

doi:10.3788/gzxb20174612.1231001

1 064 nm 激光与远红外共窗口成像系统波长 分离膜的研制

付秀华,孙兵,张静,熊仕富,郭凯,姜洪妍

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

摘 要:根据激光与远红外共窗口成像系统的技术要求,研制了一种波长分离膜,实现通过共窗口的激光与远红外光分离成像,即 1 064 nm 高反射、8~14 μm 高透射.分析薄膜的微观结构,研究了薄膜材料吸潮前后的折射率变化,结合光学薄膜理论,优化膜系结构.在薄膜应力的基础上,优化膜层厚度,提高薄膜牢固性.研制的分离膜,1 064 nm 反射率为 99.71%,8~12 μm 平均透过率为 97.1%,12~14 μm 平均透过率为 90.1%,满足户外环境中长期使用要求.

关键词:波长分离膜;共窗口成像系统;聚集密度;折射率;应力分析

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1231001-8

Development of Wavelength Separation Coating in 1 064 nm Laser and Far-infrared Common-window Imaging System

FU Xiu-hua, SUN Bing, ZHANG Jing, XIONG Shi-fu, GUO Kai, JIANG Hong-yan

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

Abstract: According to the technical requirements of the laser and far infrared common-window imaging system, a wavelength separation coating was developed, which aimed to separate the laser and far infrared light through a common window, that is, 1 064 nm laser reflected, 8~14 μm far infrared light transmitted. By analyzing the microstructure of the films, the refractive index changes of the films before and after moisture absorption were studied. The structure of the films was optimized by combining the optical film theory. On the basis of studying the stress of the film, the film thickness was optimized and the film firmness was improved. The average transmittance of the wavelength separation coating in the bands of 8~12 μm 、12~14 μm are 97.1%, 90.1% and the reflectivity of 1 064 nm is 99.71%. The separation coating can meet the technical requirements of the imaging system for a long time in various military outdoor environments.

Key words: Wavelength separation coating; Common-window imaging system; Packing density; Refractive index; Stress analysis

OCIS Codes: 310.4165; 310.3840; 310.6805; 310.1860

0 引言

远红外(8~12 μm)是最常用的大气窗口之一,也是多数发动机尾气和生物体的热辐射峰值探测波段范围,物体在远红外波段会表现出明显轮廓,容易探测识别^[1].1 064 nm 激光在主动探测夜间暗弱目标方面,成像稳定、对比度高、能清晰的显示目标细节,同时能有效抵抗外界杂光干扰^[2].因此结合激光与远红外两者的

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:孙兵(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为现代光学薄膜技术.Email:sunbing_optics@126.com

收稿日期:2017-06-14;录用日期:2017-07-25

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

成像特点,激光与远红外共窗口成像系统在侦查领域能够发挥关键作用.

2013年北京理工大学李培茂等设计了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的折反射式、离轴三反射式和全反射式光学系统^[3].2015年西南物理技术研究所曲锐、邓键完成了 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\sim 10.3\ \mu\text{m}$ 的共光路红外双波段双视场光学系统的无热化设计^[4].2013年美国陆军夜视和电子传感器理事会 Jay N. Vizgaitis、Arthur Hastings 研制了中长波红外画中画成像系统^[5].2015年 Alaaeldin Mahmoud 等对无人机可见与近红外遥感探测技术进行了研究^[6].目前,关于 $1\ 064\ \text{nm}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的双波段成像系统还未见相关报导.

受到地理条件制约,侦察设备灵活轻便程度,以及能否适应各种地形方便及时转移安置是需要考虑的重要因素.本文提到的成像系统同时具有激光与远红外两个波段的成像功能,为了减小其体积,方便携带需要使用共光路设计来简化整个系统^[7].系统成像时,共光路的 $1\ 064\ \text{nm}$ 激光和探测到的远红外光波经过同一窗口分离单独成像.另外,设备在日常的使用或者贮存中,很难避免雨水对其工作性能产生影响.本文研究了薄膜材料淋雨受潮前后的特性变化,综合其变化前后的折射率对膜系优化设计,使设计的分离膜在潮湿的环境中长期使用的环境下都保持性能稳定.

1 膜系设计

波长分离膜作为激光与远红外共窗口成像系统中的重要元件,其光谱要求如表 1.

表 1 分离膜的技术参数

Table 1 Technical parameters of separation coating

Parameter	Specification		
Substrate	ZnSe		
Incident angle/ $^{\circ}$	45		
Spectrum range/ μm	1.064	$8\sim 12$	$12\sim 14$
Average transmittance/%	<1	≥ 95	≥ 80
Reflectance/%	≥ 98	<1	<10

由表 1 可知,分离膜光谱参数涵盖了近红外和极宽的远红外波段,在广角入射的情况下由于跨越波段太宽,可供选择的材料有限,给膜系设计带来了很大的困难.

1.1 材料特性研究与选取

满足波段要求的基底材料有多光谱 ZnS 和 ZnSe.但是多光谱 ZnS 质地偏软^[8],并且在 $11.5\ \mu\text{m}$ 附近有很强的吸收峰,因此选择 ZnSe 作为系统波长分离膜的基底.

常用的红外高折射率材料有 Ge、Si 和 ZnS,Si 的透明区为 $1.2\sim 9\ \mu\text{m}$,Ge 的透明区为 $1.7\sim 23\ \mu\text{m}$,ZnS 的透明区在 $0.38\sim 14\ \mu\text{m}$,在红外区的折射率约为 2.2,且与氟化物低折射率材料有良好的应力匹配.常用的红外低折射率材料有 BaF_2 、 YbF_3 , BaF_2 的透明区为 $1.2\sim 9\ \mu\text{m}$,成膜后聚集密度低, YbF_3 的透明区为 $0.25\sim 14\ \mu\text{m}$,具有良好的机械性能^[9].故选择 ZnS、 YbF_3 作为高低折射率材料.

1.2 薄膜材料吸潮前后折射率研究

波长分离膜对反射区间的要求极为严苛,当设计的反射区间过宽时,会引入过多的背景光以致干扰 $1\ 064\ \text{nm}$ 激光成像质量.而过窄时,薄膜长期在野外环境中作业受到雨水影响容易吸潮,发生波长漂移无法成像.因此设计膜系的反射区间要在尽可能排除杂光干扰的前提下在吸潮前后都满足系统要求的技术指标.

图 1 薄膜的内部结构是由薄膜柱状固体和空隙组成,薄膜中的总空隙体积与聚集密度 p 有关^[10],其定义为

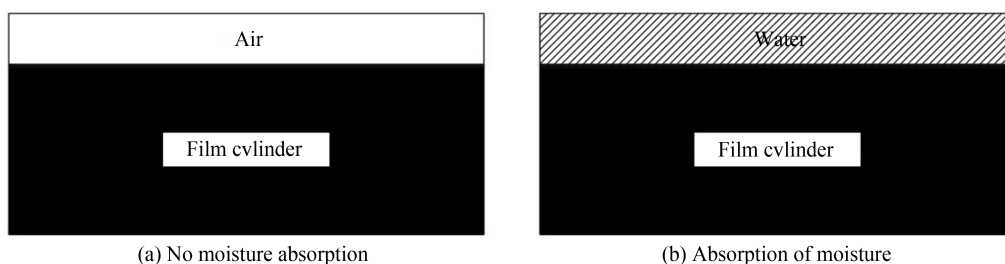


图 1 薄膜吸潮模型

Fig.1 The model of moisture absorption film

$$p = \frac{\text{薄膜中固体部分的体积}}{\text{薄膜的总体积}}$$

薄膜的聚集密度可以通过石英晶体测频法计算.石英晶体的频率随着其质量增量线性变化,晶体增加的质量包括沉积的薄膜固体和吸附在空隙中的水汽^[11].先测量石英晶体镀膜前后的振荡频率,后对其进行淋雨试验,通过观测吸附水汽后的频率计算得到聚集密度.淋雨试验标准为 GJB 150.8,试验条件如表 2 所示.

表 2 淋雨试验条件

Table 2 Test standard of rain

Raindrop diameter/mm	Rainfall/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	Test time/min
0.5~4.5	≥280	15

在 ZnSe 基底上镀制 1 500 nm 的 ZnS. f_0 为镀制前石英晶体的初始振荡频率, f_1 为镀制后石英晶体的振荡频率,对石英晶体进行滴雨试验,使其充分吸潮测得频率为 f_1^* ,如表 3 所示.

表 3 石英晶体参数

Table 3 Quartz crystal data

Material	Initial frequency f_0 /Hz	Post-deposition frequency f_1 /Hz	The frequency after moisture absorption f_1^* /Hz
ZnS	5 986 813.98	5 898 270.57	592 733.23

$$\Delta f_1 = f_1 - f_0 = 88\ 543.41 \quad (1)$$

$$\Delta f_1^* = f_1^* - f_1 = 2\ 912.65 \quad (2)$$

Δf_1 表示石英晶体沉积薄膜前后的频率变化量, Δf_1^* 表示沉积薄膜后的石英晶体受潮前后的频率变化量.ZnS 的固体密度 $\rho_s = 3.98\ \text{g/cm}^3$,薄膜的物理厚度 d_f 为 1 500.27 nm.ZnS 的聚集密度为

$$p = \frac{\Delta f_1}{B\rho_s A d_f} \quad (3)$$

同理可得

$$\Delta f_1^* = B(1-p)\rho_w A d_f \quad (4)$$

于是

$$B A d_f = \frac{\Delta f_1^*}{(1-p)\rho_w} \quad (5)$$

将式(4)、(5)带入式(3)得

$$p = \Delta f_1 \rho_w / (\Delta f_1 \rho_w + \rho_w \Delta f_1^*) \quad (6)$$

由于水的密度 $\rho_w = 1.0\ \text{g/cm}^3$,可计算出 ZnS 的聚集密度为

$$p_{\text{ZnS}} = \frac{\Delta f_1}{\Delta f_1 + \rho_s \Delta f_1^*} = 0.884\ 233\ 679\ 3 \quad (7)$$

镀制完成的 ZnS 薄膜的物理厚度 d_f 可以等效成 ZnS 薄膜固体 d_s 和空隙的厚度 d_p 之和

$$d_f = d_s + d_p \quad (8)$$

此时 ZnS 薄膜的聚集密度可以表示为

$$p_{\text{ZnS}} = \frac{d_s}{d_f} = 1 - \frac{d_p}{d_f} \quad (9)$$

薄膜吸附水汽前后的光学厚度分别为

$$n_f d_f = n_s (d_f - d_p) + d_p \quad (10)$$

$$n_f^* d_f = n_s (d_f - d_p) + 1.33 d_p \quad (11)$$

式(10)与式(11)相减得到

$$(n_f^* - n_f) d_f = 0.33 d_p \quad (12)$$

于是

$$p_{\text{ZnS}} = 1 - \frac{d_p}{d_f} = 1 - \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \frac{n_f}{0.33} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{n_f^* - n_f}{n_f} \quad (14)$$

式中 $\Delta\lambda$ 表示薄膜吸附水汽之后漂移的波长, λ 表示薄膜吸水前的膜厚是 $\lambda/4$ 奇数倍膜层所对应的极值反射率波长, 可得到 ZnS 薄膜吸附水汽之后的折射率

$$n_f^* = 0.33(1 - p_{ZnS}) + n_f \quad (15)$$

其中 n_f^* 表示 ZnS 薄膜吸附水汽后的折射率, n_f 表示 ZnS 薄膜吸附水汽前的折射率.

同理可得 YbF₃ 吸潮之后的折射率, 综合 ZnS 和 YbF₃ 吸潮前后的折射率进行膜系设计, 确保镀制薄膜在吸潮前后均可达到所需技术指标.

1.3 长波通理论基础

长波通膜系结构为 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^m$, 其等效折射率为

$$E = \left[\frac{\cos \delta_q (\eta_p + \eta_q)^2 - (\eta_p^2 - \eta_q^2)}{\cos \delta_q (\eta_p + \eta_q)^2 + (\eta_p^2 - \eta_q^2)} \right]^{1/2} \quad (16)$$

截止深度为

$$T_r = \frac{16\eta_o\eta_g}{(\eta_H/\eta_L)^{2S} \{ (\eta_o + \eta_g)^2 + [(\eta_o\eta_g/\eta_p) - \eta_p]^2 \}} \quad (17)$$

截止带相对半宽度

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\eta_H - \eta_L}{\eta_H + \eta_L} \right) \quad (18)$$

截止带宽为

$$\Delta\lambda = 2\Delta g \Delta\lambda_o = \frac{4\lambda_o}{\pi} \arcsin \left(\frac{\eta_H - \eta_L}{\eta_H + \eta_L} \right) \quad (19)$$

其中, η_p, η_q 分别为对应 p, q 层的折射率, $\eta_H, \eta_L, \eta_o, \eta_g$ 分别为高、低折射率层、入射介质层、基底的折射率, δ_q 为 q 层位相厚度, s 为对称膜系周期数^[12].

截止带中心波长为

$$\Delta\lambda_o = (1 + \Delta g)\lambda_c \quad (20)$$

其中 λ_c 为截止波长.

1.4 膜系优化设计

通过软件 TFCalc, 以长波通为基础膜系, 利用 ZnS 和 YbF₃ 吸潮前后的折射率同时进行膜系优化设计. 初始膜系为: G|(0.5HL0.5H)·15|A, 其中 G 代表 ZnSe 基底, H 代表 ZnS, L 代表 YbF₃, A 代表空气. 经过优化设计得到膜系: G|0.93H 1.00L 1.69H 0.17L 1.72H 0.85L 1.37H 0.93L 1.29H 1.01L 1.24H 1.03L 1.23H 1.03L 1.22H 1.08L 1.14H 1.24L 0.91H 3.72L 0.32H 5.83L 0.66H|A, 透过率光谱曲线如图 2.

将 ZnS 和 YbF₃ 吸潮前后的折射率导入膜系设计软件 TFCalc 模拟分析, 设计光谱如图 3. 吸潮前 1 064 nm 反射率为 99.87%, 8~12 μm 平均透过率为 99.1%, 12~14 μm 平均透过率为 94.2%. 吸潮后 1 064 nm 反射率为 99.67%, 8~12 μm 平均透过率为 98.9%, 12~14 μm 平均透过率为 94.9%. 在两种折射率下, 设计均符合技术要求.

为了提高远红外波段的成像质量, 减少基底后表面反射能量损失, 提高透过率, 在基底后表面镀制 8~12 μm 波段的减反射膜, 经过优化设计得到膜系: G|1.02H 1.00L 0.21H 5.19L 6.58H 0.51L 3.29H 0.44L|A, 优化后的设计曲线如图 4, 吸潮前后在 8~12 μm 波段平均透过率分别为 99.1%、99.2%, 在 12~14 μm 波段平均透过率分别为 97.3% 和 97.1%.

将前后表面膜层数据导入软件模拟, 得到如图 5 所示的理论设计曲线, 1 064 nm 反射率为 99.6%, 8~12 μm 波段平均透过率为 97.5%, 12~14 μm 波段平均透过率为 92%.

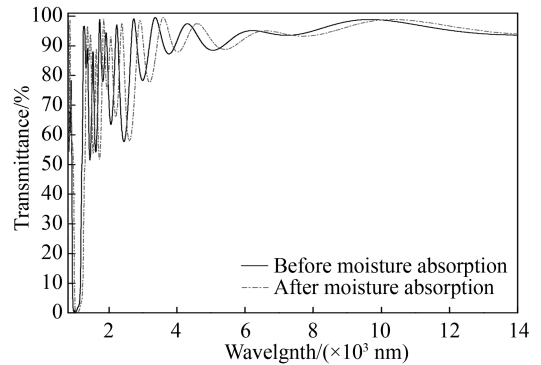


图 2 前表面理论设计光谱透过率曲线
Fig. 2 Theoretical transmission spectrum curves of front surface coating

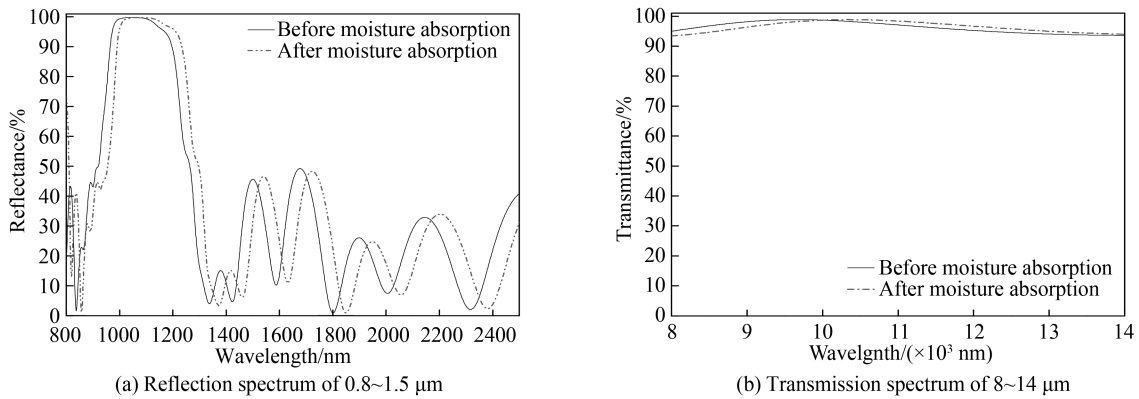


图3 前表面吸潮前后理论设计光谱曲线

Fig.3 Theoretical transmission spectrum curves of front surface coating pre and post moisture absorbing

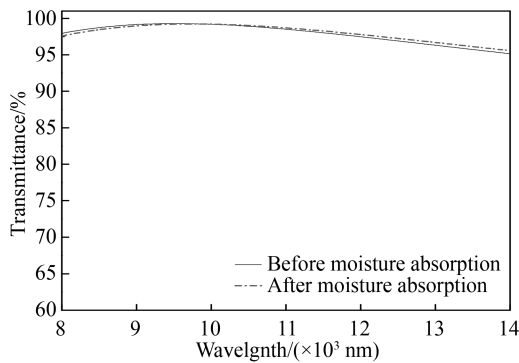


图4 后表面理论设计光谱透过率曲线

Fig.4 Theoretical transmission spectrum curves of rear surface coating

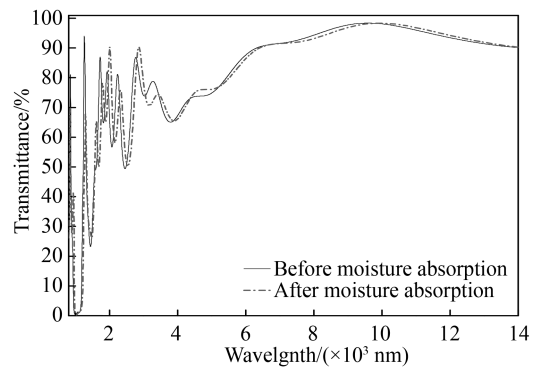


图5 理论设计光谱透过率曲线

Fig.5 The transmission spectrum curve of theoretical design

2 薄膜制备

本实验使用 OPCO-900 型箱式真空镀膜机,采用电子束热蒸发法沉积薄膜.用 IC/5 石英晶体膜厚控制仪进行物理厚度的监控,考夫曼离子源进行辅助沉积.当真空度进入 8.0×10^{-2} Pa 时加烘烤,设定烘烤温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.当真空度为 1.0×10^{-3} Pa 时,使用离子源轰击基片 15 min,镀制工艺参数如表 4.

表4 YbF₃ 和 ZnS 沉积工艺

Table 4 YbF₃ and ZnS deposition process

Material	Substrate temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Degree of vacuum/Pa	Deposition rate/ $(\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$
YbF ₃	150	1.0×10^{-3}	0.7
ZnS	150	1.0×10^{-3}	1.5

3 测试结果及分析

3.1 牢固度测试

镀制完成的波长分离膜在空气中放置 24 小时后薄膜表面出现明显的脱膜的现象,如图 6 所示,破裂的膜层呈向外卷曲状.

查阅相关资料,分析发现这种现象是由于膜层的应力与基底不匹配所致.薄膜在镀制中先后熔化、汽化、凝华、最终沉积在基底上,这种薄膜材料物理形态的转变带来的体积骤变,与沉积粒子间本身的挤压或者拉伸以及成膜不均匀,基底表面不光滑等原因共



图6 脱膜样品

Fig.6 The picture of coating stripping

同作用形成了薄膜的应力.薄膜应力是镀制薄膜过程中所无法避免的,它对薄膜的性能和稳定性构成了巨大的威胁,薄膜应力一般可分为压应力与张应力.ZnS 蒸汽粒子依附基底沉积时,粒子间隙狭小,聚集密度高,相互排斥,成膜后宏观上表现为压应力.YbF₃ 蒸汽粒子依附基底沉积时,粒子间隙疏松,聚集密度低,相互吸引,成膜后表现为张应力.当薄膜表现为张应力时,薄膜在基底上呈现拉伸状态,当薄膜的弹性限度不足以支撑其张应力则会破裂,破裂后的薄膜向外卷曲.当薄膜表现为压应力时,薄膜在基底上呈现挤压状态,当薄膜的弹性限度不足以支撑其压应力则会破裂,破裂后薄膜向内皱缩^[13].

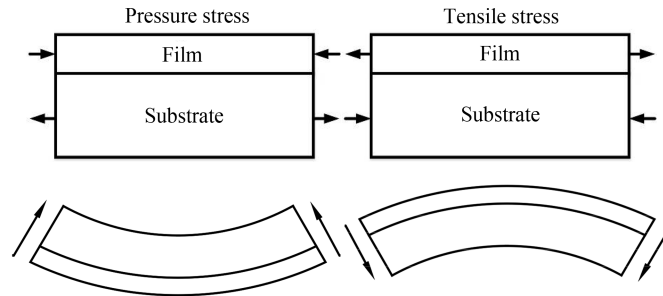


图7 薄膜受力模型

Fig.7 The mechanical model of the membrane

根据薄膜破裂向外卷曲的表状,分析可知所镀制膜层的张应力过大.通过测试脱膜后的光谱与未镀膜时基底相互对比,发现薄膜是整体脱落.为了解决脱膜问题,提高膜层牢固度,应通过提高压应力来平衡薄膜中多余的张应力.根据文献,多层薄膜中的应力,越靠近基底的膜层对整体薄膜的应力影响越大^[14].为了平衡应力之间的相互作用,应提高与 ZnSe 基底相连层 ZnS 的压应力.

如图 8 所示,薄膜的应力随其厚度的增加而增加.分别在 ZnSe 基底上镀制不同厚度的 ZnS 薄膜,通过型号为 CETR-Apex 的布鲁克微纳压痕划痕测试仪,检测其应力得到表 5.

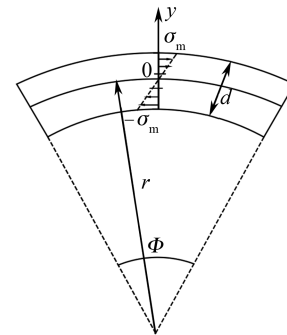


图8 膜层应力与厚度示意图

Fig.8 The picture of film stress and thickness

表 5 ZnS 应力膜厚应力对应表

Table 5 The stresses corresponding to different thickness ZnS

Thickness/nm	Stresses/($\times 10^4$ Pa)	Thickness/nm	Stresses/($\times 10^4$ Pa)
10	119.63	100	1 841.13
20	599.42	150	2 011.69
30	949.93	200	2 077.47
50	1 188.64	250	2 117.14
70	1 675.21		

图 9 为 ZnS 应力随厚度变化的拟合图,ZnS 薄膜的压应力在 0~100 nm 之间随着厚度的增加而增加,100 nm 以上时随着厚度的增加压应力增幅趋于平缓.在考虑设计膜系符合所需技术要求下,将第一层 ZnS 的膜层厚度改成 100 nm,重新实验.

镀制完成后,在空气中放置 24 小时后进行牢固度测试,用黏度大于 3 N/cm² 胶带紧贴在膜层表面,然后沿薄膜表面的垂直方向迅速拉起,重复 15 次^[16],并未出现薄膜破裂的现象.薄膜牢固性得到明显改善.

3.2 光谱测试及分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计和 Varian 600-IR 傅里叶红外光谱仪对刚从真空室取出的样片进行光谱测试,如图 11 所示,1 064 nm 反射率为 99.71%,8~12 μ m 平均透过率为 97.1%,12~14 μ m 平均透过率为 90.1%,符合成像系统使用要求.

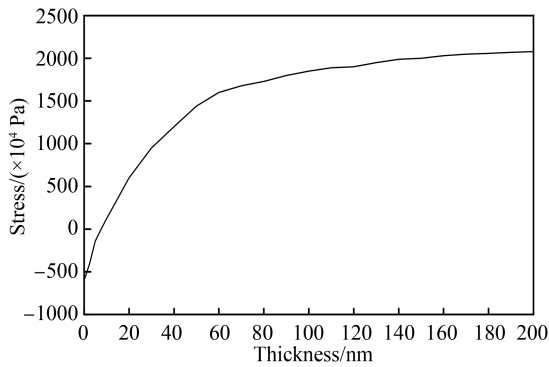


图 9 ZnS 应力随厚度变化拟合图

Fig.9 The variation of ZnS stress with thickness

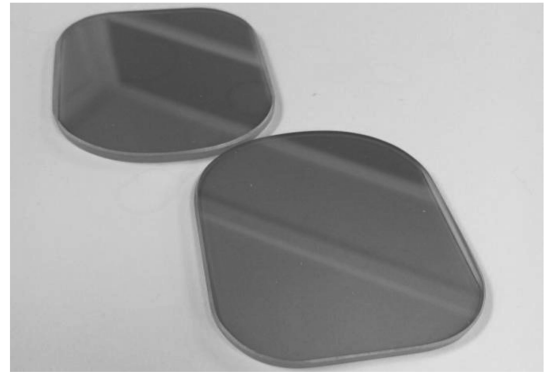
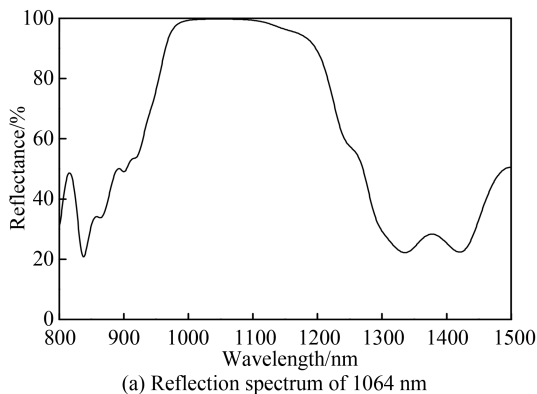
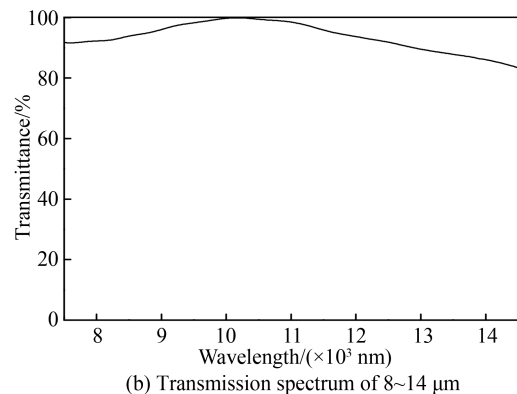


图 10 未破裂的分离膜

Fig.10 Unstripped coating samples



(a) Reflection spectrum of 1064 nm

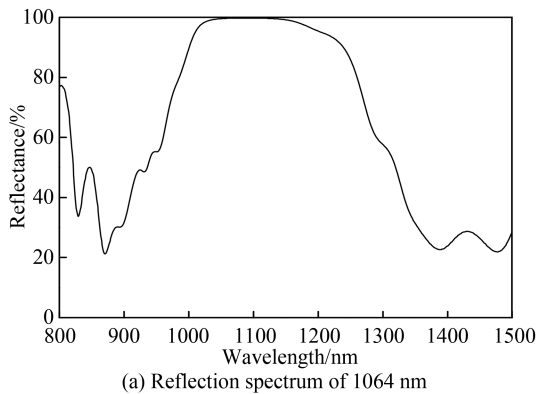


(b) Transmission spectrum of 8~14 μm

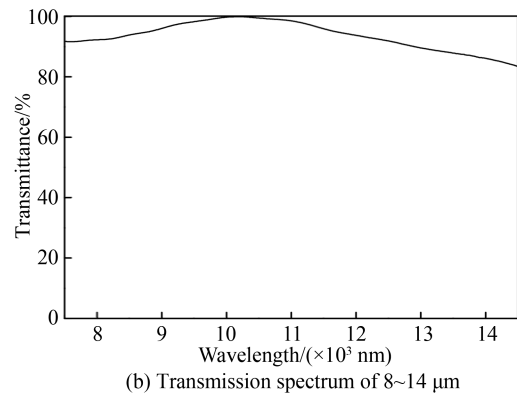
图 11 未吸潮样片光谱测试

Fig.11 The actual spectral curve of the non-moisture-absorbing sample

将镀制完成的分离膜样品进行淋雨试验后对其再次进行光谱测试,如图 12 所示,1 064 nm 反射率为 99.64%,8~12 μm 平均透过率为 97.0%,12~14 μm 平均透过率为 90.2%,符合成像系统使用要求.



(a) Reflection spectrum of 1064 nm



(b) Transmission spectrum of 8~14 μm

图 12 吸潮样片光谱测试

Fig.12 The actual spectral curve of the moisture absorption sample

将测试结果与理论设计曲线相对比,8~12 μm 平均透过率为 97.1%,略低于理论设计的 97.3%;12~14 μm 波段平均透过率为 90.1%,低于理论设计的 92%.

查阅相关资料,ZnS 在远红外波段具有一定的吸收性,从 11.5 μm 吸收加剧,由于镀制膜层较厚,透过率在 8~11.5 μm 波段略有损失,从 11.5 μm 以后下降明显.光谱测试结果与理论设计存在一定差距,但能够满足 1 064 nm 激光与远红外共窗口成像系统的技术要求,正常工作.

4 结论

根据激光与远红外共窗口成像系统技术参数要求,选择 ZnS 和 YbF₃ 作为镀膜材料,考虑分离膜的应用

会受到潮湿环境的影响,根据薄膜的结构特性,计算并分析其受潮前后的折射率变化规律,综合考虑设计的波长分离膜膜系结构符合受潮前后的指标要求;对薄膜材料的应力分析,优化连接层 ZnS 的厚度,提高了薄膜的牢固性,所制备的分离膜在户外环境可满足系统使用要求.但是实际制备的波长分离膜和理论设计存在些许差异,因此如何提高工艺精度,控制误差将是今后研究的方向.

参考文献

- [1] YUAN Sheng-fu, LUO Wei, ZHONG Wei, *et al.* Performance optimization of a middle infrared and long infrared dual-band laser[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(5): 404-407.
袁圣付,罗威,钟伟,等.中、远红外双波段激光器的性能优化[J].红外与毫米波学报,2013,**32**(5):404-407.
- [2] ZHAO Jian-chuan, WANG Di-nan, CHEN Chang-qing, *et al.* Infrared laser active imaging and recognition technology [J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(5): 795-802.
赵建川,王弟男,陈长青,等.红外激光主动成像和识别[J].中国光学,2013,**6**(5):795-802.
- [3] LI Pei-mao, WANG Xia, JIN Wei-qi, *et al.* Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, **42**(11): 2882-2888.
李培茂,王霞,金伟其,等.双波段红外光学系统设计与像质评价[J].红外与激光工程,2013,**42**(11):2882-2888.
- [4] QU Rui, DENG Jian. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 363-369.
曲锐,邓键.红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J].光学学报,2015,**35**(1):363-369.
- [5] VIZGAITIS J N, HASTINGS A R. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061306.
- [6] MAHMOUD A. Optical design of high resolution and shared aperture electro-optical/infrared sensor for UAV remote sensing applications[C]. *Igarss IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 2016: 2921-2924.
- [7] LI Xi-jie, LIU J, CHEN Y. Design of dual-band, high zoom ratio and continuous co-focal optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1022003.
李西杰,刘钧,陈阳.双波段大变焦比连续共变焦光学系统设计[J].光子学报,2016,**45**(10):1022003.
- [8] FU Xiu-hua, CHEN Zhi-hang. Development of short-medium wave energy regulation filter in infrared simulation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(5): 178-186.
付秀华,陈志航.红外仿真系统短中波能量调节滤波器的研制[J].中国激光,2016,**43**(5):178-186.
- [9] ZHANG Yin-hua, HUANG Wei, ZHANG Yun-dong. Optical property of several infrared thin film materials[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(4):104-108.
张殷华,黄伟,张云洞.几种红外薄膜材料的光学特性[J].光学仪器,2006,**28**(4):104-108.
- [10] GONG Zhe, HE Da-wei, WANG Yong-sheng, *et al.* Controllable synthesis of high quality monolayer WS₂ with large size on sapphire substrate by chemical vapor deposition[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(8): 984-989.
巩哲,何大伟,王永生,等.化学气相沉积法在蓝宝石衬底上可控生长大面积高质量单层二硫化钨[J].发光学报,2016,**37**(8):984-989.
- [11] 唐晋发,等.现代光学薄膜技术[M].浙江大学出版社,2006.
- [12] WANG Hang, XIONG Chang-xin, HE Guang-zong. Design and preparation of medium-wavelength infrared band pass combined filter[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, **13**(4): 83-86.
王航,熊长新,何光宗.组合结构的中波红外带通滤光片研制[J].光学与光电技术,2015,**13**(4):83-86.
- [13] TIAN Miao-miao, HE Xiao-guang, QI Jin-gang, *et al.* Preparation of transparent conductive praseodymium titanate doped indium oxide film and its application in organic opto-electronic devices[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(10): 1162-1166.
田苗苗,贺小光,祁金刚,等.IPTO薄膜制备及其在有机光电器件中的应用[J].发光学报,2015,**36**(10):1162-1166.
- [14] CHEN T, LUO C T. The research progress of thin film stress[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2006.
陈焘,罗崇泰.薄膜应力的研究进展[J].真空与低温,2006,**12**(2):68-74.
- [15] FU Xiu-hua, XIONG Shi-fu, LIU Dong-mei, *et al.* Study and fabrication broad spectral absorbing film in second-order correlated imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1033001.
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):1033001.