

激光与光电子学进展

宽截止高 Q 值带通滤光片研究晏荆龙¹, 王义翔^{1,2*}, 朱华新^{1,2}, 饶东升¹, 刘涛¹¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;²江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 选取 TiO_2 和 SiO_2 作为高、低折射率材料, 采用传统设计方法(将长波通膜系和短波通膜系分别镀制于基底两侧, 厚度分别为 $1.67\ \mu\text{m}$ 和 $8.67\ \mu\text{m}$) 设计了蓝宝石基底宽截止高 Q 值带通滤光片。为避免膜厚差值过大导致的滤光片面形变化较大问题, 重新调配了基底两侧的膜系, 优化后两侧膜层的数量分别为 49 层和 50 层, 膜层厚度分别为 $5.73\ \mu\text{m}$ 和 $4.22\ \mu\text{m}$ 。采用电子束蒸发物理气相沉积法镀制薄膜, 并用分光光度计测试了样品的透过率。实验结果表明, 样品在通带 ($521\sim 596\ \text{nm}$) 内的平均透过率达到 96.59% , 在截止区域的平均透过率为 0.076% , 通带矩形度为 0.95 , 通带两边过渡带的陡度均为 0.89% , 具有高 Q 值的滤光片特性。此外, 实验曲线和设计曲线的一致性较好, 验证了优化两侧膜系结构的有效性。

关键词 薄膜; 膜系设计; 带通滤光片; 薄膜制备

中图分类号 O484 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213103

Study on Band Pass Filter with Wide Cutoff and High Q FactorYan Jinglong¹, Wang Yixiang^{1,2*}, Zhu Huaxin^{1,2}, Rao Dongsheng¹, Liu Tao¹¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;²Jiangsu Province Research Center of Light Industry Opto-Electronic Engineering and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract TiO_2 and SiO_2 are selected as high and low refractive index materials, and the sapphire substrate wide cutoff high Q factor band pass filter is designed by traditional design method (the long wave and short wave pass film systems are plated on both sides of the substrate, with the thickness of $1.67\ \mu\text{m}$ and $8.67\ \mu\text{m}$, respectively). In order to avoid the problem of large variation of filter one-sided shape caused by large difference of film thickness, the membrane system on both sides of the substrate is rearranged. After optimization, the number of film layers on both sides is 49 and 50, and the thickness of film layer is $5.73\ \mu\text{m}$ and $4.22\ \mu\text{m}$, respectively. The thin films are plated by electron beam evaporation physical vapor deposition and the transmittance of the samples is measured by spectrophotometer. The experimental results show that the average transmittance of the sample in the passband ($521\sim 596\ \text{nm}$) is 96.59% , the average transmittance in the cutoff region is 0.076% , the rectangularity of the passband is 0.95 , and the steepness of the transition zone on both sides of the passband is 0.89% . It has the characteristics of high Q factor filter. In addition, the experimental curve is in good agreement with the design curve, which verifies the effectiveness of optimizing the structure of the two-sided membrane system.

Key words thin films; thin film design; band pass filter; thin film preparation

1 引言

带通滤光片是光学成像系统的重要组成部分, 能有效截止紫外光和红外光, 显著提高光学系统的信噪比(SNR), 使光波能更合理有效地被利用, 广泛应用于

于资源探测、海洋探测、生物学、通信、天文物理等领域, 如 CCD 相机和互补金属氧化物半导体(CMOS)前端的滤光片。

带通滤光片在光学中的作用相当于带通滤波器在电路中的作用。 Q 值作为衡量滤波器的品质因数, 同

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-01-11; 录用日期: 2022-02-25; 网络首发日期: 2022-03-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605067)、江苏省轻工光电工程技术研究中心(BM2014402)

通信作者: *wangyixiang@jiangnan.edu.cn

样也是衡量滤光片性能的重要参数。 Q 值在滤光片中表示为通带矩形化程度以及通带两边过渡带的陡度:为了体现通带的矩形化程度,引入矩形度作为评判指标;为了体现过渡带的陡峭程度,引入陡度体现截止区与通带间的过渡特征,这两个参数决定了滤光片的稳定性、截止带抑制能力和波纹大小。矩形度、陡度越高,表明带通滤光片的稳定性越好、波纹越小,在系统中的信噪比和 Q 值也越高。由于制备的膜层数量较厚,且监控厚度和膜层折射率容易导致膜系通带内波纹增大以及中心波长位置偏移等现象。因此,高 Q 值带通滤光片的设计和制备比较困难。同时,为了使带通滤光片能适应复杂环境且保持稳定,膜料间的应力匹配也理应适当。

本文主要研究光在垂直入射下,将蓝宝石玻璃作为基底,镀制通带为 520~590 nm,截止区为 300~510 nm 和 600~1100 nm (CCD 的响应范围)波段的滤光片。设计的滤光片技术指标如下:在 520~590 nm 波段内,平均透过率达到 95% 以上,最小透过率不低于 92%,通带内波纹不超过 0.1 T_p (T_p 为通带峰值透过率);在 300~510 nm 和 600~1100 nm 波段内截止,截止区的平均透过率小于 2%。先用传统设计思路在基底两侧分别设置长波通和短波通截止滤光片,且两个截止滤光片分别控制通带两侧的过渡带和截止区。之后,结合实际制备工艺,在传统设计基础上进行改进,使膜系设计和工艺制备相符合,以平衡基底两侧膜层厚度,实现了宽通带高 Q 值(通带矩形化程度高、过渡带陡度高)滤光片设计。

2 干涉截止滤光片的基本原理

相比其他光学玻璃(如石英玻璃),蓝宝石的稳定性和机械性能更好,且易于清洗与处理。此外,蓝宝石具有良好的热学性能,能有效运用于高温生长过程。因此,实验研究采用蓝宝石作为基底。选定基底后,要实现 70 nm 左右的通带宽度,传统的法布里-珀罗(F-P)型窄带滤光片的膜系显然不适合:一方面,通带带宽一般为窄带且由两种材料的折射率决定,无法进行大范围调整;另一方面,截止区域的宽度有限,无法实现宽截止区的特点。因此,只能采用短波通和长波通进行有效组合,为实现宽截止和宽带通的特性^[1-2],长波通滤光片和短波通滤光片的结构可表示为

$$\left[\frac{H}{2} L \frac{H}{2} \right]^M \text{ 和 } \left[\frac{L}{2} H \frac{L}{2} \right]^M \quad (1)$$

其中: H 为 $\lambda_0/4$ 光学厚度的高折射率膜层(λ_0 为中心波长); L 为 $\lambda_0/4$ 光学厚度的低折射率膜层; M 为周期数。膜层的等效折射率 E 可表示为

$$E = \eta_L \sqrt{\frac{\cos \delta_{H/L} (\eta_L + \eta_H)^2 - (\eta_L^2 - \eta_H^2)^2}{\cos \delta_{H/L} (\eta_L + \eta_H)^2 + (\eta_L^2 - \eta_H^2)^2}}, \quad (1)$$

式中:膜层的相位厚度 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \cos \theta$; n 为膜层的折

射率; d 为膜层的厚度; θ 为入射角; η 为薄膜与基底的组合导纳; $\delta_{H/L}$ 为相继矢量的夹角。可以发现,膜材应选用两种折射率差值大的材料,当膜系结构为 $(pqp)^M$,周期数 M 足够大时,截止深度 T_r 可近似为

$$T_r = \frac{16\eta_0\eta_s}{\left(\frac{\eta_H}{\eta_L}\right)^{2M} \left\{ (\eta_0 + \eta_s)^2 + \left[\left(\frac{\eta_0\eta_s}{\eta_L}\right) - \eta_L \right]^2 \right\}}, \quad (2)$$

式中, η_s 为基底的导纳。若 $\eta_H > \eta_L$,则截止带宽度可表示为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\eta_H - \eta_L}{\eta_H + \eta_L} \right). \quad (3)$$

若 $\eta_L > \eta_H$,则截止带宽度可表示为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\eta_L - \eta_H}{\eta_H + \eta_L} \right). \quad (4)$$

综上所述,膜材应选用两种折射率差值大的材料,从而在达到相同的截止深度前提下,所需的膜层周期 M 值更小,对应的膜层数量更少、膜层总厚度更小,宽截止的目标也更易实现^[3]。

3 膜材的选择

设计膜系之前,选择膜材需要考虑的因素包括材料在可见光区域的吸收系数、膜材的透明区、膜材本身的折射率及其化学稳定性、机械强度、机械牢固度、热稳定性等。对于多层膜系的光学元件,需要着重考虑机械牢固度。因此通常选择膜层与基底、膜层与膜层相容性较好的膜材,同时还要考虑各膜层之间的应力是否匹配。根据截止带宽式(3)和式(4)可知,膜材的高低折射率比值越大,截止带宽越宽,根据式(2)可知,对于相同周期数 M ,膜材高低折射率比值越大,则截止深度越好^[4]。

常用的可见光透射膜材有 SiO_2 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 MgF_2 等。其中, SiO_2 折射率约为 1.45,作为低折射率材料时具有较宽的透明区光谱,其物理和化学性质较为稳定^[5],且 SiO_2 的分子形式特殊,能保护薄膜表面的微观形态。同时, SiO_2 对光的吸收小、牢固性优良,综合考虑后选择 SiO_2 作为低折射率材料。 TiO_2 的折射率较高,约为 2.3,且 TiO_2 材料在 350 nm 以下体现出弱吸收的特性,而其他材料如 Ta_2O_5 、 HfO_2 、 ZrO_2 的透明区均可达 300 nm 以下,弱吸收的特性对于截止波段 300~350 nm 有利,使该区域的截止更易实现,根据膜层张应力与压应力相互匹配的原则,最终选择 TiO_2 和 SiO_2 (拉应力大小相近)作为截止组合结构的高低折射率膜材^[6]。

4 膜系设计的结构

为实现滤光片在 300~510 nm 和 600~1100 nm 两个波段上截止,通带为 520~590 nm,通常在基底两侧分别镀制长波通反射膜系(前截止)和短波通反射膜系

(后截止)两组膜系。根据截止带宽的要求,将蓝宝石玻璃作为基底,膜材采用 TiO_2 和 SiO_2 两种材料,先设计出短波通反射膜系^[7-8],如图 1(a)所示。为了使短波通反射膜系达到截止区所需的波段要求(600~1100 nm),需要由 3 个短波通反射膜系拼接而成,将膜系的中心波长设置为 690 nm,短波通膜系分别为 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{12}$ 、 $(0.615\text{L}1.23\text{H}0.615\text{L})^{12}$ 、 $(0.74\text{L}1.48\text{H}0.74\text{L})^{12}$,根据截止深度的要求,将周期数 M 均设置为 12。由于反射

膜系的高级次存在,300~400 nm 波段内存在反射高级次。此外,由于膜层 TiO_2 材料在 350 nm 以下存在弱吸收,整个膜系在 300~400 nm 波段的截止要求基本已由短波通膜系完成,设计长波通膜系时,仅需要考虑 400~520 nm 波段即可^[9-10],设计的长波通膜系如图 1(b)所示。可以发现,长波通膜系由一个反射膜系组成,其结构为 $(0.31\text{H}0.62\text{L}0.31\text{H})^{12}$,中心波长为 690 nm,截止区为 398~487 nm,基本满足截止区的要求。

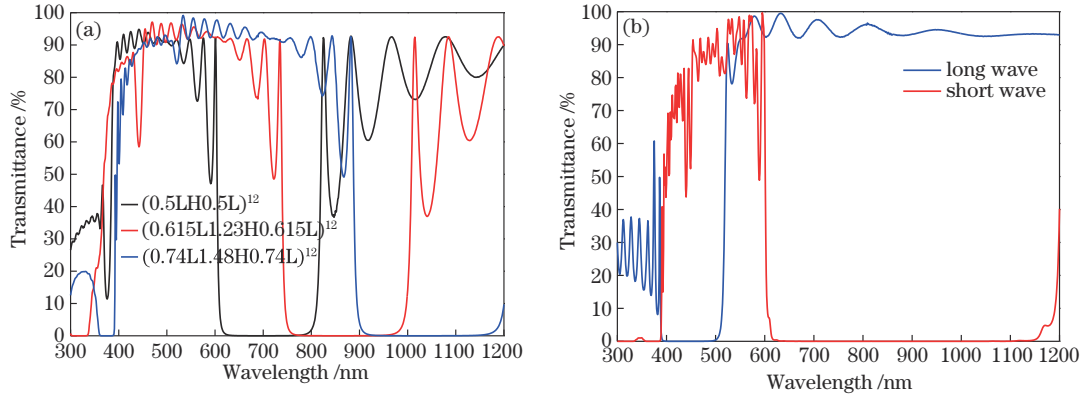


图 1 膜系的透过率曲线。(a)短波通膜系;(b)长波通膜系与短波通膜系

Fig. 1 Transmittance curve of membrane system. (a) Short wave pass membrane system; (b) long wave and short wave membrane systems

通过在蓝宝石基底两侧分别设计这两种短波通和长波通膜系,能实现宽截止区,且能保证通带的波段范围。分析可知:短波通一侧膜层数为 73,膜层总厚度约为 $8.67 \mu\text{m}$;长波通侧膜层数仅为 24,膜层总厚度仅为 $1.67 \mu\text{m}$,两侧膜层数量和膜厚极不均衡。一方面,短波通膜系总厚度接近 $8.67 \mu\text{m}$,镀制所需时间长,膜系制备过程对设备的要求极高,工艺重复性极难保证;另一方面,膜层过厚导致膜层应力较难控制。一般来说,膜层层数越多,产生残余应力的概率就越大,基底越容易变形,不利于光学系统整体波像差的控制。而长波通膜系总体厚度相对较薄,不能有效抵消短波通膜系的残余应力。

为了有效均衡两侧膜系的膜层数量和厚度,本研

究提出了一种将短波通膜系分解出一部分与长波通膜系相结合的方法。当两侧膜系数和厚度相当后,两侧膜系残余应力可进行一部分抵消。由于两组膜系分别控制通带左右两边的过渡带,在短波通膜系中控制长波侧的过渡带为 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{12}$,因此在短波通膜系一侧必然要保留此膜系。此外, $(0.615\text{L}1.23\text{H}0.615\text{L})^{12}$ 膜系作为中间的反射膜堆,能有效弥补 $(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{12}$ 和 $(0.74\text{L}1.48\text{H}0.74\text{L})^{12}$ 两个膜堆的反射带漂移。综合考虑后,将 $(0.615\text{L}1.23\text{H}0.615\text{L})^{12}$ 与 $(0.31\text{H}0.62\text{L}0.31\text{H})^{12}$ 结合。对 4 个反射膜堆进行重新组合,使基底两侧的膜层数量和厚度得到有效均衡,将基底两侧的膜系进行重新组合后得到两组透过率曲线,如图 2(a)所示。其中:2 个短波通膜系的膜层数为 49,膜

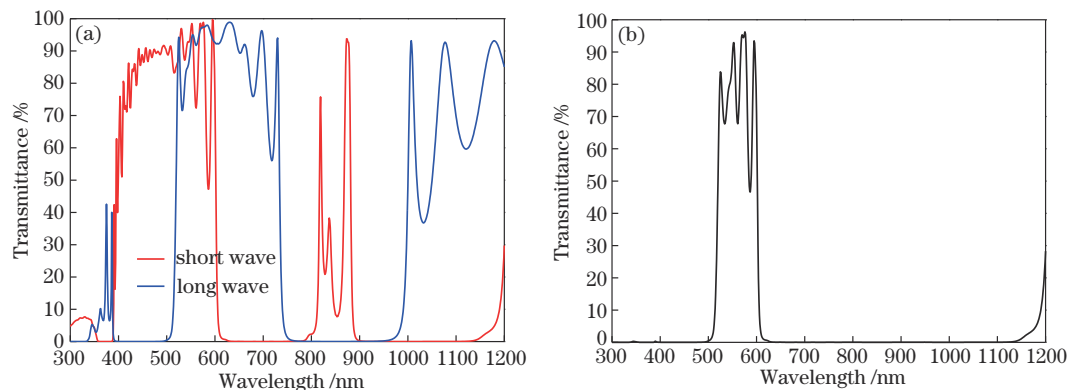


图 2 膜系透过率曲线。(a)基底两侧组合膜系;(b)基底两侧组合膜系结合曲线

Fig. 2 Transmittance curve of membrane system. (a) Composite membrane system on both sides of the base; (b) composite membrane bond curves on both sides of the substrate

层厚度为 $5.79 \mu\text{m}$;长波通膜系与短波通膜系结合的膜层数为 48,膜层厚度为 $4.53 \mu\text{m}$ 。通过对两侧膜系的调整,膜层厚度和层数较为接近。由蓝宝石两侧的透过率曲线通过非相干叠加得到的两侧膜层的整体透射率如图 2(b)所示。可以发现,整体膜系的截止区基本满足要求,但通带内的波纹较大,且透过率偏低。原因是后截止膜系本身容易出现通带波纹,且前截止膜系和后截止膜系相隔太近(二者的耦合作用较强),加剧了通带波纹的振动。波纹的存在会破坏原本入射光线在可见区的色平衡以及降低系统显色性,因此,需要对通带内的波纹进行压缩。考虑到实际制备过程中由于工艺的监控厚度误差,必然会导致通带内出现波纹。为了避免实际制备后通带波纹进一步加大,需要在设计时控制好优化函数,使设计曲线尽量平坦,避免通带内出现波纹。

对两侧的两组膜系分别进行优化设计,以满足通带透过率的要求。优化过程中,两侧的两组膜系需要分别设置优化目标:对于由两个短波通组成的膜系,优化目标除了相应的截止区外,还要压缩整体膜系位于 $520\sim 590 \text{ nm}$ 波段的通带波纹,同时根据高 Q 值的

特性,控制整体膜系通带右侧过渡带的陡度;对于长波通和一个短波通组成的膜系,除了压缩整体膜系位于 $520\sim 590 \text{ nm}$ 波段的通带波纹以及相应的截止区外,还要控制整体膜系通带左侧过渡带的陡度^[11-16]。因此,两个膜系在实际的优化过程中具有各自的优化目标,以达到整体透过率曲线的带通要求以及高 Q 值特性。优化后的两组膜系透过率曲线如图 3(a)所示。可以发现:两个短波通组合膜系优化后的截止区为 $353\sim 390 \text{ nm}$ 、 $603\sim 787 \text{ nm}$ 和 $893\sim 1100 \text{ nm}$,通带为 $520\sim 590 \text{ nm}$ 处的平均透过率为 98.51% ,膜层数仍为 49,膜层厚度从优化前的 $5.79 \mu\text{m}$ 变为 $5.73 \mu\text{m}$,膜层总体厚度变化较小,其他通带外的透射波长范围将由另一侧的膜系完成;另一侧膜系优化后,截止区为 $300\sim 505 \text{ nm}$ 和 $729\sim 946 \text{ nm}$,虽然在 $350\sim 400 \text{ nm}$ 波段出现一系列次透射峰,但该波段为高反射带且 TiO_2 薄膜存在吸收,能有效抑制此处的次透射峰。透过区域为 $506\sim 728 \text{ nm}$ 和 $947\sim 1100 \text{ nm}$,通带 $520\sim 590 \text{ nm}$ 的平均透过率达到 99.09% ,膜层数由 48 变为 50,膜层厚度由优化前的 $4.53 \mu\text{m}$ 变为 $4.22 \mu\text{m}$ 。

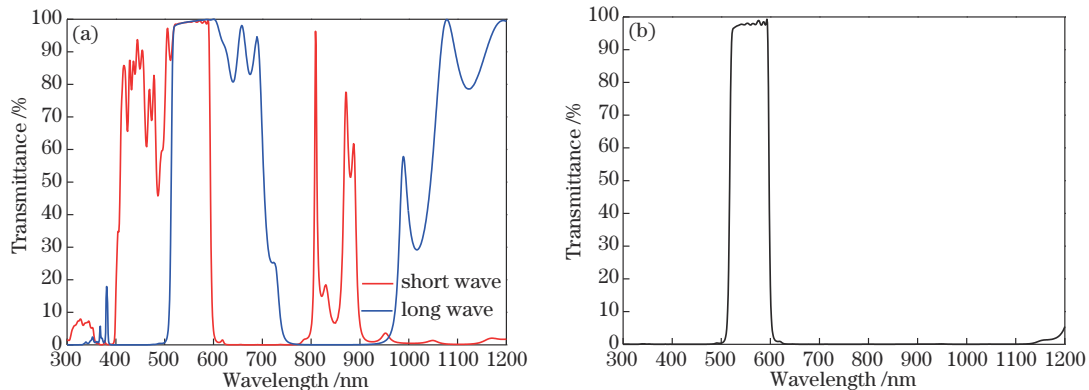


图 3 优化后膜系的透过率曲线。(a)基底两侧组合膜系;(b)基底两侧组合膜系结合曲线

Fig. 3 Transmittance curve of membrane system after optimization. (a) Composite membrane system on both sides of the base; (b) composite membrane bond curves on both sides of the substrate

将两侧膜系进行互补,再基于非相干叠加原理得到设计膜系的整体透过率曲线,如图 3(b)所示。最终设计曲线的膜系结构为 Air | 0.127L 0.278H 0.249L 0.258H 0.257L 0.254H 0.251L 0.244H 0.243L 0.247H 0.249L 0.248H 0.247L 0.24H 0.243L 0.244H 0.247L 0.25H 0.248L 0.243H 0.239L 0.239H 0.279L 0.252H 0.259L 0.33H 0.396L 0.356H 0.382L 0.372H 0.356L 0.395H 0.36L 0.354H 0.412L 0.363H 0.389L 0.382H 0.353L 0.375H 0.361L 0.357H 0.402L 0.37H 0.35L 0.38H 0.295L 0.37H 0.128L | Substrate | 0.157L 0.302H 0.309L 0.324H 0.303L 0.299H 0.316L 0.288H 0.291L 0.32H 0.276L 0.281H 0.323L 0.278H 0.272L 0.331H 0.279L 0.284H 0.328L 0.291H

0.274L 0.318H 0.306L 0.317H 0.165L 0.079H 0.158L 0.153H 0.154L 0.155H 0.151L 0.152H 0.154L 0.154H 0.155L 0.155H 0.156L 0.154H 0.155L 0.152H 0.152L 0.152H 0.153L 0.151H 0.149L 0.146H 0.141L 0.13H 0.136L 0.065H | Air。膜层数为 99,膜层厚度为 $9.95 \mu\text{m}$,将透过率高于 90% 的区域设为通带,透过率低于 2% 的区域设为截止区。可以发现:通带区域为 $518\sim 590 \text{ nm}$,平均透过率为 97.57% ,通带内最高透过率为 99.32% ,位于 589 nm 处;透过率峰半峰全宽为 49.66% ,分别位于 514 nm 和 593 nm 处,通带的半峰全宽为 79 nm 。优化后的通带顶部波纹振幅为 1.79% ,通带内波纹深度为 $0.018T_p(T_p$ 为通带内峰值透过率);截止区为 $300\sim 505 \text{ nm}$ 和 $603\sim 1100 \text{ nm}$,平均截止深度分别达到 0.075% 和 0.062% 。

膜系设计完毕后,采用 ANSYS 有限元模拟对基底两侧的应力进行仿真。多层膜的残余应力包括热应力与本征应力两种,本征应力的成因非常复杂。原因是薄膜沉积过程中的相态变化以及在成膜过程中有微孔、缺陷产生,受制备材料和沉积工艺参数的影响。本征应力是多种物理机制综合作用的结果,很难用理论公式定量计算。而多层膜的热应力仅是由镀膜温度(200 °C)到环境温度(25 °C)之间的温度差引起的,镀膜完毕后,镀膜机从高温降至室温,由于基底和膜层间的热膨胀系数不同,收缩和伸长量不匹配而产生热应力。不同材料的薄膜力学参数如表 1 所示。

使用 ANSYS 有限元模拟建立模型,由于蓝宝石基底的尺寸 Φ 为 50 mm×5 mm(基底直径为 50 mm,厚度为 5 mm),为了减少迭代运算量,建立了四分之一

表 1 材料力的学与热学参数

Table 1 Mechanical and thermal parameters of material force

Material	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Coefficient of thermal expansivity / ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Sapphire	345.00	0.28	6.60
TiO ₂	230.03	0.27	9.00
SiO ₂	73.10	0.17	0.50

个尺寸 Φ 的模型。分别建立传统模型(M1)和优化模型(M2),模拟得到的多层膜总位移云图如图 4 所示。可以发现,多层膜系统 M1、M2 的基底两侧均受热应力,而多层膜总位移在基底一侧发生面形变化,总位移量均呈环状分布,边缘变形量最大且向着薄膜一侧弯曲。

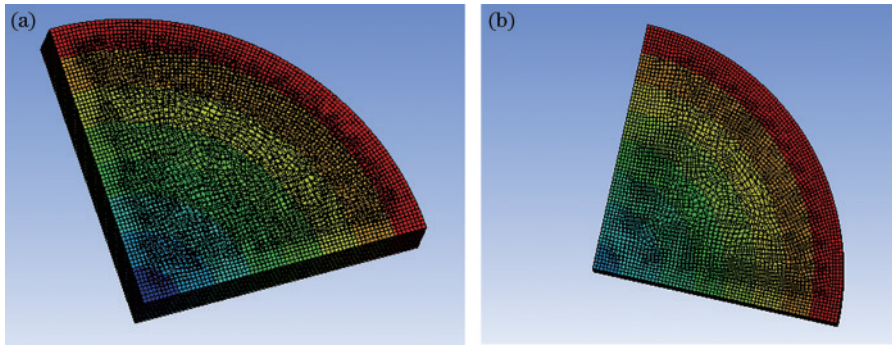


图 4 多层膜总位移云图。(a) M1; (b) M2

Fig. 4 Cloud image of total displacement of multilayer film. (a) M1; (b) M2

对模型 M1 的应力分析结果如图 5 所示。可以发现: M1 两侧的应力分布图,模型 M1 一侧为短波通膜系,共 73 层;另一侧为长波通膜系,仅为 24 层,两侧张应力分别为 137.41 MPa 和 79.56 MPa(定义张应力为正值,压应力为负值);基底两侧膜层层数分别为 73 层和 24 层、总厚度分别为 8.67 μm 和 1.67 μm ,两侧张应

力差值为 57.85 MPa^[17-19]。

对模型 M2 的应力分析结果如图 6 所示。可以发现,模型 M2 基底两侧的膜层总厚度分别为 5.73 μm 和 4.22 μm ,两侧张应力分别为 113.12 MPa 和 112.16 MPa,两侧所受的张力相抵消,整体应力变得更小,仅为 0.96 MPa。

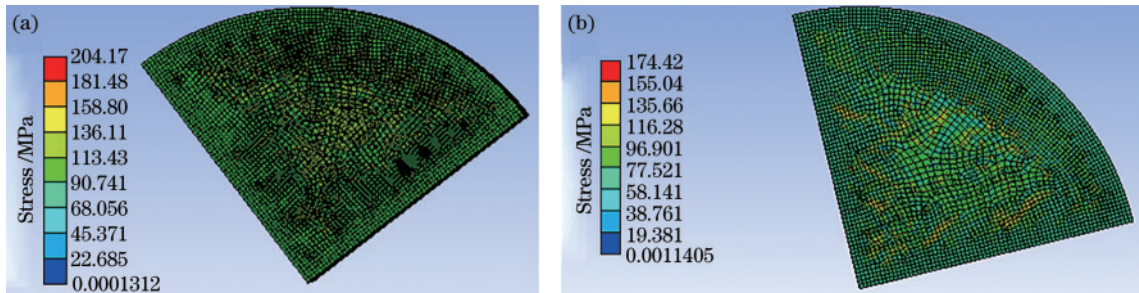


图 5 模型 M1 两侧应力分布图。(a) 短波通膜系一侧; (b) 长波通膜系一侧

Fig. 5 Stress distribution diagrams on both sides of model M1. (a) One side of the short wave pass membrane system; (b) one side of the long wave passing membrane system

通过 Stoney 公式计算模型的面形精度的峰谷(PV),可表示为

$$\sigma = \frac{4E_s}{3(1-\mu_s)} \frac{t_s^2 \Delta P}{t_i D_s^2}, \quad (5)$$

式中: σ 为薄膜应力; E_s 为基底弹性模量; μ_s 为基底材料

泊松比; t_s 为基底厚度; t_i 为膜层厚度; ΔP 为相对面形的 PV; D_s 为基底直径。将两侧的张应力代入式(5),计算得到基底两侧膜系的面形变化 ΔP_1 与 ΔP_2 分别为 101.453 nm 和 74.082 nm。由于面形变化分别位于基底两侧,同为张应力,因此两侧面形会彼此相消,最终

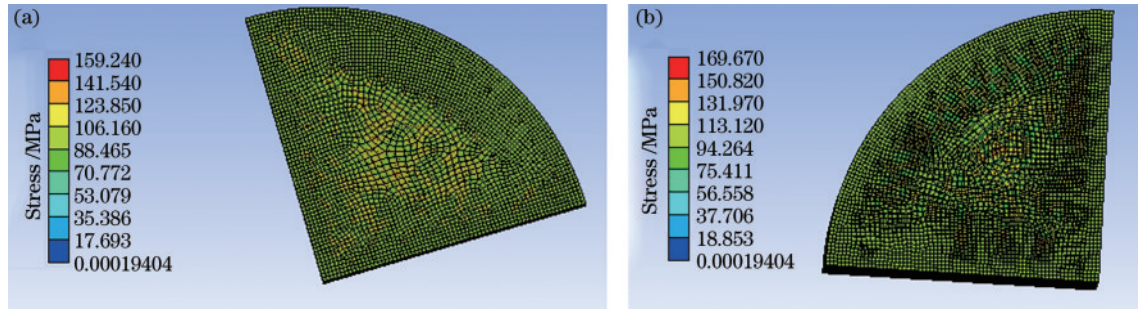


图 6 模型 M2 两侧应力分布图。(a)49 层一侧;(b)50 层一侧

Fig. 6 Stress distribution diagrams on both sides of model M2. (a) One side of 49 layers; (b) one side of 50 layers

在应力大的基底一侧面形变化量 $|\Delta P| = |\Delta P_1 - \Delta P_2| = 27.371 \text{ nm}$,即应力相对小的另一侧面形变化量为 -27.371 nm 。

5 工艺实现

薄膜的光学性质会受到很多镀膜工艺因素的影响,如真空室内的真空度、基底温度、沉积速率、薄膜厚度等^[20],因此恰当的镀膜工艺条件是镀制理想光学薄膜的基础。

镀膜设备采用沈阳齐汇有限公司生产的箱式镀膜机,型号为 ZSGA-A1100。膜厚沉积厚度采用晶振监

控,蒸发系统采用了两把电子枪,分别蒸发两种高低折射率材料,配置了 Hall 离子源进行辅助沉积, Hall 离子源的阴极电流为 32 A,阳极电流为 7 A,阳极电压为 180 V。

进行镀制之前,先使用丙酮溶液对蓝宝石基底进行清洁,再放入超声波清洗机进行去油处理,以确保基底表面洁净且没有过多杂质。采用 Zygo 激光干涉仪检测基底的面形,蓝宝石基底尺寸 Φ 为 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,镀膜之前选取蓝宝石基底抛光较好的一面进行检测,如图 7 所示,通过测量得到镀膜前基底的面形 PV 为 0.082λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

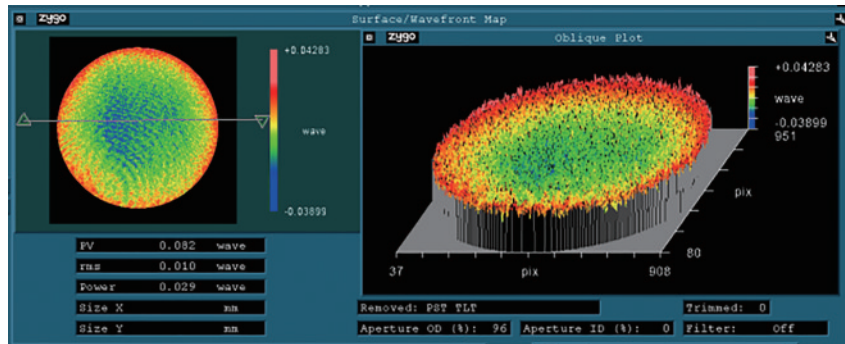


图 7 实际镀膜前基底面形测量

Fig. 7 Measurement of base surface shape before actual coating

运行电子束真空设备,打开真空舱并清理真空舱内,填充膜料,将清洁好的蓝宝石基底放入真空舱内,关闭舱门并抽真空。等真空舱内的真空度达到 $2.4 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 后,打开加热丝,将蓝宝石基底加热至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,且保持恒温 3 h。然后打开电子枪,交替蒸发选择好的高低折射率膜料 TiO_2 、 SiO_2 。 TiO_2 直接镀制通常会出现失氧问题,因此需要先通过加温来提高膜层表面迁移率,然后在蒸发坩埚附近直接补氧,充氧量为 0.012 L/min 。以及通过 Hall 离子源进行氧离子辅助沉积来进行补氧,充氧量为 0.025 L/min 。镀制过程中需要时刻关注膜层厚度的变化以及沉积速率,确保沉积速率尽可能保持稳定。通过观察可知, SiO_2 的沉积速率为 0.55 nm/s , TiO_2 的沉积速率为 0.1 nm/s ,基底两侧膜系镀制沉积时间分别为 5.5 h 和 7.5 h。镀制完毕后,测量镀膜之后的面形变化情况,如图 8 所示。

从图 8 可以发现,镀膜后的面形的 PV 为 0.13λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),相对面形变化量 $|\Delta P| = 0.048\lambda$ 。在残余应力作用下,整个多层膜系统在选取的这一侧面形呈凹形,位移呈环状分布,与仿真结果相符,边缘处变形最大,呈现略微的张应力,在残余应力作用下,这一侧引起的面形变化量 $\Delta P = 30.374 \text{ nm}$ (0.048λ),与仿真结果存在差异的原因是仿真过程仅计算了热应力对面形的影响。测试结果表明,改进后的膜系残余应力得到有效控制,面形变化量较小,有效保证透射波前误差。用 Lambda 900 分光光度计对截止带通滤光片进行透过率光谱测量,将测试的入射光角度设置为 0° ,测试的波长范围设置为 $300 \sim 1200 \text{ nm}$,实际镀制曲线与设计曲线如图 9 所示。

将低于 2% 的透过率设置为截止区域的边界,因此截止区分别为 $300 \sim 514 \text{ nm}$ 和 $604 \sim 1150 \text{ nm}$,透过

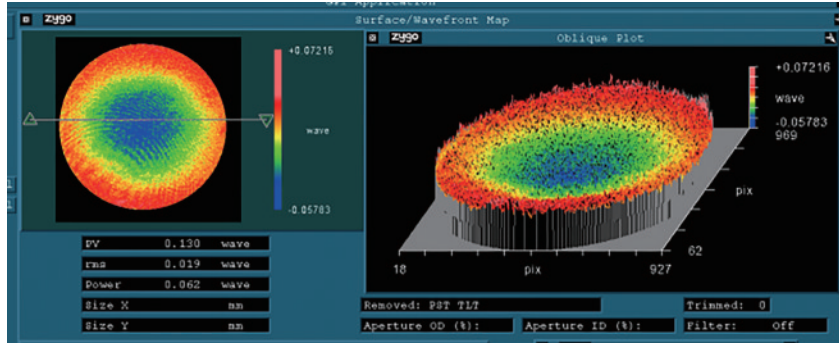


图 8 实际镀膜后基底面形测量

Fig. 8 Measurement of base surface shape after actual coating

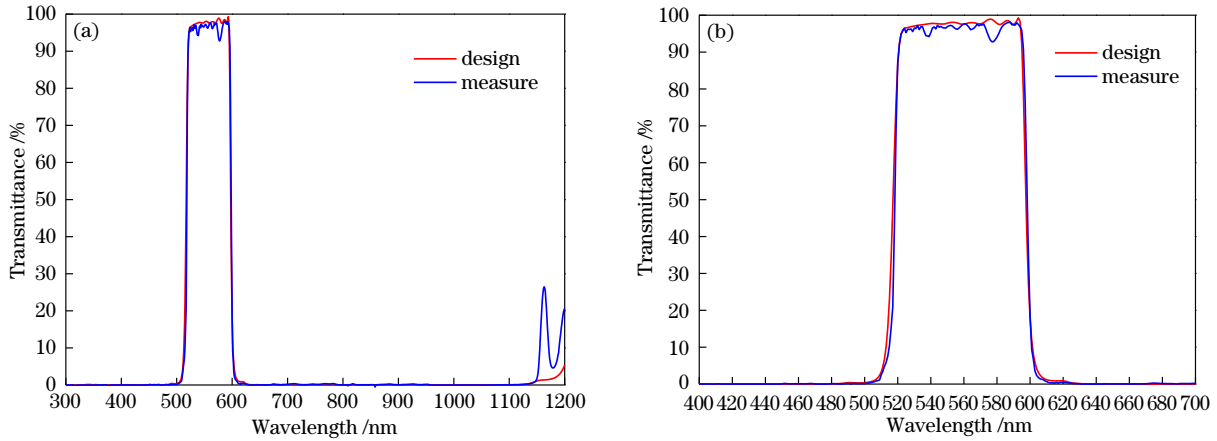


图 9 实际镀制曲线与设计曲线的透过率。(a)整体图;(b)局部放大图

Fig. 9 Transmittance of actual coating curve and design curve. (a) Overall view; (b) partial enlarged view

率分别为 0.026% 和 0.098%，平均透过率为 0.076%。将高于 90% 的透过率设置为高透区域的边界，因此高透区为 521~596 nm，通带左右两侧的波长位置误差均小于 1%，平均透过率为 96.59%。通带内最高透射率为 98.43%，位于 570 nm 处，峰值半高度为 49.22%，波长分别位于 518 nm 和 598 nm 处，通带半宽度为 81 nm。将透过率介于 2% 与 90% 之间的区域设置为过渡带，过渡带分别为 515~520 nm 和 597~604 nm，为了体现过渡带的陡峭程度，引入陡度 S 体现截止区与通带之间的过渡特征。通带左侧过渡带陡度可表示为

$$S_{\text{left}} = \frac{\lambda(80\%) - \lambda(5\%)}{\lambda_0} \times 100\%, \quad (6)$$

通带右侧过渡带陡度可表示为

$$S_{\text{right}} = \frac{\lambda(5\%) - \lambda(80\%)}{\lambda_0} \times 100\%, \quad (7)$$

式中： $\lambda(80\%)$ 与 $\lambda(5\%)$ 分别为透过率峰值 80% 与透过率峰值 5% 处所对应的波长； λ_0 为中心波长。陡度 S 越接近于 0，表明陡度越好。优化后滤光片透过率峰值 80% 处与 5% 处相对应的左侧波长值分别为 520 nm 和 515 nm，可求得通带左侧过渡带陡度为 0.89%，透过率峰值 5% 处与 80% 处相对应的右侧波

长值分别为 597 nm 和 602 nm，计算得到通带右侧过渡带陡度也为 0.89%。通带左右两边的过渡带陡度 S 均小于 1%，这表明膜系两边的过渡带陡峭。

为了体现通带矩形化程度，引入了矩形度参数作为评判指标。矩形度定义为通带透过率下降到峰值 90% 处所对应的带宽与透过率下降到峰值 50% 处所对应的带宽（通带的半峰全宽）之比，比值越接近于 1，表明通带矩形度越好。优化后的结构透过率峰值 90% 对应的带宽为 76 nm，透过率峰值 50% 对应的带宽为 80 nm，计算得到通带的矩形度为 0.95，接近于 1，可认为镀制曲线的矩形度好。综上所述，镀制的膜系曲线具有高 Q 值特性。

图 9(b) 为实验曲线和设计曲线。可以发现：实际镀制曲线的通带平均透过率为 96.59%，平均截止深度达到 OD3（即截止区的平均透过率低于 0.01%）；设计曲线的平均透过率为 97.57%，平均截止深度达到 OD3。实际镀制曲线的通带波纹相较于设计曲线有所增大，通带最低点透过率为 92.78%，位于波长 577 nm 处。这是由于膜层在制备过程中，优化后的膜系为非平整膜层厚度，而监控过程采用晶控法，只能监测沉积膜层相对厚度。膜层沉积过程中，膜层的光学厚度变化无法监控，包括实际沉积厚度和折射率。由于晶控的监控误差为逐层累积，无法像光控法能够进行补偿，

因此光学厚度的误差会随着沉积过程逐渐叠加,且短波通膜系对通带的波纹和透过率更为敏感,最终导致膜系通带出现波纹和平均透过率的下降。相比通带,截止区对厚度误差的敏感度较小,因此,整个截止区未出现透射次峰,且过渡带陡峭。在膜系沉积过程中,通过精确控制两种材料的 tooling 因子(这个过程需要反复实验来调整),从而得到两种材料的沉积厚度 tooling 因子的最佳匹配结果。经过多次调整,已达到尽可能小的通带波纹。虽然实际镀制曲线相较于设计曲线来说通带内波纹增大,透过率下降,但最大波纹深度为 $0.057T_p$,满足最小波纹目标要求,通带的波纹在可控范围,总体透过率特性达到要求,且陡度较好,实际镀制曲线与设计曲线具有较好的一致性^[21-22]。

对该带通滤光片样品进行了膜层牢固度试验,放入沸水中并持续加热 2 h。结果表明,薄膜表面没有起皱、脱落,使用胶带反复粘贴薄膜 20 次,薄膜表面没有明显变化,表明制备的截止带通滤光片的机械牢固性基本合格^[23]。

6 结 论

设计并制备出了实际通带为 521~596 nm 的带通滤光片,创新性地提出合理调配两侧膜系的设计思路,使两侧的膜系厚度相当,避免两侧膜层厚度的失衡。通过选取合适的优化目标,分别对两侧的膜系结构进行优化设计,最终得到了高 Q 值的带通滤光片。通过测试样品的透过率曲线,得知通带内平均透过率较高,达到 96.59%,截止区域的截止度整体较高,约为 0.076%,且过渡带较为陡峭,制备通带波长位置误差小于 1%,表明该膜系的设计思路行之有效,为此类带通滤光片的设计及制备提供了一种新颖的方法^[24]。

参 考 文 献

- [1] 刘冬梅,刘爽,付秀华,等. 红外线治疗仪中宽波段带通滤光片的研究[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0331001.
Liu D M, Liu S, Fu X H, et al. Study and fabrication of broad band-pass filters in infrared therapy apparatus[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0331001.
- [2] 于志强,费书国,赵帅锋,等. 面向多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片设计[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2331001.
Yu Z Q, Fei S G, Zhao S F, et al. Design of optical thin-film filters for multispectral palmprint image acquisition systems[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2331001.
- [3] Bach M. Cut-off filters[J]. Der Ophthalmologe, 2018, 115(11): 914-915.
- [4] 王丹燕,李墨馨,陆如斯,等. 多层膜结构色滤光片的原理、制备及应用[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(7): 1287-1306.
Wang D Y, Li M X, Lu R S, et al. Multilayer thin film based structural color filters: principle, fabrication and applications[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50

(7): 1287-1306.

- [5] 郭培涛,薛亦渝,赵立新,等. 多层光学薄膜缺陷的形貌及成分[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 360-363.
Guo P T, Xue Y Y, Zhao L X, et al. Morphological and composition of defects of optical coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(s1): 360-363.
- [6] 唐晋发,顾培夫,刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 96-113.
Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 96-113.
- [7] 赵兴梅,师建涛,郭鸿香. 短波通滤光片膜系设计[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 415-418.
Zhao X M, Shi J T, Guo H X. Film system Design for short-wavelength pass filter[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 415-418.
- [8] 鲍刚华,焦宏飞,程鑫彬,等. 一种抑制二倍频半波孔现象的短波通设计方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831001.
Bao G H, Jiao H F, Cheng X B, et al. A new approach to eliminate half-wave holes in short-wave pass filters with layer inhomogeneity[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831001.
- [9] 张金胜,张金龙,宁永强,等. 1555nm 宽带通滤光膜的设计和优化[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 557-562.
Zhang J S, Zhang J L, Ning Y Q, et al. Design and optimization of 1555 nm broad-bandpass filter film[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 557-562.
- [10] 付联效,吴永刚,郑秀萍,等. 中心波长 121.6 nm 的真空紫外窄带滤光片设计和制备[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2427-2430.
Fu L X, Wu Y G, Zheng X P, et al. Design and preparation of narrowband filter with central wavelength 121.6 nm in vacuum ultraviolet region[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2427-2430.
- [11] 陈刚,刘定权,马冲,等. 可见光和近红外双带通薄膜滤光片的光谱调控[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(6): 791-795.
Chen G, Liu D Q, Ma C, et al. Spectrum modulation of a thin-film filter with visible and near infrared dual band-pass channel[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(6): 791-795.
- [12] 贾钰超,李刚,白玉琢,等. 窄带滤光片设计中通带半宽度、矩形度和陡度的影响因素研究[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 448-452.
Jia Y C, Li G, Bai Y Z, et al. Study of factors influencing half bandwidth, rectangularity and steepness in design of narrow band-pass filter[J]. Infrared Technology, 2012, 34(8): 448-452.
- [13] 薛建军,朱建华,蒋茂清,等. 膜层渗透产生短波通截止滤光片半波孔现象的分析[J]. 光散射学报, 2008, 20(4): 319-323.
Xue J J, Zhu J H, Jiang M Q, et al. Study on the half-wave hole phenomenon of short-wave pass filter caused by film infiltration[J]. The Journal of Light Scattering, 2008, 20(4): 319-323.
- [14] 鲍刚华,谢雨江,王奔,等. 倍频分离薄膜中的半波孔

- 抑制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1931002.
- Bao G H, Xie Y J, Wang B, et al. Half-wave hole suppression of harmonic beam splitting films[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1931002.
- [15] 戚李阳, 徐斌, 王元庆. 基于互补式多波段带通滤光片的 3D 投影显示系统[J]. 光电工程, 2020, 47(7): 190334.
- Qi L Y, Xu B, Wang Y Q. A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(7): 190334.
- [16] Ma P Y, Wei B, Hong J S, et al. A design method of multimode multiband bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(6): 2791-2799.
- [17] Trache A, Trifan M E, Lupei V, et al. Dichroic mirror design by complete admittance matching[J]. Optical Engineering, 1996, 35(5): 1284-1287.
- [18] 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 Z, 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.
- [19] 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 S, 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.
- [20] 尚鹏, 李定, 艾万君, 等. 热载荷条件下 TiO₂ 薄膜热应力有限元分析[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 45-51.
- Shang P, Li D, Ai W J, et al. Use of the finite element technique to analyze thermal stress in coating under thermal loading conditions[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 45-51.
- [21] 鲍刚华, 王奔, 谢雨江, 等. 公转结构电子束蒸发成膜的膜厚误差研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1131001.
- Bao G H, Wang B, Xie Y J, et al. Film thickness error in electron beam evaporation with revolving structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1131001.
- [22] 潘永刚, 刘政, 王奔, 等. 电子束蒸发球面夹具系统膜厚均匀性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0531001.
- Pan Y G, Liu Z, Wang B, et al. Research on film thickness uniformity of electron beam evaporation spherical fixture system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0531001.
- [23] 王凯旋, 陈刚, 刘定权, 等. 0.2 nm 带宽滤光片的制备以及退火温度对其形貌和性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2031001.
- Wang K X, Chen G, Liu D Q, et al. Fabrication of 0.2 nm bandwidth filter and effects of annealing temperature on its morphology and characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2031001.
- [24] 魏博洋, 刘冬梅, 付秀华, 等. 基于孪生靶的磁控溅射系统薄膜厚度均匀性的研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0731001.
- Wei B Y, Liu D M, Fu X H, et al. Study on film thickness uniformity of magnetron sputtering system based on twin target[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0731001.