

光学告警系统中紫外信号采集滤光膜的研制

寇 洋¹ 付秀华¹ 刘凤娥² 刘冬梅¹ 唐昊龙¹

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)
² 中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089)

摘要 根据紫外告警模拟系统的使用要求, 基于法布里-帕罗(F-P)窄带滤光片结构, 通过对膜系理论的分析、材料蒸发工艺的研究、离子源参数的调整和优化, 利用不同膜系设计的组合, 设计并制备出能够有效采集紫外信号的紫外滤光膜。该滤光膜在紫外峰值透射率达到 17.96%, 通带半峰全宽约为 20 nm, 能够更准确地采集到所需紫外波段的模拟信号, 同时对紫外以及可见波段进行了有效地抑制, 可以较好地控制背景噪声的产生, 其截止度小于一 30 dB。该滤光膜在紫外告警模拟系统中对自然光进行滤光, 对紫外信号进行了有效地采集, 使系统的整体精度得到了提升。

关键词 薄膜; 信号采集; 窄带滤光膜; 紫外诱导滤光膜

中图分类号 O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1131001

Design and Preparation of Ultraviolet Signal Acquisition Filter Film in Optical Warning System

Kou Yang¹ Fu Xiuhua¹ Liu Feng'e² Liu Dongmei¹ Tang Haolong¹

(¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
² China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract According to the requirement of ultraviolet (UV) warning system, based on the structure of Fabry-Perot (F-P) narrowband filter, by analysing film systems theory, the research of material evaporation process, adjustment and optimization of the ion source parameters, using the combination of different film system design, the UV filter film which can collect the UV signal effectively is designed and prepared. The peak transmittance of this film in UV is 17.96%, half-peak bandwidth is 20 nm. The filter can collect the UV signal more accurate and ultraviolet and visible band are inhibited effectively, so the background noise can be controlled at a low level. The cut-off degree is less than -30 dB. This film can filter natural light and collect the UV signal effectively in the UV warning system, and it has a significant contribution to improve the overall accuracy of the system.

Key words thin films; signal acquisition; narrowband filter; ultraviolet induced filter

OCIS codes 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310

1 引 言

随着紫外(UV)光学技术的飞速发展, 现代紫外光电技术已广泛应用于军事领域。早在 20 世纪 50 年代初, 相关专家就对紫外模拟技术进行了研究。该技术是继红外与激光之后迅速发展起来的一种军民两用的光学技术^[1]。相对于较为成熟的红外告警装置, 紫外告警探测仍处于起步阶段, 而其虚告

警率低、灵敏度高、隐蔽性强等优点在军事领域中被越来越多的关注。

本文对模拟系统中滤光膜的设计与制备的相关技术进行了细致地研究, 通过反复的膜层设计与工艺调试, 所制备的紫外滤光膜能有效地采集所需紫外信号, 并对背景光谱进行抑制, 从而达到模拟紫外光的作用。

收稿日期: 2013-05-13; **收到修改稿日期**: 2013-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)、预研项目紫外技术(51317020103)

作者简介: 寇 洋(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: 13756902833@126.com

导师简介: 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

2 膜系设计

为充分利用紫外特性进行导弹告警,需要在来袭目标的光信息进入光学系统前进行“滤光”。在保证获取最佳的紫外信息的前提下,还需要抑制较宽的带通杂光,滤光片的制备应满足相对较高的峰值透射率、较好的背景抑制效果及高精度的中心波长定位等特点。然而在紫外波段,绝大部分材料都会出现相应的吸收,从而导致膜系透射率的下降。通常用于法布里-帕罗(F-P)滤光片的金属材料有铝、

银等,其中金属铝在紫外波段有着较好的透射率和可见光波段较大的消光系数。同时,铝膜对基片的附着力强,机械强度也较好,可实现在特定波段深度的截止,MgF₂在紫外波段有良好的光学和机械性能,可作为紫外波段很好的光学薄膜材料^[2]。

F-P干涉滤光片是基于F-P干涉仪理论改进而成的,透射通带呈三角形,其结构与透射通带如图1所示。

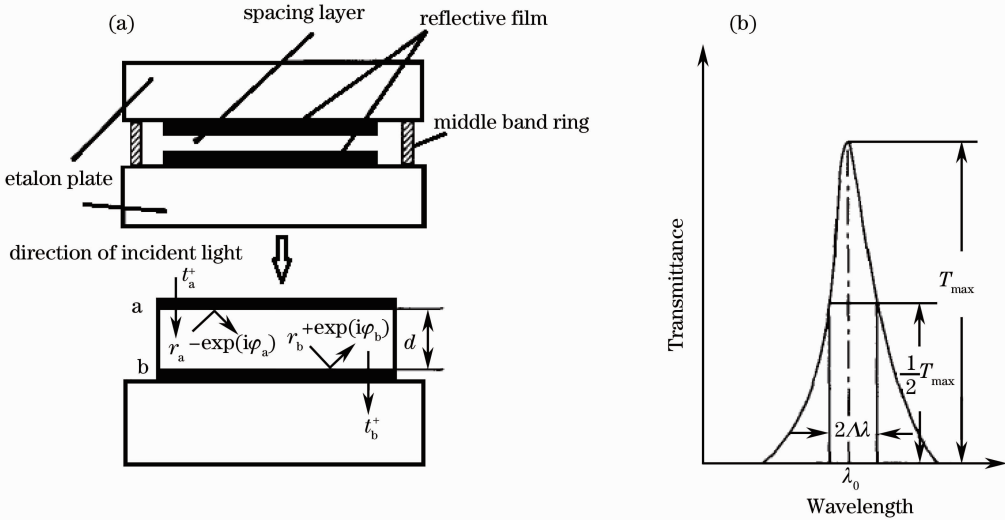


图1 (a) F-P干涉滤光片结构示意图; (b) F-P干涉滤光片光谱特性

Fig. 1 (a) Schematic diagram of F-P interference filter; (b) spectral properties of F-P interference filter

膜层结构可以等效成两个反射层与中间介质层的形式。其透射率公式为

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \left[1 + \frac{4 \sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \theta \right], \quad (1)$$

式中 $\theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$, R_1, R_2, T_1 和 T_2 分别为反射膜的反射率与透射率, φ_1 和 φ_2 为反射膜的反射相位, 其中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}nd$ 为间隔层的位相厚度。

当光线正入射时,中心波长为

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + [(\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi]} = \frac{2nd}{m}, \quad (2)$$

这里 $m = k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi$ 。

滤光片的半峰全宽为峰值透射率一半处的通带宽度,根据(1)式有

$$\frac{1}{2} T_0 = T_0 [1 + F \sin^2(\theta_0 + \Delta\theta)], \quad (3)$$

其中 $\sin(\theta_0 + \Delta\theta) = 1/\sqrt{F}$, 由于 $\theta_0 = -k\pi$, 因而 $\sin \Delta\theta = 1/\sqrt{F}$, $\Delta\theta = \arcsin(1/\sqrt{F})$, 又因为 $\Delta\theta \approx$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \right)_0 \Delta\lambda = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2 - 2 \frac{2\pi}{\lambda} nd) \right]}{\partial \lambda_0} \Delta\lambda, \text{ 其中反射}$$

位相 φ_1 和 φ_2 在通带内假定为常数, 则 $\Delta\theta \approx \frac{\delta_0}{\lambda_0} \Delta\lambda =$

$\frac{m\pi}{\lambda_0} \Delta\lambda$, 所以半峰全宽可以表示为

$$\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2}{m\pi} \arcsin\left(\frac{1 - \bar{R}}{2\sqrt{\bar{R}}}\right), \quad (4)$$

式中 $\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2}$ 。

由(4)式可以看出,滤光片的半峰全宽决定于干涉级次与反射膜的反射率^[3]。反射率越高,干涉级次就越大,半峰全宽越窄,但提高干涉级次,虽可以减小通带宽度,但主峰的长波侧会产生低级次的透射峰,这就需要在保证截止度与半峰全宽的前提下,尽量提升紫外波段的透射率。

综上所述,根据膜系设计理论,用TFC膜系设计软件来设计紫外滤光膜,采用软件中的needle优化方法并且进行隧道法(tunneling method)限定,最后利用Global Search进行全局优化。利用NASA/

Goddard Space Flight Center 以及相关紫外金属材料的资料得到 Al 和 MgF_2 的紫外光学常数值^[4], 通过反复实验验证在所需波段的光学常数与实际测量的结果符合得较好。设计的滤光片膜系为 $G|(HL)^s|A$, 其中 G 表示基底, A 表示入射介质(空气), H 表示 Al, L 表示 MgF_2 , S 表示膜层周期^[5], 其滤光膜的具体膜系如表 1 所示, 设计曲线如图 2 所示。

表 1 紫外滤光膜的结构

Table 1 Structure of UV filter film

Layer number	Material	Thickness /nm
1	Al	10
2	MgF_2	63.19
3	Al	17
4	MgF_2	65.20
5	Al	10
6	MgF_2	42.53

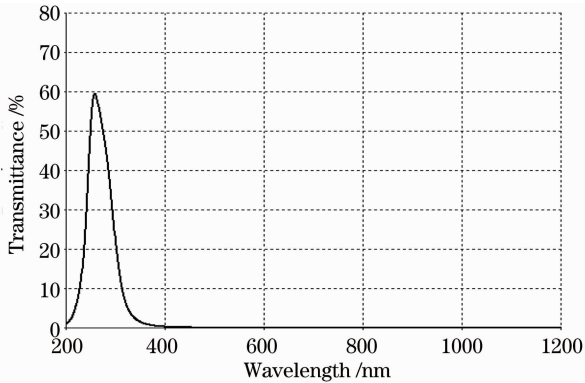


图 2 紫外窄带滤光片的设计曲线

Fig. 2 Design curve of UV narrowband filter

由于紫外滤光膜在所需波段的半峰全宽较宽, 所以需要在背面设计紫外诱导滤光膜以压缩带宽。诱导滤光膜的缺陷是在可见区域有明显次级峰, 且不能通过设计完全消除。但正面的紫外滤光膜在可见区域有良好的截止度, 所以两种紫外滤光片的结合可以更好地对可见背景噪声进行截止, 同时保证紫外所需波段的技术要求。其设计膜系为 $G|(HL)^sM(LH)^s|A$, 其中 G 表示基底, A 表示入射介质(空气), H 表示 HfO_2 , L 表示 MgF_2 , M 表示金属 Al, S 表示膜层周期^[6]。其设计曲线如图 3 所示。

3 薄膜的制备

3.1 制备工艺的确定

该滤光片是在 TXX-700 真空镀膜机上制备完成的, 该设备装配有双电子枪和考夫曼离子源, 双晶控探头以及 IC/5 膜厚监控仪。实验采用电子束蒸发工艺蒸镀 Al 以及 MgF_2 , 蒸发用材料 Al 丝和

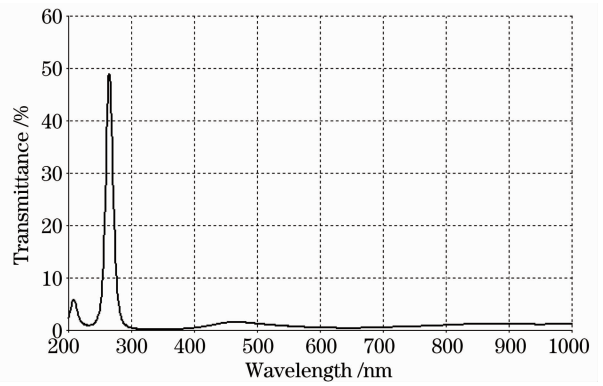


图 3 诱导滤光片理论设计曲线

Fig. 3 Theoretical design curve of induced filter

MgF_2 均选用高纯度的材料^[7]。由于熔融石英在紫外波段透射率较高、物理化学性能稳定、且热膨胀系数低, 所以该窄带滤光片采用的基片为直径 20 mm 的熔融石英。当真空室本底真空抽至 1.0×10^{-3} Pa 时进行蒸镀。由于金属 Al 蒸镀时很容易被氧化, 因此要在开挡板之前对材料进行预热, 打开挡板后进行高速蒸镀, 但是由于蒸发速率过快会导致膜层不牢, 所以在蒸镀过程中要借助离子源进行辅助沉积。制备的紫外滤光片实验测试曲线如图 4 所示。

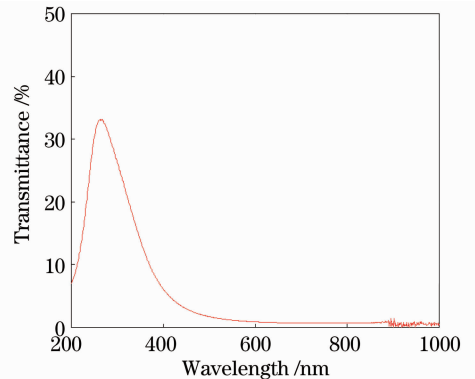


图 4 紫外滤光片实测曲线

Fig. 4 Measurement spectrum curve of UV filter

由图 4 可以看到紫外波段透射率较低, 峰值位置漂移且可见波段截止度不好。经过反复对比实验, 通过 TFC 膜系设计软件中的交互式分析(interactive analysis)功能对整个膜系进行厚度与膜层分析, 由于在金属 Al 与介质膜层中掺杂有微量 Al_2O_3 , 导致中心波长位置偏移, 且透射率高度有所下降^[8]。此外, 整个实验采用石英晶体监控, 该监控方式是通过监测 AT 切割石英晶体的振动频率的改变量来判断膜层厚度的方法, 其原理为

$$\Delta f = -\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N} \Delta d_M, \quad (5)$$

式中 Δf 为振动频率变化, Δd_M 为厚度改变量, ρ_M 为

膜层密度, ρ_a 为石英密度, f 为石英晶体基频, N 为石英晶体的频率常数, 当材料已知的情况下, $-\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N}$ 一般为常数, 其中负号表明频率随厚度的增加而减少^[9]。由(5)式可知, 由于膜层厚度的增加, 频率不断下降, 其探测灵敏度就要相对降低, 其监控度就会产生细微误差, 该误差在可见及红外波段对光谱曲线影响并不明显, 但由于紫外薄膜膜层较薄, 微小的厚度误差会对测试结果产生一定影响, 所以通过多次实验与分析, 利用膜系设计软件计算出不同膜层相对应的工具因子(tooling)值, 并对蒸镀工艺进行改进, 制备的滤光片实验测试曲线如图 5 所示。

3.2 离子源工艺参数的确定

由于紫外滤光片各层薄膜的质量要求很高, 为了保证薄膜的牢固度与致密度, 同时提升滤光片的薄膜质量, 在镀制的过程中采用离子源辅助沉积。其原理是当膜料处在蒸发过程中时, 沉积分子或原子(沉积离子)不断受到来自离子源荷能离子的轰击, 通过能量转移, 使蒸镀的离子获得了更大的动能, 整个离子源辅助的过程使薄膜的生长发生了根

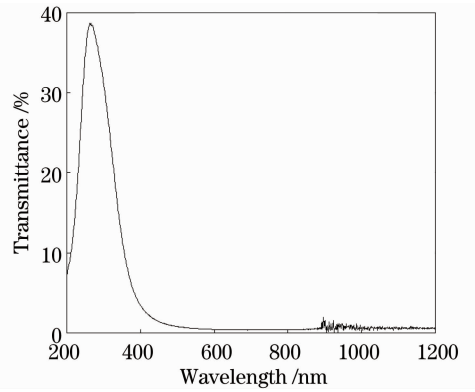


图 5 改进工艺后紫外滤光片实测曲线
Fig. 5 Measurement curve of UV filter after improving process

本的变化, 从而改善了薄膜的性能。

由于金属材料与介质材料的薄膜结构不同, 所以其离子源参数就需要相应地改变, 找到材料相对应的离子源参数是本实验重点解决的问题。以离子源束流大小作为主线, 进行对比实验找到最佳的工艺参数, 具体实验如表 2 所示^[10]。实验过程中保证其他参数不变。

表 2 离子源参数实验数据

Table 2 Experimental data of ion source parameters

Film material	Ion beam current 0	Ion beam current 25 /mA	Ion beam current 50 /mA
Dielectric material	Absorption	Normal	Surface etching
Metal material	Film off	Little film off	Normal

从实验中可以看出, 在不利用离子源辅助沉积的情况下, 介质材料在紫外波段会出现一定吸收, 金属 Al 会出现严重的脱膜现象。当离子源束流为 25 mA 时, 介质膜层镀制正常, 表面未出现刻蚀现象, 金属 Al 的脱膜问题虽得到一定改善仍存在少量脱膜现象。当束流为 50 mA 时, 介质膜层表面遭到破坏, 光学性能降低, 表面产生刻蚀现象, 金属 Al 的脱膜问

题得以解决, 表面牢固度较好。表面质量测试如图 6、7 所示, 金属表面牢固度测试如图 8、9 所示。



图 6 束流为 25 mA 时膜层表面质量
Fig. 6 Film surface quality with the ion beam current of 25 mA



图 7 束流为 50 mA 时膜层表面质量
Fig. 7 Film surface quality with the ion beam current of 50 mA

综上所述, 选择不同的离子源参数对金属膜与介质膜进行辅助沉积, 并对基片背面进行诱导滤光片的制备, 来压缩透过带宽。测得的实验光谱曲线如图 10 所示。

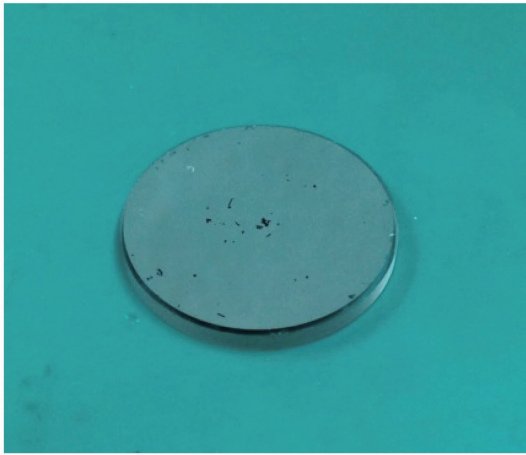


图 8 Al 表面脱膜的测试片

Fig. 8 Al film with stripping surface

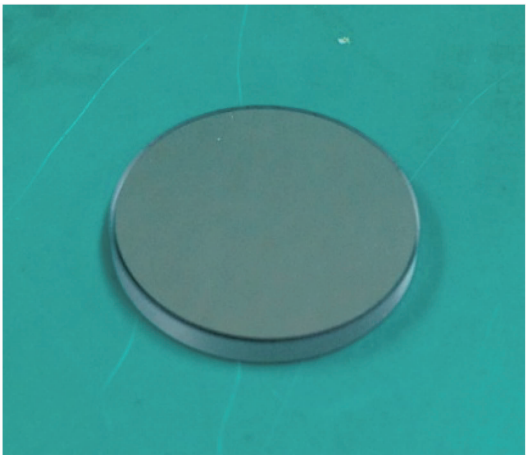


图 9 Al 表面正常的测试片

Fig. 9 Al film with normal surface

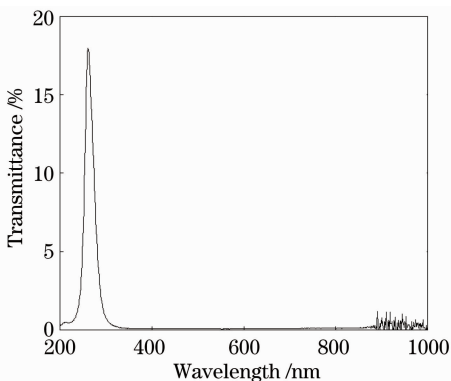


图 10 双面镀制后的紫外滤光片实测曲线

Fig. 10 Experimental curve of UV filter film with both sides coated

从光谱曲线看出,利用 F-P 带通滤光膜与诱导相结合的方法制备的滤光膜在紫外波段的透射率达到 17.96%,对可见波段截止度均小于 -30 dB,且不存在明显的次峰。在对薄膜光学特性检测的同时,采用扫描探针显微镜对薄膜表面形貌进行测试,

检测结果如图 11 所示。通过测试图可以看出该滤光膜表面测试图颜色无明显变化,与右侧标准化比较图对比后说明膜层表面平滑无明显缺陷,符合使用标准。

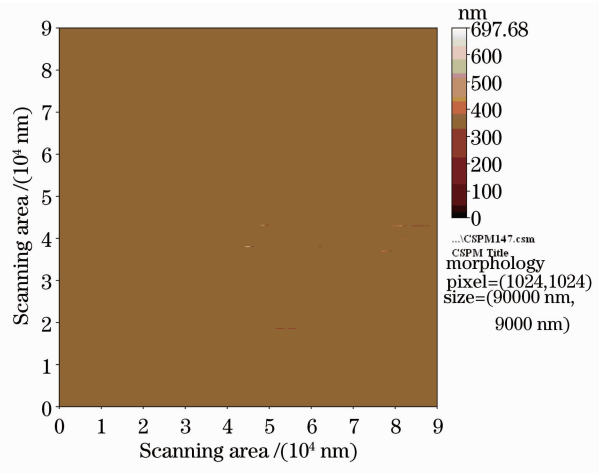


图 11 紫外滤光膜表面形貌实测图

Fig. 11 Surface morphology of UV filter film

4 结 论

基于 F-P 带通滤光膜的结构,并与紫外诱导滤光膜相结合,设计并制备出符合要求的信号采集紫外滤光膜。通过对膜系理论的研究优化,改进制备工艺,调整离子源参数,最终使该滤光膜在峰值处透射率达到 17.96%,对可见波段截止度均小于 -30 dB,并且截止度平滑,较好地控制了背景噪声的产生。但紫外透射率与设计值还存在一定差异,是由于金属 Al 层还存在微量的氧化现象,同时材料与基底均存在吸收现象。该问题会在以后的工作中通过对材料与蒸发工艺的进一步研究得以解决。

参 考 文 献

- Zhang Hailiang, Jia Honghui, Zhang Xueao, *et al.*. Research of the ultraviolet radiation transfer in the atmosphere [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s2): 108-111.
张海良,贾红辉,张学骞,等. 紫外光大气辐射传输特性研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(s2): 108-111.
- Xue Chunrong, Yi Kui, Qi Hongji, *et al.*. Optical constants of film materials for deep ultraviolet/ultraviolet [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2135-2139.
薛春荣,易葵,齐红基,等. 深紫外/紫外薄膜材料的光学常数研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2135-2139.
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006. 118-123.
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. 118-123.
- J I Larruquer, R A M Keski-Kuha. Far ultraviolet optical properties of MgF₂ deposited by ion-beam sputtering and their application as protective coating for Al [J]. Opt Commun, 2003.

- 215(1): 93-99.
- 5 Chen Haixing, Gu Peifu, Lü Weige, *et al.*. Superprism effect in thin film Fabry-Perot filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 25(1): 157-160.
陈海星, 顾培夫, 吕维阁, 等. 薄膜法布里-珀罗滤光片中的超棱镜效应[J]. *光学学报*, 2006, 25(1): 157-160.
- 6 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.*. Research of ultraviolet induced transmission filter for the solar blind system [J]. *Chinese J 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): 0507002.
- 7 Xu Zhihuang, Zhuang Xinxin, Su Genbo. Study on ultraviolet spectrum property of ultraviolet filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1918-1920.
徐智煌, 庄欣欣, 苏根博. 有机紫外滤波材料的紫外光谱性质研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1918-1920.
- 8 J Kim, M Zukic, M M Wilson, *et al.*. Design and fabrication of a reflection far ultraviolet polarizer and retarder [C]. *SPIE*, 1993: 93-103.
- 9 Zhong Disheng. *Vacuum Coating* [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. 181-191, 278-288.
钟迪生. *真空镀膜* [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 181-191, 278-288.
- 10 Wang Shaowei, Wang Li, Wu Yonggang, *et al.*. Arrays of narrow bandpass filters fabricated by combinatorial etching technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 746-751.
王少伟, 王 利, 吴永刚, 等. 组合刻蚀法制各窄带滤光片阵列 [J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 746-751.

栏目编辑: 韩 峰