

紫外日盲通信系统中滤光膜的研究

付秀华 寇 洋* 刘冬梅 张 静 朱 浩

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 紫外日盲通信凭借其优良的光学特性被越来越多地应用在光学系统中。紫外日盲通信系统与常规通信系统相比,具有结构简单、虚警率低、灵敏度高、隐蔽性强等独特优势。为了满足紫外通信系统的技术要求,提高信号采集效率,需要一种日盲光谱滤光膜来保证其稳定工作。根据薄膜理论,选择合适的紫外薄膜材料,在设计方面通过对独立敏感度和误差分布的分析与修正,降低了膜层的敏感度,同时在薄膜制备过程中通过逆向测试分析法,解决了由于设备与控制误差导致的膜厚问题。制备的紫外滤光膜在240~280 nm透射率为86%,290~360 nm波段截止度小于0.2%,并通过了国军标的相关环境测试。

关键词 薄膜;紫外日盲通信;敏感度分析;逆向测试分析

中图分类号 O484.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0731001

Research of Ultraviolet Filter Film in Solar Blind Communication System

Fu Xiuhua Kou Yang Liu Dongmei Zhang Jing Zhu Hao

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Ultraviolet solar blind communication with its excellent optical characteristics has been more and more applied in the optical system. Compared with the conventional communication systems, the advantages of ultraviolet solar band communication are simple structure, low false alarm rate, high sensitivity and strong concealment, etc. In order to satisfy the requirement of ultraviolet communication system and to improve the efficiency of signal acquisition, a high-performance ultraviolet filter film is required to ensure the system's steadiness. Appropriate ultraviolet film material are selected according to the thin film theory. In the aspect of film design, the independent sensitivity and errors distribution are analyzed and amended to reduce the sensitivity of the film. In the meantime, the reverse test analysis is used to solve the problem of film thickness which is due to the equipment error and control error. Eventually, the average transmittance of the film is 86% at the band of 240~280 nm and the rejection ratio is less than 0.2% at the band of 290~360 nm. The film has passed the relevant environmental tests of national military standard.

Key words thin films; ultraviolet solar blind communication; sensitivity analysis; reverse test analysis

OCIS codes 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310

1 引 言

在军事探测、生物工程、国防科技、工业生产等各个领域中,紫外(UV)光学都有着广泛的应用^[1-3],其中日盲型光电倍增管(SBP)作为装置于空间卫星上进行紫外通信的关键部件,其优势在于

它具有较宽的电带宽、较好的日盲紫外光获取率和较高的量子效率^[4]。而对于非日盲紫外波段,则要求衰减并消除其他信号干扰以降低背景噪声影响。因而,需要一种日盲光谱滤光膜来保证其稳定工作。

收稿日期:2014-01-12;收到修改稿日期:2014-02-25

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: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:13756902833@126.com

本文通过对紫外材料的特性研究和对紫外膜系的优化设计,重点解决了滤光膜的优化设计和制备过程中由于厚度误差导致的膜层不匹配等问题。

2 膜系设计

根据日盲型光电倍增管的使用要求,其光谱性能在 240~280 nm 处高透射,290~360 nm 波段深度截止。

2.1 膜料的选择

对于紫外波段而言,大多数镀膜材料都会出现不同程度的材料吸收,所以能够应用于该波段的镀

膜材料十分有限^[5-6]。在日盲波段满足要求的紫外常用材料有 Al_2O_3 、 HfO_2 、 MgF_2 、 LaF_3 、 UV-SiO_2 。通过多次的实验测试,最终选择的高折射率膜料为 HfO_2 ,低折射率材料为 MgF_2 ^[7]。

2.2 膜系设计

考虑到滤光膜的紫外特性,选用短波通 0.5LH0.5L 作为紫外滤光片的基础膜系。膜系中 L 为低折射率膜层, H 为高折射率膜层。该结构为一标准对称膜系,根据薄膜矩阵计算方法,其特征矩阵值为单层膜的特征矩阵的连乘积,即

$$\mathbf{M}_{pq|p} = \begin{bmatrix} \cos \delta_p & i \sin \delta_p / \eta_p \\ i \eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_q & i \sin \delta_q / \eta_q \\ i \eta_q \sin \delta_q & \cos \delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_p & i \sin \delta_p / \eta_p \\ i \eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 η_p 和 η_q 分别为 p 与 q 层的等效折射率; δ_p 和 δ_q 分别为 p 与 q 层的有效相位厚度。对于对称膜系的特征矩阵来说,其性质可以完全等同于单层膜的特征矩阵,因此上述对称膜系可等效成一单层膜

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i \sin \Gamma / E \\ i E \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中相位厚度 Γ 为

$$\Gamma = \arccos M_{11} = \arccos \left[\cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \sin \delta_q \right]. \quad (3)$$

针对这一结果,可以很容易地推广到任意层数组成的对称膜系。

通过进一步计算可知,文中给出的对称膜系 $(pqp)^S$ 的特征矩阵 \mathbf{M}^S 可等同为各特征矩阵的乘积,公式为

$$\mathbf{M}^S = \begin{bmatrix} \cos S\Gamma & i/(E \sin S\Gamma) \\ iE \sin S\Gamma & \cos S\Gamma \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 S 为膜层周期数,由以上分析可知

$$\mathbf{M}^S = \begin{bmatrix} \cos S\Gamma & i/(E \sin S\Gamma) \\ iE \sin S\Gamma & \cos S\Gamma \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(5)式证明,一个对称膜系在光谱透射带中仍存在等效折射率 E_s (可等效于基本膜系的等效折射率),其等效相位厚度为 Γ_s (可等效于基本膜系等效厚度的 S 倍)。针对这一结果,可以很容易推广到任意层数组成的对称膜系。在膜系设计的截止波段,可利用膜堆组合叠加的方法进行波段的截止和展宽,然而随着叠加层数的增加,紫外通带波纹会变得密集,如果不能对波纹进行有效压缩,那么滤光片特性就会受到影响。上述对称膜系的等效层理论成为分析和

设计紫外带通滤光片的有效工具,在对称膜系的两端添加匹配层,使它与入射介质及基片匹配。可把插入层与等效层单纯当作多层膜边界的减反射膜,只需针对多层膜系在紫外特定波长进行计算,便可起到有效压缩通带波纹的效果^[8]。

根据上述膜系设计理论,利用 Macleod 软件进行膜系设计,初始膜系为 $G | B(0.5LH0.5L)^S B' | A$,其中符号 H 和 L 分别代表 HfO_2 和 MgF_2 的 $\lambda/4$ 光学厚度, B, B' 表示对称膜系的匹配层, G 表示融石英基底, A 表示入射介质为空气。在对膜系进行 Targets 设定后,利用 Simplex 优化方法对膜系进行优化,经过优化后的膜系为 $G | 0.844L 0.143H 0.122L 1.663H(0.5LH0.5L)^{12} 1.359H 0.2661L 0.107H 0.581L | A$,其设计曲线如图 1 所示。

为了提高紫外波段透射率,在另一面镀制紫外增透膜,通过膜系设计软件,采用 HfO_2 和 MgF_2 作为高低折射率材料,其在 200~400 nm 之间理论光谱曲线如图 2 所示。

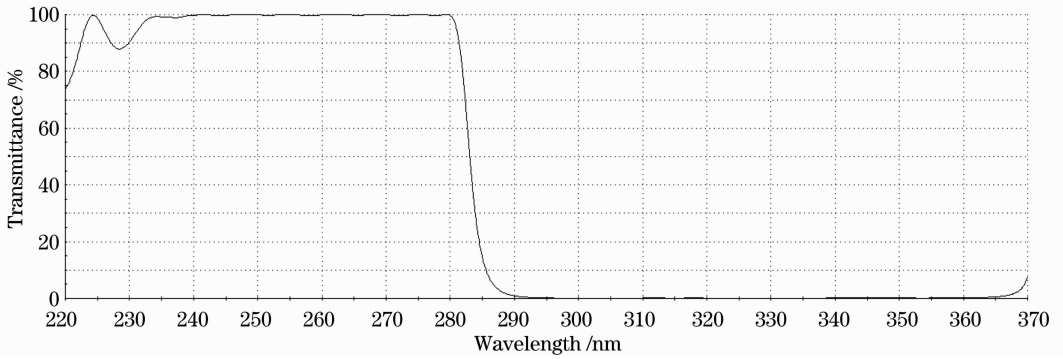


图 1 紫外滤光膜的设计曲线

Fig. 1 Theoretical transmittance curve of the UV filter film

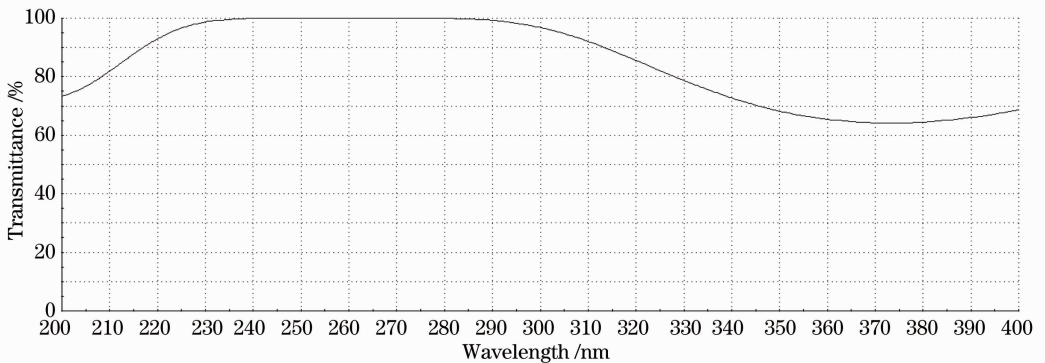


图 2 紫外增透膜的设计曲线

Fig. 2 Theoretical transmittance curve of the UV anti-reflection film

3 薄膜制备

薄膜制备是在 TXX-700 型真空镀膜机内进行的,该设备安装有双电子枪以及考夫曼离子源辅助淀积系统,同时还配有双探头的 IC/5 石英晶体控仪。考夫曼离子源能够在蒸镀前对基片进行清洗,去除在基底上产生的二次污染,同时提高成膜的致密度,有效地改善薄膜质量。

4 测试结果及分析

4.1 光学性能测试

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对实验样品进行检测,测试曲线如图 3 所示。

由图可知,光谱曲线在紫外透射区域误差较大,且出现截止波段漂移现象。利用分析软件对测试结果进行模拟后,发现截止波段漂移问题的原因主要是高低折射率工具因子存在误差,导致截止带整体漂移。通过调整工具因子参数使光谱曲线往长波方向移动。针对紫外透射率误差较大的问题,利用 Macleod 软件中 Sensitivity Tools 功能对独立敏感

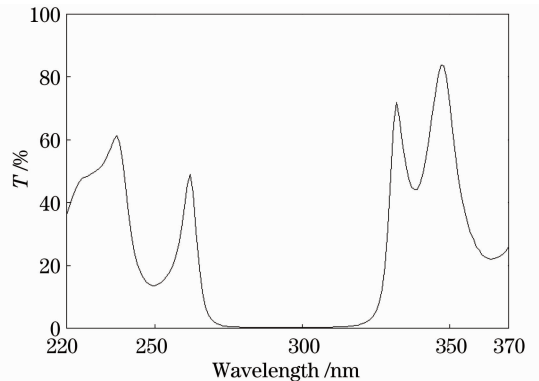


图 3 紫外滤光膜的实测曲线

Fig. 3 Measured spectrum curve of the UV filter film 度和敏感度分布进行分析,结果如图 4、5 所示。

由图 4、5 分析可知,膜系两端部分膜层敏感度较高,主要是由于膜层厚度差异较大导致。由于紫外波段膜层较薄,较大的厚度差异会直接影响晶控探头的探测精度,从而改变透射区光谱曲线,利用软件中的 Thickness Constraint 功能对每层的厚度进行约束,并对膜系进行二次优化,优化后的独立敏感度和敏感度分布如图 6、7 所示。

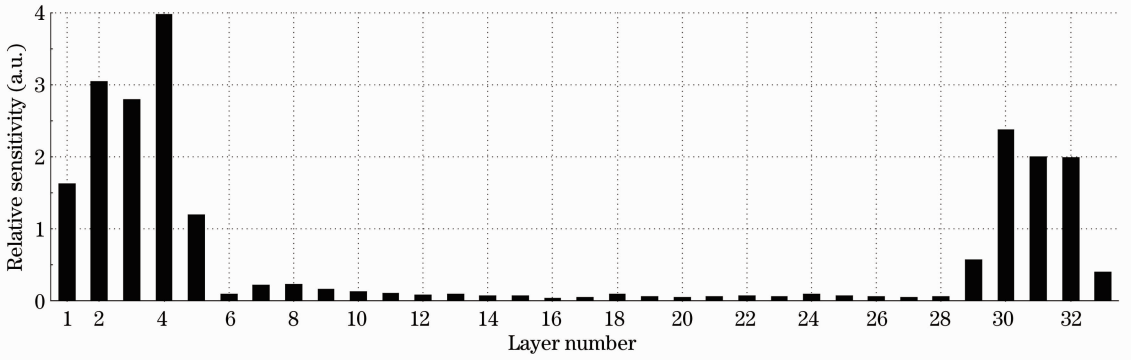


图 4 紫外滤光膜系独立敏感度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the independent sensitivity for the UV filter film

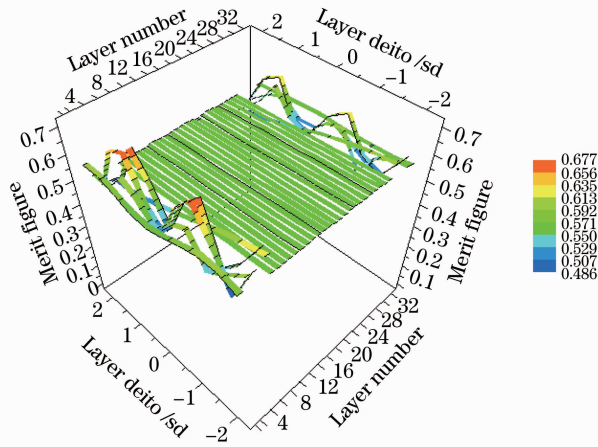


图 5 紫外滤光膜系敏感度分布图

Fig. 5 Schematic diagram of the sensitivity distribution for the UV filter film

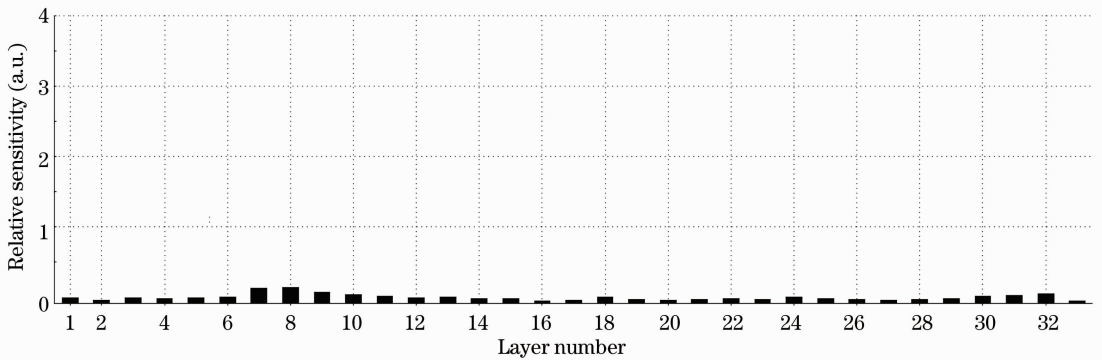


图 6 优化后膜系独立敏感度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the independent sensitivity for the optimized UV filter film

可以看出,通过约束优化后的膜系的厚度较均匀,灵敏度有明显下降,从而降低晶控探头的探测误差。最后再利用 Errors Tool 功能绘制模拟图,将厚度标准偏差值设定为 0.01%,其主要原理是在限定容差厚度范围内进行随机厚度匹配,得出模拟制备曲线。通过曲线模拟可以直观地看出膜系的公差

范围,从而确定膜系的可行性,选取 10 次模拟曲线进行对比,优化前后膜系对比如图 8、9 所示。

通过对比可以看出,优化前膜系透过区波动较大,容易产生透射率骤降现象,而优化后的曲线重合度较好。降低制备难度,利用优化后膜系对薄膜进行制备后其光谱曲线如图 10 所示。

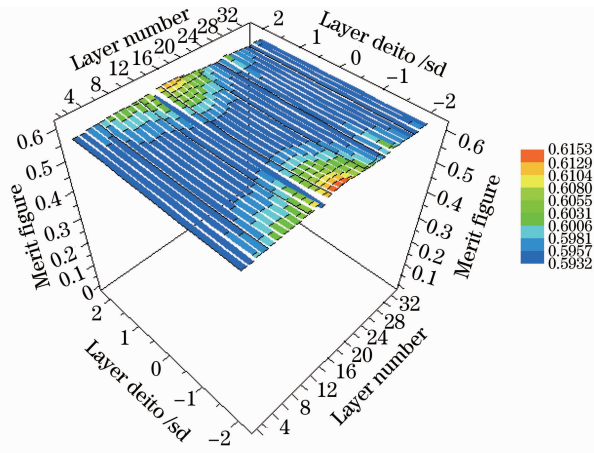


图 7 优化后膜系敏感度分布图

Fig. 7 Schematic diagram of the sensitivity distribution for the optimized film

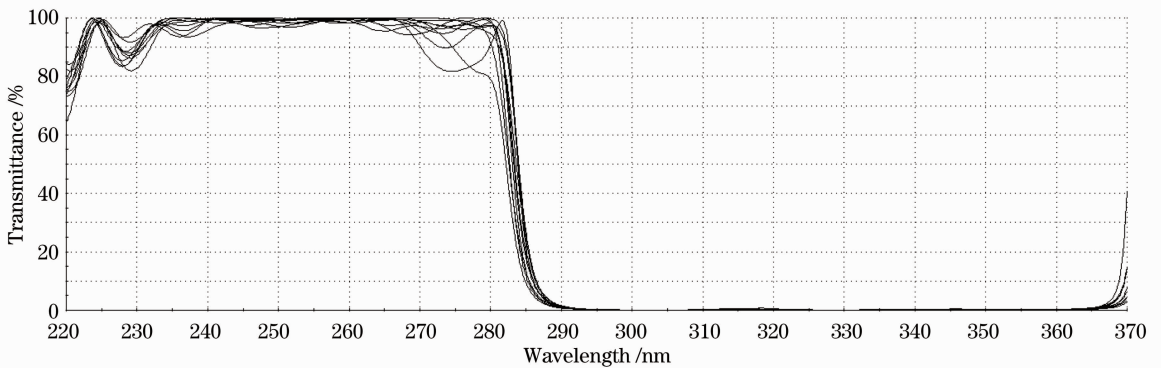


图 8 优化前膜系模拟曲线图

Fig. 8 Simulated transmittance curves of the film before optimization

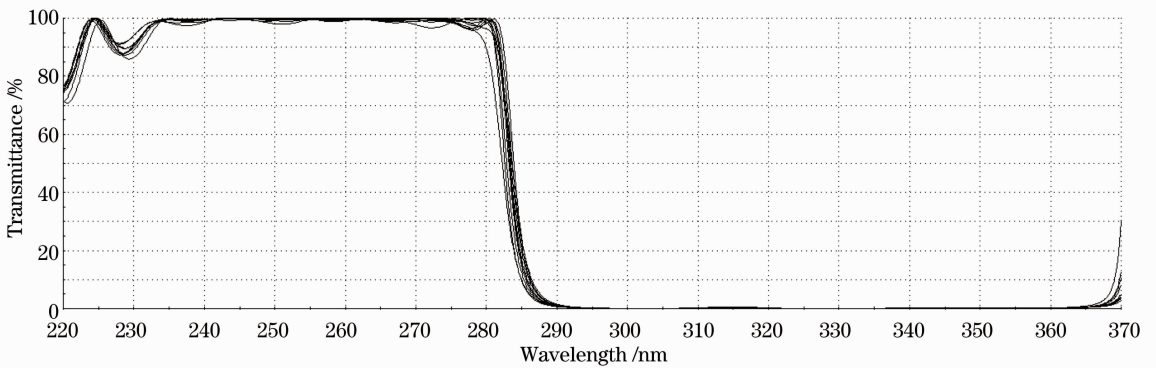


图 9 优化后膜系模拟曲线图

Fig. 9 Simulated transmittance curves of the film after optimization

由测试曲线可以看出,截止区域满足设计要求,紫外透过波段也得到显著的提高和改善,但与设计曲线仍存在差异。将实测数据导入 TFC 软件中对其进行逆向分析,模拟出实际蒸镀的各膜层厚度,将其与设计膜层厚度进行对比,结果如图 11 所示。

从对比图中可以看出,利用逆向分析模拟出的膜层厚度误差随膜层数的增加而逐渐变大,由于镀制总厚度的增加,石英晶体探测频率会随之下降,其

灵敏度就会相对降低,微量的厚度误差会对光谱曲线产生一定程度的影响^[9]。为了减少膜厚控制误差,在沉积膜系后半部分膜层时换用另一个监控探头进行监控,重新修改参数后再次进行镀制。在基片的背面镀制紫外增透膜,最终所得的双面的光谱曲线如图 12 所示。测试结果如表 1 所示。

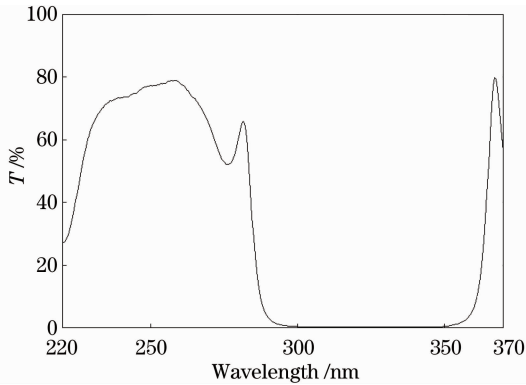


图 10 优化膜系后滤光膜实测曲线

Fig. 10 Measured spectrum curve of film after optimization

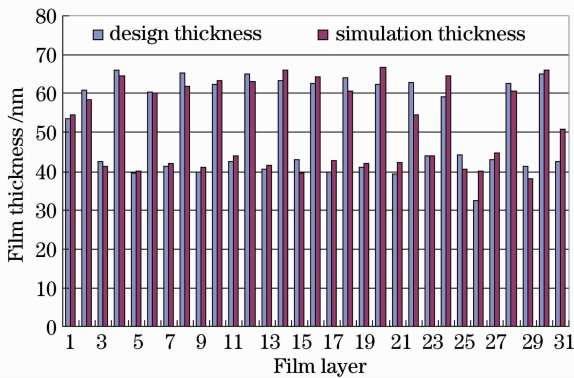


图 11 模拟厚度与实际厚度对比示意图

Fig. 11 Contrast diagram of the simulated thickness and the design thickness

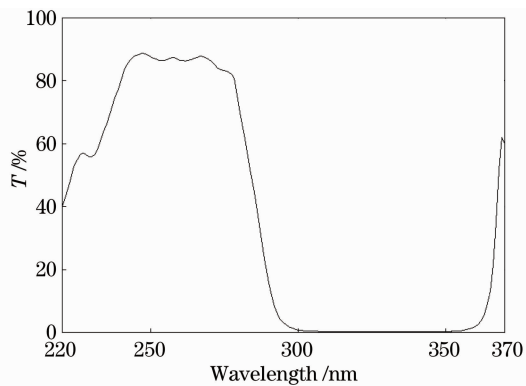


图 12 调整工艺后滤光膜实测曲线

Fig. 12 Measured spectrum curve of the film after adjusting the process

表 1 测试结果

Table 1 Test result

Wavelength /nm	Mean transmittance /%
240~280	86.64
300~360	<0.2

各波段透射率值均在要求误差范围之内,满足设计要求。但在紫外透过波段与理论设计相比仍然

有所差距,经分析是由于基底与蒸发材料在该波段仍存在少量吸收导致。

4.2 环境测试

1) 附着性测试:将 2 cm 宽、剥离强度大于 3 N/cm²的胶带粘附在膜层表面,随后沿基片垂直方向迅速拉起,重复 10 次,膜层无脱落,无损伤。

2) 高低温测试:在无外包装的情况下,将测试片放入试验箱中,该高低温试验箱的升降温速度均小于 2 °C/min,在(-40±1) °C低温中保持约 6 h,在(60±1) °C高温中保持约 6 h,测试片未出现破裂、脱落、起皱等现象。

3) 湿度测试:在(50±1) °C、相对湿度(96±1)%的相对湿度环境下,放置 24 h,膜层的外观未出现明显变化。

4) 盐水测试:把测试片浸在 5%(质量分数)的食盐溶液中,将其放入烘箱内,调温到(40±1) °C并持续 24 h。随后取出测试片,清洁表面并进行检测,膜层满足使用要求。

5 结 论

利用 Macleod 软件针对膜系设计与工艺参数进行优化调整,最终制备了 240~280 nm 处平均透射率 86.64%,290~360 nm 波段平均透射率小于 0.2%的紫外滤光膜。该滤光膜主要应用于紫外光通信系统以达到增强光信号的目的,主要通过对膜系独立敏感度的分析与修正解决了由于膜层不均导致的光谱差异。在镀制过程中,由于设备误差与控制误差,导致膜厚误差较大,通过逆向分析最终选用双探头分别监控的方法以提升光谱稳定性。

虽然紫外滤光膜满足使用要求,但在紫外透过波段与理论设计相比仍然有差距,所以进一步减少紫外材料在该波段的吸收或寻找更合适的镀膜材料是今后进一步研究的方向。

参 考 文 献

- 1 J J Puschell, R Bayse. High data rate ultraviolet communication systems for the tactical battlefield [C]. Tactical Communications Conference, Tactical Communications. Challenges of the 1990's, Proceedings of the. IEEE, 1990, 1: 253-267.
- 2 G A Shaw, M L Nischan. Short-range NLOS ultraviolet communication testbed and measurements [C]. Aerospace Defense Sensing, Simulation, and Controls. International Society for Optics and Photonics, 2001: 31-40.
- 3 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.

- 4 Jin Qiang. Solar blind photomultipliers [J]. Acta Electronica Sinica, 1982, 2: 87-89.
金强. 日盲型光电倍增管[J]. 电子学报, 1982, 2: 87-89.
- 5 Zhong Disheng. Vacuum Coatin-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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.

栏目编辑: 韩峰