

doi: 10.3788/gzxb20154411.1131003

电视测角仪光学系统复合薄膜的研制

付秀华,熊仕富,刘冬梅,张静,潘永刚

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

摘要:为了提高电视测角仪光学系统的性能,满足电视测角仪在测量导弹偏离瞄准线的角偏差和转动角速度中的要求,在设计中使用薄膜技术.依据光学薄膜设计理论,采用金属-介质组合结构设计了宽光谱分光膜和内反射膜,解决了宽光谱光束倾斜入射时产生的偏振分离问题;通过优化沉积工艺参量、离子辅助参量以及真空退火处理,解决了内反射膜的镀膜问题.实验测试满足系统使用要求,并通过了国军标的相关环境测试.

关键词:薄膜;分光膜;内反射膜;偏振分离;真空退火

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)11-1131003-6

Study and Fabricate of TV Goniometry Optics Composite Film

FU Xiu-hua, XIONG Shi-fu, LIU Dong-mei, ZHANG Jing, PAN Yong-gang

(Department of Optics and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Applying TV goniometry to measure the angle deviation and rotation angular velocity of missile deviated from the line of sight, and it has the advantage of high precision and low bias. Using of thin-film technology to improve performance of TV goniometry optical system is a more effective method. Based on the thin-film design theory, and metal-medium structure was used to design broad spectrum splitter film and internal reflecting film. This method solves the problem of polarization separation when a wide spectrum incident obliquely. By optimizing the deposition process and ion-assisted parameters, using vacuum annealing method to solve the problem of internal reflecting film stripping. After testing, the prepared film meets the requirement of the system and passes the relevant environmental tests of national military standard.

Key words: Thin-film; Splitter film; Internal reflecting film; Polarized separation; Vacuum annealing

OCIS Codes: 310.0310; 120.1880; 310.1860; 310.6860; 310.5448

0 引言

电视测角仪是反坦克导弹系统的重要组成部分^[1-2],在其制导的过程中弹标的精确提取起着至关重要的作用.随着测量准确度要求的不断增加,对元器件的技术要求相应提高.分光镜和反射镜作为电视测角仪光学系统中的关键部件,是影响光学系统成像的主要因素.

1970年 Costich 用对称周期膜系法设计出单波长全介质消偏振膜系^[3];1976年 Thelen 用三种膜料基于

膜层、基片和入射介质一体考虑的思想设计出了消偏振分束镜^[4],但材料的折射率对消偏振特性的影响极为敏感.2013年武汉东湖学院的高晓丹研制出了1260~1360 nm 波段 7:3 消偏振分光膜^[5];2015年长春理工大学的祖兴宇研制出了420~680 nm 波段与入射角 40°~50°变化的介质消偏振分光膜^[6],但关于金属-介质复合分光膜的研究少有报道.金属-介质组合的消偏振分光膜与全介质分光膜相比具有消偏振效果好,膜层薄,工艺过程相对容易,是制备宽带消偏振的有效方法.本文运用薄膜技术,研制出满足电视测量仪光学

基金项目:吉林省重大科技攻关专项(No. 20140203002GX)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和现代光学加工技术. Email: goptics@126.com

通讯作者:熊仕富(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为现代光学薄膜技术. Email: xsf_optics@126.com

收稿日期:2015-06-15;录用日期:2015-09-08

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

系统使用要求的复合薄膜,并达到测试要求.

1 膜系设计

电视测角仪光学系统分光器件由立方棱镜和斜方棱镜组成,其结构见图 1.

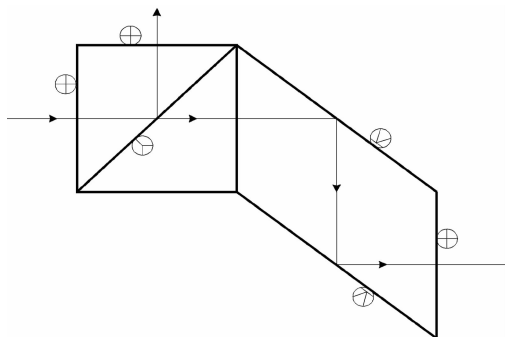


图 1 电视测角仪光路结构

Fig. 1 Structure diagram of TV goniometer light path

立方棱镜由两块相同的直角三棱镜组成,其中在一个斜面镀制分光膜,然后胶合在一起.在斜方棱镜的上下表面镀制内反射膜,光所经过的其他元件表面均需镀制增透膜.

1.1 增透膜的设计

应用双有效界面法并结合 TFCalc 膜系设计软件^[7],优化得到增透膜系 $\text{Sub} | 0.6259\text{H} 0.2368\text{L} 1.0613\text{H} 1.2036\text{L} | \text{Air}$,其中 H 代表高折射率材料 H_4 ,L 代表低折射率材料 MgF_2 ,Sub 表示折射率为 1.52 的 K9 玻璃基片,Air 表示空气,其设计曲线如图 2,500~900 nm 波段平均透过率为 99.30%.

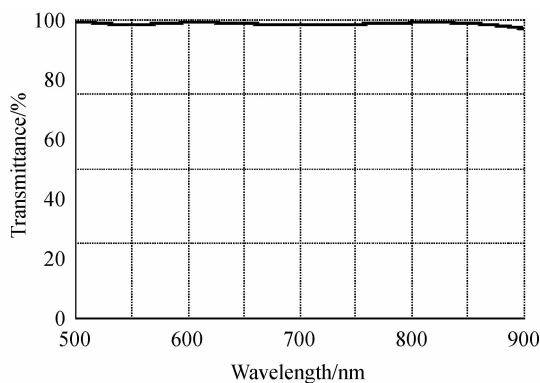


图 2 增透膜的理论设计光谱曲线

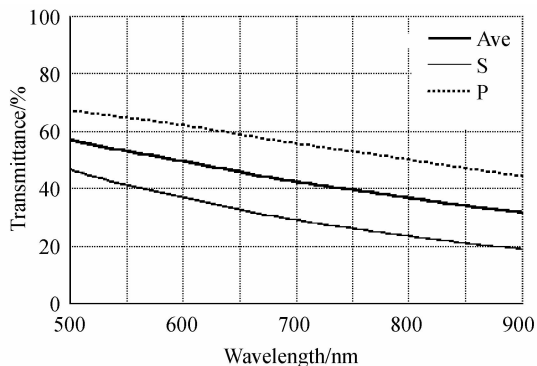
Fig. 2 Theoretical design spectrum curve of antireflection coating

1.2 分光膜的设计

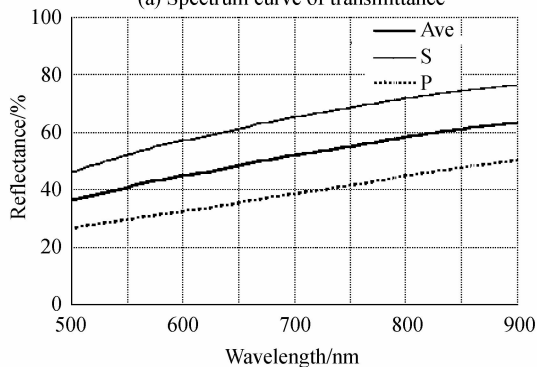
当光线垂直入射时,不产生偏振分离^[8].但光线倾斜入射时,由于 P 分量和 S 分量的有效折射率分别为 $\eta_p = n/\cos\theta$, $\eta_s = n\cos\theta$,引起偏振分离.通常偏振分离 Δn 定义为

$$\Delta n = \frac{\eta_p}{\eta_s} = \frac{n/\cos\theta}{n\cos\theta} = \frac{1}{\cos^2\theta} = \frac{1}{\left(1 - \frac{n_0^2 \sin^2\theta_0}{n^2}\right)}$$

式中 θ_0 和 θ 分别为入射角和折射角, n_0 是入射介质折射率, n 为膜层折射率^[9].显然,由此可知:偏振分离 Δn 随薄膜折射率 n 的增大而减小,随入射角的增大而增大,将多层膜的等效折射率取代单层膜折射率 n ,便可推广到多层膜.为获得尽可能高的光能量,要求分光膜的吸收要小,因而用金属作为分束膜时,选择消光系数小的材料.在 500~900 nm 波段银(Ag)膜是一种低吸收、宽反射的金属膜,它在 45°入射时的偏振效应较小,所以选择 Ag 作为分光膜的金属材料.单层 Ag 膜作为立方棱镜宽带消偏振分光镜是不理想的,如图 3.



(a) Spectrum curve of transmittance



(b) Spectrum curve of reflectivity

图 3 单层 Ag 膜分光膜理论设计光谱曲线

Fig. 3 Theoretical design spectrum curve of single Ag film beamsplitters

从图 3(a)可以看出, S 和 P 分量的分离 $T_p - T_s \approx 22\%$,再将图 3(a)和(b)对比可知 T 和 R 的分光比偏离 1:1 也很大,距中心波长(700 nm)越远此现象越严重.

如果在 Ag 膜两边加上适当的介质膜,则对宽带消偏振特性会起明显的平滑作用,如图 4. S 和 P 分量分离只有 2~3%左右,对各波长具有更接近的透射率和反射率比,中性程度较好.由于 Ag 膜相移的存在,其两侧的 Ti_3O_5 膜的厚度是不等的.膜系为 $\text{G} | 1.7663\text{H} \text{N} 0.8485\text{H} | \text{G}$,其中 H 代表高折射率材料 Ti_3O_5 ,N 代表金属 Ag,G 表示折射率为 1.52 的 K9 玻璃基片.

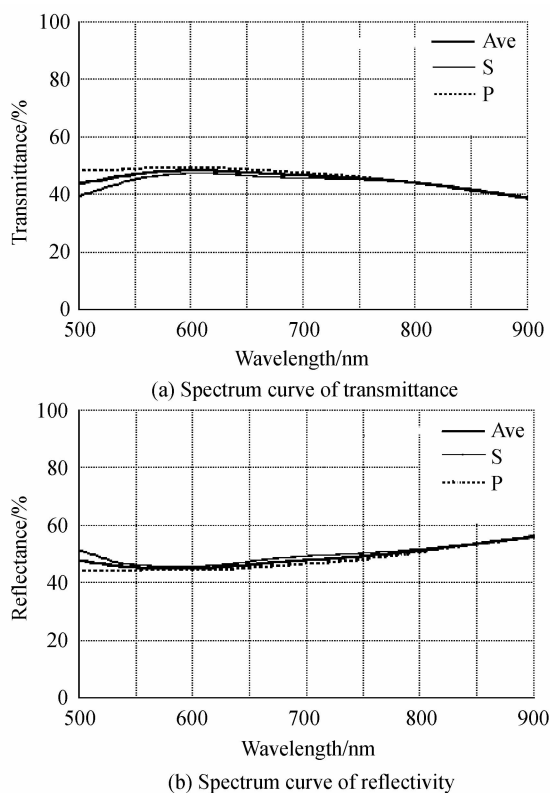


图4 分光膜 G|HNH|G 理论设计光谱曲线

Fig. 4 Theoretical design spectrum curve of G|HNH|G beam splitters

1.3 内反射膜的设计

金属的复折射率可记为 $n-ik$, 光从空气中垂直入射时, 其反射率为

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

如果在金属膜上镀以折射率为 n_1 和 n_2 的两层 $\lambda_0/4$ 厚度的介质膜, 并且 n_2 紧贴金属, 那么在垂直入射时, 波长 λ_0 的导纳为

$$Y = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (n-ik)$$

其反射率为

$$R = \left| \frac{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (n-ik)}{1 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (n-ik)} \right|^2 = \frac{\left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 n \right]^2 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^4 k^2}{\left[1 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 n \right]^2 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^4 k^2}$$

在 $(n_1/n_2)^2 > 1$ 时, 上式给出的反射率大于纯金属膜的反射率. 比值 n_1/n_2 愈高, 则反射率的增加愈多.

镀制金属反射膜常用的材料有铝 (Al)、银 (Ag)、金 (Au) 等, Au 膜常用来制备红外反射镜^[10], Al 是从紫外区到红外区都有高的反射率的唯一材料, 同时膜层比较牢固、稳定^[11-12], 但是金属 Al 在可见光波段反射率较低 (约 88%), 且 Al 在 860 nm 左右存在一个较大的吸收峰, 而 Ag 膜比 Al 膜有更高的反射率. 当入射角为 45° 时, 用单层 Ag 得到反射率曲线如图 5. 实验发

现, Ag 和 K9 的结合性较差, 将 Al_2O_3 作为玻璃和 Ag 膜的粘结层, 可以提高 Ag 膜的附着力^[13].

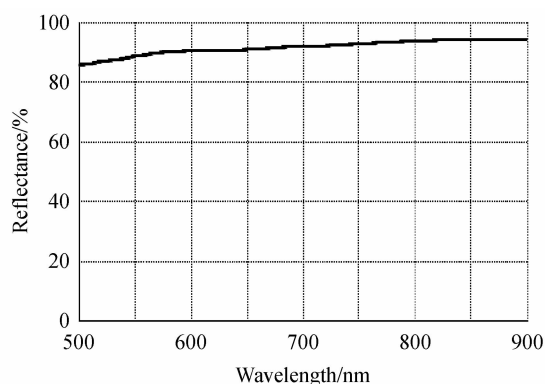


图5 单层 Ag 的反射率理论设计曲线

Fig. 5 Reflectivity theoretical design curve of Single Ag film

由图 5 可以看出其反射率在 500~900 nm 波段为 95.98%. 为了减少金属膜的吸收, 获得更高的反射率, 采用介质-金属复合膜, 膜系为 Sub|HLMNM|Air, 其中 H 为 Ti_3O_5 , L 为 SiO_2 , M 代表连接层 Al_2O_3 , N 代表金属膜 Ag, Sub 表示 K9 玻璃基片, Air 表示空气. 其反射率曲线如图 6, 平均反射率为 97.47%.

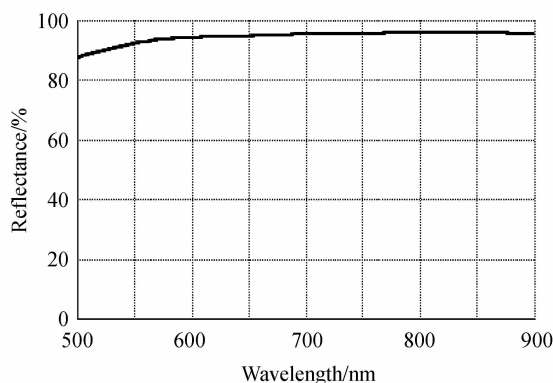


图6 内反膜 Sub|HLMNM|Air 理论设计曲线

Fig. 6 Theoretical design spectrum curve of internal reflecting film Sub|HLMNM|Air

2 薄膜制备

实验是在 TXX-700 真空镀膜机上完成的, 该设备配有两个“e 型”电子枪, 考夫曼离子源, 双晶控探头及 IC/5 膜厚控制仪.

在薄膜蒸镀开始前, 首先用无水乙醇和无水乙醚按 3:1 比例混合的溶液对基片进行清洗, 然后放在工件架上抽真空. 当真空度达到 5.0×10^{-3} Pa 时打开电子枪预熔膜料, 当真空度达到 2.5×10^{-3} Pa 时打开考夫曼离子源, 对基片进行轰击^[14-17], 离子源的具体参量如表 1. 镀 Ag 膜时, 未加离子源, 是由于镀介质膜时, Ti_3O_5 和 SiO_2 需要充氧气, Ag 易被氧化. 膜厚控制采用石英晶控的方法, 材料的工艺参量如表 2.

表 1 离子源的参量

Table 1 Parameters of Kaufmann ion source

Parameter	Value
Argon flow/SCCM	12
Plate voltage/V	300
Acceleration/V	220
Anode voltage/V	50
Neutralizing current/A	13.5
Cathodic current/A	14
Ion beam current/mA	30

表 2 工艺参量

Table 1 Technological parameters

	Deposition rate/(nm · s ⁻¹)	Flow of O ₂ /sccm
H ₄	0.3	11~13
Ti ₃ O ₅	0.3	15~20
Al ₂ O ₃	0.3	0
SiO ₂	0.7	8~10
MgF ₂	0.8	0
Ag	0.7~0.8	0

3 测试结果及分析

采用日本岛津 UV-3150 型分光光度计测试样片的光谱曲线。

3.1 增透膜

图 7 为双面增透的测试曲线,500~900 nm 波段平均透过率为 99.1%。

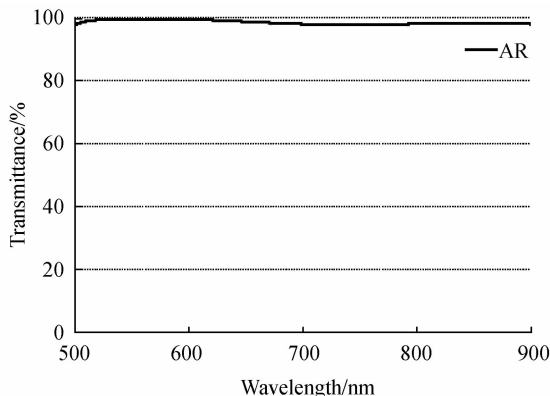


图 7 增透膜的测试曲线

Fig. 7 Transmittance curve of antireflection coatings

3.2 分光膜

将分光棱镜胶合后测试其光谱,接近理论设计值,但是放置一段时间后,发现胶合层有明显的白斑出现,而内反射膜没有此现象发生.分析可知是由于 Ag 和 Ti₃O₅ 之间不匹配所致.因此在金属 Ag 两边各加一薄层 Al₂O₃, 重新设计所得新膜系为 G|1.5215H 0.0154M N0.0154M 0.7049H|G,其中 M 代表 Al₂O₃.设计曲线如图 8,和图 4 相比其消偏振特性受到了轻微影响,但实验结果表明此膜系有良好的稳定性。

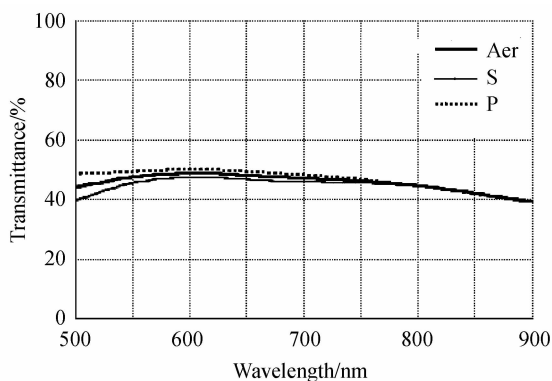
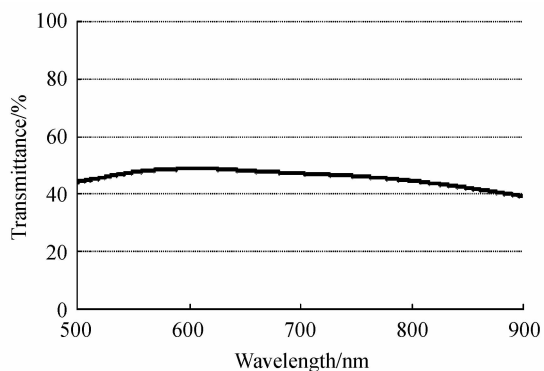
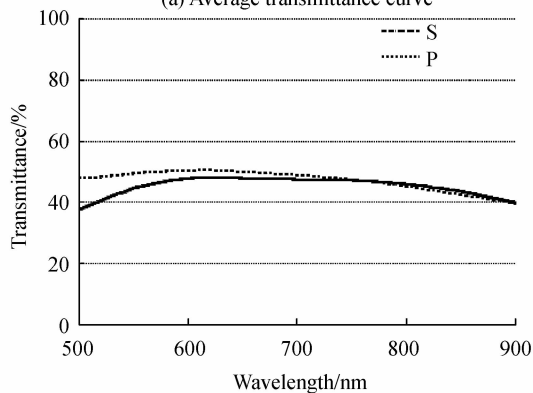


图 8 分光膜改进后理论设计曲线

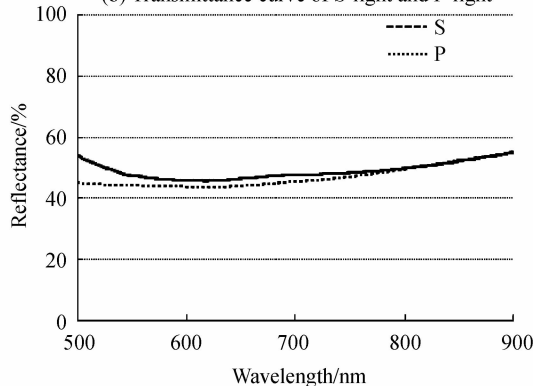
Fig. 8 Theoretical design curve of improved beamsplitters
实际测试曲线如图 9,500~900 nm 波段平均透过率为 46.3%。



(a) Average transmittance curve



(b) Transmittance curve of S-light and P-light



(c) Reflectance curve of S-light and P-light

图 9 分光膜的测试曲线

Fig. 9 Transmittance curve of beamsplitters coatings

从图 9(b)、(c)测试结果可知,S 光、P 光在 500~900 nm 波段的透过率分别为 45.5%、47.3%,平均反射率分别为 48.9%、47.1%,虽与理论设计相比存在一些差异,经分析是由于实际沉积 Ag 膜的折射率与理论计算的折射率存在微小差异所导致的,但在容许误差范围之内,满足使用要求。

3.3 内反射膜

牢固度测试:用宽 2 cm 胶带紧贴镀膜表面然后沿膜面垂直方向迅速拉起,其结果如图 10 所示,有明显的脱膜现象。

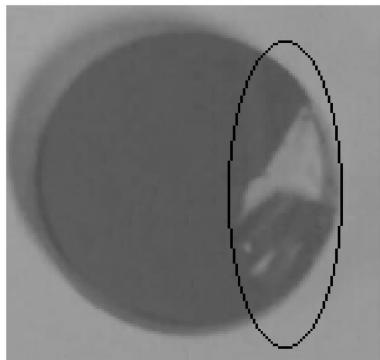


图 10 金属膜表面脱膜的测试片

Fig.10 Metal film with stripping surface

经分析,这是由于蒸镀 Ag 时的蒸发速率太小导致金属膜的附着力较差。经过实验摸索,将 Ag 的蒸发速率增加到 2.0 nm/s 时,膜层的牢固度有明显提高,但是仍然不牢。为进一步提高膜层附着力,镀 Ag 时增加离子辅助,将氧气换成氩气,另外镀制完成后在真空室内直接退火,温升速率不超过 10℃/min,当温度达到设定值时恒温 2 h,再让其自然冷却至室温后取出。经过多次对比试验,当退火温度为 120℃ 时,不再有脱膜现象,牢固度测试结果如图 11 所示,这是因为适当的退火工艺有利于膜层分子的扩散,增强了膜层附着性。测得内反膜的反射光谱曲线如图 12 所示,在 500~900 nm 波段平均反射率为 96.9%。

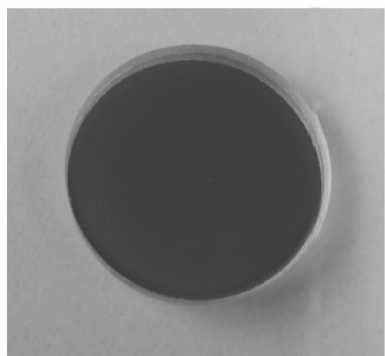


图 11 金属膜表面正常的测试片

Fig.11 Metal film with normal surface

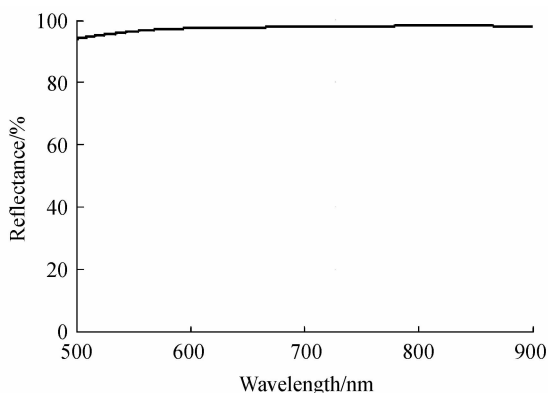


图 12 内反膜的反射率测试曲线

Fig.12 Reflectance test curve of internal reflecting film

3.4 环境测试

为了保证复合薄膜的可靠性,对测试片进行强度测试,测试内容及结果如下:

1) 湿度测试:将测试片放置在相对湿度为 95% 的常温环境下 24 h,光谱曲线没有明显变化。

2) 高低温试验:将测试片放入低温箱,由室温降至 -40℃,保持 2 h;将测试片放入高温箱,由室温升至 70℃,恒温 2 h,膜层没有明显变化。

3) 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)℃ 并持续 24h。随后取出测试片,清洁表面并进行检测,膜层满足使用要求。

4 结论

本文针对电视测角仪中光学系统复合薄膜进行了较为细致的研究,采用组合薄膜有效减小了分光膜的偏振效应,以极少的膜层得到内反膜较高的反射率。通过优化工艺参量,提高 Ag 的蒸发速率,并采用离子辅助沉积金属膜,直接在真空室内退火,解决了金属膜的脱膜问题,研制出满足电视测角仪光学系统使用要求的复合薄膜。该复合薄膜工艺稳定,可以应用到其他相应的光学系统中,适合大批量生产。

参考文献

- [1] ZHAO Kong-xin, LI Jin-yue, XU Lan. Design of novel TV goniometer based on CCD[J]. *Video Application & Project*, 2008, **32**(01): 88-90.
赵孔新, 李金岳, 许兰. 基于 CCD 的新型电视测角仪设计[J]. *视频应用与工程*, 2008, **32**(01): 88-90.
- [2] 王竹林, 苏群星. 某型反坦克导弹武器系统部队勤务教材[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.
- [3] COSTICH V R. Reduction of polarization effects in interference coating[J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(4): 866-870.
- [4] THELEN A. Nonpolarizing interference films inside a glass cube[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(12): 2983-2985.

- [5] GAO Xiao-dan. Design and manufacture of non-polarizing light-splitting film with 7 to 3 in a wide spectral range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **5**(42): 1302-1305. 高晓丹. 宽波段 7:3 消偏振分光膜的设计及镀制[J]. 红外与激光工程, 2013, **5**(42): 1302-1305.
- [6] 祖兴宇, 李琳, 付秀华. 可见光消偏振介质分光薄膜的研制[J]. 科技资讯, 2015, **1**(03): 1672-3791.
- [7] FU Xiu-hua, XIONG Shi-fu, KOU Yang, *et al.* Research on beam splitting prism in laser heterodyne interferometer[C]. SPIE, 2014, **9281**: 92812D.
- [8] FU Xiu-hua, ZHANG Yu-shuai, KOU Yang, *et al.* Design and fabrication of a broad spectrum and wide angle beam splitter in smart glasses imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0331002. 付秀华, 张于帅, 寇洋, 等. 智能眼镜影像系统宽光谱光角度分光膜的研制[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0331002.
- [9] 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, 96-101.
- [10] 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] 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): 0507002.
- [12] KOU Yang, FU Xiu-hua, 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.
- [13] SUN Xi-lian, FAN Zheng-xiu, SHAO Jian-da. Effects of Al_2O_3 and Cr interlayers on the optical property and adhesion of Ag film[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, **3**(43): 307-310. 孙喜莲, 范正修, 邵建达. Al_2O_3 和 Cr 过渡层对 Ag 膜光学性质及其附着力的影响[J]. 金属学报, 2007, **3**(43): 307-310.
- [14] LI Shou-zhong, YANG Yi-min, HUANG Liang-pu, *et al.* Research for working stability of Kaufman ion sources[J]. *Optical Instruments*, 1999, **21**(4): 44-46. 李守中, 杨益民, 黄良甫, 等. 考夫曼型离子源工作稳定性研究[J]. 光学仪器, 1999, **21**(4): 44-46.
- [15] FU Xiu-hua, HAN Fang, ZHANG Jing, *et al.* Study and fabrication of four wavelengths cavity surface film based on Nd:YVO₄ crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0531001. 付秀华, 韩放, 张静, 等. 基于 Nd:YVO₄ 晶体四波段腔面膜的研制[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0531001.
- [16] LIU Dong-mei, WANG Xiao-juan, FU Xiu-hua, *et al.* Design and fabrication of near-infrared narrow-band filters with wide rejection band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0131002. 刘冬梅, 王晓娟, 付秀华, 等. 近红外宽截止带滤光膜的研制[J]. 光子学报, 2014, **43**(1): 0131002.
- [17] HE Yue, ZHANG Ji-zhong, YAO Wen-qing, *et al.* Effect of temperature on residual stress and mechanical properties of Ti films prepared by both ion implantation and ion beam assisted deposition[J]. *Applied Surface Science*, 2008, **255**(8): 4484-4490.