

日盲探测宽波段低噪声滤波器件的研制

付秀华, 郭凯*, 熊仕富, 张静, 孙兵, 姜洪妍

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为满足日盲探测系统的技术要求,研制了一种可以实现紫外日盲区(200~270 nm)高透射、近紫外到近红外区(300~1200 nm)深截止的光学滤光片。通过分析材料的光学特性,结合光学薄膜理论,优化膜系结构,设计了介质与金属组合的膜系。采用电子束加热蒸发的方法沉积金属膜,通过对沉积速率的实验研究,在保证金属光学性能的前提下,有效降低了膜厚控制误差。采用逆向反演法与膜层敏感度分析,对谐振层工艺参数进行优化,有效降低了谐振层的控制误差。该滤光膜在200~270 nm波段的平均透射率达到51.21%,在300~1200 nm抑制区的平均透射率为0.90%。

关键词 薄膜; 滤光膜; 日盲探测; 控制误差; 逆向反演

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0603002

Development of Wide-Band Low-Noise Filter for Solar Blind Detection System

Fu Xiuhua, Guo Kai, Xiong Shifu, Zhang Jing, Sun Bing, Jiang Hongyan

*Department of Optics and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In order to meet the technical requirements of the solar blind detection system, a kind of optical filter is developed, which can realize high transmittance in the ultraviolet light field (200-270 nm) and deep cutoff from near ultraviolet to near infrared (300-1200 nm). By analyzing the optical properties of the material, combining optical film theory and optimizing the film system structure, the film system combined with medium and metal is designed. The metal film is deposited by electron beam heating and evaporation. Through the experiment on the deposition rate, the control error of the film thickness is effectively reduced under the premise of ensuring the optical properties of the metal. By using the reverse inversion method and the film sensitivity analysis, the process parameters of the resonant layer are optimized, and the control error of the resonant layer is effectively reduced. The average transmittance of the filter film is 51.21% in the range of 200-270 nm, and the average transmittance in the inhibition region of 300-1200 nm is 0.90%.

Key words thin films; filter film; solar blind detection; control error; reverse inversion

OCIS codes 310.6188; 310.6860; 310.3840; 310.6805

1 引言

太阳光覆盖了极紫外到远红外的整个光谱区,其产生的大气背景辐射会对光电探测系统造成严重的背景干扰,不仅会增加信号处理的负担,还极易产生虚警。日盲探测^[1-2]利用大气对日盲区(200~270 nm)的强吸收作用,可以避开太阳光在此波段的背景辐射,同时系统具有体积小、灵活性高、响应速度快、虚警率低、全天候可靠探测的优点,因此受到越来越多的重视,在军事及民用领域都有广泛的应用^[3-5]。

20世纪70年代起,国外研究者开始对紫外光的大气传输特性进行研究,测量了大量数据并建立了一系列理论模型。Shute^[6]通过卫星载荷精确测量了地球日盲波段的空间背景,随后发射的探测卫星为其提供了

收稿日期: 2017-01-22; 收到修改稿日期: 2017-03-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203002GX)

作者简介: 付秀华(1963—),女,博士,教授,主要从事光学薄膜和现代光学加工技术方面的研究。E-mail: goptics@126.com

* 通信联系人。E-mail: kg_optics@126.com

大量的日盲紫外背景观测数据。国内对日盲探测技术的研究才刚刚起步,研究邻域主要集中在大气传输特性的理论分析、尾焰辐射特性的分析和仿真、探测系统的搭建等^[7]。

近年来,日盲探测技术的发展对日盲滤光片性能的要求不断提高。2010年,普林斯顿大学研制了峰值波长为270 nm、透射率为27%、可见光抑制比为-20 dB的滤光片^[8];2013年,长春理工大学通过诱导膜系,实现了265 nm峰值透射率为22%、300~1000 nm平均截止度小于0.2%的滤光片^[9]。但是对于200~270 nm高透射、300~1200 nm截止的滤光膜的研究国内外还未见相关报道。为此,本文研制了一种200~270 nm高透射、300~1200 nm深截止的光学滤光片。

2 膜系设计

高频透射、低频截止的高通滤波器,作为日盲探测系统中的关键部件,其技术参数如表1所示其中JGS1表示熔融石英。

表1 滤波器的技术参数
Table 1 Filter technical parameters

Parameter	Specification	
Substrate	JGS1	
Incident angle / (°)	0	
Spectrum range / nm	200-270	300-1200
Transmittance / %	≥50	<1

由表1可以看出,滤光膜光谱参数涵盖了短波紫外到近红外波段,有限的材料及宽抑制区,使得膜系的设计难度非常大。

2.1 材料的特性研究

根据参数要求,选取透明区在紫外到近红外波段的薄膜材料,目前可用的紫外光学材料十分有限,HfO₂是首选的高折射率材料,它在紫外区的折射率在2.0以上,但其反常色散出现在250 nm附近,难以满足200~270 nm波段的设计要求。Al₂O₃、LaF₃在这一波段具有良好的透明特性,属于中折射率材料,由于高折射率材料难以满足设计要求,故可将其作为高折射率材料考虑^[10-11]。紫外低折射率材料主要有UV-SiO₂、MgF₂、AlF₃等,AlF₃和MgF₂具有比UV-SiO₂更低的折射率,经过实验验证,AlF₃的应力要比MgF₂小很多。

Al₂O₃和AlF₃作为高低折射率材料,能够满足透明区的要求,但是由于两种材料折射率的差值只有0.22~0.27,根据滤光膜系设计理论,会导致膜层数增大,镀制困难。另外本研究的主要设计难点在于宽波段的截止深度,为了抑制此波段的背景杂散光,引入了金属Al,其紫外区吸收率比较小,折射率及消光系数如图1所示,根据

$$R = \left[\frac{1 - (n - ik)}{1 - (n + ik)} \right]^2 = \frac{(1 - n)^2 + k^2}{(1 + n)^2 + k^2} \quad (1)$$

可知(式中R为反射率,n、k分别表示折射率和消光系数),随着波长增加,Al的反射率呈现整体增加的趋势,故可在保证紫外区具有一定透射率的同时,实现可见区及红外区截止。

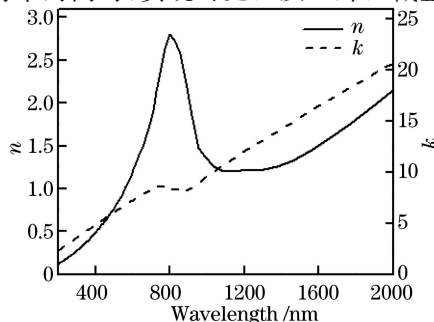


图1 金属Al膜的光学常数

Fig. 1 Optical constants of metal Al films

2.2 膜系设计方案

根据日盲紫外滤光膜的特性以及理论模型分析,选择法布里-珀罗(F-P)结构进行膜系设计^[12]。

如图 2 所示,先假定无吸收情况,该滤光片两侧反射膜分别以界面 a 和 b 表示,两个界面的反射系数和透射系数可分别表示为 $r_a^- \exp(i\phi_a)$, $r_b^+ \exp(i\phi_b)$, t_a^+ , t_b^+ , 其中 ϕ_a 、 ϕ_b 为反射膜的反射相位。则此结构的透射系数为:

$$t = \frac{t_a^+ t_b^+}{1 - |r_a^-| |r_b^+| \exp[i(\phi_a + \phi_b - 2\delta)]}, \quad (2)$$

式中 $\delta = 2\pi nd/\lambda$, 为谐振层的相位厚度,其中 d 为膜厚。在滤光片两侧介质相同的情况下,其透射率为:

$$T = \frac{|t_a^+|^2 |t_b^+|^2}{(1 - |r_a^-|^2 |r_b^+|^2) \left\{ 1 + \frac{4 |r_a^-| |r_b^+|}{(1 - |r_a^-| |r_b^+|)^2} \sin^2 \left[\frac{1}{2} (\phi_a + \phi_b - 2\delta) \right] \right\}}, \quad (3)$$

由 $T_a = |t_a|^2$, $T_b = |t_b|^2$, $R_a = |r_a|^2$, $R_b = |r_b|^2$, 令 $R = \sqrt{R_a R_b}$, $T_s = (T_a T_b) / (1 - R)^2$, $F = (4R) / (1 - R)^2$, $\theta = 1/2(\phi_a + \phi_b - 2\delta)$, 则:

$$T = \frac{T_s}{1 + F \sin^2 \theta}. \quad (4)$$

(4)式给出了 F-P 结构滤光膜透射率的基本表达式,当 $\theta = 2\pi$ 时,其峰值透射率 $T_{\max} = T_s$; 当 $\delta = (\phi_a + \phi_b)/2$ 时,其峰值波长位置为:

$$\lambda_f = \frac{4\pi}{\phi_a + \phi_b} nd. \quad (5)$$

对于一般 F-P 滤光膜来说, $T_a = T_b$, $R_a = R_b$, 其峰值透射率为:

$$T_{\max} = T_s = \frac{T^2}{(1 - R)^2}. \quad (6)$$

但是,和一般 F-P 滤光膜不同,金属反射膜除了考虑其反射率之外,吸收因素也是必须考虑的。滤光膜的吸收损耗有很强的共振加强效应,而这种加强效应与反射层的反射率密切相关。滤光膜的总消耗是由滤光膜的反射层和谐振层共同决定的。需要对(6)式进行修正,设反射层的吸收率为 A , 则该滤光膜的峰值透射率为:

$$T'_{\max} = \frac{T^2}{(T + A)^2} = \frac{1}{(1 + A/T)^2}. \quad (7)$$

使用光度法及软件拟合得到 AlF_3 、 Al_2O_3 的光学常数,并通过椭圆偏振法得到金属 Al 的光学参数。设计 F-P 滤光膜基础结构为 sub|MLM|air, 其中 M 代表 Al 膜, L 代表 AlF_3 膜, sub 为 JGS1 基片, air 表示空气。调整谐振层厚度,能够改变膜系峰值点位置,根据(7)式,可以计算出各峰值透射率,并通过软件计算 200~270 nm 平均透射率,图 3 给出了峰值点在 200~270 nm F-P 滤光膜峰值透射率及平均透射率的变化趋势,可以看出,峰值透射率随峰值波长的增大而降低,而平均透射率在 230 nm 出现极大值。

综合考虑,选择峰值波长为 230 nm 的方案进行设计,其反射层吸收率为 9.81%,透射率为 51.08%,基底透射率为 91.06%,F-P 结构峰值透射率为 $T'_{\max} = 64.08\%$, 在 200~270 nm 平均透射率为 53.11%, 在

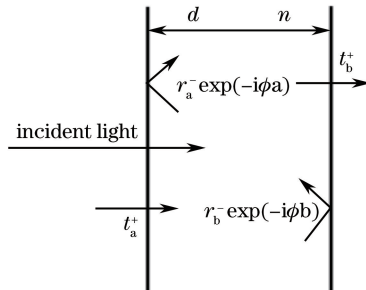


图 2 F-P 结构示意图

Fig. 2 F-P structure diagram

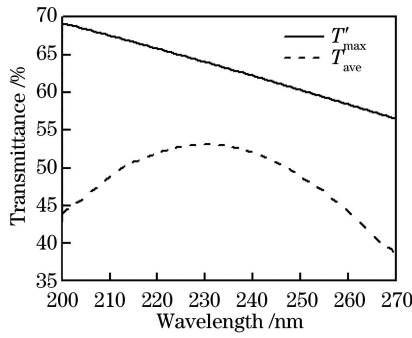


图 3 F-P 滤光膜的峰值透射率及平均透射率的变化趋势

Fig. 3 Trends of peak transmittance and average transmittance of F-P filter film

300~1200 nm 波段平均透射率为 1.86%，但仍不满足要求。

经过分析和理论验证,使用 F-P 单腔结构进行设计时,300~500 nm 波段截止度很低,而采用 F-P 多腔结构会导致 200~270 nm 波段透射率降低,故需要调整膜系结构进行设计。通过软件模拟,在原有膜系基础上,增加一组匹配膜系结构,如图 4 所示。

匹配结构由 Al_2O_3 、 AlF_3 两种材料组成,经过多次模拟及优化,最终膜系为 sub|M 0.898L M 0.5H 0.346L 0.909H 0.911L 0.910H 0.562L|air。设计结果如图 5 所示,在 200~270 nm 波段,平均透射率为 54.26%,在 300~1200 nm 波段,平均透射率为 0.93%。

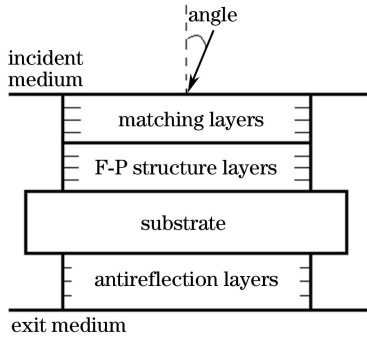


图 4 膜系设计结构

Fig. 4 Designed structure of film system

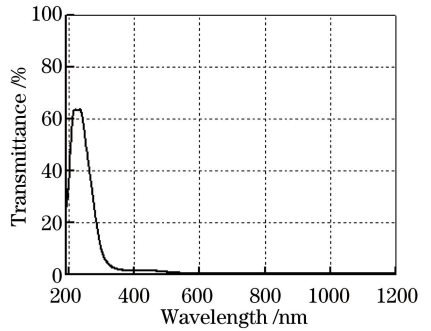


图 5 设计的膜系的理论透射光谱曲线

Fig. 5 Theoretical transmission spectrum curve of designed film system

为了在日盲区获得较高的透射率,减少基底后表面能量反射损失,在基底后表面镀制 200~270 nm 波段的减反射膜,其基础结构为 sub|(0.5LH0.5L)³|air,优化后的设计曲线如图 6 所示,在 200~270 nm 波段,该结构的平均透射率为 99.77%。

将前后表面膜系导入软件模拟,理论透射光谱曲线如图 7 所示,在 200~270 nm 波段,平均透射率为 54.15%,在 300~1200 nm 波段,平均透射率为 0.90%。

3 薄膜制备

该实验沉积设备为 OPCO-900 真空镀膜机,设备配有双“e 型”电子枪、阻蒸、考夫曼离子源、双探头及 SQC-310 膜厚控制仪。实验蒸镀 Al_2O_3 采用电子束加热法,蒸镀 AlF_3 使用电阻加热法,用超声波清洗基片,当真空度达到 1.0×10^{-3} Pa 时,使用离子源轰击基片 10 min,沉积工艺参数如表 2 所示。

表 2 AlF_3 、 Al_2O_3 沉积工艺参数

Table 2 AlF_3 , Al_2O_3 deposition process parameters

Material	Substrate temperature / $^{\circ}C$	Degree of vacuum /(10^{-3} Pa)	Deposition rate /($nm \cdot s^{-1}$)
AlF_3	Unbaked	1.0	1.0
Al_2O_3	Unbaked	1.0	0.3

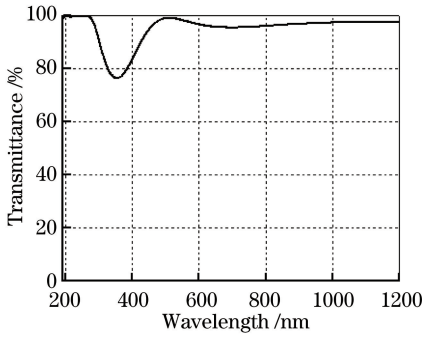


图 6 减反射膜理论透射光谱曲线

Fig. 6 Theoretical transmission spectrum curve of antireflection coatings

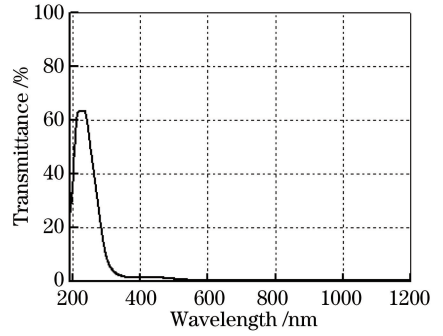


图 7 理论双面透射光谱曲线

Fig. 7 Double-sided transmission spectrum curve of theoretical design

实验中,由于 Al 膜的厚度较薄,其敏感度较高,厚度误差会直接影响薄膜的性能,从图 8 可以看出,当 Al 膜的物理厚度为 13.6 nm 时,200~270 nm 波段的平均透射率为 49.78%;而当其物理厚度为 15.6 nm 时,300~1200 nm 波段的平均透射率为 1.18%,均未达到技术要求。因此实验对 Al 膜厚度的控制精度要求较高。

对于金属 Al 膜的蒸镀,传统工艺是使用电阻加热法和磁控溅射法^[13-14],这两种方法工艺较成熟但缺点也很明显,前者对于金属的厚度及沉积速率控制比较困难,一般会应用在对厚度误差要求较小的高反射膜,即使是在滤光膜中应用,也会因为其较差的稳定性,使实验不具备可重复性;后者由于靶材种类的限制,同样不适合在此使用。因此尝试使用电子束加热蒸发的方法蒸镀金属 Al。

实验选用纯度为 99.999% 的 Al 作为镀膜材料,在石墨坩锅中蒸镀。由于 Al 的化学性质活泼,易氧化,高速蒸镀有利于保证其稳定性,传统阻蒸工艺的沉积速率控制在 1.5 nm/s 以上。但是过高的沉积速率不利于控制,易产生较大的厚度误差,所以速率的选择是沉积工艺的一个重要因素。选取了不同的沉积速率进行多次实验,分别测试其光谱曲线并进行分析,图 9 为典型的透射率曲线。

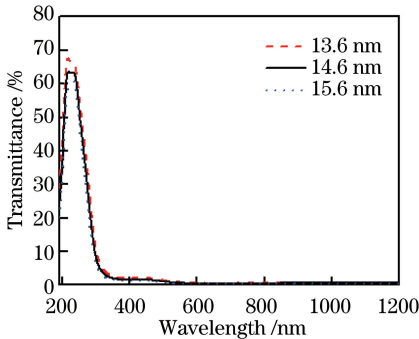


图 8 Al 膜厚度误差对光谱的影响

Fig. 8 Effect of Al film thickness error on the spectrum

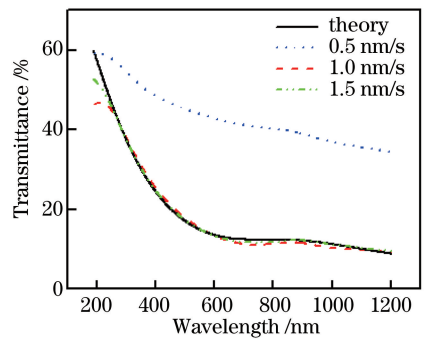


图 9 不同沉积速率下的 Al 膜光谱测试曲线

Fig. 9 Al film spectrum curves with different deposition rates

实验在 JGS1 基底上镀制 $\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$ 三层膜系,根据膜系的透射率曲线,使用软件模拟得到单层 Al 的透射率曲线。从图 9 中可以看出,速率为 0.5 nm/s 的曲线与理论偏差很大,速率为 1.0 nm/s 与 1.5 nm/s 的透射率曲线相近,且都可以通过设计得到符合系统要求的膜系。考虑到控制误差的影响,沉积速率最终选择 1.0 nm/s。Al 的沉积工艺如表 3 所示。

表 3 金属 Al 沉积工艺参数

Table 3 Deposition process parameters of metal Al

Material	Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	Degree of vacuum /Pa	Deposition rate / $(\text{nm}\cdot\text{s}^{-1})$
Al	Unbaked	1.0×10^{-3}	1.0

4 测试结果及分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对实验滤光片的光谱曲线进行测试,如图 10 所示。该滤光膜在

200~270 nm 波段,平均透射率达到 49.79%,在 300~1200 nm 波段,平均透射率为0.92%。测试结果在 200~270 nm 波段与设计曲线相差较大。通过对比分析,认为这是由基底及介质材料在 200 nm 附近存在吸收,以及在制备过程中存在厚度控制误差导致。通过逆向反演法分析,认为是由 F-P 结构谐振腔(第二层)敏感度较高所致,如图 11 所示。谐振层厚度误差越大,薄膜透射率变化越大,实验结果与设计的膜系敏感度分析一致。

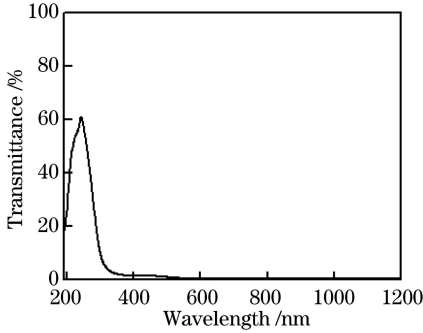


图 10 实际光谱测试曲线

Fig. 10 Actual spectral test curve

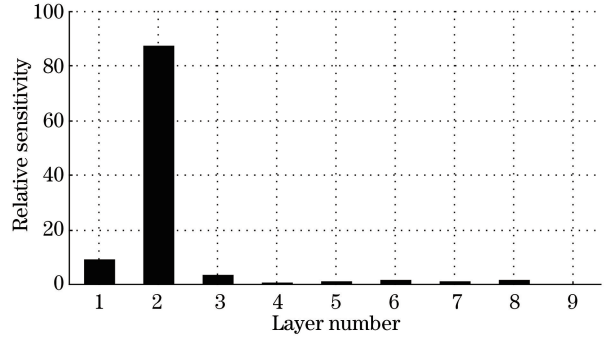


图 11 膜层独立敏感度示意图

Fig. 11 Schematic diagram of independent sensitivity for the film

对于敏感度较高的膜层,可以从设计上进行优化,也可以通过减小膜厚误差进行控制。由于实验采用两种结构组合,简单的优化会导致两种结构的匹配度下降,对整体光谱影响较大。因此只能适当减小谐振腔 AlF_3 的沉积速率来减小膜厚控制误差。当 AlF_3 的沉积速率降为 0.6 nm/s,光谱曲线如图 12 所示,测试结果有了很大的改善,在 200~270 nm 波段,平均透射率达到 51.21%,在 300~1200 nm 波段,平均透射率为 0.90%。

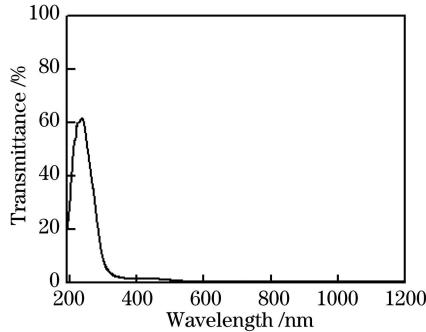


图 12 调整后的实际光谱测试曲线

Fig. 12 Adjusted actual spectral test curve

5 结 论

根据膜系设计理论,选择 Al、 AlF_3 两种材料组成 F-P 结构,结合 Al_2O_3 、 AlF_3 组成的匹配结构,实现了滤光膜系的设计。采用电子束热蒸发的方法沉积金属 Al,通过对不同沉积速率的实验分析,结合控制误差分析,最终选择 1.0 nm/s 的沉积速率进行 Al 膜的镀制,保证了其光学性能,同时有效降低了厚度误差。以逆向反演法分析测试曲线,结合膜层敏感度,找到误差产生的原因,降低谐振层材料的沉积速率,制备出日盲区高透射率、近紫外到近红外深截止的滤光膜。而进一步改进工艺、减少膜厚控制误差、实现更高的透射率以及更深的截止度,将是今后研究工作的重点。

参 考 文 献

- [1] Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子进展, 2014, 51(2): 022202.

- [2] Kou Yang, Fu Xiuhua, Liu Feng'e, *et al.*. Design and preparation of ultraviolet signal acquisition filter film in optical warning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1131001.
寇 洋, 付秀华, 刘凤娥, 等. 光学告警系统中紫外信号采集滤光膜的研制[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1131001.
- [3] Zhao Taifei, Feng Yanling, Ke Xizheng, *et al.*. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2229-2235.
赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政, 等. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2229-2235.
- [4] Liu Ju, Jia Honghui, Yin Hongwei. Development of military ultraviolet technology[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(6): 60-64.
刘 菊, 贾红辉, 尹红伟. 军用紫外光学技术的发展[J]. *光学与光电技术*, 2006, 4(6): 60-64.
- [5] Wang Xi, Fang Xiaodong, Nie Jinsong. Military ultraviolet technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 58-61.
王 玺, 方晓东, 聂劲松. 军用紫外技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 58-61.
- [6] Shute R D. Electrodeless ultraviolet communications system[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1995, 10(11): 2-7.
- [7] Dong Zheng. Research on automatic target recognition for solar-blind ultraviolet detection system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011: 1-8.
董 政. 日盲紫外探测系统自动目标识别的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 1-8.
- [8] Li W D, Chou S Y. Solar-blind deep-UV band-pass filter (250-350 nm) consisting of a metal nano-grid fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 931-937.
- [9] 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. 日盲系统紫外诱导透射滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0507002.
- [10] Zhong Disheng. Vacuum coating-selection and application of optical material[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001: 186-188.
钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001: 186-188.
- [11] Fan Zhengxiu, Shao Jianda, Yi Kui, *et al.*. Optical thin film and its application[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014: 163-168.
范正修, 劭建达, 易 葵, 等. 光学薄膜及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014: 163-168.
- [12] Tang Jinfu, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 118-123.
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: 118-123.
- [13] Fu Xiuhua, Xiong Shifu, Liu Dongmei, *et al.*. Study and fabrication broad spectral absorbing film in second-order correlate imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(10): 1031001.
付秀华, 熊仕富, 刘冬梅, 等. 二阶关联成像系统宽光谱吸收膜研制[J]. *光子学报*, 2016, 45(10): 1031001.
- [14] Deng Wenyuan, Jin Chunshui. Fabrication of solar-blind induced transmission filters by ion-beam sputtering methods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2884-2890.
邓文渊, 金春水. 离子束溅射制备“日盲”紫外诱导透射滤光片[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2884-2890.