

doi: 10.3788/gzxb20144301.0131002

# 近红外宽截止窄带滤光膜的研制

刘冬梅, 王晓娟, 付秀华, 张静, 潘永刚

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:**在空间光通信系统中,为满足光学系统对滤光膜的特殊要求,研制出了一种近红外宽截止窄带滤光膜,实现了降低深背景范围内杂散光干扰的要求.通过对薄膜材料特性的研究、膜系设计曲线的不断优化,得到了相对易于制备的窄带滤光膜结构;采用电子束加热蒸发及离子辅助沉积技术制备薄膜,采用光控加晶控同时监控的方法监控膜层厚度,通过不断优化工艺参量,提高中心波长处的透过率,最终成功得到了光谱性能较好的滤光膜.经光谱测试表明:所镀膜层在 800~1 530 nm, 1 600~1 800 nm 波段平均透过率低于 0.3%, 1 565 nm 单点透过率高于 92%, 通带半带宽为 18 nm, 满足光学系统的使用要求.

**关键词:**光学薄膜;窄带滤光膜;真空镀膜;离子辅助沉积;光学特性;膜系设计;膜厚监控

中图分类号:O484.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)01-0131002-5

## Design and Fabrication of Near-infrared Narrow-band Filters with Wide Rejection Band

LIU Dong-mei, WANG Xiao-juan, FU Xiu-hua, ZHANG Jing, PAN Yong-gang

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to meet the special requirements for filter coating of the space optical communication system, a narrow-band filter with high rejection in near-infrared band was prepared. The filter can reduce the interference of the stray light perfectly in the range of deep background. Through analyzing the characteristics of the coating materials, continually optimizing the film system design curve, an easily prepared narrow-band filter film structure was obtained. Thin films were prepared through electron beam evaporation method and ion-assisted deposition technique, and the thickness of the filter was controlled using crystal-controlled and light control monitoring methods at the same time. By continually optimizing technical parameters, the transmittance of the central wavelength increased, and the filter membrane with better spectral performance was obtained successfully. After the spectrum testing, the average transmittance of the filter is lower than 0.3% at the band of 800~1 530 nm and 1 600~1 800 nm, the transmittance at 1 565 nm is higher than 92% and the full-width at half maximum of the filter is 18 nm, and the technical requirements of the optical system are satisfied.

**Key words:** Optical films; Narrow-band filter film; Vacuum coating; Ion-beam assisted deposition; Optical character; Film system design; Thickness monitor

**OCIS Codes:** 310.0310; 310.6860

## 0 引言

自 1960 年梅曼发明世界首台红宝石激光器以来,激光以其单色性好、方向性强及功率密度大等良好的光束特性而得到广泛的应用<sup>[1]</sup>.近几十年来,随着光学元器件技术的逐渐成熟,空间光通信技术也已成为了现代通信技术发展的一个重要方面.从空间光通信系

统的组成来说,捕获系统是通信链路建立的关键一步,它主要是以光学手段来完成对信标光的捕获.光在空间光通信系统中传输时,为了保证在接收信标光的同时,减少大气通道中其他背景光对信标光的影响,需在系统中添加一个核心光学元件——窄带干涉滤光片.该滤光片能够使所需工作波段的光通过而让其它非工作波段的光截止,这样就可以降低非工作波段杂散光

基金项目:红外技术预研项目(No. 5131xxxx103)资助

第一作者:刘冬梅(1970-),女,教授,主要研究方向为现代光学薄膜技术及现代加工技术. Email: sjx8811@sohu.com

收稿日期:2013-06-28;录用日期:2013-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

的干扰从而提高系统的信噪比。资料显示,国内外对各种窄带滤光膜的研究<sup>[2-7]</sup>已取得了一定的成果,但针对截止带宽为 800~1 800 nm 的窄带滤光膜的研制就变得不多了,尤其是采用全介质膜进行制备的近红外宽截止窄带滤光膜。

本文主要针对空间激光通信系统对窄带滤光膜的特殊要求,在研制过程中,重点解决了近红外超宽波段高截止的设计问题和中心波长透过率提高的问题,并给出了相应的光谱测试曲线。

## 1 膜系设计

### 1.1 技术要求

根据空间激光通信系统的技术要求,该窄带光学滤光片的光谱性能应达到的要求是:中心工作波长 1 565 nm 处的光高透射,近红外波段的光高截止。其具体技术指标如表 1。

表 1 1 565 nm 窄带滤光膜技术要求

Table 1 Technical index requirement for 1 565 nm narrow-band filter

FWHM/nm	17±2
Center wavelength/nm	1 565±3
Peak transmission	≥92%
Outside-pass band transmission	<0.3%
Cut-off region/nm	800~1 530, 1 600~1 800

### 1.2 材料的初步选取

通常在膜系设计过程中,镀膜材料的选取主要是针对技术要求及材料特性(如材料的透明度、色散和吸收特性、机械牢固度和化学稳定性等)进行综合考虑。

由表 1 可见,该窄带滤光片所涉及的波段范围为 800~1 800 nm,在此波段范围内,常用的部分高、低折射率材料如表 2 所示。由于 TiO<sub>2</sub> 折射率高、性能稳定, SiO<sub>2</sub> 具有吸收小、膜层牢固等特点,且二者匹配良好,

表 2 近红外波段部分常用材料的光学性能

Table 2 The character of some commonly used materials of near-infrared

Materials	Transparent band/μm	Refractive index/μm
ZrO <sub>2</sub>	0.3~12	1.95(1 565 nm, 200℃)
H <sub>4</sub>	0.36~7	1.96(1 565 nm, 200℃)
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35~10	1.97(1 565 nm, 200℃)
TiO <sub>2</sub>	0.3~10	2.17(1 565 nm, 200℃)
SiO <sub>2</sub>	0.2~9	1.44(1 565 nm, 200℃)
MgF <sub>2</sub>	0.11~10	1.35(1 565 nm, 200℃)

故初步选择 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 作为高低折射率材料<sup>[8]</sup>。

### 1.3 膜系设计方案的确定

由于此滤光片具有截止带宽、峰值透过率要求高、带宽窄、中心波长容差小等特点,在利用 TFC 膜系设计软件设计时,若采用常规的窄带滤光膜结构(多腔式带通滤光膜结构<sup>[9]</sup>) 在 K9 基底上进行膜系设计时,存在截止带较窄的缺点(通带两侧仅有 200 nm 左右的截止带区域,如图 1 所示),具体膜系为:G|(HL)<sup>3</sup>H2LH

(LH)<sup>3</sup>L(HL)<sup>3</sup>H2LH(LH)<sup>2</sup>0.69L1.48H|A,其中,  $n_G = 1.52$ ,  $n_H = 2.17$ ,  $n_L = 1.44$ ,  $n_A = 1.0$ 。故需在常规窄带滤光膜系的基础上进行改进,来抑制截止带处的不规则波纹,实现近红外超宽波段高截止的设计要求,通过大量研究分析提出以下两种设计方案。

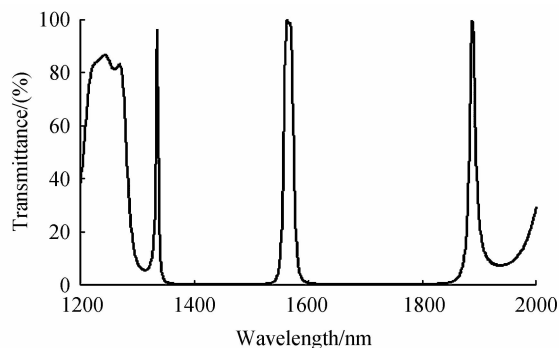


图 1 多腔式窄带滤光膜理论透过率曲线

Fig. 1 Spectral transmittance of the multiple cavity narrow-band filter

1) 在 K9 基底的正面镀制超宽带、高截止窄带滤光膜,反面镀制 1 530~1 600 nm 波段的减反膜。在设计正面膜系时,为实现超宽波段截止,需要在多腔式带通滤光膜的膜系结构基础上,叠加不同中心波长的  $\lambda/4$  多层介质膜<sup>[10]</sup>,具体表达式为:G|m(HL)<sup>s</sup>...n(HL)<sup>s</sup>(HL)<sup>3</sup>H2LH(LH)<sup>3</sup>L(HL)<sup>3</sup>H2LH(LH)<sup>3</sup>2.13L0.73H2.90L|A,  $n_H = 2.17$ ,  $n_L = 1.44$ ,其理论设计曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,在不考虑背面反射的情况下,通带的平均透过率为 99.65%,截止带的平均透过率小于 0.2%,通带半宽度为 17 nm,膜层总物理厚度为 15.12 μm。

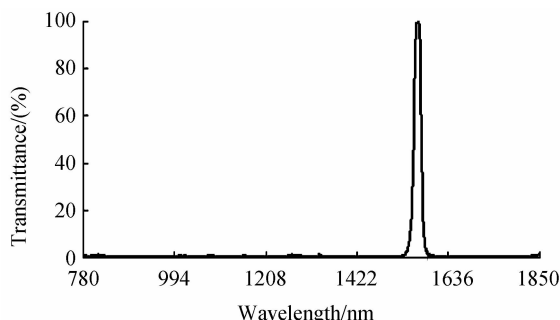


图 2 超宽带窄带滤光膜的理论透过率曲线

Fig. 2 Spectral transmittance of the ultra-broadband narrow-band filter

2) 在 K9 基底的正面镀制多腔式窄带滤光膜,反面镀制干涉截止滤光膜。正面膜系的理论设计透过率曲线如图 1,反面采用 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 进行膜系设计时,为满足 800~1 400 nm 截止带的平均透过率  $T < 0.3%$  及中心波长 1 565 nm 处高透过率的要求,在初始膜系 G|1.8(HL)<sup>9</sup>1.2H2.4(LH)<sup>9</sup>1.2L|A 的基础上,经过软件优化,最终得到膜厚为 5.41 μm 的非周期膜系,其理论设计曲线如图 3。由于膜层较厚,对于国产型真空镀膜机来说制备难度较大。

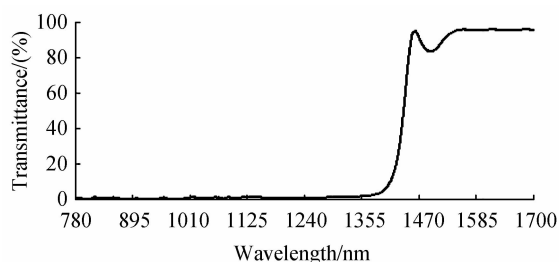


图3 TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>设计的干涉截止滤光膜理论透过率曲线  
Fig. 3 Spectral transmittance of interference cut-off filter designed by TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>

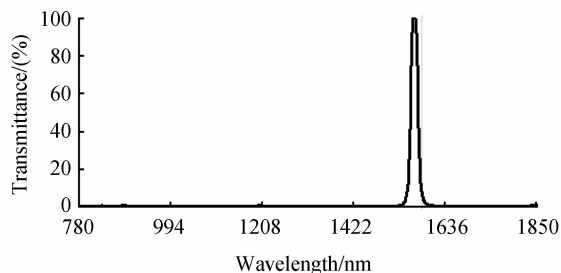


图5 1 565 nm窄带干涉截止滤光膜理论透过率曲线  
Fig. 5 Spectral transmission of the 1 565 nm filter

对于薄膜的设计和制备而言,抑制波段越宽,膜层就越厚,厚膜会导致吸收增大,从而造成薄膜的光学性能变差,同时对薄膜的牢固性也会产生一定影响.为减少膜层总厚度,减小膜层之间应力,提高机械强度,考虑选用Si做为高折射率材料.材料Si的透明区虽为1~9 μm,但在500~1 000 nm之间仍存在着一定程度的透射,同时Si具有比TiO<sub>2</sub>更高的折射率,并且与低折射率材料SiO<sub>2</sub>有良好的匹配性,故Si的使用能够使干涉截止滤光膜的膜层总数减少、膜系整体厚度降低,从而在一定程度上降低了制备难度.其中具体膜系为:G|0.58H0.81L0.87H0.86L0.55H0.60L0.83H0.78L(HL)<sup>3</sup>H0.78L1.33H0.98L0.36H|A,  $n_H = 3.2$ ,  $n_L = 1.44$ .图4是在K9基底上采用Si和SiO<sub>2</sub>设计的干涉截止滤光膜理论透过率曲线.

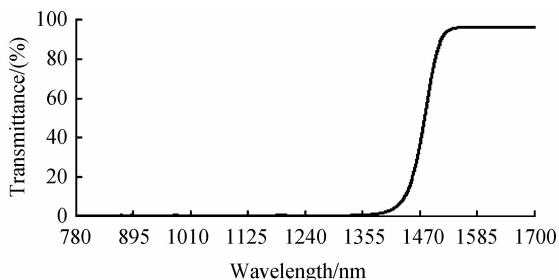


图4 Si和SiO<sub>2</sub>设计的干涉截止滤光膜理论透过率  
Fig. 4 Spectral property of interference cut-off filter designed by Si and SiO<sub>2</sub>

3)通过对以上两种设计方案进行比较和分析可知,方案1膜层过多,膜系总厚度过厚,这将直接导致膜层吸收增加,控制难度加大,机械性能及光学性能变差.故而最终选择方案2作为最终设计方案,即在K9基底上进行双面镀制,具体设计参量如表3,其理论设计透射率曲线如图5.

表3 窄带滤光膜具体设计参量

Table 3 Design parameters of the narrow band filter

	Layers-Front	Layers-After
Film structure	The multiple cavity narrow-band filter(Fig.1)	Interference cut-off filter(Fig. 4)
Materials	TiO <sub>2</sub> and SiO <sub>2</sub>	Si and SiO <sub>2</sub>
Reference wavelength	1 565 nm	1 160 nm
Physical thickness	8.27 μm	2.27 μm

## 2 薄膜的制备

采用国产TXX-700型真空镀膜机对1 565 nm窄带干涉滤光片进行制备.在薄膜制备过程中,需要对充氧量、蒸发速率、基底温度及离子源等各项工艺参量进行反复优化,以提高中心波长的透过率,同时满足超宽波段高截止的设计要求.

### 2.1 材料特性研究

在镀制过程中发现TiO<sub>2</sub>材料易因分解而失氧,需充入适量的氧气以减少吸收.而选择适当的蒸发速率可以改善薄膜的致密性,提高膜料的折射率<sup>[11]</sup>,通过大量实验,最终选择TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>的蒸发速率分别为0.3 nm/s、0.7 nm/s.同时为改善膜层的机械牢固度和聚集密度,将基底温度设置为200℃.

在Si的蒸镀工艺选择上,若采用常规工艺Si的蒸发速率低且不稳定,为获得相对稳定的蒸发速率选用石墨坩埚,在沉积过程中还发现Si常因局部温度过高而产生坩埚龟裂现象,需在每层镀制之后进行退火处理<sup>[12]</sup>.

### 2.2 提高膜层控制精度的研究

为获得具有良好光学性能的窄带干涉滤光片,在沉积的过程中需严格控制膜层精度,否则会出现较大的累计误差,从而影响薄膜的光学性能.影响膜层控制精度的因素有很多,但主要通过以下几方面提高膜层的控制准确度.

1)周期膜系的控制精度:基片正面主要由周期膜系构成,常采用光电极值法<sup>[13]</sup>控制膜层的光学厚度,由于本膜系的设计波长为1 565 nm,而所配备的GMHK-9704型单色仪在400~700 nm范围内较为灵敏,在极值法监控过程中,可用三倍极值的控制方法进行控制即改变设计波长.因各点材料的折射率不同,设计波长不存在标准的三倍关系,需在不影响窄带滤光片中心波长位置及透过率的前提下进行修改,修改后的设计波长为565 nm.此外在制备过程中,为了便于监控,通常采用过极值法加以控制,同时为减少判断膜厚的随机误差,应确保一个一致性的过正量,但过正量的存在会导致中心波长的移动,此误差可通过调整监控波长来弥补.

2)非周期膜系的控制精度:在沉积过程中由于蒸

发源到基片的距离与到晶控片的距离有一定差异,故需要引入 Tooling(修正因子)值<sup>[14]</sup>来修正由于此差异而产生的误差,而修正因子的准确程度将直接影响非周期膜层的控制精度,其大小(见表4)需要经过反复试验来确定。

表4 材料 Tooling 值的大小

Table 4 Size of the material's tooling

Material	Size of tooling
TiO <sub>2</sub>	111%
SiO <sub>2</sub>	99.6%
Si	77.1%

3) 残余蒸镀量的控制精度:在薄膜蒸镀的过程中,每层膜都是以关闭挡板来结束此蒸镀过程,但在关闭挡板之后仍会存在少量残余蒸镀量<sup>[15]</sup>,使薄膜的物理厚度发生改变.残余蒸镀量的大小与膜料类型、膜层数及厚度有关联,且不具有严格的重复性,但通过大量的反复试验如图6所示,发现每层膜的残余蒸镀量基本恒定.需要强调的是每层残余蒸镀量虽然很小(零点几个纳米到几个纳米不等)但其累计误差却对薄膜的光学性能产生较大的影响.故而在薄膜制备的过程中,需在膜层预设的物理厚度中考虑此残余蒸镀量的影响,以进一步提高控制精度,提高中心波长的透过率。

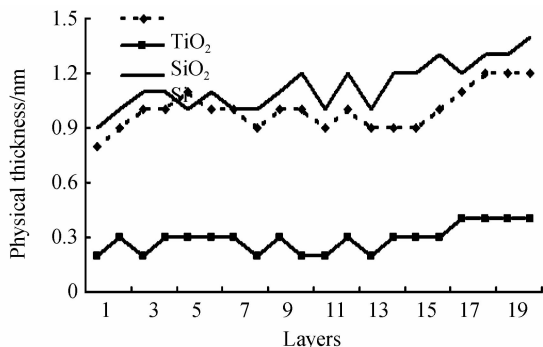


图6 材料的残余蒸镀量

Fig. 6 Materials of the residual evaporation amount

### 2.3 离子辅助沉积工艺

薄膜在生长的过程中,由于原子或分子的沉积速率不同导致薄膜呈柱状结构,膜层中存在一定空隙,这些空隙很容易被空气中的水汽充满而产生光谱特性曲线移动的现象.为改善薄膜的稳定性,增加薄膜的致密度和附着力,改善光谱特性曲线移动的现象,在蒸镀的过程中采用离子源辅助沉积<sup>[16]</sup>.经对离子源工作时的各项参量进行反复优化,确定其各项工作参量如表5.

表5 离子辅助沉积技术参量

Table 5 Parameter of ion assisted deposition technique

Item	Value
Vacuum/pa	$3.0 \times 10^{-3}$
Polar voltage/V	270
Accelerating voltage/V	220
Anode voltage/V	50
Neutral current/A	15
Ion beam current/mA	30

## 3 测试结果与分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计分别对在 K9 基底上所镀制的单面多腔式窄带滤光膜、单面干涉截止滤光膜以及双面窄带干涉截止滤光膜进行测试,得到的透过率测试曲线结果分别如图7~9.

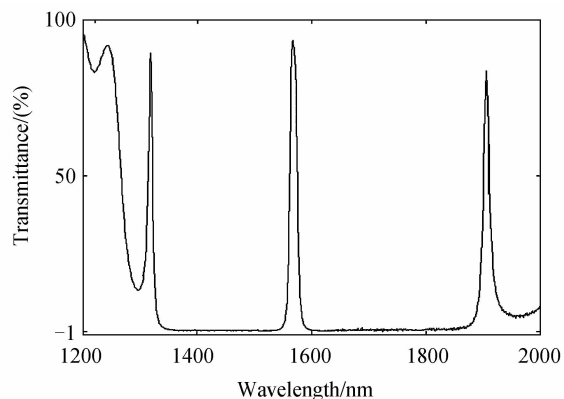


图7 多腔式窄带滤光膜的实测透过率曲线

Fig. 7 Measured transmittance curve of the multiple cavity narrow-band filter

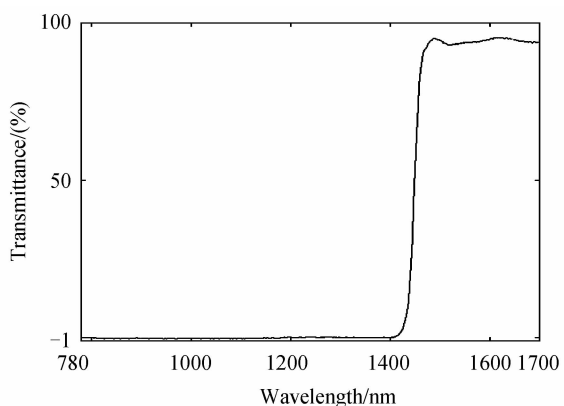


图8 干涉截止滤光膜的实测透过率曲线

Fig. 8 Measured transmittance curve of the interference cut-off filter

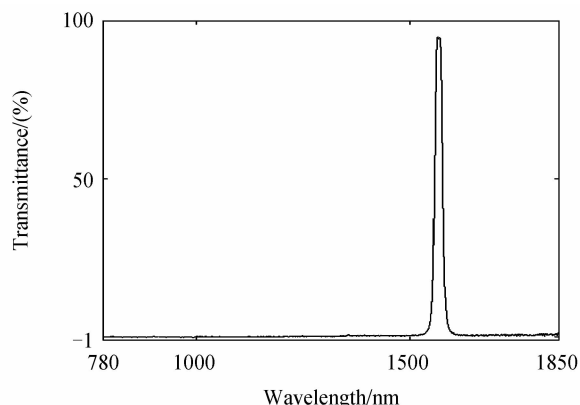


图9 双面镀膜的实测透过率曲线

Fig. 9 Measured transmittance curve of substrate coated on both sides

比较图5和图9可以看出,对于理论曲线和实际曲线,无论是透过率还是峰值半宽度都有一定的差异,

表 6 给出了具体的实际对比. 引起实际测试曲线与理论设计曲线的差异主要因素有: 1) 虽已双面镀制但每面膜层的层数仍较多, 整体膜层厚度仍较厚, 势必会存在一定的弱吸收和散射等现象; 2) 采用光电极值法控

制极值会引入一定的人为控制误差; 3) 由于正反面均镀有多层膜, 基片背面膜层的镀制对正面膜层将会产生一定的影响, 降低其光学性能. 虽在制备过程中已经尽可能的改善, 但仍存在部分能量损失.

表 6 理论曲线与实测曲线对比

Table 6 Comparison of theoretical curve and measured curve

	Multiple cavity narrow-band filter	The interference cut-off filter	Filter coated on both sides
Theoretical transmittance at 1 565 nm/%	95.70	95.80	98.66
Measured transmittance at 1565nm/%	92.75	94.20	94.58
Theoretical average transmittance of outside-pass band/%	0.03	0.06	0.15
Measured average transmittance of outside-pass band/%	0.218	0.185	0.254
Theoretical FWHM/nm	17	\	17
Measured FWHM/nm	18	\	18

## 4 结论

本文基于薄膜设计理论, 借助 TFC 软件设计, 采用离子辅助沉积技术, 成功研制出了截止带宽为 800 ~ 1 800 nm、通带半宽度为 18 nm、1 565 nm 处峰值透过率为 94.58% 的窄带滤光膜, 该滤光膜可成功地抑制掉空间光通信系统中的背景噪声. 在研制过程中, 通过使用双面镀制的方法解决了近红外超宽波段高截止问题; 同时反复优化各种工艺参量, 提高中心波长的透过率, 有效改善了滤光膜的光学性能; 最后又采用离子辅助沉积技术, 解决了中心波长漂移的问题. 虽然研制的滤光膜能够满足使用要求, 但如何进一步降低吸收, 提高中心波长透过率及改善面形精度是以后研究和改进的方向.

### 参考文献

- [1] FU Qiang, JIANG Hui-lin, WANG Xiao-man, *et al.* Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(2): 116-125.  
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, **5**(2): 116-125.
- [2] FU Lian-xiao, WU Yong-gang, ZHENG Xiu-ping, *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.  
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.
- [3] FU Xiu-hua, KOU Yang, LIU Dong-mei, *et al.* Research of ultraviolet induced transmission filter for the solar blind system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(5): 0507002.  
付秀华, 寇洋, 刘冬梅, 等. 日盲系统紫外诱导滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2012, **40**(5): 0507002.
- [4] YU Kan, LIAO Jian-feng, ZHANG Xiao-dan, *et al.* Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 181-185.  
俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 等. 基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 181-185.
- [5] LI Shan, FU Xiu-hua, SU Jia-ni, *et al.* Fabrication of filter film using in lida ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 853-856.
- [6] YANG Yong-liang, LIU Guo-jun, FU Xiu-hua, *et al.* Study and fabrication of filter film in laser identification between friend or foe system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1):

0131002.  
杨永亮, 刘国军, 付秀华, 等. 激光敌我识别系统中滤光膜的研制[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0131002.
- [7] CHEN Chao-ping, SHI Jian-tao, GUO Rui, *et al.* Design and preparation of mid-infrared band-pass filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(3): 595-598.  
陈建平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备. *应用光学*, 2012, **33**(3): 595-598.
- [8] 钟迪生. 真空镀膜—光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 235-241, 252-265.
- [9] JIA Yu-chao, LI Gang, BAI Yu-zhuo, *et al.* Study of factors influencing half band width rectangularity and steepness in design of narrow bend-pass filter[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(8): 448-452.  
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.
- [10] 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: 114-118.
- [11] PAN Yong-qiang, ZHU Chang, MI Qian, *et al.* The optical properties of TiO<sub>2</sub> thin film prepared by electron beam evaporation[J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(5): 53-55.  
潘永强, 朱昌, 弥谦, 等. 电子束蒸发 TiO<sub>2</sub> 薄膜的光学特性[J]. *应用光学*, 2004, **25**(5): 53-55.
- [12] JANG Xiao-dong, HUANG Zu-xin, REN Huan, *et al.* Study of laser conditioning process for optical film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **14**(3): 321-324.  
蒋晓东, 黄祖鑫, 任寰, 等. 光学膜层激光预处理过程研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3): 321-324.
- [13] ZHAN Mei-qiong, ZHANG Dong-ping, YANG Jian, *et al.* Thickness monitoring by quartz crystal oscillation for optical coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585-588.  
占美琼, 张东平, 杨健, 等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 585-588.
- [14] SHEN Yi, LIU Dong-mei, FU Xiu-hua, *et al.* Research and preparation of the ultraviolet communication filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(12): 1207005.  
沈弈, 刘冬梅, 付秀华, 等. 紫外光通信滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1207005.
- [15] FU Xiu-hua, SUN Ying-jie, LIU Dong-mei, *et al.* Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0331002.  
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反膜的研制[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 0331002.
- [16] FU Xiu-hua, WANG Gang, LIU Dong-mei, *et al.* Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 0107001-5.  
王刚, 付秀华, 刘冬梅, 等. 可见红外制导系统高通滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 0107001-5.