

矩形波宽带通滤光膜研究

董莹 张艳茹 胡荣 刘永强 杨崇民

Research on rectangular-wave broadband pass filter film

DONG Ying, ZHANG Yanru, HU Rong, LIU Yongqiang, YANG Chongmin

引用本文:

董莹, 张艳茹, 胡荣, 等. 矩形波宽带通滤光膜研究[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 188–194. DOI: 10.5768/JAO202344.0105002

DONG Ying, ZHANG Yanru, HU Rong, et al. Research on rectangular-wave broadband pass filter film[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 188–194. DOI: 10.5768/JAO202344.0105002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于塑料镜片防水加硬抗老化光学薄膜的研制

Fabrication of anti-water hard and anti-aging optical film based on plastic lens

应用光学. 2017, 38(1): 83–88 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105002>

二氧化钛薄膜表面粗糙度研究

Study on surface roughness of titanium dioxide thin film

应用光学. 2018, 39(3): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303005>

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>

基于三角波驱动法珀可调谐滤波器的光纤光栅解调偏差校正算法

Deviation calibration method for fiber Bragg grating demodulation system based on tunable Fabry–Perot filter driven by triangular wave

应用光学. 2017, 38(1): 147–152 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0108002>

矩形复合抛物面空间双向照明节能多功能反光杯设计

Design of rectangular composite paraboloid three-dimensional two-way lighting and energy-saving reflective cup

应用光学. 2019, 40(2): 323–333 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205004>

基于单目视觉的矩形靶面弹着点测量

Measurement of impact point of rectangular target surface based on monocular vision

应用光学. 2021, 42(1): 131–136 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0188-07

矩形波宽带通滤光膜研究

董莹¹, 张艳茹², 胡荣¹, 刘永强¹, 杨崇民¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 北京科益虹源光电技术有限公司, 北京 102605)

摘要: 对矩形波宽带通滤光片进行了深入研究, 提出了一种设计、制备矩形波宽带通滤光片的方法。使用该方法设计并制备了 400 nm~1 100 nm 波段, 中心波长 $\lambda_0=515$ nm, 透射带 $\lambda=\lambda_0\pm 25$ nm, 透射带平均透射率 $\tau\geq 92\%$, 截止带 $\lambda=400$ nm~475 nm、 $\lambda=555$ nm~1 100 nm, 截止带透射率小于 0.1% 的矩形波宽带通 OD3-A 滤光片。对样片光谱进行了测试, 结果满足需求。该方法设计、制备矩形波宽带通滤光片克服了 F-P 型窄带滤光膜监控精度要求高、通带带宽窄、成本高以及传统长、短波截止膜组合方式膜层总厚度过大、通带透过率低、波形矩形度差的缺点。

关键词: 光学薄膜; 带通滤光膜; 矩形波; 吸光性

中图分类号: TN305.8; O484.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0105002

Research on rectangular-wave broadband pass filter film

DONG Ying¹, ZHANG Yanru², HU Rong¹, LIU Yongqiang¹, YANG Chongmin¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Beijing RSLaser Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Beijing 102605, China)

Abstract: A method for designing and preparing the rectangular-wave broadband pass filter was put forward after a deep study. A rectangular-wave OD3-A broadband pass filter was designed and prepared with this method, with its center wavelength $\lambda_0=515$ nm in the working range of 400 nm~1 100 nm. And the mean transmittance of the sample in its pass-band of $\lambda_0\pm 25$ nm was great than or equal to 92.7%, meanwhile the transmittance in the cut-off band λ ranging from 400 nm~475 nm and λ ranging from 555 nm~1 100 nm was less than 0.1%. The transmittance of the thin film sample was tested, and the spectrum met the requirements. The rectangular-wave broadband pass filter designed and prepared by this method overcame the disadvantages of high precision requirements of Fabry-Perot interferometer narrow-band filter film monitoring, narrow pass-band broadband, high cost, overlarge total thickness, low pass-band transmittance and poor waveform rectangularity in the traditional combination way of long and short wave cut-off films.

Key words: optical thin film; band-pass filter film; rectangular wave; optical density

引言

带通滤光膜是指在一定波段内, 除中间一小段高透射外, 其余均是高反射带。可以粗略地分成窄带通滤光片和宽带通滤光片。窄带通滤光片^[1]通常采用 Fabry-Perot 干涉仪形式进行设计和制备; 宽带通滤光片多采用长波截止与短波截止滤光膜组合的方式获得。近年来, 由于带通滤光片变角度使用情况增多, 矩形波带通滤光片愈发重要。

在军事、武器装备领域, 高矩形度、宽截止波段的宽带通滤光片可以消除武器装备在实际使用中的偏轴、变温效应, 优势十分明显。

国外对矩形波滤光片^[2]的研究较早。国内费书国^[3]、申林^[4]、杨洁^[5]、庞薇^[6]等对 F-P 型矩形波窄带通滤光片进行了研究, F-P 型滤光膜系为达到更高的矩形度, 需要制备的膜层腔数较多, 通带范围较窄, 对设备的稳定性、一致性以及监控精度要

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-08

作者简介: 董莹 (1987—), 男, 博士, 主要从事光学工艺及光学设计研究。E-mail: dy3284@126.com

通信作者: 张艳茹 (1988—), 女, 硕士, 主要从事光学系统设计与机器光学工艺研究。E-mail: 1032671324@qq.com

求较高;国产设备光控精度有限,进口光控价格昂贵,所以用F-P型滤光膜系设计、制备矩形波宽带通滤光片的局限性较大;齐健^[7]、朱新华^[8]、岳鹏飞^[9]、赵会聪^[10]等使用长、短波截止滤光膜层组合的方式,利用晶控法制备了矩形波宽带通滤光片。由于长、短波截止滤光膜组合的方法使得膜层很厚,特别是对于截止带较宽的带通滤光片,其厚度会成倍增加,应力迅速增大,环境适应性较差,晶控法工艺一致性^[11]也使得镀制的样片通带透过率较差,截止宽度较短。

本文研究了一种K9基底上的矩形波50 nm带宽的宽带通滤光膜层,要求 $\lambda_0=515$ nm,透射带 $\lambda=\lambda_0\pm 25$ nm,透射带平均透过率 $\bar{\tau}\geq 92\%$,截止带 $\lambda=400$ nm $\sim$ 475 nm、 $\lambda=555$ nm $\sim$ 1 100 nm的OD3-A矩形波宽带通滤光片。采用新方法设计的膜层通带透过率高,膜层整体厚度较薄,监控方法简便,每层膜的厚度适中,敏感度较低,透射率满足要求。制备了实验样片,测试结果显示制备的样片满足要求。在保证膜层光学指标的前提下,克服了F-P型滤光膜控制精度要求高、成本大、晶控法监控膜层透过率不高、膜层厚度过大的缺点。

1 理论分析

1.1 指标分析

光密度值定义为:入射光强度和透射光强度之比的对数,即:

$$V_{OD} = \lg\left(\frac{1}{T_{\text{sample}}}\right) = -\lg(T_{\text{sample}}) \quad (1)$$

光密度和吸光度是同一个概念,国标中规范使用“光密度(optical density, OD)”命名。OD值确定了带通滤光膜反射带的透过率。带通滤光膜的反射编号和截止带一一对应, A 表示反射带为400 nm $\sim$ 1 100 nm。

根据上述分析可知,本文研究的膜层透过率要求可以写成:K9基底上 $\lambda_{c1}=400$ nm $\sim$ 475 nm, $\lambda_{c2}=555$ nm $\sim$ 1 100 nm,透过率 $\tau\leq 0.1\%$,透射带 $\lambda=490\sim 540$ nm,透过率 $\bar{\tau}\geq 92\%$ 。

1.2 滤光膜基本理论

不论是长波截止滤光膜 $\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^S$ 或短波截止膜 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^S$,它们的截止带宽度^[12]是完全相同的:

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_L - n_H}{n_L + n_H}\right) \quad (2)$$

式中: H 、 L 分别表示高、低折射率材料的折射率。随着周期数 S 的增加,过渡带不断减小。将不同中心波长的长、短波滤光膜层结合可以展宽反射带的宽度。

1.3 膜系设计

在400 nm $\sim$ 1 100 nm波段范围内,一般选择 SiO_2 作为低折射率材料,高折射率材料的折射率越高,则截止深度越大、反射带宽度越宽、过渡带越窄,所以选择 Ti_2O_3 作为高折射率材料,本实验所用的高折射率材料 Ti_2O_3 的折射率色散曲线如图1所示。

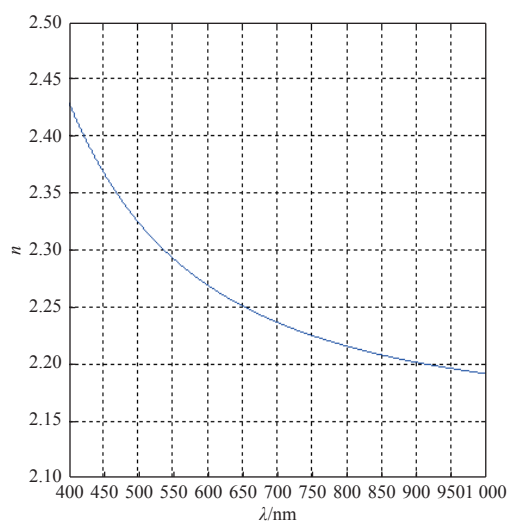


图1 高折射率材料 Ti_2O_3 的折射率曲线

Fig. 1 Refractive index curve of high refractive index material of Ti_2O_3

该滤光片使用光谱范围400 nm $\sim$ 1 100 nm,截止带很宽,中心波长 $\lambda_0=515$ nm,透射带 $\lambda=\lambda_0\pm 25$ nm,不能按照F-P型窄带滤光片的方法进行设计;使用长、短波组合的方式会使膜层厚度过大,同时长波截止膜存在“半波孔”^[13-14]效应,会导致薄膜应力增大、环境适应性较差、通带透射率降低。采用长、短波截止膜组合的方式设计、制备所需的矩形波宽带通滤光片也不适用。在保证膜层光谱的前提下,要减小膜层总厚度,降低应力及膜层敏感度,提高通带透过率,可以将膜层指标拆解成一个带通滤光膜层和一个长波截止膜层的组合。

带通滤光膜层以F-P型窄带滤光膜层作为膜系优化起点,主要解决膜层通带透射率以及过渡带宽度的问题。优化设计的带通膜透过率如图2所示。

带通膜面设计光谱为: $\lambda_{c1}=420$ nm $\sim$ 475 nm,

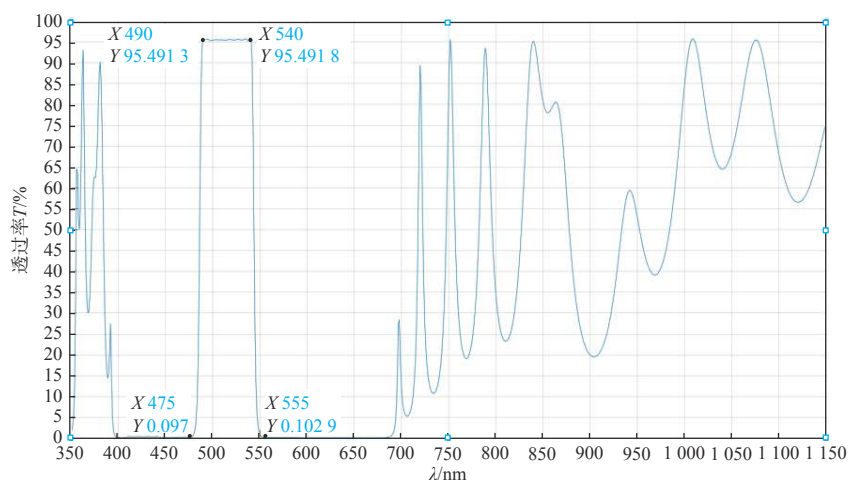


图 2 带通膜面模拟透过率曲线

Fig. 2 Simulated transmittance curve of band-pass films surface

$\lambda_{c2}=555\text{ nm}\sim 680\text{ nm}$, $\tau<0.1\%$; $\lambda=485\text{ nm}\sim 545\text{ nm}$, $\tau>94\%$, 膜层总厚度 $3.277\text{ }\mu\text{m}$, 其中第 9 层最薄, 厚度 20 nm 。该膜系光谱指标优异, 膜层总厚度适中, 每一层膜层的敏感度较低, 控制精度要求较低。

按照膜层指标要求, 结合带通滤光膜的光谱可知: 第二面需要配镀 $485\text{ nm}\sim 545\text{ nm}$ 高透射, $680\text{ nm}\sim 1100\text{ nm}$ 截止带, 透过率小于 0.1% 的长波截

止膜。

按照 1.2 所述方法展宽截止带。对于“半波孔”效应, 董莹^[15]等采用非规整周期性膜系 $\langle mHnL \rangle^s$ 避开半波孔, 大幅提高了通带透过率。利用 2 个非规整周期性膜系叠加, 需要的反射堆数目减小, 膜层整体厚度进一步降低, 可以有效完成该长波截止膜的设计。长波截止膜的模拟透过率如图 3 所示。

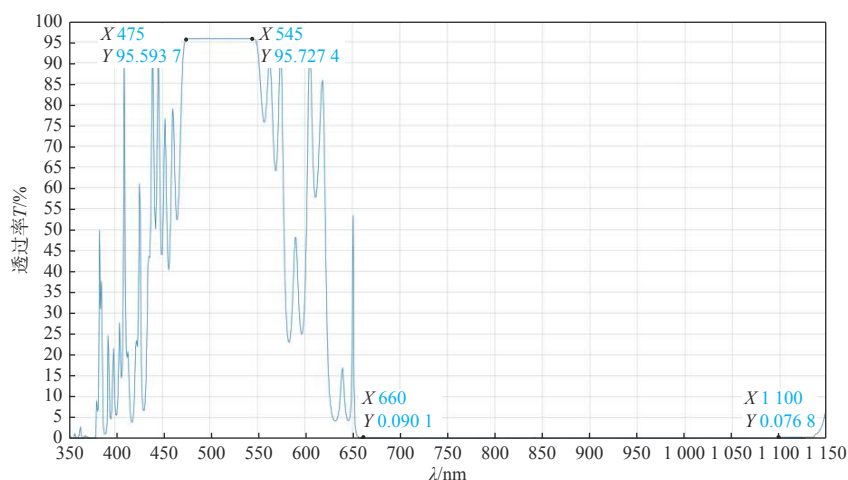


图 3 长波截止膜面模拟透过率曲线

Fig. 3 Simulated transmittance curve of long-wave cutoff films surface

该膜系的厚度 $7.3\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda=470\text{ nm}\sim 560\text{ nm}$, $\tau>95\%$, 截止带 $660\text{ nm}\sim 1100\text{ nm}$, $\tau<0.1\%$, 满足带通滤光片对第二面长波截止膜的光谱指标要求。

将第一面带通滤光膜和第二面长波截止膜分别镀制在样片的 2 个表面进行组合, 得到宽带通滤光膜模拟透过率曲线, 如图 4 所示。

通过理论模拟可知: 设计的矩形波宽带通滤光片中心波长 $\lambda_0=515\text{ nm}$, 在通带 $490\text{ nm}\sim 540\text{ nm}$ 范围内, 平均透射率 $\bar{\tau}$ 可达 95.5% , 截止带 $400\text{ nm}\sim 575\text{ nm}$ 、 $555\text{ nm}\sim 1100\text{ nm}$ 的透过率 $\tau_{\text{cmax}}<0.1\%$, 光密度 (OD) >3 , 过渡带满足要求, 半高宽 $=545-484=61\text{ nm}$, 各项指标均达到预期目标。

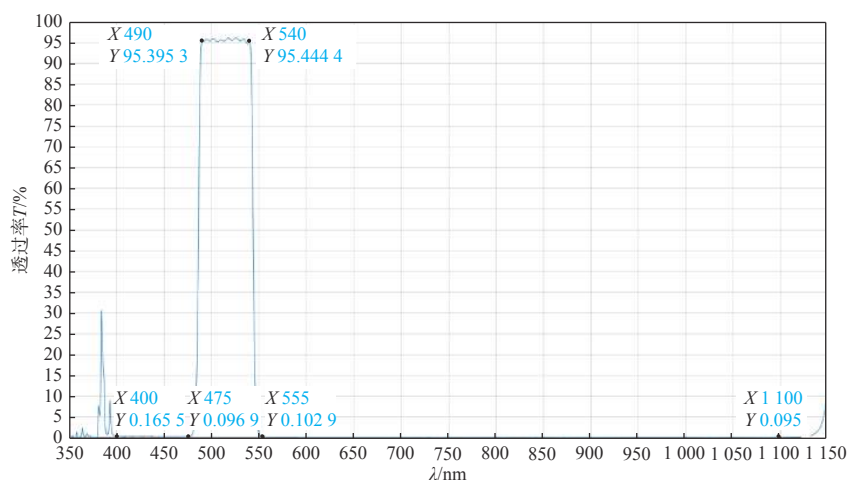


图4 宽带通滤光片模拟透射率曲线

Fig. 4 Simulated transmittance curve of broad-band pass filter

2 工艺实验及透过率测试分析

使用配备有英福康 IC5 石英晶控膜厚监控仪的 ZZSX-800M 型真空镀膜机, 用电子束热蒸发的方式, 用晶控法在 K9 基底上沉积上述设计膜层。

为了测试方便, 分别制备了单面带通滤光膜, 单面长波截止膜以及两面分别沉积了带通膜和长波截止膜的样片。使用 LAMBDA900 型分光光度

计测试单面带通膜、长波截止膜及最终矩形波宽带通滤光片的透射率。

对于带通滤光膜面, 主要控制膜层的敏感度, 提高通带透射率。在设计过程中对每一层膜层的敏感度进行控制, 最薄层也可达到 20 nm, 所以膜层控制精度要求较低。镀制的单面带通滤光膜, 测试的透过率曲线如图 5 所示。

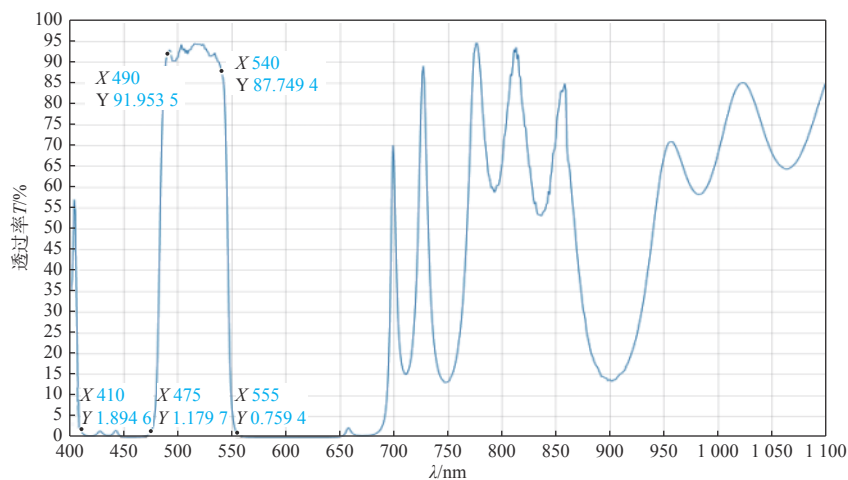


图5 带通膜面的实测透射率曲线

Fig. 5 Measured transmittance curve of band-pass films surface

测试结果显示: 镀制的带通滤光膜层透过率中心波长 $\lambda_0=515$ nm 处, 透过率 94.45%, 在通带波段 490 nm~540 nm 透射率满足要求, 其余波段的光谱测试情况和膜系设计结果基本吻合。但短波截止带存在一定问题, 在 400 nm~410 nm 截止深度明显不够。出现这种问题的原因可能是由于膜层厚度较大, 沉积过程较长, 所以膜层实际沉积温度及孔隙率等参数可能有变化, 导致截止带和设计

曲线出现了较大差异。

对于长波截止膜面, 由于膜层总厚度很厚, 要避免镀膜过程较长引起温度、材料高度以及真空状态等工艺参数的改变, 这些工艺参数改变会带来膜层折射率及晶控参数的变化, 从而引起膜层失配, 降低通带透过率。测试镀制的单面长波截止膜的透过率曲线如图 6 所示。

从制备的长波截止膜样片透过率测试结果

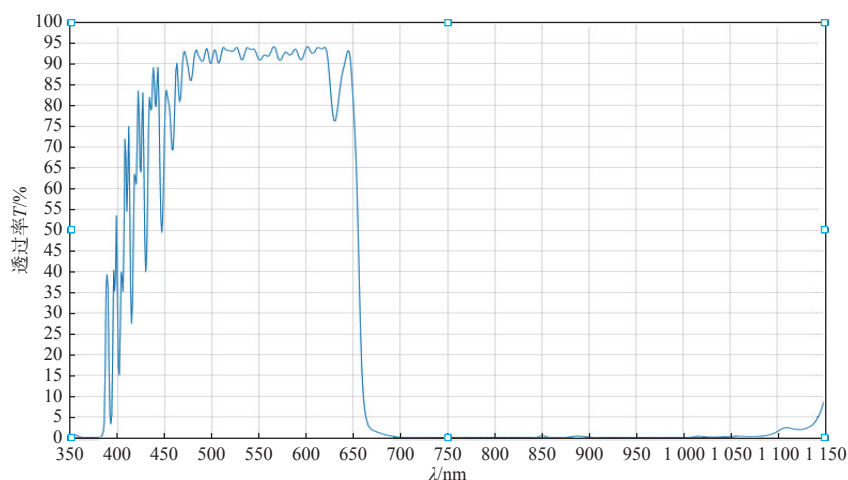


图6 长波截止膜面的实测透过率曲线

Fig. 6 Measured transmittance curve of long-wave cutoff films surface

可以看出:该样片在490 nm~540 nm的透射区域透过率均大于90%,截止区为675 nm~1100 nm,总体上达到设计结果,但同样存在禁带稍窄的情况。

由上述带通滤光膜以及截止膜样片的透过率测试结果,可以推测最终制备的矩形波宽带通滤光膜整体上可以达到指标要求,最终测试制备样片的透过率曲线如图7所示。

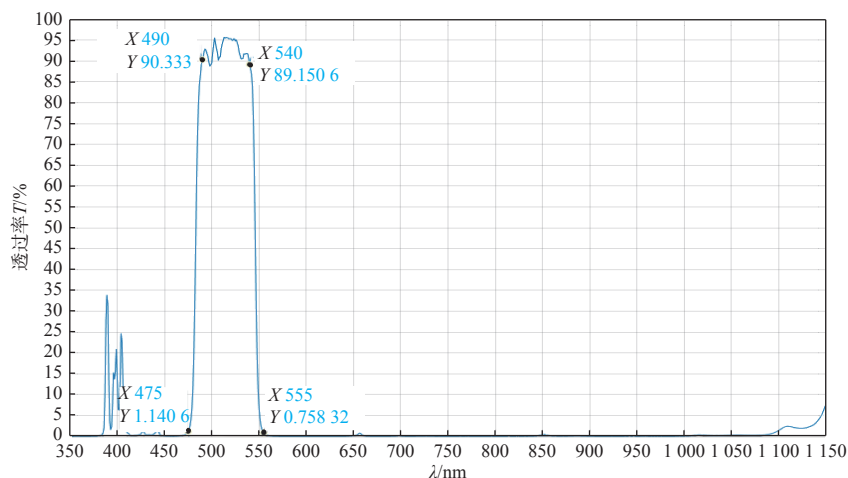


图7 最终样片的实测透过率曲线

Fig. 7 Measured transmittance curve of final sample piece

由制备的矩形波宽带通滤光膜的透过率测试曲线可以看出:该样片光谱基本满足指标要求,在400 nm~1100 nm波段,截止区域为410 nm~475 nm、555 nm~1100 nm,透射带490 nm~540 nm,透射中心波长 $\lambda_0=515$ nm,透射带平均透射率 $\tau=92.7\%$ 。

和前面对带通滤光膜以及截止膜样片光谱分析的情况类似,最终样片的光谱存在一定的缺陷,如400 nm~410 nm截止深度不够,这可能是由于膜层制备时间较长,多层滤光膜的实际沉积温度、孔隙率等工艺参数和单层 Ti_2O_3 膜不同,造成光谱

和设计曲线有偏差;655 nm、850 nm附近存在截止带拼接有偏差,这是2次制备膜层温漂不完全相同的原因^[16-17]。这2个问题都可以通过多次温度漂移实验解决。和国内外同类宽带通滤光膜的相关研究报道^[18]相比较,文中所述的方法更有优势。

3 结论

对矩形波宽带通滤光片光谱进行合理拆解,采用新的膜层设计方法减小膜层总厚度以及每层膜的敏感度。在K9基底上,以 Ti_2O_3 、 SiO_2 分别作为

高、低折射率材料,设计了满足项目需求的矩形波宽带通滤光膜层,设计得到的膜层厚度较小,应力可接受,对设备的精度要求较低。按照设计的膜系结构以电子束热蒸发的方式,使用晶控法监控膜层厚度,制备了带通滤光片,测试结果表明,存在的缺陷可以消除,各项光谱指标均满足实际需求。

参考文献:

- [1] MCLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. 4th ed. New York: CRC Press, 2010: 302-399.
- [2] LITVINOV V I, MANASSON V A, SADOVNIK L S. Conductive coating with infrared pass band[J]. SPIE, 2000, 4094: 38-45.
- [3] 费书国, 廖邦俊, 翁锐, 等. 硬膜矩形带通滤光片[J]. 光学仪器, 1999, 21(增刊1): 137-140.
FEI Shuguo, LIAO Bangjun, WENG Rui, et al. Hard-coated rectangular bandshapes filters[J]. Optical Instruments, 1999, 21(S1): 137-140.
- [4] 申林, 熊胜明, 刘洪祥, 等. 双离子束溅射技术制备带通滤光片[J]. 光学仪器, 2004, 26(2): 87-90.
SHEN Lin, XIONG Shengming, LIU Hongxiang, et al. Preparation narrow-band pass filter by dual-ion beams sputtering deposition[J]. Optical Instruments, 2004, 26(2): 87-90.
- [5] 杨洁. 905 nm带通滤光片制备工艺的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
YANG Jie. Research of preparation craft about 905 nm band-pass filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [6] 庞薇. 1 540 nm带通滤光片的研究与制备[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
PANG Wei. Research and preparation of 1 540 nm band-pass filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [7] 齐健, 苏宙平, 胡立发, 等. 双截止透可见带通滤光片研制[J]. 激光与红外, 2019, 49(12): 1472-1477.
QI Jian, SU Zhouping, HU Lifa, et al. Fabrication of dual-band cut-off for visible bandpass filter[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(12): 1472-1477.
- [8] 朱华新, 王彤彤, 高劲松, 等. 宽通带宽截止带通滤光片研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(5): 1296-1301.
ZHU Huaxin, WANG Tongtong, GAO Jinsong, et al. Study on broad pass-band and wide rejection band of band-pass filters[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(5): 1296-1301.
- [9] 岳鹏飞. 用于虹膜识别的低角度效应带通滤光片的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
YUE Pengfei. Research of low angle effect bandpass filter for iris recognition[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [10] 赵会聪. 带通滤光片的镀制及抗辐照性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHAO Huicong. Evaporation and research on anti-radiation of bandpass filter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 曹一鸣, 王小辉, 卫红. 双重膜厚监控在中远红外光学镀膜工艺中的应用[J]. 光学仪器, 2007, 29(3): 86-89.
CAO Yiming, WANG Xiaohui, WEI Hong. Application of duple monitor mode in the deposition of mid-IR and far-IR optical film[J]. Optical Instruments, 2007, 29(3): 86-89.
- [12] 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: 107-111.
TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 107-111.
- [13] 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. Film system design for short-wavelength pass filter[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 415-418.
- [14] 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): 335-340.
BAO Ganghua, JIAO Hongfei, CHENG Xinbin, 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): 335-340.
- [15] 董莹, 赵兴梅, 杨崇民, 等. 使用非等厚周期性膜系设计负滤光片[J]. 应用光学, 2017, 38(增刊): 74-77.
DONG Ying, ZHAO Xingmei, YANG Chongmin, et al. Design of minus-filterbasedonnon-uniform periodic layers[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(S): 74-77.
- [16] 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): 225-231.
WANG Kaixuan, CHEN Gang, LIU Dingquan, et al. Fabrication of 0.2 nm bandwidth filter and effects of anneal-

- ing temperature on its morphology and characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 225-231.
- [17] 魏博洋, 刘冬梅, 付秀华, 等. 基于结构光3D成像技术的 945 nm窄带滤光片研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 498-506.
- WEI Boyang, LIU Dongmei, FU Xiuhua, et al. Development of a 945 nm narrowband filter based on a structured light 3D imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 498-506.
- [18] 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): 261-268.
- YU Zhiqiang, FEI Shuguo, ZHAO Shuaifeng, et al. Design of optical thin-film filters for multispectral palmprint image acquisition systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 261-268.