

· 光学设计 ·

偏振分光棱镜带宽扩展设计与制备技术

张金豹, 王明慧, 耿浩, 史成淳, 刘海伟, 孙亚威

(河南平原光电有限公司, 河南 焦作 454001)

摘要: 光学薄膜偏振分光棱镜是现代光电显示、光电测试、光电信息传输等系统的重要部件之一,但是,常规的光学薄膜偏振分光棱镜存在光坯化学稳定性差、偏振分光带宽窄、应用角度小等工艺难点。通过深入研究布儒斯特角偏振分光原理与干涉截止滤光片膜系偏振分离效应,使两种设计方法进行结合扩展了偏振分光棱镜的偏振分光带宽,在化学稳定性好的德国肖特光学玻璃BK7光坯上,制备了P偏振光 $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{\text{ave}} \geq 95\%$, $R_{\text{ave}} \leq 5\%$, S偏振光 $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{\text{ave}} \leq 5\%$, $R_{\text{ave}} \geq 95\%$ 的偏振分光膜。这种结构的光学薄膜可以在不同材料光学玻璃光坯上设计优化出宽带宽、大角度、高偏振消光比的偏振分光棱镜,为偏振分光棱镜的设计与加工提供了新的理论依据与制备方案。

关键词: 光学薄膜; 偏振分光膜; 干涉截止滤光片; 布儒斯特角

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0001-05

Bandwidth Expansion Design and Preparation Technology of Polarization Splitting Prism

ZHANG Jin-bao, WANG Ming-hui, GENG Hao, SHI Cheng-bo, LIU Hai-wei, SUN Ya-wei

(Henan Pingyuan Optics & Electronics Co. Ltd., Jiaozuo 454001, China)

Abstract: Optical thin film polarization splitting prism is one of the important parts for modern photoelectric display, test and information transmission systems. However, conventional optical thin film polarization splitting prism has some technical difficulties, such as poor chemical stability of substrate, narrow polarization splitting bandwidth and small application angle. By studying the principle of Brewster angular polarization splitting and the polarization separation effect of interference cut-off filter, the polarization splitting bandwidth of polarization splitting prism is extended by combining two design methods. The polarizing beam splitters of p-polarized light $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{\text{ave}} \geq 95\%$, $R_{\text{ave}} \leq 5\%$, and s-polarized light $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{\text{ave}} \leq 5\%$, $R_{\text{ave}} \geq 95\%$ on the BK7 substrate of Schott optical glass with good chemical stability are prepared. This kind of optical thin film can be used to design and optimize wide-band, wide-angle and high polarization extinction ratio polarization splitting prisms on different glass substrates. It provides a new theoretical basis and preparation scheme for the design and preparation of polarization splitting prisms.

Key words: optics film; polarizing splitting film; interference cut-off filter; Brewster angle

光是一种电磁波,电磁波是横波。而振动方向和光波前进方向构成的平面叫做振动面,光的振动面只限于某一固定方向或者光的振动面随时间进行变化,这样的光就是偏振光。偏振光可以通过偏振器件产生,光栅偏振器由金属光栅做成,偏振方向垂直于金属线的光可通过,而平行于金属线的

光,则因金属外层自由电子产生与光相同频率的震荡而将光吸收,但此种偏振器光栅周期不够小,只还用于红外光;二向色性晶体偏振器由二向色性晶体的选择吸收产生偏振,这些物质能吸收某一方向的光振动,而只让与这个方向垂直的光振动通过,但此种偏振器消光比较小,稳定性较差;晶体偏振

收稿日期: 2018-09-09

作者简介: 张金豹(1984-),男,本科,工程师,主要研究方向为光学薄膜设计及镀膜。

器由晶体双折射产生偏振,某些各向异性透明晶体沿不同方向其光学特性有所不同,一束自然光入射于这种晶体时会产生两束偏振光(o光、e光),但天然晶体,透明、纯净的很少,而且口径较小、加工工艺复杂。光学薄膜偏振分光棱镜则因其通光孔径大、损耗低、系统设计灵活等特点备受人们关注。在光学仪器、激光技术、光电显示和光电存储领域得到了广泛的应用。特别是在大屏幕显示系统中,无论基于阴极射线(CRT)技术,还是基于液晶显示(LCD)技术的投影系统中都要用到含有偏振分光棱镜(PBS)的光学引擎,它是投影显示器及投影机的核心部件,决定了图像的对比度、色彩的一致性和光能利用率,从而决定了投影机的整机效率。最常用的光学薄膜偏振分光棱镜是基于布儒斯特角原理实现起偏^[1-2]。但是,这种原理在德国肖特光学玻璃BK7光坯上应用时所选择膜料匹配偏振分光带宽很窄,不能满足宽带偏振分光的使用要求,如果更换光学玻璃材料重新选择膜料匹配虽然可以解决偏振分光带宽窄的难题,但是更换后的光学玻璃化学稳定性差,对加工工艺及后期维护要求较高;文中则运用布儒斯特角与干涉截止滤光片膜系结合的方法设计偏振分光膜,通过计算机优化设计,制备出了比布儒斯特角法性能更加优异的偏振分光棱镜。

1 技术原理

1.1 布儒斯特角

自然光在电介质界面上反射和折射时,一般情况下反射光和折射光都是部分偏振光,只有当光以布儒斯特角入射时,反射光才是线偏振光且反射光与折射光互相垂直。光学薄膜偏振分光棱镜的设计原理是寻找这样一个入射角,使之对于两种不同折射率的界面满足布儒斯特角条件。在这样的条件下,P偏振光的反射完全消失。这两种材料能够交替叠加构成多层膜堆,而对P偏振光不产生反射,对S偏振光产生高反射^[3-5],如图1所示。

光线斜向入射时,斜向入射时的反射率是

$$R = \left| \frac{\eta_L - \eta_H}{\eta_L + \eta_H} \right|^2 \quad (1)$$

式中,P偏振光, $\eta_L = n_L / \cos\theta_L$, $\eta_H = n_H / \cos\theta_H$; S偏振光, $\eta_L = n_L \cos\theta_L$, $\eta_H = n_H \cos\theta_H$, θ_L 、 θ_H 是折射

角^[6-7]。

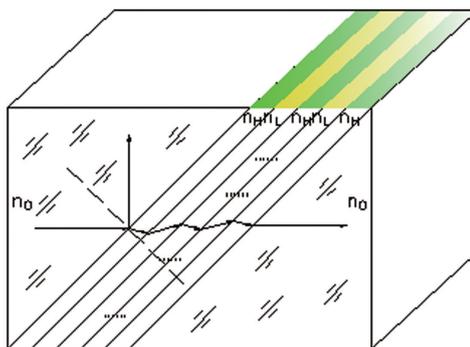


图1 光学薄膜偏振分光棱镜

两种不同材料满足布儒斯特角时,P偏振光的折射率必须相等,即

$$n_L / \cos\theta_L = n_H / \cos\theta_H \quad (2)$$

同时也满足折射定律,即

$$n_L \sin\theta_L = n_H \sin\theta_H = n_0 \sin\theta_0 \quad (3)$$

从式(2)和式(3),得到实现偏振条件的关系式,即

$$n_0 \sin\theta_0 = \frac{n_H n_L}{(n_H^2 + n_L^2)^{1/2}} \quad (4)$$

P偏振光的高透射可以通过偏振条件实现,S偏振光的高反射可以通过叠加两种不同材料有效厚度的1/4波长的多层膜堆来实现^[6-7]。

当选定光学玻璃BK7材料时,进行高、低折射率膜料匹配^[8]选择, Al_2O_3 、 MgF_2 满足式(4)。

膜系结构: $G/(\text{ML})^9\text{M}/G$ M: Al_2O_3 L: SiO_2 G: BK7

TFCalc 光学薄膜设计软件光谱曲线如图2所示。

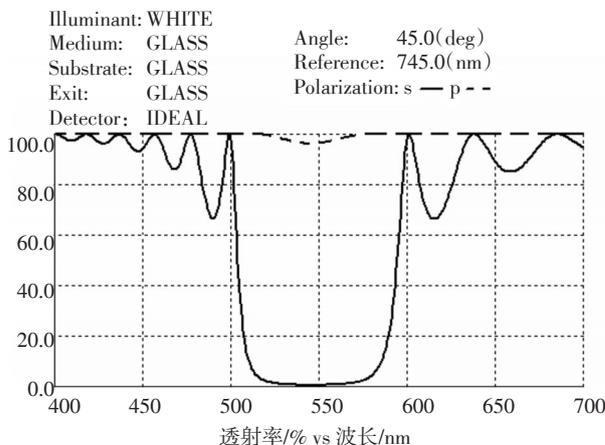


图2 布儒斯特角光谱

从光谱曲线分析,中间为偏振分光区,两侧为通带。在通带上可以进行偏振分离区的扩展。

1.2 倾斜入射干涉截止滤光片膜系

垂直入射时,在入射介质 n_0 , 出射介质 n_g 的基片上镀以 n_H 和 n_L 高、低折射率层,并使介质膜系两边的最外层为高折射率层,且其每层的厚度均为 $\lambda_0/4$, 则对于中心波长 λ_0 , 反射率与反射带宽有

$$R = \left[\frac{n_0 - (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)}{n_0 + (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)} \right]^2 \quad (5)$$

式中, $2s+1$ 是多层膜层数,且 n_H/n_L 的值越大、层数越多,则反射率越高。

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (6)$$

式中,反射带的宽度仅仅同构成多层膜的两种膜料的折射率有关。折射率 (n_H/n_L) 的比值越大,反射带越宽^[9]。

而当光线倾斜入射薄膜界面时,对P偏振光, $\eta = n/\cos\theta$, 而对S偏振光, $\eta = n\cos\theta$ 。而根据公式(6),可以得到倾斜下,P偏振光和S偏振光的反射带有一偏振分离区^[9-10]。

短波通膜系结构: G/0.5L(HL)⁹H0.5L/G H: Ta₂O₅ L:SiO₂ G:BK7

TFCalc 光学薄膜设计软件光谱曲线如图3所示。

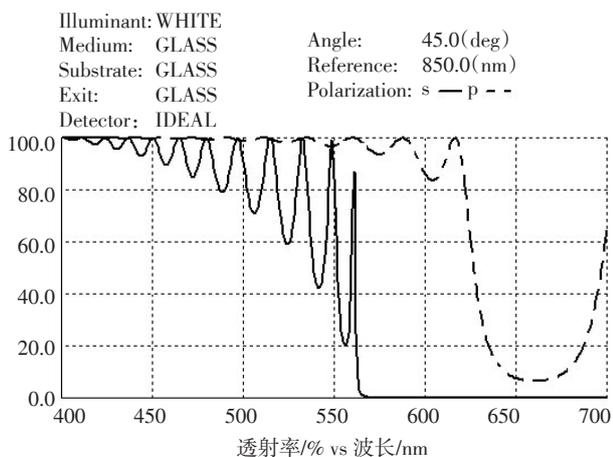


图3 短波通光谱

长波通膜系结构: G/0.5H(LH)⁹L0.5H/G H: Ta₂O₅ L:SiO₂ G:BK7

TFCalc 光学薄膜设计软件光谱曲线如图4所示。

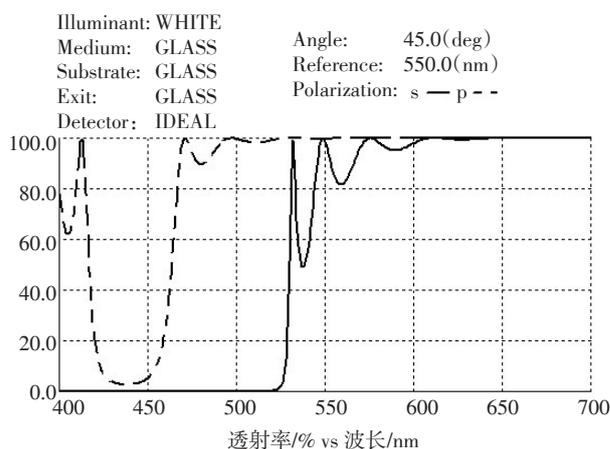


图4 长波通光谱

分析短波通与长波通光谱曲线,可以看到,中间为偏振分光区,一侧为通带,另一侧为截止带,可以利用通带扩展偏振分离区。

2 设计与制备

2.1 偏振分光膜带宽扩展设计

依据布儒斯特角光谱曲线与短、长波通干涉截止滤光膜系光谱曲线性质,利用光谱曲线的通带可以对偏振分光带实现扩展连接。

膜系结构:G/(0.67H0.67L)¹⁰(1.2H1.2L)¹⁰(ML)¹⁵/G H: Ta₂O₅ M: Al₂O₃ L: SiO₂ G: BK7

通过对扩展的偏振分光区进行优化可以得到很好的结果,实现了化学稳定性很好的光学玻璃基底上宽带偏振分光膜的设计,TFCalc 光学薄膜设计软件所得光谱曲线如图5所示。

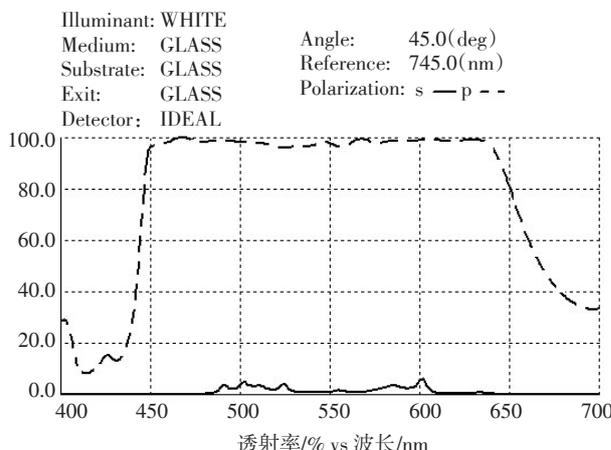


图5 设计光谱

薄膜物理厚度见表1。

表1 薄膜物理厚度

序号	膜料	物理厚度 /nm	序号	膜料	物理厚度 /nm	序号	膜料	物理厚度 /nm
1	Ta ₂ O ₅	26.52	25	Ta ₂ O ₅	86.47	49	Al ₂ O ₃	109.27
2	SiO ₂	100.92	26	SiO ₂	145.69	50	SiO ₂	135.64
3	Ta ₂ O ₅	57.11	27	Ta ₂ O ₅	125.59	51	Al ₂ O ₃	108.33
4	SiO ₂	91.19	28	SiO ₂	154.41	52	SiO ₂	134.00
5	Ta ₂ O ₅	48.25	29	Ta ₂ O ₅	84.78	53	Al ₂ O ₃	107.26
6	SiO ₂	98.31	30	SiO ₂	183.90	54	SiO ₂	133.16
7	Ta ₂ O ₅	58.95	31	Ta ₂ O ₅	102.25	55	Al ₂ O ₃	107.14
8	SiO ₂	106.30	32	SiO ₂	163.57	56	SiO ₂	133.92
9	Ta ₂ O ₅	54.19	33	Ta ₂ O ₅	103.59	57	Al ₂ O ₃	107.90
10	SiO ₂	90.64	34	SiO ₂	174.09	58	SiO ₂	134.51
11	Ta ₂ O ₅	51.98	35	Ta ₂ O ₅	84.66	59	Al ₂ O ₃	107.75
12	SiO ₂	103.73	36	SiO ₂	160.83	60	SiO ₂	133.21
13	Ta ₂ O ₅	59.62	37	Ta ₂ O ₅	118.64	61	Al ₂ O ₃	106.89
14	SiO ₂	104.26	38	SiO ₂	151.50	62	SiO ₂	132.56
15	Ta ₂ O ₅	52.14	39	Ta ₂ O ₅	128.58	63	Al ₂ O ₃	107.72
16	SiO ₂	91.17	40	SiO ₂	71.32	64	SiO ₂	136.39
17	Ta ₂ O ₅	54.92	41	Al ₂ O ₃	105.98	65	Al ₂ O ₃	115.17
18	SiO ₂	111.03	42	SiO ₂	132.64	66	SiO ₂	155.43
19	Ta ₂ O ₅	62.76	43	Al ₂ O ₃	106.43	67	Al ₂ O ₃	123.49
20	SiO ₂	90.52	44	SiO ₂	132.74	68	SiO ₂	127.96
21	Ta ₂ O ₅	33.01	45	Al ₂ O ₃	107.21	69	Al ₂ O ₃	41.13
22	SiO ₂	104.75	46	SiO ₂	134.23	70	SiO ₂	167.77
23	Ta ₂ O ₅	84.34	47	Al ₂ O ₃	108.65			
24	SiO ₂	226.19	48	SiO ₂	135.94			
总厚度(nm) Ta ₂ O ₅			总厚度(nm) SiO ₂			总厚度(nm) Al ₂ O ₃		
1 468.68			4 553.82			1 559.49		

如果要进一步提高偏振消光比,可以通过增加三种膜堆周期数实现,如果要进一步扩展带宽,则需要选择高、低折射率差异更大的TiO₂、SiO₂或者其他膜料进行补偿布儒斯特角设计才行。

2.2 偏振分光膜制备

沉积设备是德国Leybold公司热蒸发APS离子源辅助沉积SYRUSpro1100镀膜机,见图6。

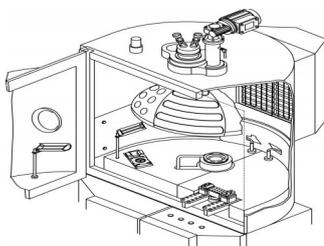


图6 SYRUSpro1100镀膜机

采用APS离子源辅助电子枪热蒸发沉积技术,如图7所示。

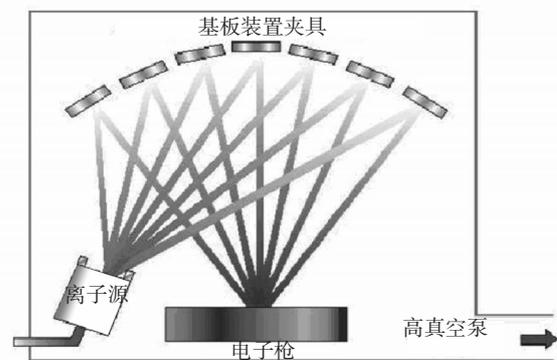


图7 APS离子源辅助沉积

电子枪加热蒸发指用高能电子流轰击材料,材料熔化蒸发逸出。通常无离子源辅助沉积薄膜呈现柱状加空隙结构,薄膜堆积密度差,薄膜附着

力强烈依赖于基板的沉积温度,抗磨强度较小。APS离子源辅助沉积可以提高薄膜堆积密度,膜变得更致密,大气吸水量变小,光谱特性不漂移,环境稳定性提高,同时还可以提高薄膜牢固度及抗磨强度^[9-10]。

沉积参数:对Ta₂O₅、Al₂O₃、SiO₂进行工艺参数试制,见表2。

表2 膜层应力匹配主要工艺参数

参数	膜料					T/(°C)
	Ar ₁ 流 (sccm)	A ₂ 流 (sccm)	O ₂ 流 (sccm)	速率 (nm/s)	偏压 (V)	
Ta ₂ O ₅	4	8	30	0.2	120	150
Al ₂ O ₃	3	12	10	0.28	120	150
SiO ₂	2	16	3	0.5	140	150

沉积过程:当真空度 9×10^{-3} Pa以下,烘烤;当真空度 9×10^{-3} Pa以下,电子枪对Ta₂O₅、Al₂O₃进行充分预熔、除气;达到工艺真空度 3×10^{-3} Pa以下后,APS源开启,进行离子轰击,清洗零件;清洗结束后,离子源辅助进行膜层镀制Ta₂O₅、Al₂O₃、SiO₂,利用石英晶体压电效应监控膜层厚度,选择了预减少过量蒸发,厚度补偿等方法,克服了薄膜厚度控制误差问题。

3 偏振分光膜测试

测定胶合偏振分光棱镜光谱曲线、膜层强度、环境适应性。

3.1 光谱曲线

测试依据:光谱技术指标

测试设备:Agilent Cary 7000 UV-VIS-NIR全自动光谱仪,其工件支架、光谱探测器皆可以自由转动,便于多角度测量,如图8所示。



图8 Agilent Cary 7000 UV-VIS-NIR全自动光谱仪

测试结论:P偏振光 $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{ave} \geq 95\%$, $R_{ave} \leq 5\%$;S偏振光 $0.44 \sim 0.64 \mu\text{m}$, $T_{ave} \leq 5\%$, $R_{ave} \geq$

95%,满足了光谱技术指标要求,如图9、图10所示。

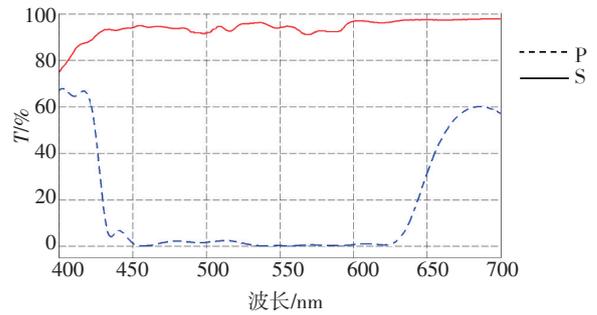


图9 P、S偏振光透射测试光谱

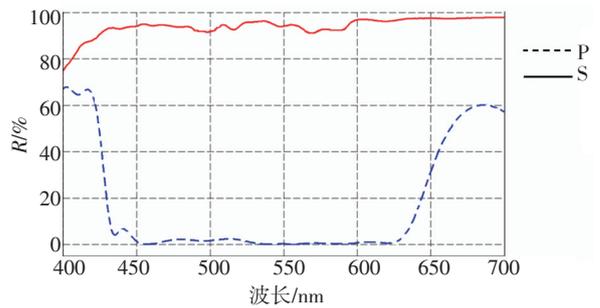


图10 P、S偏振光反射测试光谱

3.2 膜层抗磨强度

测试依据:JB/T8226.7-1999

测试设备:膜层强度试验机

测试结论:用膜层强度试验机,同膜层接触的磨头为球半径3 mm,表面粗糙度Ra为0.4的钢球,外裹两层干的脱脂纱布,使用时磨头对被检膜面的作用力为1.96 N(0.2 kg),当零件表面有效孔径为D (mm)时,零件转速按 $n=10\ 000/D$ (r/min)选择,磨头触点到零件转动中心的距离应为D/3,零件经受2 000转摩擦后的膜层不磨破,满足了膜层的抗磨强度,见表3。

表3 膜层抗磨强度

序号	直径 /mm	转速 /(r/min)	直径 /3/mm	表面损伤	结论
1	24	416	8	轻微划痕	合格
2	30	333	10	无划痕	合格
3	45	222	15	无划痕	合格
4	60	166	20	无划痕	合格
5	90	111	30	无划痕	合格

(下转第54页)

参考文献

- [1] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999(4): 21-23.
- [2] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1337-1339.
- [3] 张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 420-422.
- [4] 杨立, 寇蔚, 刘慧开, 等. 热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 43-45.
- [5] 胡剑虹, 宁飞, 沈湘衡, 等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 152-156.
- [6] 孙志远, 王晶, 乔彦峰. 环境中波红外探测器测温精度的影响[J]. 中国光学, 2010, 3(6): 659-664.
- [7] 孙志远, 朱玮, 乔彦峰. 红外测温过程中灰度值漂移的修正[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 391-396.
- [8] 陆子凤, 潘玉龙, 王学进, 等. 目标到测试系统距离对红外测温精度的影响[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 271-276.
- [9] 李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319-2325.
- [10] 张正辉, 魏宇飞. 红外成像系统测试与评价[M]. 红外与激光工程(编辑部). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 海啸, 朱志杰. 最小二乘法和三次样条曲线拟合的比色测温误差修正对比分析[J]. 激光杂志, 2015, 36(6): 72-76.
- [12] 修金利, 金伟其, 刘崇亮, 等. 应用U形边框黑体光阑的三点辐射定标校正方法及其分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2313-2318.
- [13] 程丽鹏, 张猛, 王高, 等. 长波红外探测器的辐射定标[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 195-198.
- [14] 李冰, 李响, 魏臻. 实时定标红外测温法测量海水表面温度[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(2): 66-69.
- [15] CAO Xi-zheng, GUO Li-hong, LI Zhuo. Infrared radiation measurement of the aerial target based on temperature calibration and target images[J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(6): 463-467.
- [16] 张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 150-155.

(上接第5页)

3.3 膜层环境适应性

测试项目: 恒定湿热、盐雾、低温

测试依据: GB/T2423.3、GB/T2423.17、GB/T2423.1

测试结论: 光谱曲线无变化, 满足了膜层的环境适应性。

4 结论

化学稳定性很好的光学玻璃基底采用布儒斯特角制备的偏振分光棱镜偏振分光带宽较窄, 更换光学玻璃后, 光学玻璃的化学稳定性变差, 选用的匹配膜料多为氟化物、硫化物软膜, 在实际制备这种宽带偏振分光膜时, 容易基底变质、表面路子等疵病, 以及膜层应力不匹配而发生膜裂等现象; 运用干涉截止滤光片膜系结构补偿布儒斯特角的偏振分光膜带宽, 则使用氧化膜料膜实现了在化学稳定性好的光学玻璃基底上宽带偏振分光膜的制备, 氧化物膜料抗磨强度明显优于氟化物膜料, 而且膜料应力匹配, 不出现膜裂现象。同时, 布儒斯特角角度适应范围小, 光线偏离布儒斯特角则出现“孔洞效应”, 偏振分光效果变差, 而干涉截止滤光片结

构补偿优化设计则可以大幅度改善上述情况。

参考文献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 484-542.
- [2] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学、像差、光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 102-156.
- [3] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990: 34-120.
- [4] 李建芳, 周言敏, 王君. 光学薄膜制备技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 40-54.
- [5] Macleod H A. Thin-film optical filter[M]. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001: 18-198.
- [6] Eckertova L. Physics of Thin Films[M]. Prague: Plenum Publishing Corporation and SNTL, 1986: 18-198.
- [7] 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, 2007: 118-188.
- [8] 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: 42-128.
- [9] 李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 台湾: 艺轩图书出版社, 2016: 188-286.
- [10] Thelen A. Design of Optical Interference Coatings[M]. McGraw-Hill Book Company, 1988: 22-98.