光学器件严重制约光电装备的发展。研究高面形精度滤光片制备工艺对光学薄膜技术发展及光电装备提升都有极大促进作用。

高面形精度滤光片工艺研究涉及膜层应力理论、控制方法、应力形变等方面。1909 年, STONEY

G G 建立了应力/形变关系, 该公式适用于薄膜/厚基底的弹性形变范围^[2]。1999 年, KIM J S 等将 Stoney 公式扩展到硅基多层复合材料的应力计算^[3]。之后, TOWNSEND P H、KLEIN C A、HSUEH C H、ZHANG X C 等分别以弹性形变理论为基础, 根据不同情况采取近似, 对 Stoney 公式进行精度分析和修正, 给出了应力计算精度随膜层/基底厚度比值的变化情况, 使用该修正公式可以计算膜层/基底厚度比值达到 0.2 时的应力情况^[4-8]。对更大

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-04-23

作者简介: 董莹 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光学薄膜、光学工艺及光学系统设计研究。E-mail: dy3284@126.com

厚度膜层或形变超出弹性范围的器件,一直没有适当的应力模型及应力计算方法。随着计算机技术发展,相关学者使用有限元分析法模拟应力的发展:1999年,SPENCE P A 仿真分析了高反膜应力形变过程^[9]; GENSEMER S、李阳、QIAO Guanbo 等利用有限元法仿真了大口径零件自重、镀膜引起的应力集中及形变现象^[10-12]; 2022年, FU Hang 等模拟 K9 透镜的应力分布及集中情况,建立了一种非球面透镜的应力松弛模型^[13]。

在高面形精度光学薄膜制备方面,膜层应力控制或双面镀膜技术取得了一定成果。2012年, LI Y Q 等研究分析了 IAD 法制备 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜层应力性质随工艺参数、退火条件的变化规律^[14]。2014年, BISCHOFF M 等对高反膜零件后处理,可大幅改变膜层应力状态^[15]。2020年, TIEN C L、GUO C 等通过膜层厚度、应力匹配制备了低应力、高面形精度的红外滤光膜和 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 三波段高反膜^[16-17]。2020年, OLIVER J B 等在薄膜样片表面镀制了一层非均匀厚度的平滑膜层,达到了高面形精度的目的^[18]。2021年, TIEN C L 等引入层间应力,预测膜系应力并制备了低应力激光反射膜及中波带通滤光膜^[19]。双面镀膜也是制备高面形精度薄膜器件的一种常用方法,2018年, MORI H 以同种工艺,使第二膜层厚度略大于第一膜层厚度,制备了高面形精度的 X-射线金属反射膜^[20]。2019年, BEGOU T 结合膜层匹配和双面镀膜法,在石英基底上制备的各类滤光膜零件^[21],在不超过全口径 80% 的范围内表面峰谷值优于 $\lambda/20$ 。随着光电装备及光电探测器件的不断发展,共孔径军用光电系统使用的波段更宽,探测器灵敏度更高,用于可见光/近红外(780 nm~3000 nm)共孔径系统的各类光学膜厚度成倍增加,引入的残余应力及形变愈发显著,成为制约高性能共孔径光电装备的瓶颈,该波段的全孔径高面形精度滤光片尚未见报道。

针对外径 $\Phi 25$ mm、径厚比 10:1 的 HWB900 基底,使用离子束辅助沉积技术,制备了通带波段为 1215 nm~1265 nm,通带透过率 $\tau \geq 92\%$,截止带波段为 900 nm~1135 nm 和 1345 nm~1700 nm,截止带透过率 $\tau_{\max} \leq 1\%$ 的带通滤光膜。通过深入研究,以两面应力/形变膜层匹配的双面镀膜方式,在单面镀膜满足样片光谱性能的条件下,给背面匹配应力/形变膜层,获得了镀膜后两面表面 RMS 值小于 $\lambda/26$ 的高面形精度滤光片。该方法制备的滤光片面形精度高、光谱性能优异,工艺性强。最

后,对背面应力/形变匹配膜层的厚度及双面镀膜的特性进行分析,给出应力/形变匹配膜层的厚度,并指出利用双面镀膜法实现高面形精度器件制备的适用性。

1 理论分析

光学膜层的应力/形变关系由 Stoney 公式给出:

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

式中: E_s 、 ν_s 表示基底的杨氏模量和泊松比; t_s 、 t_f 表示基底和膜层厚度; R_1 、 R_2 表示镀膜前后零件表面的曲率半径。

滤光膜基底一般都是平面,平面零件的矢高 H_{power} 、曲率半径 R 、直径 D_s (或半径 $r_s = D_s/2$) 三者之间的关系如图 1 所示。

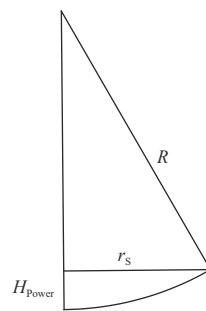


图 1 平面零件矢高和直径的关系

Fig. 1 Relationship between vector height and diameter for planar element

矢高 H_{power} 很小,在忽略矢高 H_{power} 值二阶小量的条件下,矢高 H_{power} 可以表示为

$$H_{\text{power}} = \frac{D_s^2}{8} \frac{1}{R} \quad (2)$$

带入式(1)中可得:

$$\sigma_r = \frac{4E_s \cdot t_s^2}{3(1-\nu_s) \cdot D_s^2} \frac{\Delta H_{\text{power}}}{t_f} \quad (3)$$

由式(3)可知:薄膜残余应力的计算与基底直径 D_s 、基底厚度 t_s 、膜层厚度 t_f 、基底杨氏模量和泊松比 E_s 和 ν_s 等均有关。

Stoney 公式适用于薄膜/厚基底的情况,准确性与厚度相对比值 $r_t = t_f/t_s$ 、杨氏模量相对比值 $\gamma_E = E_f/E_s$ 有关。KLEIN C A、HSUEH C H 等通过研究给出了精度更高的修正公式,并通过理论分析得出:在厚度相对比值 $r_t < 0.01$ 的情况下,使用 Stoney 公式计算残余应力时和杨氏模量相对比值 γ_E 无关,此时应力测试误差不超过 5%^[3,5-8]。

Stoney 公式及其修正公式是基底形变法测试薄膜残余应力的理论基础。虽然以 IAD 技术沉积的多层滤光膜层具有柱状结构,其厚度、折射率以及材料形态均存在不均匀性,无法给出本文中所述膜层的杨氏模量具体值,不能使用理论计算的方法直接给出膜系引入的残余应力,但是应力/形变关系依然遵循式(3)的规律。

2 膜系设计

项目需求的滤光片光谱指标为: 外径 $\Phi 25$ mm、径厚比 10:1 的 HWB900 材料基底, 通带波段 $1215\text{ nm} \sim 1265\text{ nm}$ 的平均透过率 $\bar{\tau} \geq 92\%$, 截止带 $900\text{ nm} \sim 1135\text{ nm}$ 、 $1345\text{ nm} \sim 1700\text{ nm}$ 内透过率 $\bar{\tau}_{\max} < 1\%$, 同时镀膜后零件 2 个表面 RMS 值优于 $\lambda/20$ 。此类高面型精度滤光膜的难点是在保证光谱的同时, 满足镀膜后零件表面的面形要求。

2.1 材料参数

使用配备英福康 IC5 石英晶控仪的 ZZSX-800M 真空镀膜机作为膜层沉积设备。针对本文所述光学薄膜的适用波段, 通常选择 TiO_2 、 SiO_2 分别作为高、低折射率材料。

SiO_2 折射率为 1.46, 十分稳定。高折射率材料 TiO_2 使用 Umicore 公司产的 Ti_2O_3 镀膜材料, 采用电子束加热蒸发方式, 沉积 TiO_2 膜层。高折射率膜层的沉积工艺参数为: 烘烤温度 $275\text{ }^\circ\text{C}$, 本底真空 $2.4 \times 10^{-3}\text{ Pa}$, 沉积速率 $2\text{ \AA/s}$, 工艺气体 O_2 , 工作真空度 $3.4 \times 10^{-2}\text{ Pa}$, 使用美国 J.A.Woollam 公司的 M2000UI 型椭偏仪测试制备的 TiO_2 薄膜样片, 利用 Cauchy 模型拟合得到 TiO_2 薄膜的色散曲线, 如图 2 所示。

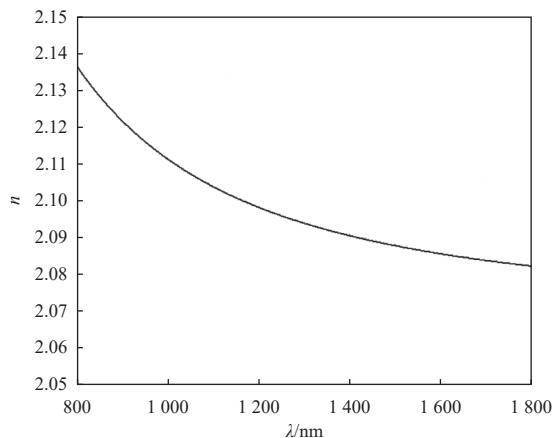


图 2 TiO_2 膜层色散曲线

Fig. 2 Dispersion curve for TiO_2 films

2.2 膜系结构

分析所述光学膜层的光谱要求, 可以看出该光学薄膜器件是一种带通滤光片, 透过率包含一个通带及两侧的截止带。进一步分析滤光片的通带透过率要求可知, 只在一面镀制带通滤光膜即可满足光谱需求。

考虑到样片需同时满足表面面形精度的要求, 故在另外一面沉积单层 SiO_2 作为应力/形变匹配膜层。在 HWB900 基底上沉积匹配膜层 SiO_2 不会改变样品的透过率。通过双面镀膜方法, 提高镀膜后样片的表面面形精度。

使用 TFCalc 软件设计得到的带通滤光膜透过率曲线如图 3 所示。

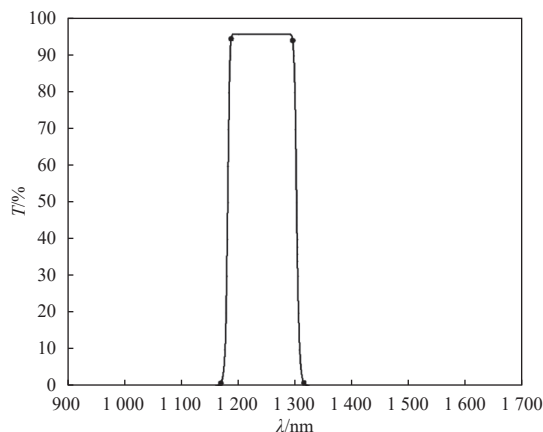


图 3 单面带通滤光膜的模拟透过率曲线

Fig. 3 Simulated transmittance curve of single sided band-pass filter film

由理论设计的透过率曲线图 3 可知: $\lambda=1187\text{ nm} \sim 1295\text{ nm}$ 波段透过率 $\tau > 94\%$, 截止带 $\lambda=900\text{ nm} \sim 1170\text{ nm}$ 及 $\lambda=1315\text{ nm} \sim 1700\text{ nm}$, 截止带透过率 $\tau < 1\%$, 满足滤光片光谱要求。

软件模拟结果显示: 该带通滤光膜的厚度总计 19906.97 nm , 其中高折射率材料 TiO_2 总厚度为 8192.90 nm , 低折射率材料 SiO_2 总厚度为 11714.07 nm 。

由于 A 面膜层已经满足光谱需求, 因此 B 面可以只沉积应力/形变匹配膜层, 提升样片的整体表面面形精度即可。在前期研究中, 对以本文所属工艺参数制备的高、低折射率膜层应力性质进行了测试标定, 结果显示: 高折射率材料 TiO_2 表现出拉应力状态, 应力较小; 低折射率材料 SiO_2 表现出压应力状态, 应力数值较大。可以预见, 当这 2 种膜层相互交替沉积时, 制备的带通滤光膜会显

示出较强的压应力,因此需要在 B 面沉积 SiO_2 膜层,抵消 A 面应力引起的形变,B 面膜层厚度需通过实验确定。

完成样片应力/形变匹配后,B 面相当于在 HWB900 基底上镀制了单层 SiO_2 薄膜,还有光学薄膜设计空间,可以在 B 面已有单层 SiO_2 的基础上再次设计减反射膜系,进一步提升样片的整体透过率。

3 测试分析

本实验零件需要同时满足光谱性能和表面面形 2 个方面的指标要求,使用 Perkin Elmer 的 Lambda950 型分光光度计测试样片透过率,使用 VeriFire XP/D 型 ZYGO 干涉仪测试零件表面面形参数。

双面镀膜实现高面形精度滤光片制备工艺中,每一步都会对样片表面产生一定的影响。因此,在镀膜前,一面镀制带通膜后,背面补偿后均需记录零件两面的面形参数。为测试和标记方便,抛光完成的 HWB900 基片分别标记为 A、B 面,其中 A 面为带通滤光膜沉积面,B 面为单层 SiO_2 补偿膜面。

膜层镀制前,对抛光完成的基片表面形貌进行测试,结果如图 4 所示。

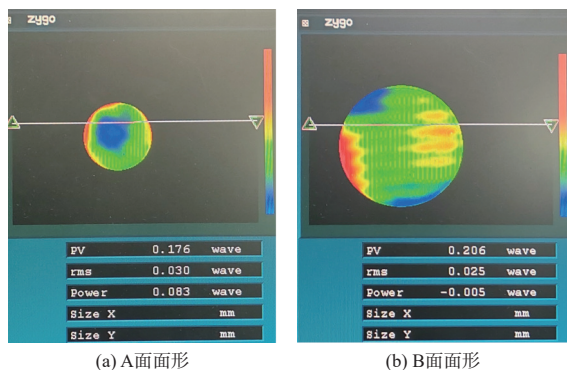


图 4 HWB900 基片的表面面形

Fig. 4 Surface shape of HWB900 substrate

可以看出:样片抛光后,2 个表面 RMS 均不超过 $\lambda/30$,矢高不超过 0.09λ 。

3.1 带通膜测试分析

3.1.1 光谱性能测试

使用 2.1 中所述工艺方法,在 A 面沉积 2.2 中所述的带通滤光膜,完成膜层镀制后测试样片的透过率和表面面形,样片的透过率如图 5 所示。

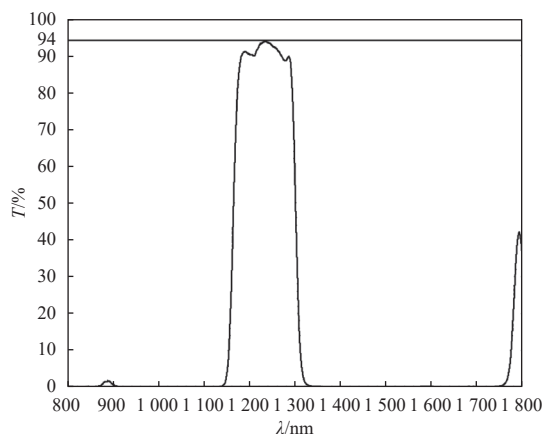


图 5 单面带通滤光膜透过率测试结果

Fig. 5 Test results of transmittance of single-sided bandpass filter film

由图 5 可以看出:样片在 $\lambda=900\text{ nm}\sim 1135\text{ nm}$ 、 $\lambda=1345\text{ nm}\sim 1700\text{ nm}$ 波段截止,截止波段内透过率 $\tau_{\max}<1\%$,在通带 $\lambda=1215\text{ nm}\sim 1265\text{ nm}$ 的透过率不低于 91% ,平均透过率 $\bar{\tau}=92.71\%$ 。

比较制备样片的实测透过率和设计透过率发现:样片实测透过率有一定降低,通带波纹起伏较大,这是因为膜层非常厚,膜层透过率损耗较大,因此和设计透过率相比,实测样片的透过率曲线下降;另一方面,膜层厚度大,镀膜过程后期控制精度显著下降,造成通带波段波纹加深。总体来看,通过在一面沉积带通滤光膜的方法,制备得到的样片通带和截止带符合零件指标,通带及截止带透过率达到样片要求,样片整体光谱性能达到设计要求,满足项目所需。

3.1.2 表面面形测试

A 面沉积完带通滤光膜后,分别测试样片镀膜面 A 面和未镀膜面 B 面的表面面形,测试结果如图 6 所示。

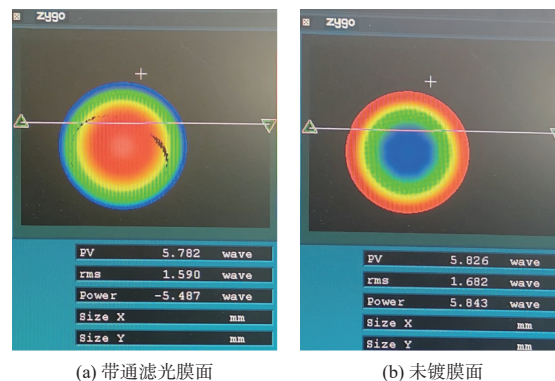


图 6 沉积单面带通滤光膜后的样片表面面形

Fig. 6 Surface shape of sample after depositing single-sided bandpass filter film

对沉积单面带通滤光膜的样片表面面形测试结果图6分析可知:1)带通滤光膜具有较大的残余压应力,A面在严重的残余压应力作用下,中心明显向外突出;2)由于玻璃基底具有一定弹性,在A面作用下,未镀膜面B面受到反向的压应力,中心向内严重弯曲,表现出非常明显的低光圈效果;3)比较镀膜后2个表面面形的数值发现,在薄膜应力作用下,未镀膜面B面的形变量更大,这和以往的认知有显著区别。

3.2 匹配层沉积及测试

A面单面沉积带通滤光膜后,样片透过率已经满足光学性能需求,因此B面沉积单层 SiO_2 膜层作为应力/形变匹配层时,只考虑应力/形变或面形指标即可。

在对图6沉积单面带通滤光膜后的样片表面面形分析中已经明确:虽然B面未镀膜,但该表面的形变量大于镀膜面A面。根据式(3)可知,相同条件下形变量或 ΔH_{power} 和残余应力正相关,为了匹配较大残余应力,则必然需要配镀残余应力更大的膜层。由此可以断定:想要利用背面镀膜的方式进行反向应力/形变匹配,则B面膜层的残余应力应大于A面。

对B面匹配 SiO_2 膜层的厚度进行了多次试验,结果表明:当B面 SiO_2 膜层厚度超过A面带通膜中 SiO_2 材料总厚度11714.07 nm,约为12400 nm时,样片具有最高表面面形精度。此时测试样片表面面形如图7所示。

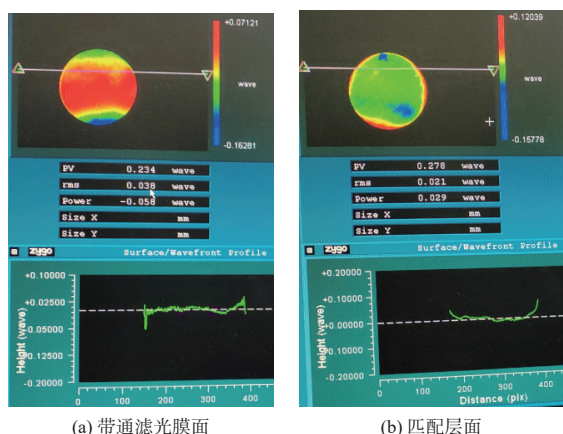


图7 背面匹配应力/形变膜层后样片表面面形测试结果
Fig. 7 Test results of surface shape of sample after matching stress/deformation film on back

图6中弯曲大致均匀,边缘效应也不是特别明显;匹配应力/形变膜层后,在图7(a)中样片A面

出现了局部面形不一致、边缘效应显现的特征。排除工装夹具以及图6中相对误差较小等缘故外,很可能是由于此时A面的弹性形变已经达到弹性形变极限,无法完全依靠应力引起的弹性形变达到零件表面高面形精度的目标。

由图7(b)可知,此时 SiO_2 膜层的匹配厚度比较合适,匹配膜层表面RMS值达到 $\lambda/50$ 。这也从实践的角度再次验证了“应力/形变匹配膜面B面的膜层残余应力应大于A面,才有可能使得匹配镀制B面应力/形变匹配层后,样品的表面面形达到最优”这一结论。

如图7所示,测试沉积完应力/形变匹配膜层后,样片A面的RMS值为 0.038λ ,表面矢高 $H_{\text{power}} = -0.058\lambda$,B面的RMS值为 0.021λ ,表面矢高 $H_{\text{power}} = 0.029\lambda$ 。可以看出,零件表面RMS均超过 $\lambda/26$,满足零件表面RMS优于 $\lambda/20$ 的要求,制备零件的表面面形满足零件的指标要求。

同零件基底相比,制备零件的2个表面面形均有一定程度下降。这是由于零件膜层厚度过大,表面粗糙度增加,叠加零件表面面形的因素后,表面RMS值必然增加。

在3.1中,通过单面镀制带通滤光膜的方式制备带通滤光片,测试样品透过率,结果显示光谱性能满足要求;在3.2中,通过给带通滤光片的背面镀制单层 SiO_2 ,作为应力/形变匹配膜层的方式,制备了高面形精度的带通滤光片,测试零件2个面的表面面形,结果显示2个零件的表面RMS均优于 $\lambda/20$ 。综合光谱性能和表面面形2个方面的测试结果可知,制备样片满足要求。

4 分析讨论

以双面镀膜,背面匹配应力/形变膜层的方式制备得到了表面RMS优于 $\lambda/20$ 的高面形精度带通滤光膜,并对实验结果进行了分析。得出结论:膜层应力引入的形变对零件2个表面的影响不一致,未镀膜面的形变量更大,这可能是玻璃本身存在一定弹塑性的原因。由于目前无法计算多层介质薄膜的残余应力,因此,即使按照弹塑性力学原理计算出玻璃基底弹性形变、塑性形变对应的极限应力,也不能定量给出该极限应力对应的膜系结构,这给双面镀膜制备高面形精度滤光片的方法带来了一定的挑战。

为进一步验证背面应力/形变匹配方法的适用性,使用相同方法,在表面RMS值均优于 $\lambda/20$ 的

相同基底上制备 $\lambda=960\text{ nm}\sim 1080\text{ nm}$ 通带透过率 $\bar{\tau}\geq 92\%$, $\lambda=900\text{ nm}\sim 920\text{ nm}$ 、 $\lambda=1100\text{ nm}\sim 1700\text{ nm}$ 截止带透过率 $\tau_{\max}<1\%$ 的带通滤光膜。以本实验所用材料作为高、低折射率材料进行膜系设计,在 A 面沉积带通滤光膜满足光谱性能,在 B 面沉积单层 SiO_2 作为应力/形变匹配膜层,该带通滤光膜膜系设计透过率曲线如图 8 所示。

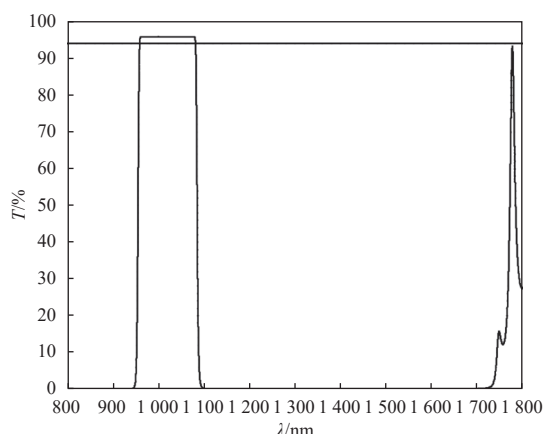
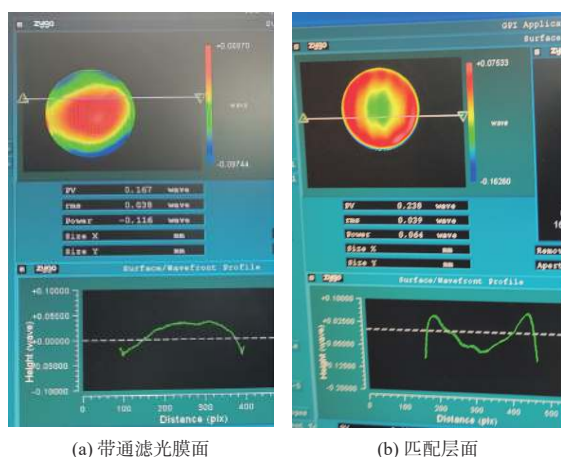


图 8 验证膜系设计透过率曲线

Fig. 8 Transmittance curve of verified membrane system design

该膜系总厚度为 21858.18 nm, 其中 TiO_2 膜厚为 8953.92 nm, SiO_2 膜厚为 12904.27 nm。带通滤光膜沉积完成后,在 B 面沉积单层 SiO_2 膜作为应力/形变匹配层,当 SiO_2 膜层厚度达到 13500 nm 左右时,样片表面 RMS 最小。镀膜完成后测试样片的表面面形,结果如图 9 所示。



(a) 带通滤光膜面

(b) 匹配层面

图 9 双面镀膜制备的带通滤光片表面面形测试结果

Fig. 9 Test results of surface shape of bandpass filter prepared by double-sided coating

从图 9 可以看出:按照相同工艺,以背面匹配应力/形变膜层的方式,制备得到了镀膜后表面面

形均优于 $\lambda/25$ 的高面形精度带通滤光膜。同时也可以得出:沉积有带通滤光膜的 A 面表面 RMS 值为 0.038λ , B 面表面 RMS 值为 0.039λ , 整体依然保持规则弯曲的同时又包含强烈的边缘效应,边缘部分已经匹配过量,中心部位仍然没有完全消除背面反向压应力引入的零件弯曲。可以预见,如果此时继续增加匹配膜层厚度,则 A 面的局部面形不一致情况会进一步增大, B 面的边缘效应更加强烈,整体面型也会继续变差。因此可以得出:对于该滤光片零件,使用背面匹配应力/形变膜层的方式,受到玻璃弹塑性的影响,已经接近匹配可获得的表面面形极限,使用该方法无法获得表面面形显著提升的效果。

5 结论

针对 HWB900 材料、径厚比 10 : 1、外径 $\Phi 25\text{ mm}$ 基底上的高面形精度带通滤光膜进行研究,在样品单面沉积带通滤光膜满足零件光谱性能,另一面沉积单层 SiO_2 作为应力/形变匹配膜层,通过双面镀膜的方式制备得到了实验样片。测试样片的光谱性能和表面面形,测试结果表明,薄膜样片的光谱性能满足要求,镀膜后 2 个表面的 RMS 值均低于 $\lambda/26$ 。对应力/形变匹配膜层的厚度进行实验,结果表明:在以背面应力/形变膜层匹配的双面镀膜方法制备高面形精度膜层过程中,未镀膜面的形变量要大于镀膜面,同时该方法存在局部面形偏离和边缘效应的现象,关于使用该方法能够获取的表面面形极限还有待进一步研究。本研究中所述的方法和经验对高面形精度光学零件的制备具有重要作用,关于双面镀膜法的适用性还需作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张博, 张峰, 刘永强. 多波段共孔径离轴三反光学系统设计[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 654-660.
ZHANG Bo, ZHANG Feng, LIU Yongqiang. Design of multi-band off-axis three-mirror optical system with common aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 654-660.
- [2] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1909, 82(553): 172-175.
- [3] KIM J S, PAIK K W, OH S H. The multilayer-modified

- Stoney's formula for laminated polymer composites on a silicon substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(10): 5474-5479.
- [4] TOWNSEND P H, BARNETT D M, BRUNNER T A. Elastic relationships in layered composite media with approximation for the case of thin films on a thick substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(11): 4438-4444.
- [5] KLEIN C A. Comment on " the multilayer-modified Stoney's formula for laminated polymer composites on a silicon substrate" [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(9): 5499-5500.
- [6] HSUEH C H. Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(12): 9652-9656.
- [7] HSUEH C H, LEE S, CHUANG T J. An alternative method of solving multilayer bending problems[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2003, 70(1): 151-154.
- [8] ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. Error analyses on some typically approximate solutions of residual stress within a thin film on a substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(5): 053516-1-5.
- [9] SPENCE P A, KANOUFF M P, RAY-CHAUDHURI A K. Film-stress-induced deformation of EUV reflective optics[C]//Emerging Lithographic Technologies III. Santa Clara, CA: SPIE, 1999: 724-734.
- [10] GENSEMER S, GROSS M. Figuring large optics at the sub-nanometer level: compensation for coating and gravity distortions[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31171-31180.
- [11] 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): 488-494.
- LI Yang, XU Junqi, LIU Zheng, 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): 488-494.
- [12] QIAO G B, HU H X, ZHANG X J, et al. Stress-induced deformation of the coating on large lightweight freeform optics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 4755-4769.
- [13] FU H, XUE C X, LIU Y, et al. Prediction model of residual stress during precision glass molding of optical lenses[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): 1194-1202.
- [14] LI Y Q, WANG H Q, WANG W Y, et al. Effect of ion-beam assisted deposition on the film stresses of TiO_2 and SiO_2 and stress control[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1382-1388.
- [15] BISCHOFF M, NOWITZKI T, VOß O, et al. Postdeposition treatment of IBS coatings for UV applications with optimized thin-film stress properties[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): A212-A220.
- [16] TIEN C L, LIN H Y. Accurate prediction of multilayered residual stress in fabricating a mid-infrared long-wave pass filter with interfacial stress measurements[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36994-37003.
- [17] GUO C, KONG M D. Fabrication of ultralow stress $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ optical coatings by plasma ion-assisted deposition[J]. *Coatings*, 2020, 10(8): 720: 1-14.
- [18] OLIVER J B, SPAULDING J, CHARLES B. Stress compensation by deposition of a nonuniform corrective coating[J]. *Applied Optics*, 2019, 59(5): A54-A57.
- [19] TIEN C L, CHEN K P, LIN H Y. Internal stress prediction and measurement of mid-infrared multilayer thin films[J]. *Materials*, 2021, 14(5): 1101-1-12.
- [20] MORI H, OKAJIMA T, ZHANG W W, et al. Reflective coatings for the future X-ray mirror substrates[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray. Austin, USA: SPIE, 2018: 1069941-1-8.
- [21] 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, Optics, Image Science, and Vision*, 2019, 36(11): C113-C121.