

用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备

庞梦林 周顺 郭峰 杭良毅 肖相国

Design and preparation of cut-off filter for observation scope

PANG Menglin, ZHOU Shun, GUO Feng, HANG Liangyi, XIAO Xiangguo

引用本文:

庞梦林, 周顺, 郭峰, 等. 用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 221–227. DOI: 10.5768/JAO202243.0201006

PANG Menglin, ZHOU Shun, GUO Feng, et al. Design and preparation of cut-off filter for observation scope[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 221–227. DOI: 10.5768/JAO202243.0201006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究

Design and fabrication of microstructure narrowband filter

应用光学. 2017, 38(1): 78–82 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105001>

基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构

Multi-channel mid-infrared filter structure based on bilayer metallic grating

应用光学. 2020, 41(1): 176–179 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0106001>

用于MiniLED背光模组的亮度增强薄膜设计与制备

Design and preparation of brightness enhancement thin film for MiniLED backlight module

应用光学. 2019, 40(5): 887–893 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505005>

用于头盔显示液晶像源的透镜薄膜设计与制备

Lens film design and preparation for LC image source in helmet display

应用光学. 2021, 42(1): 182–187 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0105001>

薄膜光学锥形光栅的制备与光学特性分析

Fabrication and optical properties analyses of thin film optical tapered grating

应用光学. 2019, 40(2): 342–348 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0208001>

可见–短波红外波段光谱模块光机装调及分析

Opto-mechanical assembly and analysis of spectral module in visible–short wave infrared band

应用光学. 2019, 40(2): 193–201 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 02-0221-07

用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备

庞梦林¹, 周 顺¹, 郭 峰¹, 杭良毅¹, 肖相国²

(1. 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室 西安工业大学, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 基于观察瞄准镜系统中胶合目镜对滤光片的使用需求, 设计了一种用于瞄准镜光学系统的截止滤光片, 消除了滤光片的半波孔, 压缩了通带波纹。采用电子束热蒸发技术制备了滤光片并测试其透过率, 在 400 nm~630 nm 的平均透过率为 95.76%, 在 655 nm~800 nm 的平均透过率为 0.06%, 样片通过了盐雾测试和机械牢固度测试, 制备结果满足设计需求。

关键词: 短波通滤光片; 薄膜制备; 半波孔消除; 通带波纹压缩

中图分类号: O484

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0201006

Design and preparation of cut-off filter for observation scope

PANG Menglin¹, ZHOU Shun¹, GUO Feng¹, HANG Liangyi¹, XIAO Xiangguo²

(1. Xi'an Technological University, Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the requirements of glued eyepiece for the optical filter in the observation scope system, a cut-off filter for the optical system of the scope was designed, which eliminated the half-wave hole of the filter and compressed the passband ripple. The optical filter was prepared by electron beam thermal evaporation technology and its transmittance was tested. The average transmittance in the range of 400 nm~630 nm is 95.76%, and the average transmittance in the range of 655 nm~800 nm is 0.06%. The sample passes the salt spray test and the mechanical firmness test, and the preparation results meet the design requirements.

Key words: short-wave pass filter; thin film preparation; half-wave hole elimination; passband ripple compression

引言

观察瞄准镜被广泛装备于军事部队、武警、公安等单位, 在执行反恐、边境作战等特殊环境的任务中^[1]得到了大量的应用。同时, 对瞄准镜性能提升产生了迫切需求。瞄准镜光学系统性能的优劣直接决定了瞄准镜本身的性能^[2-3]。简单的瞄准镜光学系统包含组合光学镜头、接收和成像组件。在组合光学镜头中, 截止滤光片的作用是提高工作效率, 同时抑制干扰光。目前, 瞄准镜光学系统的优化方向是更高的成像质量和更小的视差调节^[4]。

目前常见的短波通滤光片大多以空气为入射

介质进行膜系设计, 即在基片两面分别镀制短波通滤光膜系和减反射膜。这样镀制的短波通滤光片不仅在刑侦检测^[5], 指纹识别^[6-8], 紫外光通信^[9]等领域有广泛应用, 而且在可见-近红外波段均能达到较高的光谱性能。如王庆^[10]通过制备 400 nm~640 nm 范围的短波通滤光片, 针对多层膜的镀制工艺问题给出了分析。在可见近红外领域, 西安应用光学研究所的赵兴梅等^[11], 设计并制备了光谱范围在 600 nm~1 150 nm 的短波通滤光片, 给出了镀制该膜系需要考虑的工艺特点。在中远红外波段, 吴博琦等人^[12]设计并制备了用于公共电视天线传输系统的短波通滤光片, 在 1 110 nm~

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2021-11-12

基金项目: 陕西省教育厅科研计划重点项目 (21JY017)

作者简介: 庞梦林 (1997—), 男, 硕士, 主要从事薄膜方面的研究。E-mail: 363012076@qq.com

通信作者: 周顺 (1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事先进光学制造方面的研究。E-mail: zsemail@126.com

1360 nm 波段上的反射率低于 1%, 在 1490 nm±20 nm 波段上的透射率低于 0.08%, 降低了信号的传输噪声。但上述短波通滤光片的应用并未考虑到类似瞄准镜目镜成像系统的胶合需求。

在透镜的凸面镀短波通滤光膜作为瞄准目镜的一部分使用, 相比于短波通滤光片与瞄准目镜光学成像系统装配的组合的设计, 具有两个优势: 一是可以优化光学系统的结构, 提升目镜组的

像质; 二是在制造和装配过程中, 减少了镜片的数量, 提高了系统装配的质量。

本文研究在瞄准镜目镜成像的胶合场景下(胶合应用如图 1 所示, 透镜的材料为成都光明的 H-ZK11 型号的玻璃), 通过实例对短波通滤光膜的设计原理、材料选择以及镀膜工艺做了详细分析, 并给出了设计该膜系的关键工艺及结果。

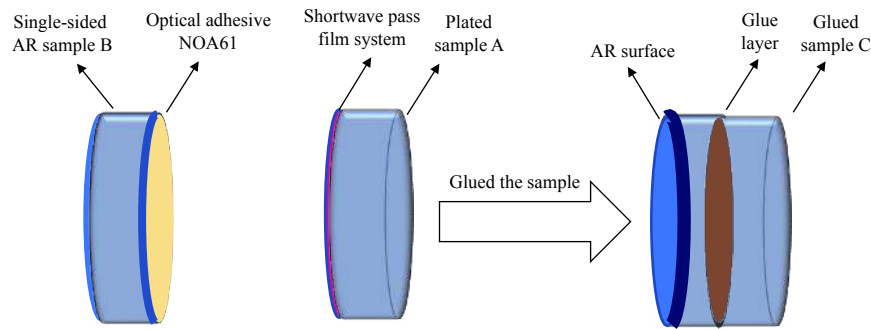


图 1 透镜 B、A 胶合的三维示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of gluing of lens B and A

1 膜系设计

1.1 基本原理

短波通滤光片的设计指标是: 在 400 nm~630 nm 上为高透射带, 在 650 nm~800 nm 上为截止带。该膜系的下降宽度仅 20 nm, 从薄膜的制备与工艺稳定性来说, 可以通过增加膜系的周期性来降低短波通滤光膜的下降宽度。短波通滤光片的基础膜系结构为 G|(0.5LH0.5L)^S|A, G 表示基底为玻璃,

A 表示入射介质为空气, S 表示膜系的周期数, L 代表低折射率层, H 代表高折射率层。该膜系是一个典型的对称膜系, 其特征矩阵为单层特征矩阵的连乘积。

$\begin{bmatrix} \cos\delta_1 & i\sin\delta_1/\eta_1 \\ i\eta_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix}$ 称为薄膜的特征矩阵^[13-14], 它包含了薄膜分析中需要用到全部有用参数。其中矩阵中的 δ_1 为单层薄膜的位相厚度; η_1 为有效导纳。用于分析 pqp 型基础膜系, 可得:

$$M_{\text{pqp}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_p & \frac{i\sin\delta_p}{\eta_p} \\ i\eta_p\sin\delta_p & \cos\delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_q & \frac{i\sin\delta_q}{\eta_q} \\ i\eta_q\sin\delta_q & \cos\delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_p & \frac{i\sin\delta_p}{\eta_p} \\ i\eta_p\sin\delta_p & \cos\delta_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

M_{pqp} 为 pqp 型无吸收介质薄膜特征矩阵, 由(1)式推知:

$$\begin{aligned} M_{12} &= \frac{i}{\eta_p} \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] \\ M_{21} &= i\eta_p \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] \\ M_{22} &= \cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \sin \delta_q = M_{11} \end{aligned} \quad (2)$$

当 $M_{22} = M_{11}$ 时, 引入等效折射率的概念, 基础对称膜系的特征矩阵与单层膜特征矩阵类似, 因而可以将对称膜系 pqp 等效为单层膜矩阵进行分析:

$$M_{\text{pqp}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i\sin \Gamma/E \\ iE\sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Γ 表示等效位相厚度, 通常选取最接近 $(2\delta_p + \delta_q)$

的值; E 表示等效折射率。设多层膜 pqp 是由 s 个对称周期组成, 故该膜系的特征矩阵为

$$M_{\text{pqp}}^s = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i \sin \Gamma / E \\ i E \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}^s = \begin{bmatrix} \cos S \Gamma & i (\sin S \Gamma) / E \\ i E \sin S \Gamma & \cos S \Gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(4)式多层膜的特征矩阵可分析得, 该对称膜系中存在一个等效折射率, 该折射率不随基本周期的叠加而变化, 且等效位相厚度是基本周期的 S 倍。反射率可以表示为

$$R = r r^* = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 - \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 + \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1} \quad (5)$$

结合本膜系在考虑反射率时, 式中的 $\eta_0 = \eta_g$, η_g 为入射介质 H-ZK11 型的光学导纳。

因此, 在进行多层周期膜系的分析中, 只需考虑基本周期膜系的等效折射率 E 和等效位相厚度 Γ 。若多层膜的等效折射率 E 与基底以及入射介质匹配良好时, 周期数所引起等效位相厚度 Γ 的变化有限。鉴于此特点, 简化了对多层对称膜系透射带中光学特性的分析。

1.2 膜料选择

一般对镀膜材料的选择主要集中在透明度、折射率和机械牢固度等方面进行考虑。本文中滤光片的工作波段范围为 400 nm~800 nm, 结合膜料的折射率和稳定性等因素^[15], 选择 SiO_2 作为低折射材料, 它具有较宽的光谱范围, 形成的膜结构精细, 呈现网络状玻璃态, 不仅散射小, 而且保护能力极强。

SiO_2 产生的是压应力, 应选择产生张应力或者应力较小的高折射率材料与之匹配。高折射材料 TiO_2 与 Ta_2O_5 均有压应力产生, 可以与 SiO_2 匹配。选择 TiO_2 作为高折射率材料时, 高低折射率差更大而且成本更低。在截止滤光片的生产试验中, 也多采用 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 组合^[6, 7, 16], 但 TiO_2 在热蒸发过程中, 容易分解失氧, 生成高吸收的亚氧化钛薄膜 ($\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$), 对镀制方法和温度的敏感度较高, 镀制过程中需要通入适量的 O_2 同时保持温度的稳定。

因此结合上述分析, 本课题最终采用 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 组合, 进行短波通滤光片的设计研制工作。

1.3 短波通膜系

短波通膜系需要与具有减反射膜的光学元件胶合, 入射介质为固化后的光学粘结剂 NOA61, 该光学粘结剂的折射率与 H-ZK11 折射率较为接近 (见表 1)。设计时, 近似采用 H-ZK11 玻璃作为膜系的入射介质。

表 1 材料的主要参量

Table 1 Main parameters of materials

Material	Index of refractive n_d @589 nm
H-ZK11	1.63
NOA61	1.56

选择 $G|0.5\text{LH}0.5\text{L}|^s\text{G}$ (其中 G 为 H-ZK11 玻璃基底, H 为 TiO_2 , L 为 SiO_2) 作为初始基础膜系设计, 中心波长 706 nm。在短波通滤光片的设计和制备的过程中, 在通带上会出现一个反射峰值, 即半波孔。

依据 $G|0.5\text{LH}0.5\text{L}|^s\text{G}$, 设计得到短波通膜系 $G|0.5\text{L}(\text{HL})^{16}\text{H}0.5\text{L}|^s\text{G}$, 短波通膜系在 350 nm 左右出现透射率小于 50% 的半波孔, 如图 2 所示。

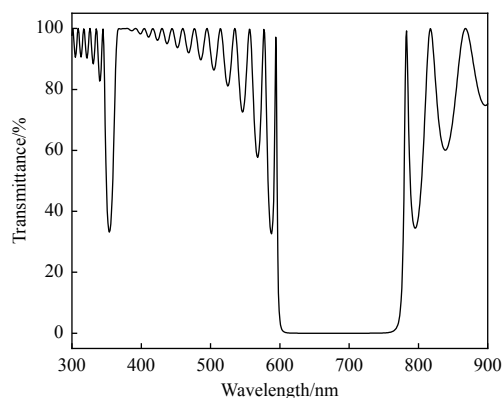


图 2 $G|0.5\text{L}(\text{HL})^{16}\text{H}0.5\text{L}|^s\text{G}$ 膜系曲线

Fig. 2 Film system curve of $G|0.5\text{L}(\text{HL})^{16}\text{H}0.5\text{L}|^s\text{G}$

马小凤等人^[17]认为半波孔出现的主要原因是膜层的膜厚累积误差和敏感层厚度误差, 同时也和膜系周期性结构有关。黄伟^[18]等认为是镀膜材料的折射率非均匀性、色散及其镀制过程中膜厚控制误差累积造成的, 在蒸发源上方设计了一种遮挡板, 用以改善蒸发源蒸汽分布, 达到消除半波孔的目的。薛建军等^[19]人认为膜层渗透比例较大时会出现半波孔。根据半波孔的上述成因分析, 依据马小凤等人的研究, 可以破坏膜系的周期性结构, 尝试对半波孔进行消除, 此时将原基础膜系调整结构后为: $G|0.5\text{L}(0.95\text{H}1.05\text{L})^{16}\text{H}0.5\text{L}|^s\text{G}$, 结果如图 3 所示, 在 350 nm 处的半波孔已经大幅度减小。

在此基础上对该膜系进行优化, 结果如图 4 所示。从图 4 中可看出, 曲线优化后 400 nm~600 nm 的高透射带在 2 个极值之间震荡。这是由于将对称膜系等效为单层膜分析时, 由于等效层的等效

折射率与周围介质匹配不好,出现这种透射带的波纹。

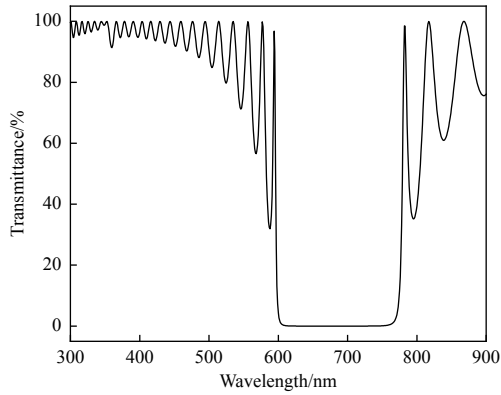


图3 G|0.5L (0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L|G 消除半波孔膜系曲线
Fig. 3 Film system curve of half-wave hole elimination of G|0.5L (0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L|G

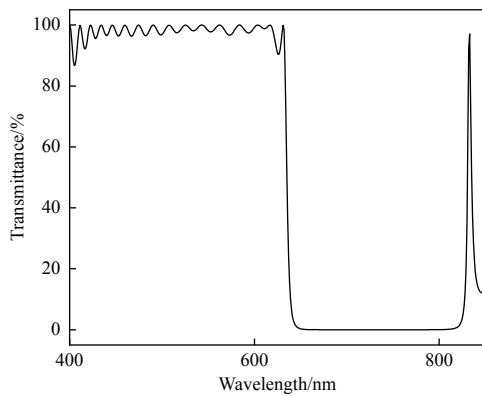


图4 G|0.5L (0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L|G 优化膜系曲线
Fig. 4 Optimized film system curve of G|0.5L (0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L|G

关于通带波纹的压缩,一种常用的方法是在所设计的多层膜的两侧加镀匹配层^[16, 20]。若有多层膜与基片之间插入有效折射率 E' 的 $\lambda/4$ 层,在多层膜与入射介质之间插入折射率 E'' 的 $\lambda/4$ 层,可以降低通带波纹的抖动幅度,其中:

$$E' = \sqrt{n_s E}$$

$$E'' = \sqrt{n_0 E} \quad (6)$$

基于上述原理,对多层膜加镀匹配层,膜系为: G|0.3H0.5L(0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L0.3H|G。优化后的非规整膜系为: G|0.137H 0.247L 1.239H 1.189L 1.070H 1.092L 1.022H 1.070L 1.003H 1.059L 0.996H 1.052L 0.993H 1.049L 0.988H 1.050L 0.984H 1.051L 0.984H 1.049L 0.987H 1.050L 0.986H 1.051L 0.992H 1.052L 0.994H 1.060L 1.003H 1.070L 1.017H 1.094L

1.064H 1.187L 1.250H 0.256L 0.129H|G, 相应的优化曲线如图5所示。

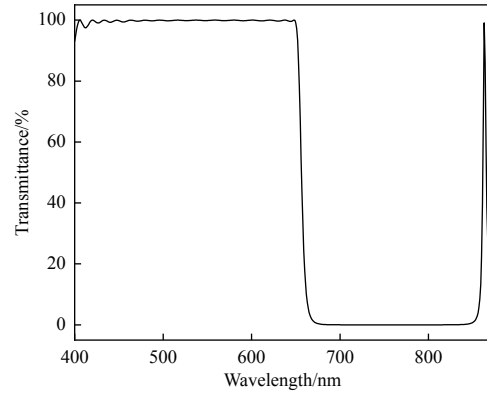


图5 G|0.3H0.5L(0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L0.3H|G 优化膜系曲线
Fig. 5 Optimized film system curve of G|0.3H0.5L (0.95H1.05L)¹⁶ H0.5L0.3H|G

2 实验

薄膜的研制试生产均在 Leybold 的 SYRUS-C1110 型镀膜机完成,使用 OMS5000 光学膜厚控制仪与 ICXTC 石英晶体膜厚控制仪进行光学厚度与物理厚度的控制。H-ZK11 玻璃基底,直径 $\phi 25$ mm,镀膜材料选用 SiO₂ 和 TiO₂。

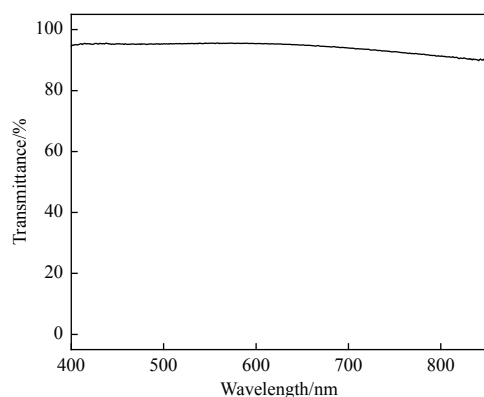
镀膜前,先将基片表面用无水乙醇清洗,烘干后装入工件盘抽真空,烘烤温度 250 °C,恒温 50 min,真空度达到 1.5×10^{-5} mbar 时,开始蒸镀。SiO₂ 的沉积速率为 0.5 nm/s, TiO₂ 的沉积速率为 0.2 nm/s。镀制开始时,需对 SiO₂ 与 TiO₂ 进行预熔,对镀膜材料进行除气。由于 SiO₂ 与 TiO₂ 在镀膜过程中容易失氧,在镀膜过程中通入适量的 O₂,保证较高的 TiO₂ 化学计量比。

镀膜后,采用紫外固化光学胶 NOA61 覆涂于减反射样片 B 一侧,将覆涂胶一侧与镀膜样品 A 进行在紫外光照射下粘合,即可得到固化样片 C(胶合过程参照图1)。

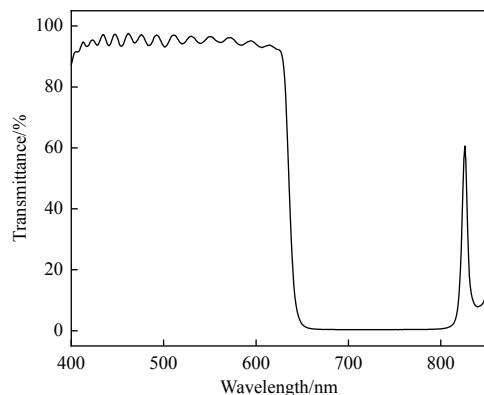
3 实验结果与分析

使用 Lambda950 分光光度计,搭载透射附件,对减反射样片 B、镀制样片 A 中心分别进行测量,光谱测量曲线如图6所示。

胶合样片 C 的光谱曲线和优化膜系曲线对比如图7所示。实验样片胶合后峰值透过率达 97.2%, 400 nm~630 nm 的平均透过率为 95.76%; 在 655 nm~800 nm 的平均透过率为 0.06%, 满足指标要求。



(a) 减反射样片 B 透射率测量曲线



(b) 镀制样片 A 透射率测量曲线

图 6 样片 B、A 测量图谱

Fig. 6 Measurement spectrum of sample B and A

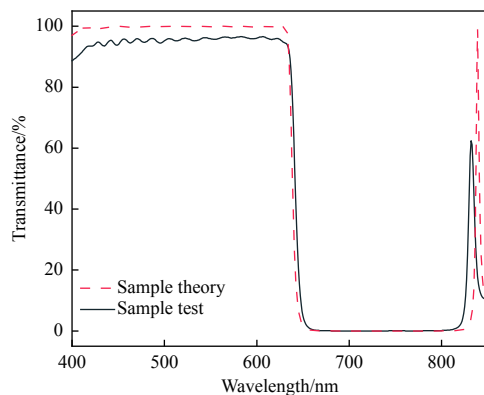


图 7 样片 C 和优化膜系曲线对比图

Fig. 7 Comparison of sample C curve and optimized film system curve

为了保证薄膜在使用过程中的可靠性, 还需对镀膜样片 A 进行非光学性能测试。依照国标 GB/T 2423.17 进行盐雾测试, 膜层表面没有明显变化; 按照国标 GB/T 26332.4-2015 对薄膜机械牢固度测试, 采用 NICHIBAN CT-18 胶带紧贴膜面垂直方向迅速拉起, 重复 5 次, 表面不存在脱膜现象。

对比胶合样片 C 和设计的优化膜系曲线, 结

果如图 7 所示, 可看出满足截止滤光片的应用要求, 但胶合样片 C 和设计膜系曲线有差别。结合文献 [21-26] 与本课题的结果进行分析, 认为膜厚和折射率误差是导致透过率变化的主要原因, 误差来源主要有 3 点: 1) 设计的匹配膜层敏感度高且厚度薄; 2) 采用光控极值法监控膜厚, 在非规整膜系的镀制过程中, 容易产生累积误差; 3) 薄膜材料的折射率受制备工艺参数的影响, 导致实际制备的折射率与设计值出现偏差。

4 结论

本文研制了 400 nm~800 nm 的短波通滤光片, 使用膜系设计软件对短波通滤光片进行了设计和优化, 优化后设计的短波通膜系在 400 nm~630 nm 的平均透射率为 99.70%, 在 655 nm~800 nm 的平均透过率为 0.025%。采用离子束辅助沉积技术进行了多层膜的制备, 对镀制样片透过率及相关非光学性能进行了测试。对镀制样片胶合得到胶合样片, 胶合样片在 400 nm~630 nm 的平均透过率为 95.76%, 在 655 nm~800 nm 的平均透过率为 0.06%, 同时分析了胶合样片与理论设计曲线存在差异的原因。

参考文献:

- [1] 胡红伟, 李秀飞, 高龙岳, 等. 棱镜合束昼夜合一瞄准镜光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2015(5): 75-81.
HU Hongwei, LI Xiufei, GAO Longyue, et al. Design of prism combined beam aiming optical system for day and night[J]. optics & optoelectronic technology, 2015(5): 75-81.
- [2] 刘光灿, 白廷柱, 王毫球, 等. 轻武器新型瞄准镜研究[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 548-552.
LIU Guangcan, BAI Tingzhu, WANG Haoqiu, et al. Research on a new type of sight for light weapons[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 548-552.
- [3] 刘康. 一种新颖实用的步枪瞄准镜[J]. 轻兵器, 1997(2): 13-17.
LIU Kang. A novel and practical rifle sight[J]. Light Weapon, 1997(2): 13-17.
- [4] 李玉瑶, 张婉怡. 长出瞳距军用瞄准镜目镜设计[J]. 光电工程, 2015(10): 33-36.
LI Yuyao, ZHANG Wanyi. Eyepiece design of military sight with long pupil distance[J]. Opto-Electronic Engin-

- earing, 2015(10): 33-36.
- [5] 牟鑫. 刑侦检测光学系统干涉滤光片的设计与制备[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- MU Xin. Design and preparation of interference filter for criminal detection optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [6] 耿似玉. 用于紫外指纹仪的短波通滤光片的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- GENG Siyu. Development of short-wave pass filter for ultraviolet fingerprint scanner[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [7] 关钧戈. 380 nm-570 nm短波通滤光片的设计与制备研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- GUAN Junge. Design and preparation of 380 nm-570 nm short-pass filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [8] 靳贵平, 庞其昌. 紫外指纹检测仪的研制[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 198-202.
- JIN Guiping, PANG Qichang. Development of ultraviolet fingerprint detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(2): 198-202.
- [9] 吴慧利. 深截止型日盲紫外干涉滤光片研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- WU Huili. Research on deep cut-off solar-blind ultraviolet interference filter[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [10] 王庆. 短波通滤光片的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- WANG Qing. Research on short wave pass filter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [11] 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 Xingmei, SHI Jiantao, GUO Hongxiang. Design of short-wave pass filter film system[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 415-418.
- [12] 吴博琦, 董连和, 孙艳军, 等. 光纤公共电视天线传输系统中短波通截止滤光片[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 174-179.
- WU Boqi, DONG Lianhe, SUN Yanjun, et al. Shortwave pass cut filter in optical fiber public television antenna transmission system[J]. Chinese Laser, 2016, 43(2): 174-179.
- [13] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 12-25.
- TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 12-25.
- [14] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 现代光学薄膜技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 20-25.
- LU Jinjun, LIU Weiguo, PAN Yongqiang. Modern optical thin film technology[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 20-25.
- [15] GU Peifu, ZHENG ZhenRong, ZHAO YongJiang, et al. Study on the mechanism and measurement of stress of TiO_2 and SiO_2 thin-films[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6459-6463.
- [16] 沈晓月. 近红外截止滤光片的研究与制备[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- SHEN Xiaoyue. Research and preparation of near-infrared cut-off filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
- [17] 马小凤, 余祥, 王英剑, 等. 倍频波长分离膜半波孔的消除[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(B04): 155-158.
- MA Xiaofeng, YU Xiang, WANG Yingjian, et al. Elimination of half-wave holes in frequency-doubled wavelength separation membranes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(B04): 155-158.
- [18] 黄伟, 张云洞. 消除短波通截止滤光片半波孔的方法[J]. 光学仪器, 1999, 21(4): 145-148.
- HUANG Wei, ZHANG Yundong. The method of eliminating the half-wave hole of the short-wave pass cut-off filter[J]. Optical Instruments, 1999, 21(4): 145-148.
- [19] 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(4): 319-323.
- XUE Jianjun, ZHU Jianhua, JIANG Maoqing, et al. Analysis of the half-wave hole phenomenon of short-wave pass cut-off filter produced by membrane penetration[J]. Acta Light Scattering, 2008(4): 319-323.
- [20] 刘卫国. 截止滤光片通带波纹的失调修正[J]. 西安工业学院学报, 1995(1): 41-44.
- LIU Weiguo. Misalignment correction of cut-off filter passband ripple[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1995(1): 41-44.
- [21] 白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. 光子学报, 2001, 30(5): 576-580.
- BAI Shengyuan, GU Peifu, LIU Xu, et al. Study on the optical stability of thin film filters[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(5): 576-580.
- [22] 潘永强, 白涛, 杭凌侠. 太阳模拟器AM0型滤光片

- 及其稳定性研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1306-1310.
- PAN Yongqiang, BAI Tao, HANG Lingxia. Research on AM0 type filter of solar simulator and its stability[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1306-1310.
- [23] HANG Liangyi, LIU Weiguo, XU Junqi. Effects of various substrate materials on structural and optical properties of amorphous silicon nitride thin films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. [Chinese Optics Letters](#), 2020, 18(8): 083101.
- [24] 杭良毅, 徐均琪, 宋岩峰, 等. 多层介质滤光片的制备及激光损伤特性[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(12): 947-953.
- HANG Liangyi, XU Junqi, SONG Yanfeng, et al. Preparation of multilayer dielectric filter and laser damage characteristics[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(12): 947-953.
- [25] HANG Liangyi , LIU Weiguo , SONG Shigeng , et al. Simulation analysis and preparation of a high optical density laser protection filter[J]. [Applied Optics](#), 59(11): 3315-3323.
- [26] 张金豹, 史成淳, 耿浩. 多角度光谱测量法制备短波通滤光膜技术[J]. 光电技术应用, 2020, 171(2): 73-76.
- ZHANG Jinbao, SHI Chengyun, GENG Hao. Preparation of short-wave pass filter film technology by multi-angle spectroscopy method[J]. [Application of Optoelectronic Technology](#), 2020, 171(2): 73-76.