

# 光纤通信系统中带通滤光膜的研制

张 雷 张于帅\* 张 静 付秀华

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 光纤作为光信号传输媒介,其具有传输速率高、信息量大等优点,因而在通信领域得到了广泛应用。在此背景下,为满足光纤通信系统的使用要求,对该系统中的带通滤光膜进行研制。选用 $Ta_2O_5$ 和 $SiO_2$ 作为镀膜材料,设计了含有5个谐振腔的带通滤光膜,分析并解决了耦合层膜厚监控的问题。制备的带通滤光膜在1479~1504 nm处插入损耗小于0.3 dB,1260~1450 nm与1530~1620 nm处透射隔离度分别大于39 dB和31 dB,满足该系统使用要求。

**关键词** 薄膜;带通滤光膜;谐振腔;耦合层

中图分类号 O484 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0305003

## Fabrication of Band-Pass Filter in Optical Fiber Communication System

Zhang Lei Zhang Yushuai Zhang Jing Fu Xiuhua

*School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** As a transmission media of communication, optical fiber communication is widely used in people's lives for its high transmission rate, large amount of information. Under this background, the band-pass filter film is made to satisfy the requirements for the laser communication system. Using  $Ta_2O_5$  and  $SiO_2$  as coating materials, the band-pass filter which has five resonators is designed and the thickness of coupling layers are monitored by analyzing and solving the question of material stress match. The insertion loss of the filter is less than 0.3 dB at from 1479 nm to 1504 nm and the transmission isolation is higher than 39 dB and 31 dB at from 1260 nm to 1450 nm and from 1530 nm to 1620 nm, which meets requirement of the system.

**Key words** thin films; band-pass filter; resonator; coupling layers

**OCIS codes** 310.4165; 310.6860; 310.1860; 120.2440

## 1 引 言

21世纪在信息高技术高速发展的背景下,人们对于信息的需求不断增大,可靠性高、速度高、频带宽的通信网络构建已成为通信行业的首要任务,而光纤通信技术是实现信息高速传输的基础<sup>[1-2]</sup>。在光通信中,薄膜光学技术发挥着不可取代的作用,尤其是在光纤通信的无源器件与有源器件中具有最为广泛的应用,如干涉滤光膜波分多路复用(WDM)器件在光纤通信系统中起关键性的作用<sup>[3-6]</sup>。

本文所研究的带通滤光膜,需实现:1479~1504 nm插入损耗(IL)小于0.3 dB,1260~1450 nm和1530~1620 nm透射隔离度分别大于31 dB和20 dB。由于反射带1(1260~1450 nm)带宽较宽,仅通过带通滤光膜难以实现,需将带通滤光膜(BPF)与长波通(LPF)膜系组合才能实现反射带1的要求,这就增加了设计及制备该滤光膜的难度。在研制过程中,重点解决了该BPF的设计与优化,分析并解决了耦合层膜厚监控的问题。

## 2 膜系设计

根据该系统的使用要求,入射角为 $0^\circ\sim 3^\circ$ ,具体参数指标如表1所示。

收稿日期:2015-10-08;收到修改稿日期:2015-11-18

基金项目:长春市科技发展计划项目(2014219)

作者简介:张雷(1978—),男,副研究员,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: 908705644@qq.com

\*通信联系人。E-mail: yushuai100929@163.com

表1 带通滤光膜设计参数

Table 1 Filter film design parameters

Parameter	Value
Operating wavelength /nm	1250~1630
Pass band /nm	1479~1504
Reflect band 1 /nm	1260~1450
Reflect band 2 /nm	1530~1620
Wavelength dependent loss /dB	≤ 0.3
Insertion loss at pass band /dB	≤ 0.3
Transmission isolation at reflect band 1 /dB	≥ 31
Transmission isolation at reflect band 2 /dB	≥ 20

从表1中的参数可以看出,该滤光膜在设计及制备方面都有较大的难度。因此,在设计BPF之前,需要对影响其性能的主要参数进行研究分析,然后才能设计出理想的带通滤光膜。

### 2.1 影响BPF性能的主要参数分析

影响BPF性能的主要参数有材料折射率差值、干涉级次、谐振腔的个数、间隔层及耦合层的厚度。

以高折射率材料作为间隔层的法布里-珀罗<sup>[7]</sup>(F-B)BPF基本结构,即  $subl(HL)^mS2mH(LH)^nSlair$ ,其中H和L分别代表1/4波长厚度的高低折射率材料的膜层, $m$ 为整数( $m=1,2,3,\dots$ ),其中 $2mH$ 为间隔层, $S$ 表示膜堆的周期数。实验中测得的BPF透射光谱如图1所示,其中图1(a)~(e)图分别给出了材料折射率差值、干涉级次、谐振腔个数、间隔层及耦合层厚度对BPF的影响。从图1(a)和(b)中可以看出,随着材料高低折射率差值及膜层干涉级次的增加,通带带宽变窄,截止深度增大;从图1(c)和(d)中则可以看出,谐振腔个数及间隔层厚度增大,通带形状越来越接近矩形,同时截止深度加深;图1(e)表明,随着耦合层厚度的增加,通带形状基本不变,但是在通带两侧会出现2个次通带,同时截止深度变小。

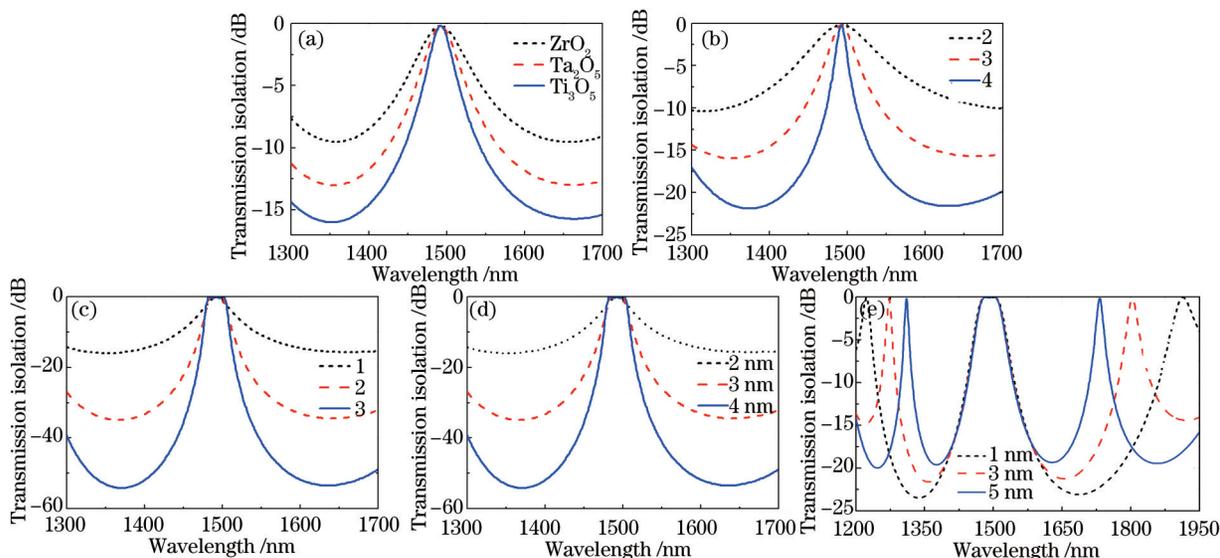


图1 带通滤光膜的影响因素分析。(a) 折射率差值;(b) 干涉级次;(c) 谐振腔个数;(d) 间隔层厚度;(e) 耦合层厚度

Fig.1 Analyzing the influence factors of BPF. (a) Refractive index difference; (b) interference order; (c) resonator number;

(d) thickness of space layer; (e) thickness of coupling layer

### 2.2 膜系设计方案

根据光学薄膜设计理论<sup>[8]</sup>,宽带滤光膜可以采用长波通和短波通滤光膜的组合进行设计,窄带滤光膜的设计可以采用F-P结构<sup>[9]</sup>。利用长波通和短波通组合设计的带通滤光膜,通带内波纹较多,无法保证通带IL小于0.3 dB和波长相关损耗(WDL)大于0.3 dB,需增加大量非规整层来抑制通带内的波纹,但非规整层给BPF的制备带来较大困难;另一方面,该设计方法无法保证截止波长有准确的定位,这就严重影响了滤光膜的使用。另外,由于反射带1带宽较宽(1260~1450 nm),仅用BPF难以实现反射带1透射隔离度大于等于31 dB,需将BPF

与长波通滤光膜组合才能满足要求。因此,实验中采用BPF与LPF相组合的方式来制备该滤光膜。

### 2.2.1 BPF设计原理

基于等效折射率及BPF设计理论<sup>[10]</sup>,多腔F-P结构带通滤光膜需考虑其与空气及基板侧的折射率的耦合问题。对于结构为(HLHLHLHLH)<sup>S</sup>,其等效折射率为 $n_e = n_H^5/n_L^4$ ,在基板侧需镀HLHL膜层,而在空气侧镀HLH膜层,得到新的等效折射率为 $n_e^2/n_H$ ,此值与 $n_0$ ( $n_0$ 为空气折射率)差异不大,故BPF的反射损耗很小。

依据以上分析,采用5个F-P结构的谐振腔作为BPF的基础膜系,并在膜堆与空气之间增加匹配层HL,其基本结构为subl(HL)<sup>2</sup>4H(LH)<sup>1</sup>2H(LH)<sup>1</sup>L(HL)<sup>3</sup>2H(LH)<sup>3</sup>L(HL)<sup>3</sup>4H(LH)<sup>3</sup>L(HL)<sup>3</sup>2H(LH)<sup>3</sup>L(HL)<sup>2</sup>4H(LH)<sup>1</sup>2H(LH)<sup>1</sup>HLair。为保证通带有平坦和较高的透射率,5个谐振腔均为规整膜层,仅优化匹配膜层,这样一方面增加了通带的透射率及平滑度,降低了WDL,同时可以降低BPF的制备难度。优化后的膜系为subl1.0H1.0L...1.0L1.0H0.39H1.32Lair,物理厚度约16.3 μm,反射带1的透射隔离度大于42 dB,反射带2的透射隔离度大于35 dB,WDL小于0.026 dB,其理论透射光谱曲线如图2所示。

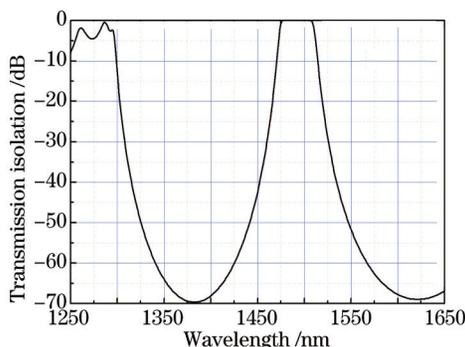


图2 BPF透射光谱曲线

Fig.2 Transmission spectral curve of BPF

### 2.2.2 LPF设计原理

LPF初始膜系为subl(0.5HL0.5H)<sup>S</sup>Lair,依据等效折射率理论,在初始膜系空气侧添加匹配层L,使多层膜的等效折射率与入射介质相匹配,从而抑制通带内的波纹。 $S=18$ ,优化后的膜系为subl1.074H1.079L0.817H0.714L0.888H1.050L1.090H1.077L1.070H1.067L1.049H0.990L0.911H0.877L0.931H1.008L1.057H1.071L1.074H1.072L1.072H1.061L1.021H0.942L0.884H0.902L0.979H1.038L1.063H1.065L1.077H1.098L1.072H0.905L0.716H0.730L1.267H2.057Lair,物理厚度约7.2 μm,理论设计透射光谱曲线如图3所示。

根据以上分析,将BPF、LPF及背面抗反(AR)膜系组合在一起,理论透射光谱曲线如图4所示。

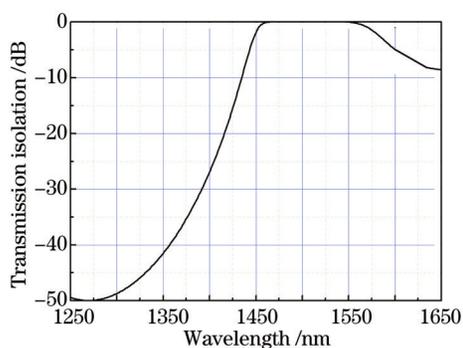


图3 LPF透射光谱曲线

Fig.3 Transmission spectral curve of LPF

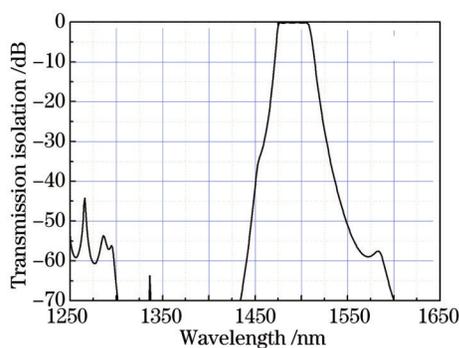


图4 BPF+LPF+AR组合膜系透射光谱曲线

Fig.4 Transmission spectral curve of the BPF+LPF+AR combination films

该带通滤光膜在0.3 dB处带通宽度为1476~1508 nm,反射带1的透射隔离度大于41 dB,反射带2的透射隔离度大于34 dB,通带IL小于0.1 dB,WDL小于0.17 dB;当光束以3°入射,光谱曲线往短波漂移0.4 nm,均满足使用要求。

### 3 薄膜的制备

该滤光膜是在 Leybold 真空镀膜机上制备的,该设备配备有石英晶体膜厚控制仪、OMS5100 光控系统、APS (Advanced Plasma Source)离子源和双电子枪。实际镀制的工艺参数如表 2 所示,APS 实验参数如表 3 所示。

表 2 工艺参数

Table 2 Technological parameters

Material	Deposition rate / (nm/s)	Substrate temperature / °C	Vacuum / Pa	Filling O <sub>2</sub> rate / (cm <sup>3</sup> /min)
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.3	200	1.9	40
SiO <sub>2</sub>	0.6		1.3	30

表 3 APS 参数

Table 3 Parameters of APS

Material	Bias voltage / V	Discharge voltage / V	Coil current / A
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	100	90	1.58
SiO <sub>2</sub>	160	120	1.7

在制备该带通滤光膜时,采用 OMS5100 直接光控方法监控膜层厚度,晶振片监控膜料沉积速率。

BPF 直接光控监控曲线如图 5 所示,监控波长为 1492 nm。由于耦合层 L 光信号变化比较微弱,无法用直接光进行监控。可采用两种方法监控其厚度,一种是时间判断法,即根据镀膜时间来判断膜层厚度;另一种是晶振监控法,即根据晶振片检测到的膜层厚度来判断。同时,采用 Scale Thickness<sup>[11-12]</sup>方法,分析了耦合层膜厚误差对 BPF 的影响,其结果如图 6 所示。当耦合层厚度变化  $\Delta d = \pm 0.2\%$  时,光谱曲线漂移量为  $\pm 3$  nm,仅使用晶振监控的方法达不到  $\pm 0.2\%$  的膜厚控制精度;另外,对于蒸发镀膜,膜料蒸发速率不稳定,采用时间判断法会增大误差。以上两种方法单独使用均不可行,在以上方法的基础上,采用 SiO<sub>2</sub> 膜厚平均值与晶振监控相结合的方法来监控耦合层的厚度。膜系中的 5 个谐振腔膜层结构都是规整膜层,所有的 SiO<sub>2</sub> 膜层厚度均相同,通过计算晶振片检测到的前几层 SiO<sub>2</sub> 厚度的平均值作为耦合层 L 的膜层厚度,后面的耦合层也采用同样计算方法,这样不仅提高了耦合层厚度的监控精度,同时也提高了 BPF 的制备精度。

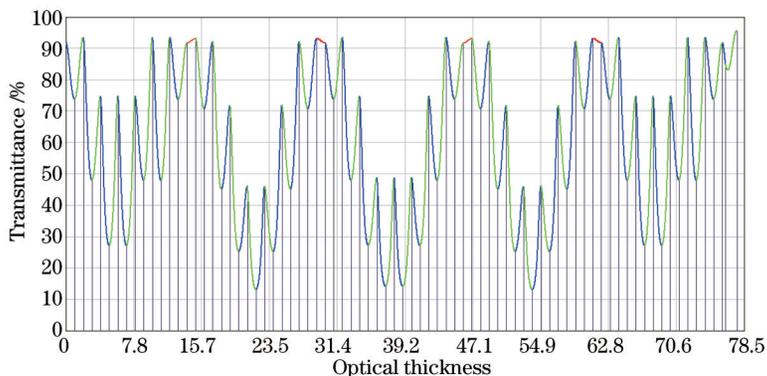


图 5 BPF 监控曲线

Fig.5 Monitoring curve of BPF

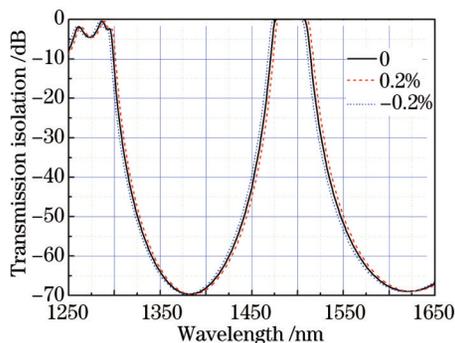


图 6 耦合层不同膜厚误差下的 BPF 透射光谱曲线

Fig.6 Transmission spectral curves of BPF under the different thickness errors of coupling layer

## 4 测试结果与分析

使用Agilent Cary 5000分光光度计对制备的BPF的光谱特性进行测试,透射光谱测试曲线如图7所示。

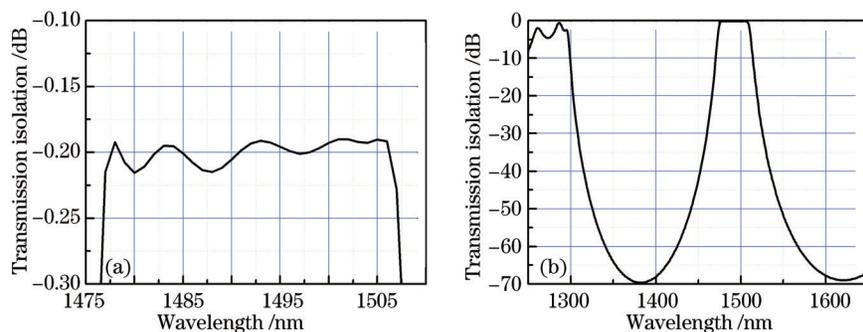


图7 BPF透射光谱测试曲线

Fig.7 Testing the transmission spectral curves of BPF

测试结果表明通带IL小于0.23 dB,其余各项参数同样满足要求,然后在BPF的基础上镀制LPF膜层,基板背面镀制AR膜层,实验测试结果如图8所示。

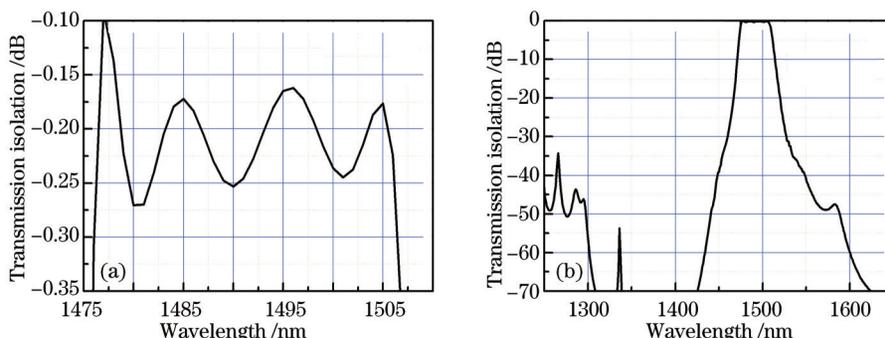


图8 BPF+SPF+AR组合膜系透射光谱测试曲线

Fig.8 Testing the transmission spectral curves of the BPF+SPF+AR combination films

测试数据表明,当通带WDL小于0.2 dB,IL小于0.27 dB,制备的BPF满足该滤光膜参数要求。图9为理论与实测曲线对比图,表5为测试数据。经讨论分析,实际透射率与理论设计仍存在偏差的主要源于BPF膜层与LPF膜层等效折射率的偏差和耦合层的膜厚误差。另外,当整个膜系较厚时,膜层中的散射与吸收所导致的误差不能忽略,测试仪器的误差也会导致实际测试结果与理论结果的偏差。因此若使实验结果与理论值更加接近,需要对耦合层的监控方式以及改进膜系的设计方案进行改进。

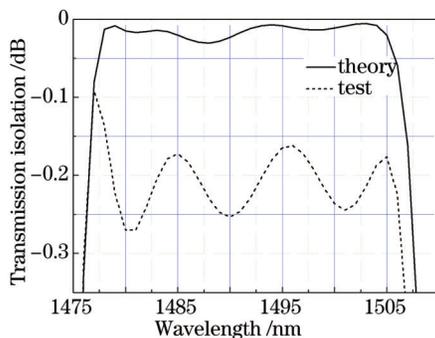


图9 理论与实测曲线对比图

Fig.9 Comparison results of the theoretical and measured transmission spectral curves

表5 测试数据

Table 5 Test data

Wavelength /nm	1479~1504	1260~1450	1530~1620
Transmission isolation /dB	<0.27	>39	>31

## 5 结 论

根据光学薄膜设计理论和滤光膜设计参数要求,选用 $Ta_2O_5$ 、 $SiO_2$ 分别作为高低折射率材料,通过 Scale Thickness 方法分析耦合层厚度误差,采用 $SiO_2$ 膜厚平均值与晶振监控相结合的方法来监控耦合层的厚度,解决了监控耦合层厚度的问题。采用电子束及离子辅助沉积技术制备了该滤光膜。制备的滤光膜在 1479~1540 nm 处 IL 小于 0.3 dB,在 1260~1450 nm 和 1530~1620 nm 处透射隔离度分别大于 39 dB 和 31 dB。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Leping. Present situation and prospects of optical fiber communication[J]. Study on Optical Communication, 2000, 3: 1-7.  
韦乐平. 光纤通信的现状与展望[J]. 光通信研究, 2000, 3: 1-7.
- 2 Fu Xiuhua, Mo Chaoyan, Huang Jinlong, *et al.*. Design and fabrication of near space laser communication link optical system filter film [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0907003.  
付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 临近空间激光通信链路光学系统中滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0907003.
- 3 Qin Xiaoying. The main technology of DWDM in optical fiber communication[J]. Optical Communication Technology, 2001, 25(2): 95-98.  
秦小英. DWDM 光通信发展的热点技术[J]. 光通信技术, 2001, 25(2): 95-98.
- 4 Yuan Yifang, Chen Guilian, Chen Baoxue, *et al.*. Application of optical thin film technology in optical communication technology[J]. Optical Instruments, 2001, 23(5-6): 110-113.  
袁一方, 陈桂莲, 陈抱雪, 等. 光学薄膜技术在光通信技术中的应用[J]. 光学仪器, 2001, 23(5-6): 110-113.
- 5 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang, *et al.*. Applications of optical coatings on WDM systems[J]. Optical Instruments, 2001, 23(5-6): 105-109.  
顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 光学薄膜在波分复用系统中的应用[J]. 光学仪器, 2001, 23(5-6): 105-109.
- 6 Fu Xiuhua, Kou Leilei, Zhang Jing, *et al.*. Fabrication of optical filter film for visible and near-infrared laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1207001.  
付秀华, 寇雷雷, 张 静, 等. 可见与近红外激光通信系统光学滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1207001.
- 7 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 96-102, 237-242.  
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 96-102, 237-242.
- 8 Zha Jiaming, Li Sicheng, Tang Qianlong. Structure bandwidth estimation and adjustment of medium bandpass infrared filter[J]. J Appl Opt, 2007, 28(2): 151-155.
- 9 Zha Jiaming, Li Sicheng, Tang Qianlong. Structure, bandwidth estimation and adjustment of medium bandpass infrared filter[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 151-155.  
查家明, 李斯成, 唐乾隆. 红外中带滤光片的结构、带宽估算及调整[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 151-155.
- 10 H A Macleod. Thin Film Optical Filters (4nd Edition)[M]. Taylor and Francis Group, LLC, 2010: 13-71, 156-168.
- 11 Fu Xiuhua, Zhang Yushuai, Kou Yang, *et al.*. Design and fabrication of a broad spectrum and wide angle beam splitter in smart glasses imaging system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0331002.  
付秀华, 张于帅, 寇 洋, 等. 智能眼镜影像系统宽光谱广角度分光膜的研制[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0331002.
- 12 Fu Xiuhua, Zhang Yushuai, Kou Yang, *et al.*. Study and fabrication of multi-channel filter film in free-space laser communication system [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0407001.  
付秀华, 张于帅, 寇 洋, 等. 自由空间激光通信系统中多通道滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0407001.

栏目编辑: 王晓琰