

文章编号 1004-924X(2015)05-1221-06

高色散系数线性渐变滤光片的研制

张 建^{1,2}, 高劲松^{1*}, 李玉东¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:采用双离子束溅射物理沉积方法,通过修正线性渐变沉积速率制备了高透过率、高色散系数的线性渐变滤光片。在不同材料的膜厚修正过程中,通过匹配高低折射率材料的线性渐变趋势来减小两种材料的失配误差。利用微小光斑测试方法获得了线性渐变滤光片的线性渐变光谱数据,使用扫描电子显微镜表征了滤光片的表面形貌及微观结构。测试结果表明:制备的线性渐变滤光片各个位置的中心波长峰值透过率均达到 85% 以上,其工作波长为 650~1 050 nm,中心波长的线性变化率为 20 nm/mm,线性度误差在 5 nm 以内,带外截止度在 0.1% 以下。制备的线性渐变滤光片不仅具有好的光谱特性,也具有好的稳定性,完全满足滤光片在空间应用时对小型化、集成化和稳定性的需求。

关键词:线性渐变滤光片;双离子束溅射;色散;透过率;膜厚修正

中图分类号:O484.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1221

Linear variable filter with high dispersion coefficient

ZHANG Jian^{1,2}, GAO Jin-song^{1*}, LI Yu-dong¹

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn*

Abstract: On the basis of dual ion beam sputtering physical deposition method, a Linear Variable Filter (LVF) with a high transmittance and a high dispersion coefficient was fabricated by correction of linear gradual deposition rates. To get good quality, the linear varying trends of the two materials was matched to reduce their mismatch in film thickness correction processing. The spectral data of the LVF were obtained by the small spot method and the surface morphology and microstructure of the LVF were observed by a Scanning Electron Microscope (SEM). Tested results show that an all-dielectric LVF with an operating range of 650-1 050 nm is obtained. In the range of 20 mm length, the center wavelength transmitted through LVF exhibits an excellent linear dependence (20 nm/mm), and the linearity error is within 5 nm along the direction of the wedge. The measured results indicate that the transmittance of the center wavelength is higher than 85%, and out-of-band transmittance is

收稿日期:2014-08-18;修订日期:2014-09-17.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 093Y32J090)

less than 0.1%. The LVF has good spectral characteristics and stability, thus can satisfy the system requirements for miniaturization, integration and stabilization.

Key words: Linear Variable Filter(LVF); dual ion beam sputtering; dispersion; transmittance; film thickness correction

1 引言

近年来,随着航空航天技术的飞速发展,空间光学实验和探测设备受到人们越来越多的关注。受空间应用的成本限制,空间光学系统必须追求轻量化和集成化的发展道路,但一些传统的光学器件已经不能满足空间应用的要求。线性渐变滤光片是继棱镜、光栅等分光元件之后发展起来的一种新型分光元件,与棱镜、光栅等传统的分光元件相比,具有体积小、通带多、通带位置可以任意设计等优点;与多通道带通滤光片相比,又具有不需拼接、制作工艺相对简单的优点。线性渐变滤光片对光学系统的小型化和集成化具有重大意义,尤其是在空间技术领域。

线性渐变滤光片是指滤光片的渐变方向上的每一不同位置对应于不同线性变化的通带光谱的窄带滤光片^[1],具有超高集成度,根据设计需求可以任意调整工作谱段内的分光系数。相比于传统的分光器件,它具有较高的分光效率,因此为小型化、集成化空间光学系统的设计提供了新的思路。在国外,线性渐变滤光片已应用于小型化光度计^[2-7]。荷兰代尔伏特理工大学的 Arvin Emadi 等人基于可见区的线性渐变滤光片制作了亚纳米分辨率的微型光度计。瑞典查尔姆斯理工大学的 Huaiwen Wu 等人应用紫外线性渐变滤光片制造了极紫外微型光度计。国内的相关制备工艺研究起步较晚,且存在色散系数较低、透过率较低等问题^[8]。空间技术物理研究所表面工程技术国防科技重点实验室的秦洁玉等人采用真空蒸发镀膜技术,通过膜厚挡板修正机构制作出了可见近红外线性渐变滤光片,所制备的滤光片中心波长的峰值透过率只有 60%左右。同济大学的程鑫彬等人采用离子束辅助沉积工艺制备了可见近红外的线性渐变滤光片,其线性色散系数只有 11 nm/mm。国内的线性渐变滤光片制备水平与国外相比仍有很大的差距,因此制备高精度、高色散系数的线性

渐变滤光片具有迫切的需求。本文采用双离子束溅射物理沉积方法,配合线性渐变沉积速率修正及高低折射率材料的线性渐变趋势匹配等手段,制备出了高透过率和高色散系数的线性渐变滤光片。

2 线性渐变滤光片设计

衡量线性渐变滤光片集成度的指标是线性色散系数。对于线性渐变滤光片,线性色散系数定义为:

$$L_D = \frac{\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{start}}}{d_{\text{end}} - d_{\text{start}}}, \quad (1)$$

其中: d_{start} 和 d_{end} 分别为线性渐变滤光片的起始工作位置和终止工作位置, λ_{start} 和 λ_{end} 分别为线性渐变滤光片的起始工作波长和终止工作波长。对于截止滤光片, λ_{start} 和 λ_{end} 分别为截止滤光片在工作起始端和工作终止端时的截止边 $T=50\%$ 点的波长;而对于带通滤光片, λ_{start} 和 λ_{end} 则分别为带通滤光片在工作起始端和工作终止端的中心波长^[9]。

从应用角度来看,线性渐变滤光片的线性色散系数越大,则工作波长压缩的越密集,微型化程度越高。但从研制角度来看,大色散系数就意味着大的沉积速度变化率,研制难度也就越大。在保证制作精度的前提下,本文将渐变滤光片的线性色散系数设计为 20 nm/mm,这样在 20 mm 的基片范围内可以获得 600~1 000 nm 的线性渐变区。从膜系的设计角度而言,波长渐变滤光片和普通光学滤光片一样,也是利用光波在多层光学膜中的干涉原理设计的^[10]。带通滤光片的膜系设计采用双法布里-珀罗(F-B)腔模型,带通滤光片的膜系结构为:基底|(HL)²H₂LH(LH)²L(HL)²H₂LH(LH)²|空气。在工艺过程中,膜厚的实时控制采用直接光学监控法。使用 Nb₂O₅和 SiO₂分别作为高低折射率材料,光谱曲线如图 1 所示。

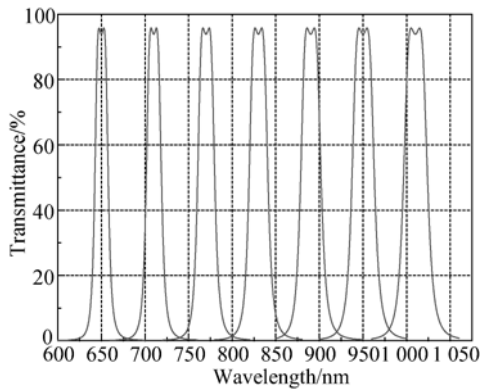


图 1 带通滤光片的设计光谱曲线

Fig. 1 Design spectrum of band pass filter

3 线性渐变膜层厚度匹配

本文采用离子束溅射沉积^[11-15]的方法制备了线性渐变滤光片。双离子束溅射系统如图 2 所示。

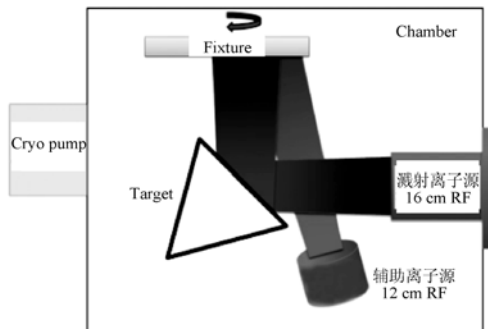


图 2 双离子束溅射系统

Fig. 2 Dual ion beam sputtering system

膜厚修正挡板置于样品架的前方。膜料的沉积速率由主离子源的溅射功率和挡板的遮挡比共同决定,膜料的溅射分布则由离子束相对靶材的入射角和膜料的溅射特性决定。在薄膜沉积过程中,辅助离子源要通入一定比例的 O₂,以保证沉积材料的氧化程度。

为了实现通带中心波长沿长度方向的线性变化,需要控制各膜层的光学厚度沿基片长度方向呈线性变化。因此,准确控制各膜层的厚度及其随基片位置的变化速率,就能准确控制波长渐变滤光片的线性色散系数。各膜层厚度的线性变化是通过在基片前方安装适当形状的膜厚修正挡板来实现的。本文根据在夹具匀速旋转的情况下,基片表面各点镀制的薄膜厚度与在溅射沉积过程中被暴露在膜料束流中的角度成正比的原理,以

及溅射膜料在镀膜机真空室内的密度分布情况设计了挡板的基本形状。

线性渐变修正公式为:

$$\theta_1 : \theta_t = \frac{d_0 - d_1}{d_0} : \frac{d_0 - d_t}{d_0}, \quad (2)$$

其中: θ_1 是初始挡板的遮掩角度, θ_t 是目标挡板的遮掩角度, d_0 是无遮掩挡板情况下沉积的光学厚度, d_1 是放置初始挡板情况下沉积的光学厚度, d_t 是目标沉积厚度。沿着线性渐变滤光片渐变方向上每隔 5 mm 取一个采样点,用分光光度计测量每个采样点处在无挡板和初始挡板情况下的光学厚度,再根据给定的目标厚度进行修正,测量及修正数据如表 1 所示。

表 1 线性渐变滤光片挡板修正数据

Tab. 1 Mask revised data of Linear Variable Filter(LVF)

采样点	d_0 /nm	d_1 /nm	d_t /nm	θ_1 /($^\circ$)	θ_t /($^\circ$)
1	1 239	633	633	90	90.0
2	1 241	636	640	90	89.4
3	1 241	639	650	90	88.4
4	1 239	641	750	90	73.6
5	1 237	644	850	90	58.7
6	1 232	645	950	90	43.2
7	1 227	647	1 050	90	27.5

按照上述方法分别对 Nb₂O₅ 和 SiO₂ 两种材料进行线性挡板修正,经过修正后两种材料达到的线性变化率如图 3 所示。

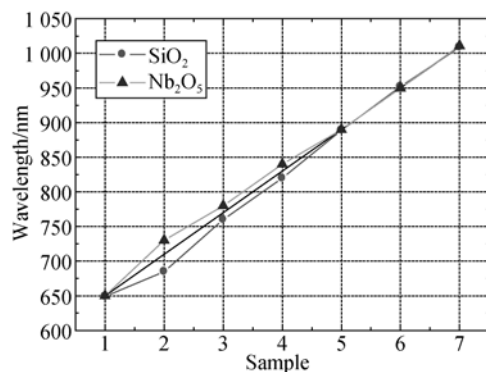


图 3 两种材料的厚度线性变化率

Fig. 3 Linear change rates of thicknesses of two materials

由图 3 可以看出,两种材料基本都能满足设计所需的 20 nm/mm 的线性渐变率。但是,由于两种材料的溅射特性差异很大,在相同的溅射环境中,溅射出的膜料分布差别很大,因此在某些采

样点区域,两种材料的失配现象较为严重,具体的失配波长误差如图 4 所示。

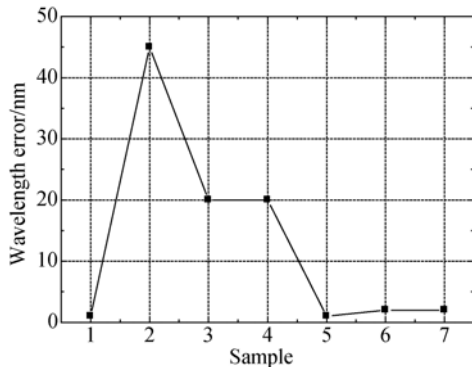


图 4 采样点处的膜厚失配误差

Fig. 4 Film thickness mismatching errors at sample positions

膜厚的失配将会导致中心波长的偏移,也会严重影响带通滤波片的峰值透过率。因此,材料的失配是透过率低下的主要原因。为了减小两种膜料的失配误差,在原有的修正挡板基础上,采用趋势匹配的方法进行精修。具体修正方法是在失配较严重的采样点处,固定一种膜料的沉积厚度,将另外一种膜料朝着误差方向按照失配比例进行匹配修正。高折射率材料 Nb_2O_5 的溅射稳定性较好,膜厚定标也较精确,因此本文选择固定 SiO_2 的变化率,对 Nb_2O_5 的变化率进行趋势匹配。经过匹配修正,最终两种材料的线性渐变率如图 5 所示。

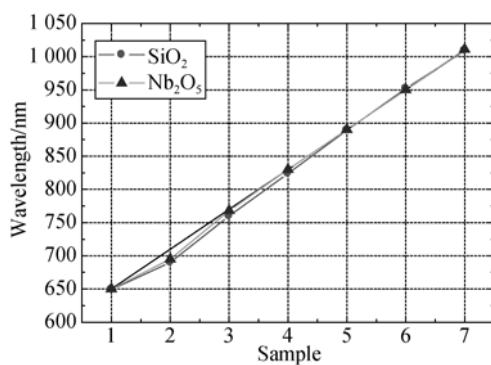


图 5 修正后两种材料的厚度线性变化率

Fig. 5 Linear change rates of thicknesses of two materials after revising

4 测试分析

线性渐变滤光片是一种光谱随基片位置变化的滤光片,它的中心波长在滤光片的工作方向上

按线性色散系数连续变化。由于所设计的膜系的线性色散系数为 20 nm/mm ,这就意味着在一定的采样范围内所测得的光谱曲线为采样范围内的平均值。光谱的平均效应会使所测得的光谱曲线大大变形,中心波长透过率大大下降。具体的透过率为:

$$T(x, \lambda) = \frac{\int_{-d}^d T(x+t, \lambda) dt}{2d}, \quad (3)$$

其中: $T(x, \lambda)$ 为采样区间中心位于基片上 x 处时,波长为 λ 的光透过率, $2d$ 为采样光斑尺寸。图 6(彩图见期刊电子版)是根据式(3)按不同的测试光斑尺寸对所设计的线性渐变带通滤波片进行分析的结果。从图 6 可以看到,随着测试光斑尺寸的增大,测试光谱曲线的截止陡度变差,中心波长透过率降低。

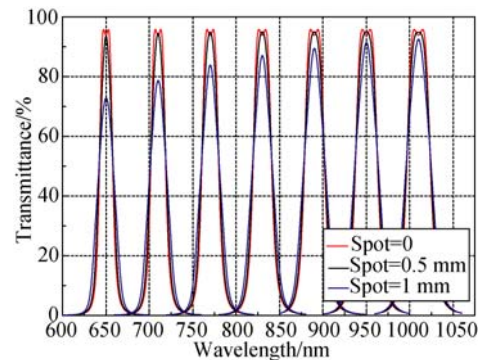


图 6 不同大小采样点的光谱曲线

Fig. 6 Spectra of different sample spots

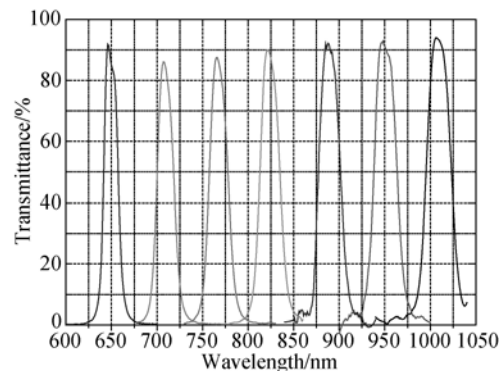


图 7 透射光谱测试曲线

Fig. 7 Measured transmittance spectra

为了克服光谱测量平均效应对测试结果的影响,以获取更为准确的测量结果,本文采用小光斑测试方法来优化测试系统的采样光斑。使用

Lambda1050 测试实验样件的光谱透射曲线,沿波长渐变方向每隔 3 mm 取一个采样点,采样光斑为 0.5 mm。测得的每个采样点的光谱透射曲线如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,实测光谱曲线与 Spot=0.5 mm 的理论设计曲线基本吻合,各个采样点的中心波长峰值透过率基本达到 85% 以上,实验样件的光谱实测参数与所设计的参数吻合。经过多次相同条件的重复镀制发现,在相同的工艺条件下,所得的透过率特性基本相同,工艺重复性良好,双离子束溅射系统的稳定性具有很大优势。为了验证实验样件的线性色散系数,取各个采样点的中心波长位置与理论设计的色散系数斜线作比较,结果如图 8 所示。

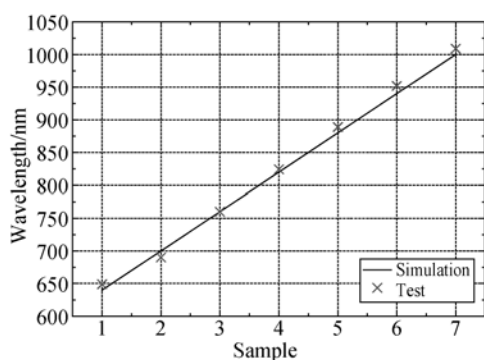


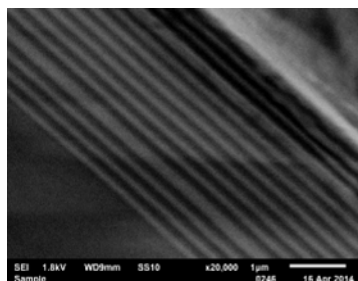
图 8 中心波长的线性度误差

Fig. 8 Linear errors of center wavelengths

图 8 中斜线为理论设计色散系数的参考线,×点是各个采样点处的中心波长值。由图可以看出,各个采样点的中心波长位置与 20 nm/mm 的理论设计色散曲线基本吻合,浮动误差在 ±5 nm 以内。由上述测试可知,制备的线性渐变滤光片的光学特性达到了理论设计指标,完全可以满足集成化光学系统的使用需求。

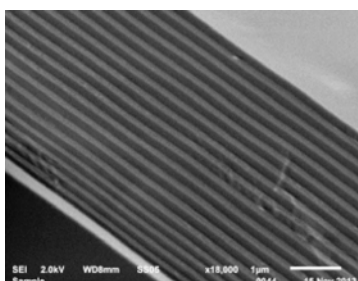
为了观察所镀膜系的表面形貌及膜层的断面结构,用扫描电子显微镜(SEM)对膜层微观结构进行了观察,膜层断面如图 9 所示。从 SEM 照片里可以清楚地看到膜系的分层结构,膜系由厚度不同的高低折射率材料交替镀制而成。由于离子束溅射沉积具有稳定致密、迁移率大等优点,膜层断面和表面形貌比较光滑,没有明显的缺陷。因此,离子束溅射方法制备的线性渐变滤光片具

有非常好的稳定性和环境适应能力,在特殊工作环境如空间应用中具有很大的优势。



(a)带通滤光片

(a) Band pass filter



(b)截止滤光片

(b) Cut-off filter

图 9 扫描电子显微镜膜层断面图

Fig. 9 SEM images of film cross-sections

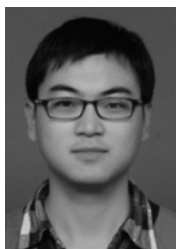
5 结 论

本文采用双离子束溅射物理沉积法,通过线性渐变沉积速率修正,制备出了高透过率、高色散系数的线性渐变滤光片。在不同材料的膜厚修正过程中,采用高低折射率材料的线性渐变趋势匹配手段来减小两种材料的失配误差。采用微小光斑测试方法获得了线性渐变滤光片不同位置的光谱数据。所制备的渐变滤光片的线性色散系数达到 20 nm/mm,并且基片上每个点的光谱透过率峰值都在 85% 以上,光谱线性度误差在 5 nm 以下。本文使用 SEM 对其表面形貌及微观结构进行了表征。测试结果表明,制备的线性渐变滤光片不仅具有良好的光谱特性,也具有较高的稳定性,完全满足空间应用集成化、小型化光学系统的使用要求。

参考文献:

- [1] 陈焘, 罗崇泰, 刘宏开, 等. 多光谱带通线性渐变滤光片的研制[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 72-75.
CHEN T, LUO CH T, LIU H K, *et al.*. Development of multi-band linear variable filters [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7): 72-75. (in Chinese)
- [2] EMADI A, WU H W, Ger de GRAAF, *et al.*. Design and implementation of a sub-nm resolution micro spectrometer based on a linear-variable optical filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 489-507.
- [3] EMADI A, WU H W, Ger de GRAAF, *et al.*. Linear variable optical filter-based ultraviolet microspectrometer [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4308-4315.
- [4] LAETITIA A T, FREDERIC L, MICHEAL L. Masking mechanisms applied to thin-film coatings for the manufacturing of linear variable filters for two-dimensional array detectors [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(30): 5706-5714.
- [5] EMADI A, WU H, GRAAF de G, *et al.*. IR Microspectrometers based on linear-variable optical filters [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 25: 1401-1404.
- [6] EMADO A, WU H, GRAAF de G, *et al.*. An UV linear variable optical filter-based micro-spectrometer [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 5: 416-419.
- [7] EMADI A, WU H, GRABARNIK S, *et al.*. Fabrication and characterization of IC-compatible linear variable optical filters with application in a microspectrometer [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 162: 400-405.
- [8] 秦洁玉, 罗崇泰, 马勉军. 线性渐变滤光片镀制挡板设计[J]. 真空与低温, 2007, 13(1): 57-62.
QIN J Y, LUO CH T, MA M J. Mask design for linear variable filters [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2007, 13(1): 57-62. (in Chinese)
- [9] 范滨, 李刚正, 程鑫彬, 等. 线性渐变滤光片的制备与测试[J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 95-103.
FAN B, LI G ZH, CHENG X B, *et al.*. Production and measurement of linear variable filter [J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(4): 95-103. (in Chinese)
- [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.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Film Technology*[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 张金胜, 张金龙, 宁永强, 等. 1 555 nm 宽通带滤光膜的设计和優化[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 557-562.
ZHANG J SH, ZHANG J L, NING Y Q, *et al.*. Design and optimization of 1 555 nm broad-band pass filter film [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 557-562. (in Chinese)
- [12] 刘华松, 王利栓, 姜玉刚, 等. 离子束溅射制备 SiO₂ 薄膜的折射率与应力调整[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2238-2243.
LIU H S, WANG L SH, JIANG Y G, *et al.*. Adjustments of refractive index and stress of SiO₂ films prepared by IBS technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2238-2243. (in Chinese)
- [13] 张立超, 高劲松. 长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2395-2401.
ZHANG L CH, GAO J S. Developments of DUV coating technologies in CIOMP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2395-2401. (in Chinese)
- [14] 杨道奇, 付秀华, 耿似玉, 等. 0.6~1.55 μm 可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 270-276.
YANG D Q, FU X H, GENG S Y, *et al.*. Design and fabrication of 0.6—1.55 μm visible/near infrared ultra-broad band anti-reflection coatings [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 270-276. (in Chinese)
- [15] 张立超, 高劲松. 基于遮挡矩阵的膜厚修正挡板的设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2757-2763.
ZHANG L CH, GAO J S. Design of uniformity correction masks based on shadow matrix [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2757-2763. (in Chinese)

作者简介:



张 建(1987—),男,山东淄博人,博士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: waterscent@163.com

导师简介:



高劲松(1968—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜与电磁功能薄膜等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)