

自由空间激光通信系统中多通道滤光膜的研制

付秀华¹ 张于帅^{1*} 寇 洋¹ 李旭娜²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631

摘要 激光通信作为一种通信手段,以其抗干扰能力强、保密性好、功率集中等优点,在军事和民用等领域得到广泛应用。为满足激光通信系统使用要求,提高信噪比,对系统中的滤光膜进行研制。选用Ti₃O₅和SiO₂作为镀膜材料,依据倍频设计和双波长增透原理完成了三带通、宽反射带滤光膜的设计。通过膜厚缩放比例和逆向工程方法分析膜厚累积误差,重点解决了膜厚监控误差大的问题。制备的滤光膜在532 nm和1064 nm处透射率大于90%,808 nm处透射率大于85%,(1550±20) nm处透射率小于0.4%,满足该系统环境测试要求。

关键词 薄膜; 滤光膜; 倍频设计; 双波长增透; 逆向工程

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0407001

Study and Fabrication of Multi-Channel Filter Film in Free-Space Laser Communication System

Fu Xiuhua¹ Zhang Yushuai¹ Kou Yang¹ Li Xuna²

¹School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract As a means of communication, laser communication is widely used in the military and civilian fields for its strong anti-interference ability, excellent confidentiality, and centralized optical power. Filter film is made to satisfy the requirements for laser communication systems and to improve the signal to noise ratio. Using Ti₃O₅ and SiO₂ as coating materials, a three-band-pass and wide reflection band filter is designed according to the double frequency design and dual-wavelength anti-reflection principle. By using scale thickness and reverse engineering methods, the accumulative error is analyzed, and the problem of thickness monitoring error is solved. Transmittance of the filter is greater than 90% at 532 nm and 1064 nm, is higher than 85% at 808 nm, and is less than 0.4% at (1550±20) nm, which meets environmental testing requirements of the communication system.

Key words thin films; filter film; double frequency design; dual-wavelength anti-reflection; reverse engineering

OCIS codes 310.4165; 310.6860; 310.1860; 120.2440

1 引 言

带通滤光膜能够消除杂散光对光信号的影响,提高信噪比,在激光陀螺、激光测距、激光通信等领域中发挥着重要的作用^[1-5]。

随着光电技术的发展,对滤光膜的使用要求越来越高,出现一些特殊功能的滤光膜,其中一个发展方向就是多带通滤光膜(MPF)。如果多带通滤光膜通道数为 N ,那么携带的信息量就是单带通滤光膜的 N 倍,运载同样多的信息量所需要的滤光膜数量是传统滤光膜的 $1/N$ ^[6]。因而,采用MPF可使多个信号源共用一个通

收稿日期: 2014-11-18; 收到修改稿日期: 2014-12-08

基金项目: 吉林省科技发展计划(20140203002GX)

作者简介: 付秀华(1963—),女,博士,教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: goptics@126.com

* 通信联系人。E-mail: yushuai100929@163.com

信窗口,从而可以简化光学系统^[7],减轻光学系统重量,这正是光学系统小型化、集成化发展的方向。

本文所研究的三带通滤光膜,需实现 532, 808, 1064 nm 波长处高透射和 1550 nm 处高反射,三个带通及宽反射带(1100~1600 nm)都给膜系的设计带来很大的困难。该膜系采用一般的设计方法很难实现,并且对制备工艺也提出了更为严格的要求,尤其是膜厚的控制精度。在研制过程中,重点解决了该滤光膜的设计与优化,分析并解决了膜层厚度累积误差带来的问题,消除背景光对通信信号的影响,提高了信噪比。

2 膜系设计

根据该系统的使用要求,滤光膜具体参数指标如表 1 所示,其中 T 表示平均透射率。

表 1 滤光膜设计参数

Table 1 Filter film design parameters

Wavelength/nm	Incident angle	Transmittance T /%
532 ± 10		≥ 90
808 ± 10		≥ 85
1064 ± 10	0°~15°	≥ 90
1550 ± 20		≤ 0.5
1100~1600		≤ 2

由设计参数可以看出,该滤光膜在设计及制备方面都有很大的难度。选取合适的基底和薄膜材料可在一定程度上降低薄膜设计与制备的难度。

2.1 基底及镀膜材料的选取

粗糙度为 0.2 nm 的熔石英(JGS₁)基底具有高激光损伤阈值,使得该基底上的滤光膜有较高的抗激光损伤能力;熔石英在紫外到近红外波段透射率较高、物理化学性能稳定且热膨胀系数低^[8]。

在波长为 400~1600 nm 范围对镀膜材料综合考虑, Ti₃O₅(2.36, 550 nm)透明区为 0.35~12 μm,光学性能稳定,阻温性好,耐酸碱腐蚀能力强^[9]。SiO₂(1.455, 550 nm)在 0.18~8 μm 有良好的透光性、优良的机械性能和抗腐蚀性,并且具有较高的抗激光损伤阈值^[10],经过多次实验测定,选用 Ti₃O₅作为高折射率材料, SiO₂作为低折射率材料。

2.2 膜系设计方案

根据表 1 设计参数的要求,同时为了减少杂散光对通讯光信号的影响,提高该滤光片的信噪比,需设计一个三带通滤光膜。根据光学薄膜设计理论^[11],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法布里-珀罗(F-P)结构或多半波结构^[12];而对于本文中三带通滤光膜的设计,采用上述两种设计方法难以实现。根据倍频设计思想、双波长增透原理建立理论模型,通过双面镀膜实现三带通滤光膜的设计。

2.2.1 前表面设计原理

对于一个多层周期膜系[A, B, A, B, …],一个周期的特征矩阵为

$$M = m_A \cdot m_B = \begin{bmatrix} \cos \delta_A & \frac{i}{\eta} \sin \delta_A \\ i\eta \sin \delta_A & \cos \delta_A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_B & \frac{i}{\eta} \sin \delta_B \\ i\eta \sin \delta_B & \cos \delta_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 m_A, m_B 为膜层特征矩阵; η 为介质的光学导纳; δ_A, δ_B 为膜层相位; $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ 为其矩阵元。

假设单个周期周围介质的光学导纳为 η ,则该周期的透射系数为

$$t = \frac{2\eta}{\eta \left\{ (m_{11} + m_{22}) + \left[\eta m_{12} + \left(m_{21} / \eta \right) \right] \right\}}. \quad (2)$$

令 $t = |t| \exp(i\tau)$ (τ 为透射光的相位变化, $\tau \approx \sum \delta$),则有

$$\frac{1}{2} \left\{ (m_{11} + m_{22}) + \left[\eta m_{12} + \left(m_{21} / \eta \right) \right] \right\} = \frac{\cos \tau - i \sin \tau}{|t|}. \quad (3)$$

对无吸收介质膜, m_{11}, m_{22} 是实数, m_{12}, m_{21} 为纯虚数。令实部相等,即

$$\frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) = \frac{\cos \tau}{|t|}, \quad (4)$$

当 $\frac{1}{2}|m_{11} + m_{22}| > 1$ 时可以构成反射带, 因此只要 $\cos \tau / |t| > 1$ 就能构成反射带。

一般情况下 $|t| < 1$, 若在波长 λ 处形成透射带, 则须在此波长处不满足 $\cos \tau / |t| > 1$, 从而实现一个带通。根据倍频设计思想^[13], 若要实现在 λ 处高反射, 而在 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 处高透射, 必须使膜系在 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 处不满足 $\cos \tau / |t| > 1$, 从而抑制 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 波长处的反射带。

根据双波长增透原理, 选择合适的光学厚度, 可同时满足 $\delta_1 = 2\pi nd/\lambda_1$ 与 $\delta_2 = 2\pi nd/\lambda_2 = \pi - \delta_1$ 处反射为零, 于是

$$nd = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 + \lambda_2)}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{2}, \lambda_2 = \frac{\lambda}{3}, \quad (6)$$

得 $nd = \lambda/10$ 。选择 $\lambda_0 = 4nd = \frac{2}{5}\lambda$ 为中心波长, 可满足在 $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 同时增透的相位条件。

针对三带通滤光膜的设计, 令 $\lambda = 1616 \text{ nm}$, 则 $\lambda_0 \approx 646 \text{ nm}$, $\lambda/2 = 808 \text{ nm}$, $\lambda/3 = 539 \text{ nm}$, 可实现 808 nm 和 532 nm 波长处的两个带通; 532 nm 与 1064 nm 是倍频关系, 基于相同的设计原理可实现 532 nm 和 1064 nm 波长处的两个带通。前表面初始膜系为 $G|(\text{HL})^s m(\text{HL})^t \text{HIA}$, 其中 G 表示熔石英基底, H 与 L 分别代表高、低折射率材料, s 和 t 为周期数, m 为周期系数。采用 Macleod 中基于幂函数叠加最优值算法的 Optimac 优化方法对初始膜系进行优化得到 $G|1.8\text{H}1.5\text{L}0.6\text{H}0.7\text{L}\cdots\text{H}1.8\text{L}0.6\text{H}1\text{A}$, 共 49 层, 物理厚度约为 4067 nm , 理论透射光谱曲线如图 1 所示。

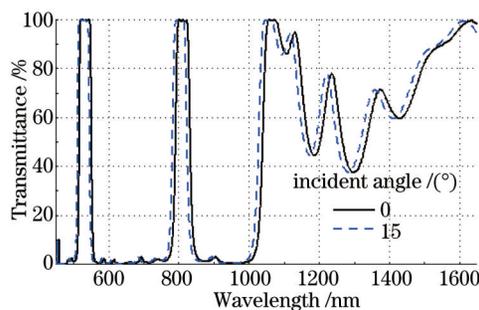


图 1 前表面透射光谱曲线

Fig.1 Transmission spectral curves of the front surface

2.2.2 后表面设计原理

后表面基于短波通设计原理, 初始膜系为 $G|m(0.5\text{LH}0.5\text{L})^s m(0.5\text{LH}0.5\text{L})^t \text{IA}$, 包含两个短波通周期, 由于反射带 ($1100 \sim 1600 \text{ nm}$) 较宽, 所以对两个周期采用不同的参考波长以展宽反射带。在短波通膜系透射带中会有不同程度的波纹, 这是因为多层膜在透射带的等效折射率同入射介质或基底的匹配性差。依据等效折射率理论, 在初始膜系两侧添加匹配层以使多层膜的等效折射率与入射介质和基底达到匹配, 从而减少通

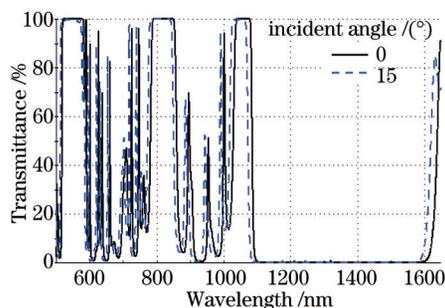


图 2 后表面透射光谱曲线

Fig.2 Transmission spectral curves of the back surface

带内的波纹。用 Macleod 中基于微分算法的共轭梯度优化方法对初始膜系进行优化,优化后的膜系为 G11.9H2.4L2.3H...1.8L2.3H0.8LIA,共 38 层,物理厚度为 6105 nm,理论设计透射光谱曲线如图 2 所示。

2.2.3 双面设计原理

根据以上分析,将前、后表面膜系导入 Macleod 中,该滤光膜的理论透射光谱曲线如图 3、4 所示。

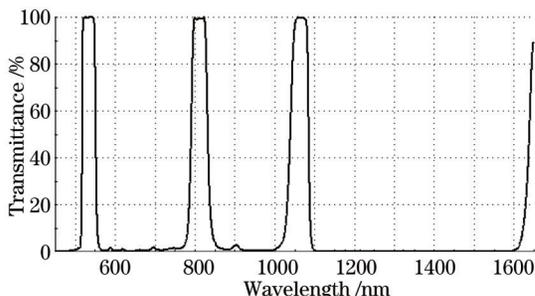


图 3 双面透射光谱曲线

Fig.3 Transmission spectral curves of the sided

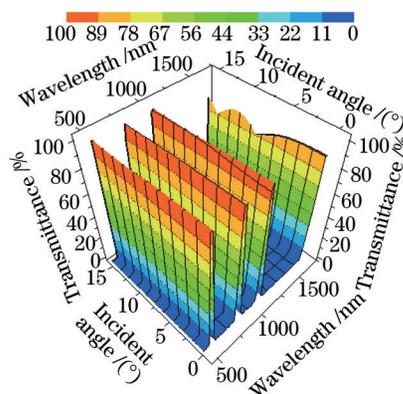


图 4 双面透射光谱曲线(三维图)

Fig.4 Transmission spectral curves of the sided (3D graph)

3 薄膜的制备

该滤光膜是在 TXX-700 型真空镀膜机上制备的,该设备配备有 IC/5 石英晶体膜厚控制仪,考夫曼离子源和双电子枪。实际镀制的工艺参数如表 2 所示。

表 2 工艺参数

Table 2 Technological parameters

	Deposition rate /(nm/s)	Substrate temperature /°C	Vacuum /Pa	Flow rate of O ₂ /sccm
Ti ₃ O ₅	0.4	200	4.5 × 10 ⁻²	40
SiO ₂	0.6		2.9 × 10 ⁻²	15

在制备前,用超声波清洗基片,并用离子源轰击基片 5 min,提高其清洁度;采用电子束及离子辅助沉积技术来制备该滤光膜。离子源参数如表 3 所示。镀制完成后,进行真空退火处理,由 200 °C 降温至 80 °C。

表 3 离子源参数

Table 3 Parameters of ion source

Plate voltage /V	285
Acceleration voltage /V	220
Anode voltage /V	50
Neutral current /A	13~15
Cathodic current /A	18
Ion beam current /mA	50

4 测试结果与分析

4.1 光谱性能测试与分析

用岛津 UV-3150 分光光度计对膜层进行光谱特性测试。0°入射时,前表面膜层透射光谱测试曲线如图 5 所示,与理论设计存在较大偏差。

由于该膜层层数较多,因而在实际制备过程中精确控制膜厚成为关键所在。在镀制每一层膜的过程中都会有残余蒸镀量,累积起来即为膜层厚度累积误差。通过 Macleod 中膜厚缩放比例方法对膜层厚度累积误差进行分析,如图 6 所示,当 Ti₃O₅ 厚度误差为 ±3%,将导致光谱曲线漂移 4~10 nm;如图 7 所示,当 SiO₂ 每层厚度误差为 ±3%,将使光谱曲线漂移 3~7 nm,同时通带峰值透射率变差。晶控片的控制精度大约为 2%^[14],在

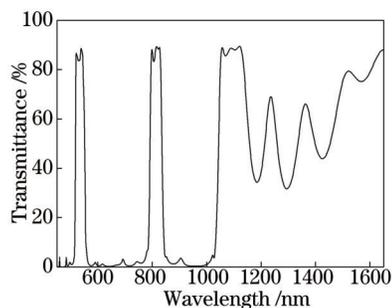


图5 前表面透射光谱测试曲线

Fig.5 Testing transmission spectral curve of the front surface

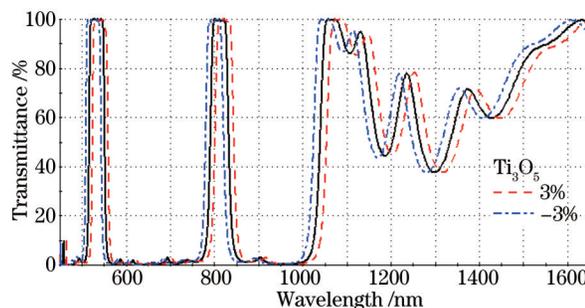


图6 Ti₃O₅厚度累积误差分析

Fig.6 Cumulative error analysis of Ti₃O₅ thickness

膜层数较多、膜系较厚的情况下,仅通过晶控系统来监控膜层厚度,很难达到较高的精度。

另外,晶振片的灵敏度随着质量的增加而降低^[15]。因此,使用石英晶体监控法(晶控法)进行镀膜时,会随着晶振片活性的下降而出现镀膜曲线向长波漂移的现象。

通过 Macleod 中基于单一优化算法的逆向工程方法来分析膜厚误差,将测试结果导入 Macleod 中,与理论设计进行对比分析,图 8 显示了前 20 层膜厚度误差分布的情况。经统计计算 Ti₃O₅ 平均膜厚度误差为 0.93%, SiO₂ 平均膜厚度误差为 1.08%。为了使实验结果与理论设计相符,将每层膜的理论厚度减去相应的误差厚度,将得到的新的膜层厚度输入到膜厚监控系统中。经多次实验,前后表面测试结果如图 9、10 所示。

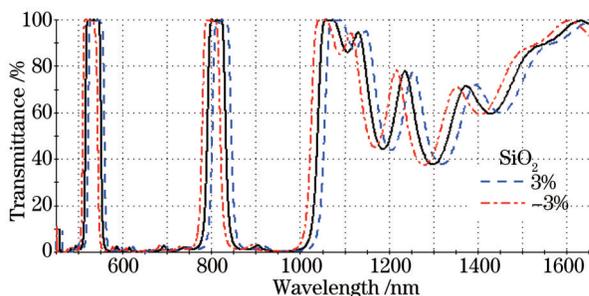


图7 SiO₂厚度累积误差分析

Fig.7 Cumulative error analysis of SiO₂ thickness

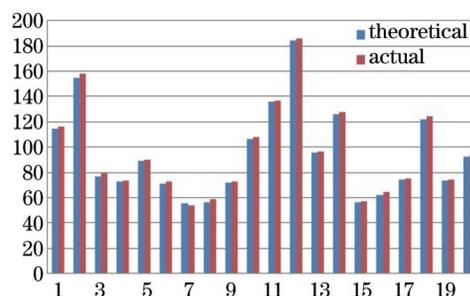


图8 膜厚误差分布

Fig.8 Distribution of film thickness error

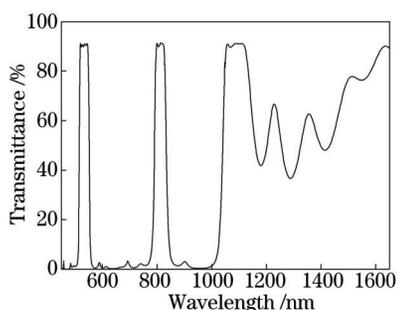


图9 前表面透射光谱测试曲线

Fig.9 Testing transmission spectral curve of the front surface

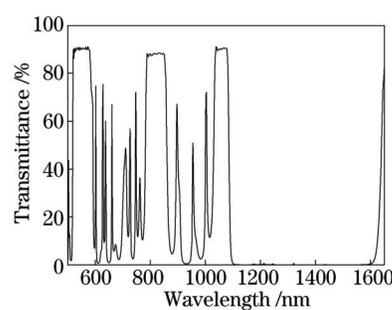


图10 后表面透射光谱测试曲线

Fig.10 Testing transmission spectral curve of the back surface

在前、后表面实验的基础上,进行双面镀膜实验。双面镀膜后透射光谱曲线测试结果如图 11 所示,测试数据如表 4 所示。

测试数据表明,制备的滤光片在 4 个波长处的透射率均满足系统使用要求, 557~783 nm 和 846~1027 nm 间的透射率低于 3%,提高了光信号的信噪比。但三个带通的透射率受膜厚误差和材料吸收的影响,导致实际透射率与理论设计存在偏差。要使实验结果与理论设计更加接近,仍需在膜系设计与优化以及制备工艺等方面进行改进。

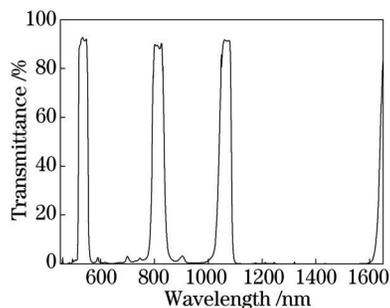


图 11 双面透射光谱测试曲线

Fig.11 Testing transmission spectral curve of the sided

表 4 测试数据

Table 4 Test data

Wavelength /nm	532 ± 10	808 ± 10	1064 ± 10	1550 ± 20	1100~1600
Transmittance /%	91.8	86.7	90.6	<0.4	≤ 1.2

4.2 薄膜性能测试

附着力测试:用粘性强度不小于 2.94 N/cm²的胶带紧贴在膜层表面,然后从零件的边缘朝镀膜表面的垂直方向慢慢拉起,重复 15 次,膜层无脱落无损伤。

温度测试:将样品放入高温箱,从室温升到 75 ℃,保持 12 h。将样品放入低温箱,从室温降到-40 ℃,保持 12 h;在两种情况下,通带中心波长漂移小于 2.3 nm,膜层均无明显变化。

湿度测试:将基片放在相对湿度为 95%的环境下,放置 24 h,膜层无明显的变化。

5 结 论

多带通滤光膜是随着光学薄膜的发展而出现的,从膜系的设计到镀制工艺等方面要求要比单带通滤光膜高,技术难度更大。根据光学薄膜设计理论和设计参数要求,选用 Ti₃O₅、SiO₂分别作为高、低折射率材料,依据倍频设计思想、双波长增透和双面镀膜的方法实现了该滤光膜的设计;通过膜厚缩放比例和逆向工程方法分析误差,解决了膜厚累积误差带来的问题。采用电子束及离子辅助沉积技术制备了该滤光膜,在满足系统使用参数要求的情况下,使 557~783 nm 和 846~1027 nm 间的透射率低于 3%,大大降低了背景光对通信信号的影响。

由于多通道滤光片能够运载更多的信息,简化光学系统的结构,因此在自由空间光学通信技术等方面有着优越的应用前景,未来对这类滤光片的研究将是一个重点。实验结果与理论设计还有一定的差距,如何进一步改善膜系设计方法及简化加工工艺,提高制备精度,也是未来研究的方向。

参 考 文 献

- 1 Ghosh R, Ghosh K K, Chakraborty R. Narrow band filter using 1D periodic structure with defects for DWDM systems[J]. Opt Commun, 2013, 289: 75-80.
- 2 Zhang Jing, Fu Xiuhua, Pan Yonggang. Design and fabrication of satellite laser communication filter coating[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(3): 303-306.
张 静, 付秀华, 潘永刚. 卫星激光通信滤光膜的研制[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 303-306.
- 3 Yue Wei, Hong Dongmei, Liu Guoxi, et al.. 1572 nm narrow-band filter in laser telemeter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1819-1822.
岳 威, 洪冬梅, 刘国喜, 等. 用于激光测距的 1572 nm 窄带滤光膜[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1819-1822.
- 4 Zhuang Qiuhui, Fu Xiuhua, Liu Guojun. Design and fabrication of a near-infrared dichroic beam splitter used for space laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831002.
庄秋慧, 付秀华, 刘国军. 用于空间激光通信系统的近红外分色片设计与研制[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831002.
- 5 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, 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.
- 6 Wang Yizhe, Zhang Fengshan. A novel optical thin film element—multi passed filter[J]. Infrared, 2003, (1): 15–20.
- 王懿喆, 张凤山. 一种新的光学薄膜元件——多通道带通滤光片[J]. 红外, 2003, (1): 15–20.
- 7 Fu Xiuhua, Wang Gang, Liu Dongmei, *et al.*. Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0107001.
- 付秀华, 王 刚, 刘冬梅, 等. 可见与红外制导系统高通滤光片的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0107001.
- 8 Xue Chunrong, Yi Kui, Wei Chaoyang, *et al.*. Optical properties of vacuum ultraviolet and deep ultraviolet region substrate materials [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 287–290.
- 薛春荣, 易 葵, 魏朝阳, 等. 真空紫外到深紫外波段基底材料的光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 287–290.
- 9 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.
- 10 Zhang Jinsheng, Zhang Jinlong, Ning Yongqiang, *et al.*. Design and optimization of 1555 nm broad-bandpass filter film[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 557–562.
- 张金胜, 张金龙, 宁永强, 等. 1555 nm 宽带通滤光膜的设计和优化[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 557–562.
- 11 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- 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.
- 12 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.
- 13 Fan Ruiying, Lu Yuemei, Fan Zhengxiu. Design and experiment of multiple frequency beam splitting thin film[J]. Chinese J Lasers, 1986, 14(5): 295–301.
- 范瑞英, 陆月妹, 范正修. 三倍频分光膜的设计与试制[J]. 中国激光, 1986, 14(5): 295–301.
- 14 Fu Xiuhua, Huang Jinlong, Mo Zhaoyan, *et al.*. Design and fabrication of 589 nm laser optical path integration system filter film[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0307001.
- 付秀华, 黄金龙, 莫朝燕, 等. 589 nm 激光器光路整合系统滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0307001.
- 15 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.*. Research of ultraviolet filter film in solar blind communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0731001.
- 付秀华, 寇 洋, 刘冬梅, 等. 紫外日盲通信系统中滤光膜的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0731001.

栏目编辑: 吴秀娟