

doi:10.3788/gzxb20154403.0331002

# 智能眼镜影像系统宽光谱广角度分光膜的研制

付秀华<sup>1</sup>, 张于帅<sup>1</sup>, 寇洋<sup>1</sup>, 李旭娜<sup>2</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李光辉<sup>3</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

(3 京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176)

**摘 要:**依据光学薄膜理论,建立膜系优化评价函数,利用软件优化膜系,实现 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 入射宽光谱 P 光分光膜的设计.选择  $H_4$  和  $MgF_2$  作为高低折射率材料,采用电子束及离子辅助沉积技术,来制备该分光膜.通过对膜层厚度误差分析,用晶控片单独控制相对敏感度较高的膜层,解决了薄膜制备过程中不能精确控制膜厚误差的问题.运用逆向分析法对实验测试结果进行模拟分析,通过改变膜厚修正因子,使 P 光透射光谱曲线更加平滑.光谱测试表明 P 光垂直入射平均透过率为 60.3%,满足系统使用要求.

**关键词:**薄膜;分光膜;逆向分析法;评价函数;相对敏感度;修正因子;电子束沉积;离子辅助沉积

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0331002-5

## Design and Fabrication of a Broad Spectrum and Wide Angle Beam Splitter in Smart Glasses Imaging System

FU Xiu-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yu-shuai<sup>1</sup>, KOU Yang<sup>1</sup>, LI Xu-na<sup>2</sup>, LIU Dong-mei<sup>1</sup>,  
ZHANG Jing<sup>1</sup>, LI Guang-hui<sup>3</sup>

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

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

(3 Boe Technology Group Co., LTD, Beijing 100176, China)

**Abstract:** Based on the optical film theory, the membrane system was introduced to optimize the evaluation function, and the TFC software was used to optimize the membrane system, so that a  $0^{\circ}$  to  $75^{\circ}$  wide spectrum of P-polarized light beam splitter was designed. In order to produce the beam splitter,  $H_4$  and  $MgF_2$  were chosen as high/low refractive index materials, and the electron beam and ion assisted deposition techniques were adopted. During the experiment, the film thickness error was analyzed and a crystal was used to control the highly sensitive layers, which solved the accuracy problem in the film preparation process. Utilizing the inverse analysis method to simulate the experimental results, the P-polarized light transmission spectrum curves become smoother by changing the thickness of the correction factor. The spectral testing shows that the average transmittance of the prepared beam filter is 60.3% with vertical incidence P-polarized light, which meets the requirements of the system.

**Key words:** Thin films; Beam splitter; Reverse analysis; Evaluation function; Relative sensitivity; Correction factor; Electron beam deposition; Ion assisted deposition

**OCIS Codes:** 310.6860; 310.1860; 310.6085; 110.5200

基金项目:省部产学研结合项目(No. 2010A090200006)资助

第一作者:付秀华(1963-),女,教授,博士,主要研究方向为光学薄膜. Email:goptics@126.com

通讯作者:张于帅(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学薄膜. Email:yushuai100929@163.com

收稿日期:2014-08-15;录用日期:2014-11-12

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

## 0 引言

智能眼镜,即利用增强现实技术,让用户将眼前所看到的景物与计算机所提供的数据相结合,从而得到最优视觉效果的一种可穿戴设备.目前,智能眼镜的主要功能是通过摄像头拍摄到的实景分析用户需求.而分光棱镜作为智能眼镜影像系统中的关键部件,能够有效改善成像质量,其中分光膜的研制是难题之一.1999年,LI Li等研究一种新的偏振分光膜并应用于高效率投影显示中<sup>[3]</sup>;2005年,浙江大学顾培夫等研究了用于投影显示系统中的分色滤光膜<sup>[4]</sup>,邓云龙等对宽角度宽波长偏振分光膜进行了研究<sup>[5]</sup>;2011年,LEE Cheng-chung等对抬头显示器中的分光膜进行了研究<sup>[6]</sup>,杨开勇等研制了超高准确度的偏振分光膜<sup>[7]</sup>.

本文根据智能眼镜影像系统中分光棱镜对分光效率的要求,研制了P光分光膜,入射角范围为 $0^\circ\sim 75^\circ$ ,涵盖了整个可见光波段.依据光学薄膜理论,通过建立膜系优化评价函数,重点解决分光膜设计的问题;在逆向分析法及调整膜厚修正因子基础上,解决不能精确控制膜厚误差的问题,制备满足要求的分光膜.

## 1 膜系设计

### 1.1 膜层材料的选取

膜系技术指标要求见表1,其中 $T$ 表示P光的平均透过率.根据该分光膜的参量要求,应选择可见光波段透明度高、消光系数小、与基底匹配、机械牢固度和化学稳定性好的材料.

表1 分光膜的参量要求

Table 1 Specification of beam splitter	
Spectrum range	400~700 nm
Angle of incidence	Parameter
$0^\circ$	$\bar{T}=(60\pm 2)\%$
$45^\circ$	$\bar{T}=(70\pm 5)\%$
$0^\circ\sim 75^\circ$	$\bar{T}\geq 95\%$

在可见光波段常用的高折射率材料有 $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$ 和 $HfO_2$ 等.一般情况下, $ZrO_2$ 薄膜在空气中会吸收水分<sup>[8]</sup>,使 $ZrO_2$ 膜层的反射率和透射率光谱产生变化,降低光谱的稳定性. $TiO_2$ 在蒸镀过程中,因充氧量的不同会生成多种氧化物,导致折射率不稳定<sup>[9]</sup>.另外,电子束蒸发技术制备的薄膜,由于蒸发粒子具有的动能相对较低( $0.01\sim 0.1$  eV)<sup>[10]</sup>,使 $Ta_2O_5$ 膜层呈现柱状结构、不够致密、吸收大、光学稳定性差<sup>[11]</sup>. $HfO_2$ 主要成分是氧化铪和氧化镧,含有微量的铜、铁、钴、铬、钒,其透明区为 $0.36\sim 7.0$   $\mu m$ <sup>[12-14]</sup>,相对更稳定,因此高折射率材料选用 $HfO_2$ .

常用的低折射率材料有 $MgF_2$ 和 $SiO_2$ . $MgF_2$ 与 $SiO_2$ 相比折射率更低,成膜牢固<sup>[15-16]</sup>,因而在光学薄膜

中得到广泛应用.因此,最终选用 $MgF_2$ 作为低折射率材料.

### 1.2 $HfO_2$ 光学常量的确定

为了准确测定不同工艺参量对 $HfO_2$ 的光谱色散曲线的影响,在实验条件相同的情况下对比分析了有无离子源对 $HfO_2$ 折射率的影响,如图1.曲线1为不加离子源时 $HfO_2$ 的折射率色散曲线,曲线2为加离子源时 $HfO_2$ 的折射率色散曲线.由此可见,实验过程中增加离子源辅助沉积技术,有利于提高材料的折射率.

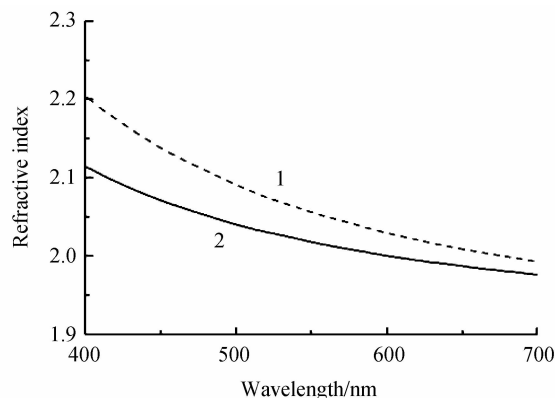


图1  $HfO_2$ 折射率对比图

Fig.1 The comparison chart of  $HfO_2$  refractive index

### 1.3 膜系设计

由于分光膜对光谱曲线平滑度要求较高,所以在设计膜系时为了减少镀制过程中的累计误差,膜层数要尽量少;由于单层膜过薄导致厚度难以控制,所以避免出现薄层( $\leq 5$  nm).

考虑到该分光膜光谱及入射角范围都比较大,引入膜系优化设计评价函数,并结合膜系设计软件来实现该膜系的设计方案.

依据光学薄膜理论及文献[17-19],在入射媒介折射率 $n_0$ 和衬底折射率 $n_g$ 给定条件下,一组膜系的反射率 $R$ 取决于膜层所用材料的折射率 $n_1, n_2, \dots, n_j$ 、各层的光学厚度 $t_1, t_2, \dots, t_j$ 、光线入射角 $\theta$ 以及入射光波长 $\lambda$ ,即: $R_j(\lambda) = R_j(n_0, n_1, n_2, \dots, n_j, n_{j+1}; t_1, t_2, \dots, t_j; \theta; \lambda)$ ,其中 $n_0, n_{j+1}$ 为膜系两侧介质的折射率; $n_1, n_2, \dots, n_j$ 为膜系各层材料的折射率; $t_1, t_2, \dots, t_j$ 为膜系各层光学厚度, $t_j = n_j d_j$ .

在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内, $j$ 层膜的能量反射率 $R_j(\lambda)$ 与给定理想能量反射光谱曲线 $R_0(\lambda)$ 之差的面积为最小时,每层膜的光学厚度为最佳光学厚度,则将评价函数定义为

$$F(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) | [R_{jp}(t, \lambda)]^2 + [R_{js}(t, \lambda)]^2 - 2R_0(\lambda) | d\lambda \quad (1)$$

式中, $\omega(\lambda)$ 为权重函数,取决于光源能量分布及受光器分光灵敏度等. $R_{jp}(t, \lambda)$ 为 $j$ 层膜P光振幅反射率, $R_{js}(t, \lambda)$ 为 $j$ 层膜S光振幅反射率,而能量反射率

$R_j(\lambda) = \frac{1}{2} \{ [R_{jp}(t, \lambda)]^2 + [R_{js}(t, \lambda)]^2 \}$ . 例如:在无吸收多层介质膜的情况下,当  $R_0(\lambda) = 0.5$  时,即在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波长范围内求一个中性分光膜.

对于多层膜,当膜层数为  $k(k=1, 2, 3, \dots)$  时,膜系与基底组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

膜系与基底的组合导纳为

$$Y = \mathbf{C} / \mathbf{B} \quad (3)$$

膜系的反射率为

$$R = \left( \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^2 \quad (4)$$

对 P 光  $\eta_0 = n_0 / \cos \theta_0$ ,  $\eta_j = n_j / \cos \theta_j$ ,  $\eta_g = n_g / \cos \theta_g$ .

在该分光膜中,入射光为 P 光,因此评价函数变为

$$F(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) | [R_{jp}(t, \lambda)]^2 - R_0(\lambda) | d\lambda \quad (5)$$

将依据评价函数建立的算法与 Macleod 软件结合,根据膜系设计参量要求,设定相关变量,多次优化后膜系为:  $G | m_1 L m_2 H m_3 L m_4 H m_5 L m_6 H m_7 L m_8 H | A$ , 其中  $m_j (j=1, 2, \dots, 8)$  表示膜厚修正因子, H 和 L 分别代表  $H_1$  和  $MgF_2$ , G 为 K9 基底, A 表示入射介质空气.

P 光分光膜的理论设计光谱曲线如图 2,  $0^\circ$  入射时, P 光平均透过率  $\bar{T} = 60.2\%$ ;  $45^\circ$  入射时, P 光平均透过率  $\bar{T} = 70.8\%$ ;  $70^\circ$  入射时, P 光平均透过率  $\bar{T} = 98.4\%$ ;  $75^\circ$  入射时, P 光平均透过率  $\bar{T} = 96.2\%$ , 满足设计要求.

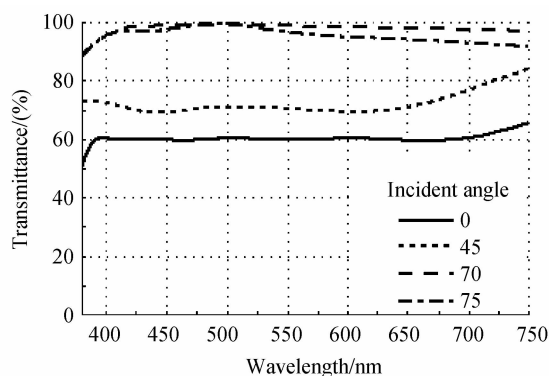


图 2 P 光分光膜理论设计曲线

Fig. 2 Theoretical curve of P light beam splitter

## 2 薄膜的制备

用 OPCO-1100 型真空镀膜机制备分光膜,该设备配有双电子枪和晶控膜厚控制仪.由于该分光膜入射角范围大,覆盖的光谱波段宽,即使很小的膜厚误差也会引起光谱曲线发生显著变化,因此,在制备过程中膜

厚的控制是关键问题.

以  $0^\circ$  入射为例,通过 Macleod 模拟该分光膜的膜厚误差如图 3. 当  $MgF_2$  的膜厚误差超过  $2\%$  或  $H_1$  的膜厚误差超过  $3\%$  时,光谱曲线就会变坏;而对于一般的分光膜,膜厚误差控制在  $3\% \sim 5\%$  就已满足要求,显然该分光膜对薄膜制备过程中膜厚的控制准确度提出了更为严格的要求. 利用 Macleod 软件对膜层的相对敏感度进行分析,如图 4,第 4 层和第 7 层敏感度较高.

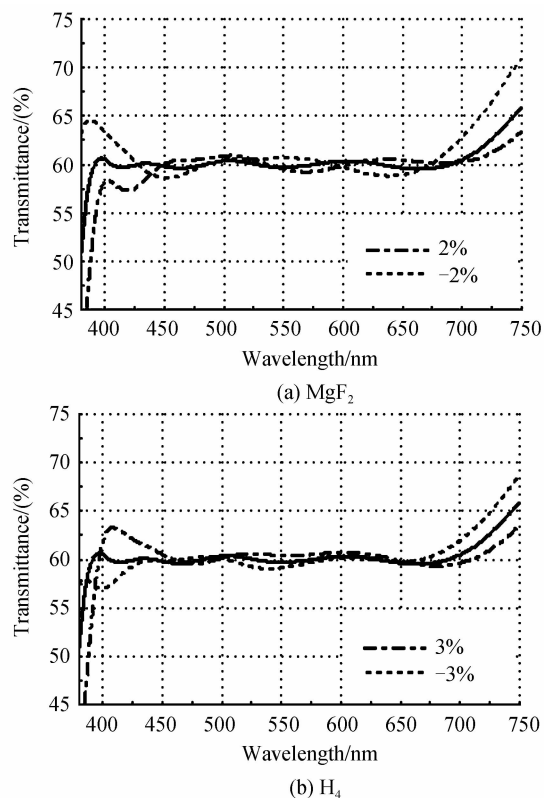


图 3  $MgF_2$  和  $H_1$  膜层厚度误差模拟

Fig. 3  $MgF_2$  and  $H_1$  film thickness error simulation

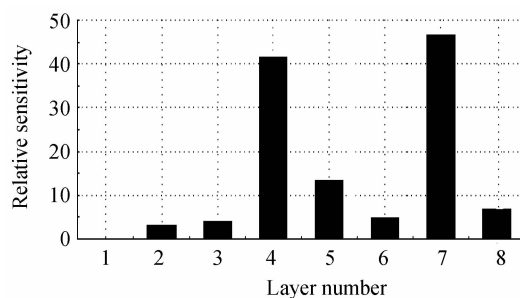


图 4 膜层相对敏感度

Fig. 4 The relative sensitivity of the film

为了精确控制膜厚,必须严格控制工艺参量,晶控片的控制准确度大约为  $2\%$ <sup>[20]</sup>,因此对第 4 层和第 7 层的厚度采用新的晶控片单独控制.实际镀制的工艺参量如表 2.

表 2 工艺参量

Table 2 Technological parameters

Material	H <sub>1</sub>	SiO <sub>2</sub>
Deposition rate/(nm · s <sup>-1</sup> )	0.3	0.8
Substrate temperature/°C	250	
Vacuum/Pa	1.0 × 10 <sup>-2</sup>	3.0 × 10 <sup>-3</sup>
Flow rate of O <sub>2</sub> /sccm	25	0

### 3 测试结果与分析

用岛津 UV-3150 分光光度计进行光谱特性测试, 0°入射时 P 光的透射光谱曲线如图 5.

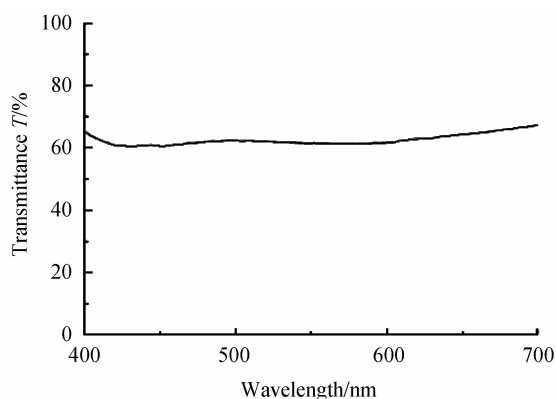


图 5 实测 P 光透射光谱曲线

Fig. 5 Measured the curve of P light transmittance spectral

测试结果显示 P 光平均透过率  $\bar{T} = 61.8\%$ , 同时从图 5 测试结果可以看出 400~430 nm 和 650~700 nm 两个波段 P 光透过率过高, 用逆向分析法将所测光谱曲线作为离散目标导入 TFCalc 中, 运用交互式分析法在原膜系的基础上模拟, 使模拟光谱曲线与实测光谱曲线一致, 这样得到一个新的 8 层膜系, 利用 TFCalc 交互式分析与原来的膜系逐层对比分析, 依据分析结果, 修改膜厚修正因子得到新的膜系为: G|s<sub>1</sub>Ls<sub>2</sub>Hs<sub>3</sub>Ls<sub>4</sub>Hs<sub>5</sub>Ls<sub>6</sub>Hs<sub>7</sub>Ls<sub>8</sub>H|A, 其中 s<sub>j</sub> (j=1, 2, ..., 8) 表示修改后的膜厚修正因子. 通过实验得到测试结果如图 6.

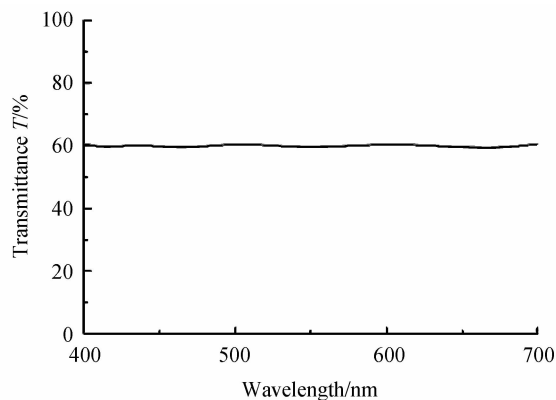


图 6 修改膜层厚度修正因子后测试结果

Fig. 6 The test results after modifying the film correction factor

P 光平均透过率  $\bar{T} = 60.3\%$ , 基本满足设计要求. 镀膜后棱镜组如图 7.

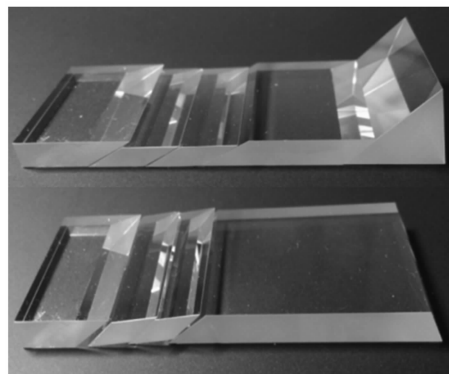


图 7 镀膜后的棱镜组

Fig. 7 Coated prism group

### 4 膜层性能测试

为保证该分光膜的可靠性, 需要对样品进行环境测试, 测试内容为:

**牢固度测试:** 用粘性强度不小于 3 N/cm<sup>2</sup> 的胶带紧贴在膜层表面, 然后沿薄膜表面垂直方向迅速拉起, 重复 5 次, 膜层无脱落无损伤.

**高低温测试:** 将样品放入低温箱, 由室温降到 -40°C, 保持 3 h; 将样品放入高温箱, 由室温升到 50°C, 保持 3 h. 两种情况下, 光谱曲线和膜层均无明显变化.

**湿热测试:** 在湿度为 95%, 温度为 50°C 的条件下, 放置 24 h, 膜层未有明显变化, 透射光谱中心波长漂移小于 3 nm, 满足使用要求.

### 5 结论

本文采用 H<sub>1</sub> 和 MgF<sub>2</sub> 作为高低折射率材料, 依据光学薄膜设计理论, 建立一种膜系优化设计的评价函数, 并结合膜系设计软件, 实现了该分光膜的设计. 对膜层相对敏感度进行分析, 对敏感度较高的膜层进行特殊控制, 将膜厚误差控制在许可范围内. 采用电子束真空镀膜及离子辅助沉积的方法, 制备了应用于智能眼镜影像系统中的宽光谱广角度 P 光分光膜. 经过多次优化和实验分析, 该分光膜性能稳定, 易于批量生产, 对智能眼镜及其他可视设备的研制和应用将起到推动作用. 另外, 随着便携、可穿戴可视设备的普及, 对此类分光膜的研究将是未来几年的热点, 如何进一步展宽分光波段, 获得精确的分光效率, 将是今后研究的方向.

#### 参考文献

- [1] LI L, JERZY A, DOBROWOLSKI J A, *et al.* Novel thin film polarizing beam splitter and its application in high-efficiency projection displays[C]. SPIE 1999, **3634**: 52-62.
- [2] CHEN Wei-bin, GU Pei-fu. Design of non-polarizing color splitting filters used for projection display system [J].

- Displays*, 2005, **26**(2): 65-70.
- [3] DENG Yun-long, DENG Hua-qiu, XU Xiao. Study of broadband and wide-angle polarizing beam splitter design[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(12): 971-973.  
邓云龙, 邓华秋, 徐晓. 宽角度宽波长偏振分光膜系的设计研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(12): 971-973.
- [4] LEE C C, TSAI S H, KUO C C, *et al.* Free ghost image and high transmittance optical thin film beam splitter for head-up display[J]. *Society for Information Display*, 2011, **42**(1): 1451-1453.
- [5] YANG Kai-yong, LONG Xin-wu, HUANG Yun, *et al.* Design and fabrication of ultra-high precision thin-film polarizing beam splitter[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**: 4650-4653.
- [6] 钟迪生. 真空镀膜[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001, 181-191, 278-288.
- [7] 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] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology[M]. New York: Academic, 1982.
- [9] FAN Huan-huan, ZHANG Yue-guang, SHEN Wei-dong, *et al.* Optical properties of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films fabricated by atomic layer deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1031001.  
范欢欢, 章岳光, 沈伟东, 等. 原子沉积制备 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的光学特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1031001.
- [10] MOZHEGOROV A A, NIKIFOROV A E, LARIN A V, *et al.* Structure and the electronic and magnetic properties of LaTiO<sub>3</sub>[J]. *Physics of the Solid State*, 2008, **50**(9): 1795-1798.
- [11] LIU Chun-ling, WANG Chun-wu, WANG Guang-de, *et al.* Process investigation of H4 thin film prepared by electron beam evaporation and application on laser diodes cavity coatings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(12): 3140-3144.  
刘春玲, 王春武, 王广德, 等. 电子束蒸镀 H4 膜工艺及其在 808 nm 激光器腔面膜上的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3140-3144.
- [12] YANG Yong-liang, FU Xiu-hua, LIU Guo-jun, *et al.* Study and fabrication of multi-wavelength laser antireflection film using new mixed material [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2011, **38**(10): 1007002.  
杨永亮, 付秀华, 刘国军, 等. 采用新型混合材料的多波长激光减反膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1007002.
- [13] 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*, 2013, **40**(5): 050700.
- [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.  
沈羿, 刘冬梅, 付秀华, 等. 紫外通信滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1207005.
- [15] FAN Zheng-xiu, QIAN Wei-zhen. Automatic coating of optical thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(3): 273-280.  
范正修, 钱伟珍. 光学薄膜的自动设计[J]. *光学学报*, 1981, **1**(3): 273-280.
- [16] WU Su-yong, YANG Kai-yong, TAN Zhong-qi. Robust design of a high-performance laser thin-film polarizing beam splitter with low layer errors sensitivity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0231004.  
吴素勇, 杨开勇, 谭中奇. 低误差灵敏度的高性能激光偏振分光膜的稳健设计[J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 0231004.
- [17] ZHAI Zi-yu, YE Mei-ying. A coating design method based on particle swarm optimization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1338-1341.  
翟子羽, 叶美盈. 基于粒子群优化算法的膜系设计方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1338-1341.
- [18] FU Xiu-hua, HUANG Jin-long, MO Zhao-yan, *et al.* Design and fabrication of 589 nm laser optical path integration system filter film [J]. *Chinese Journal of 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.