

基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制

付秀华, 姜洪妍*, 张 静, 熊仕富, 郭 凯, 孙 兵

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 以硫系玻璃为基底, 根据膜系设计理论, 结合软件完成了短中波红外减反膜的设计。通过对材料热应力的计算分析, 研制了一种混合材料 M-11 作为连接层, 优化了沉积工艺参数, 并根据其力学特性修正膜系结构, 解决了硫系玻璃的脱膜问题。光谱测试结果表明, 该膜层在 $1.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $3.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 波段透过率分别为 95.8%、96.7%, 满足红外成像系统的使用要求。

关键词 薄膜; 硫系玻璃; 红外成像系统; 连接层; 应力分析

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0903002

Preparation of Short and Medium Wave Infrared Anti-Reflective Coating Based on Chalcogenide Glass

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

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Based on the film design theory, we design anti-reflective coating for short and medium infrared based on chalcogenide glass. Based on calculation and analysis of material thermal stress, a mixed material M-11 is developed as the connecting layer, the parameters of the deposition process are optimized. and the coating structure is corrected based on its mechanical properties. We solve the problem of stripping of chalcogenide glass. The results of spectral tests show that the transmittance in the bands of $1.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ and $3.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ are 95.8% and 96.7%, respectively, which satisfies the requirement of infrared imaging system.

Key words thin films; chalcogenide glass; infrared imaging system; connection layer; stress analysis

OCIS codes 310.3840; 310.1210; 310.4925; 310.6860

1 引 言

硫系玻璃在民用、医疗和军事领域具有很多潜在的应用价值, 作为透红外光学元件可应用于热成像、夜视、化学传感分析等, 在红外镜头的工程化、无热化设计^[1]等方面有着明显优势。硫系玻璃是基于硫族元素 S、Se、Te, 掺杂 Ge、As、P、Sb 元素所形成的二元或者三元化合物玻璃, 是一种非晶态材料。同时具有声子能量低、红外透过率高、折射率可调等优点, 并且有良好的化学稳定性和热稳定性^[2-3]。随着玻璃组成的变化, 透明区可从 $2\ \mu\text{m}$ 扩展至 $18\ \mu\text{m}$ 。由于其具有优良的透中红外和极佳的消热差性能, 被视为新一代温度自适应红外光学系统的核心透镜材料^[4]。

2014 年 Abdel-Moneim 等^[5]在 $\text{Ge}_{17}\text{As}_{18}\text{Se}_{65}$ 衬底上热压 $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ 硫系玻璃薄膜, 研制了稳定的低损耗光波导; 2015 年 Huddleston 等^[6]采用精密模压法制备了高精度的硫系玻璃透镜, 应用于红外系统, 降低了光学系统热敏性。2016 年宁波大学用硫化锌、硒化锌和硫系玻璃材料制备的 6 片镜片设计了 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 无热

收稿日期: 2017-05-02; 收到修改稿日期: 2017-06-02

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: Jhy_optics@126.com

化长波红外广角镜头^[7];2017年华北光电技术研究所利用锗和硫系玻璃设计了大面阵非制冷探测器,在-40~55℃均能够清晰成像^[8]。根据所查资料,虽然对硫系玻璃的制备及应用报道较多,但以硫系玻璃为基底的短中波红外成像系统减反膜未见报导。

虽然硫系玻璃用途越来越广泛,但是其材料软、硬度低、附着力差导致表面镀膜难度增大。本文基于硫系玻璃研制了短中波红外成像系统减反膜,主要研究如何提高硫系玻璃表面附着力,解决硫系玻璃基底脱膜的问题。

2 膜系设计

本论文基于硫系玻璃基底研制减反射膜,其技术参数如表1所示。

表1 减反膜技术参数

Table 1 Technical parameters of anti-reflective coating

Parameter	Specification	
Substrate	TI-1173	
Incident angle / (°)	0	
Spectrum range / nm	1400-2500	3500-4500
Transmittance / %	>95	>95

硫系化合物玻璃根据组成元素和成分的不同,光学、力学和热学性质也有很大差别。本文所用基底 TI-1173 的组成成分为 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$,其折射率约为 2.75。

2.1 材料选择

根据技术参数要求、硫系玻璃的组成成分和光学常数进行材料选择^[9]。可选择的高折射率材料有 ZnS 和 ZnSe,低折射率材料有 YbF_3 和 YF_3 。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,且与低折射率氟化物材料有良好的应力匹配^[10]。ZnSe 的透明区为 $0.55\sim 15\ \mu\text{m}$,但易潮解。 YF_3 成膜后的机械强度比 YbF_3 低。最终选择 ZnS 和 YbF_3 作为高、低折射率材料。实验测得两种材料的折射率如图 1 所示。

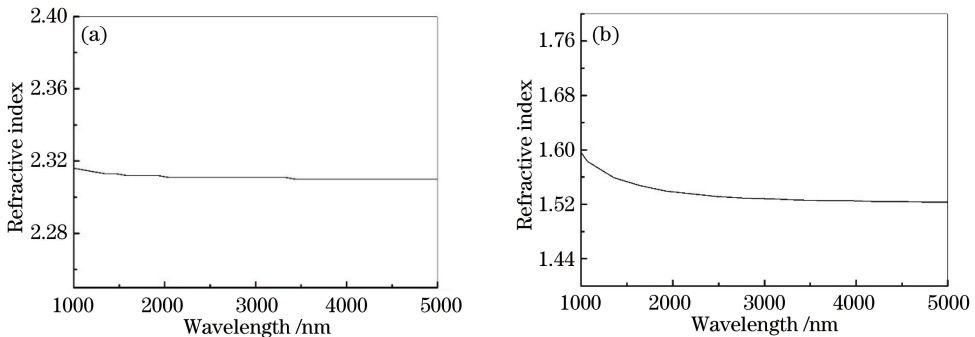


图1 两种材料折射率。(a) ZnS;(b) YbF_3

Fig. 1 Refractive index of two materials. (a) ZnS; (b) YbF_3

2.2 理论设计

利用膜系设计软件 TFCalc 进行膜系结构设计,其膜系为:Sub |2.29H 0.74L 0.80H 1.32L 0.25H 3.03L 0.53 H 0.66L 2.90H 0.12L 1.65H 0.59L 0.92H 2.24L| Air,其中 Sub 代表 TI-1173,H 代表 ZnS,L 代表 YbF_3 ,Air 代表空气。理论设计的双面透过率光谱如图 2 所示,在 $1.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段平均透过率为 97.54%,在 $3.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 波段平均透过率为 98.27%。

3 沉积工艺研究

本实验使用 ZZS700-II 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监控物理厚度,霍尔离子源进行辅助沉积。当真空度为 $1.0\times 10^{-3}\ \text{Pa}$ 时,使用离子源轰击基片 10 min,分别沉积了 100 nm 的 ZnS 和 YbF_3 ,均出现脱膜现象,如图 3 所示。增加基底温度和退火处理可以提高薄膜

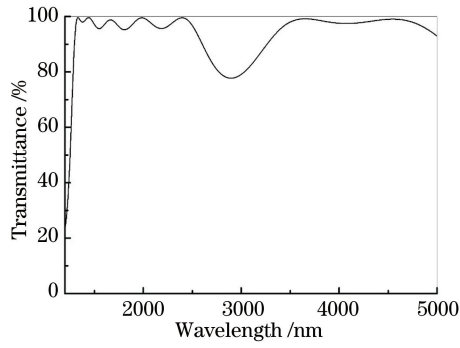


图 2 减反膜理论透过率曲线

Fig. 2 Theoretical transmittance curves of anti-reflection coating

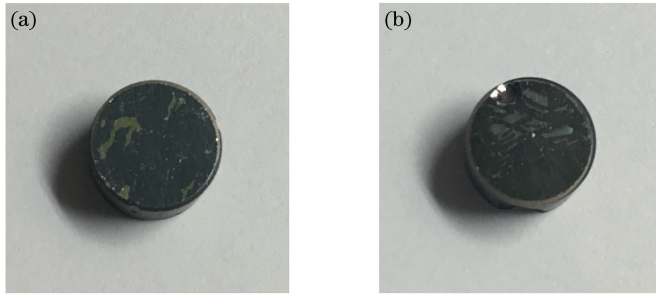


图 3 膜层脱落图片。(a)单层 ZnS;(b)单层 YbF₃

Fig. 3 Picture of coating stripping. (a) Single-layer ZnS; (b) single-layer YbF₃

牢固度,设定烘烤温度为 150 °C,退火时间为 1 h,按照表 2 进行几组实验,均出现脱膜现象。

表 2 几组实验

Table 2 Several groups of experiments

Heating	Annealing	Experimental phenomenon
No	No	Coating stripping
Yes	No	Coating stripping
No	Yes	Coating stripping
Yes	Yes	Coating stripping

经过分析其主要原因是由于衬底与薄膜热膨胀系数的差异产生应力不匹配,尤其是热应力^[11]分布不均。TI-1173, ZnS, YbF₃的热膨胀系数分别为 13.5×10^{-6} , 7.85×10^{-6} , $10.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。因此需要一种合适的薄膜材料作为连接层,提高衬底与薄膜之间的附着力。

3.1 连接层材料

文献[12]对应力进行了分析,由胡克定律得应力 $\sigma = \epsilon E$,其中应变可表示为

$$\epsilon = c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha \Delta T, \quad (1)$$

式中 E 为薄膜的杨氏模量, c 为材料受温差影响产生的均匀应变, y 为厚度方向坐标, t_b 为中性面距基底距离, r 为室温下薄膜的曲率半径, α 为材料热膨胀系数, ΔT 为温度变化量。

基底的热应力为

$$\sigma_s = E_s \left(c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha_s \Delta T \right), \quad -t_s \leq y \leq 0. \quad (2)$$

第 i 层薄膜的热应力为

$$\sigma_i = E_i \left(c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha_i \Delta T \right), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

根据力矩平衡可得

$$c = \frac{(E_s t_s \alpha_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i \alpha_i) \Delta T}{E_s t_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i}, \quad (4)$$

$$t_b = \frac{-E_s t_s^2 + \sum_{i=1}^n E_i t_i (2h_{i-1} + t_i)}{2(E_s t_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i)}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{3[E_s(c - \alpha_s \Delta T)t_s^2 - \sum_{i=1}^n E_i t_i (c - \alpha_i \Delta T)(2h_{i-1} + t_i)]}{E_s t_s^2 (2t_s + 3t_b) + \sum_{i=1}^n E_i t_i [6h_{i-1} t_i + 2t_i^2 - 3t_b (2h_{i-1} + t_i)]}, \quad (6)$$

式中 $h_i = \sum_{j=1}^i t_j$, $i=1, 2, 3, \dots, n$, 表示前 i 层薄膜的总厚度, E_s, α_s, t_s 分别为基底的杨氏模量、热膨胀系数、厚度, E_i, α_i, t_i 分别为第 i 层薄膜的杨氏模量、热膨胀系数、厚度。

Moore 和 Jarvis 提出用力矩判断薄膜是否发生破裂或分层, 当垂直于界面的应力力矩为负时, 薄膜容易出现分层现象, 当力矩为正时分层受到抑制^[12]。力矩表达式为

$$M_k = \sum_{i=k}^n E_i t_i \left\{ (c - \alpha_i \Delta T) \left(h_{i-1} - h_{k-1} + \frac{t_i}{2} \right) + \frac{1}{r} \left[h_{i-1}^2 + h_{i-1} t_i + \frac{t_i^2}{3} - (t_b + h_{k-1}) \left(h_{i-1} + \frac{t_i}{2} \right) + t_b h_{k-1} \right] \right\}. \quad (7)$$

TI-1173 衬底的热膨胀系数 $\alpha_s = 13.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 杨氏模量 $E_s = 21.8 \text{ GPa}$, 沉积温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 即 $\Delta T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当 $i=k=1$ 时, 将 (4)~(6) 式代入 (7) 式可得: 第一层薄膜材料的热膨胀系数 $\sigma_1 > \sigma_s$ 时, $M_1 < 0$, 膜层可能发生分层; 当 $\sigma_1 < \sigma_s$ 时, $M_1 > 0$, 膜层分层受到抑制。表 3 为常用短中波红外薄膜材料热学与力学参数, 以及根据 (3)~(6) 式计算出的材料热应力参数。

表 3 薄膜的热学与力学参数

Table 3 Thermal and mechanical parameters of thin films

Material	Thermal expansion / (10^{-6} K^{-1})	Young's modulus / GPa	Thermal stress / (10^8 Pa)
BaF ₂	18.40	65	-0.414
YbF ₃	10.80	76	2.667
Al ₂ O ₃	5.00	230	2.507
ZnS	7.85	74	5.208
MgO	10.50	248.74	-3.626

由力矩分析可知, YbF₃、Al₂O₃、ZnS、MgO 作为第一层材料时, 薄膜分层会受到抑制, 但经过实验验证 ZnS 作为第一层时会出现脱膜现象, 需要进一步分析膜层应力。计算得到 YbF₃、Al₂O₃、MgO 作为第一层时热应力大小分别为 2.667×10^8 、 2.507×10^8 、 $-3.626 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。Al₂O₃ 作为第一层薄膜材料时, 薄膜的热应力最小。为进一步减少热应力, 选择应力相反的 MgO 与 Al₂O₃ 混合为一种新材料 M-11。Al₂O₃ 和 MgO 的折射率分别为 1.54、1.7, 蒸发温度分别为 $2100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2600 \text{ }^\circ\text{C}$, 可以作为混合材料使用。下面对 Al₂O₃ 和 MgO 混合的中折射率材料 M-11 的沉积工艺进行研究。

3.2 新材料 M-11 沉积工艺

经过大量实验, MgO 与 Al₂O₃ 混合比例为 8:2 时, 混合折射率如图 4 所示, 与 ZnS 和 YbF₃ 折射率相匹配, 易于设计。在 TI-1173 基底上镀制单层 100 nm 的 M-11, 充入气体为氧气, 以不同的蒸发速率进行实验。实验结果表明: 速率为 0.2 nm/s 时出现脱膜现象; 速率为 0.5 nm/s 时未出现脱膜现象; 速率为 0.7 nm/s 时未出现脱膜现象, 但是镀制后的薄膜样品有喷点。经分析, 单一材料的热膨胀系数并不是一个固定不变的常量, 以不同速率蒸镀的薄膜由于聚集密度的不同, 热膨胀系数同样会有所差异, 相应的热应力也是变化的。在以速率 0.5 nm/s 沉积 M-11 得到的薄膜所表现出的热应力与硫系玻璃基底匹配最好, 样品表面质量更好。根据 GJB 2485-95 标准, 用黏合强度不小于 3 N/cm^2 的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 10 次,膜层没有脱落;再用橡皮摩擦头外裹两层脱脂纱布,以 4.9 N 的压力摩擦 50 次,无擦痕等损伤,如图 5 所示,符合检测要求,可以作为连接层使用。

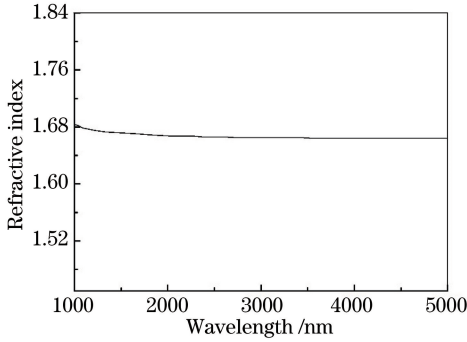


图 4 M-11 折射率

Fig. 4 Refractive index of M-11

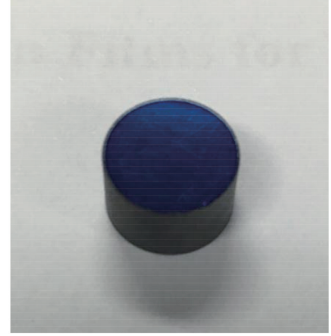


图 5 未脱膜薄膜样品

Fig. 5 Unstripped coating samples

3.3 新材料 M-11 应力分析

薄膜应力通常分为内应力、热应力和表面张力,宏观上薄膜的应力^[13]可以用表示为

$$\sigma_f = \frac{1}{6r} \frac{E_s d_s^2}{(1 - \nu_s) d_f}, \quad (8)$$

式中 E_s 为基底的杨氏模量, d_s 为基板的几何厚度, r 为薄膜的曲率半径, ν_s 为基底的泊松系数, d_f 为薄膜的几何厚度。

本实验采用曲率法,通过台阶仪测量基底镀膜前后的曲率变化来计算薄膜的应力。样品曲率测量示意图如图 6 所示。

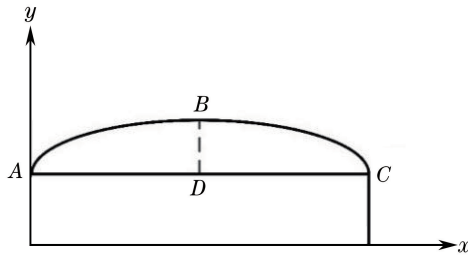


图 6 基底曲率测量示意图

Fig. 6 Schematic of substrate curvature measurement

设 ABC 为薄膜表面, AC 为测量宽度, BD 为薄膜弯曲程度,且 AC 的长度为 a , BD 的长度为 h ,根据几何计算得到薄膜的曲率半径为

$$r = \frac{1}{2h} \left(\frac{a^2}{4} + h^2 \right), \quad (9)$$

测量宽度 $a = 5 \text{ mm}$, 由于 $a \gg h$, 将 (9) 式简化为

$$r = \frac{a^2}{8h}. \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式中,得到

$$\sigma_f = \frac{4E_s}{3(1 - \nu_s)} \frac{d_s^2 h}{d_f a^2}, \quad (11)$$

其中,

$$h = h_1 - h_0, \quad (12)$$

h_0 为镀膜前基底的弯曲程度, h_1 为镀膜后基底的弯曲程度。通过测量 h_0 和 h_1 值,就可以根据 (11) 式计算出薄膜的应力。实验在 TI-1173 基底上镀制 400 nm 的新材料 M-11,图 7 为镀膜前后测试的曲率图。

通过曲线分析, $h_0 = 300 \text{ nm}$, $h_1 = 500 \text{ nm}$, 实验基底为直径 10 mm 的硫系玻璃。将数据代入 (7) 式中,

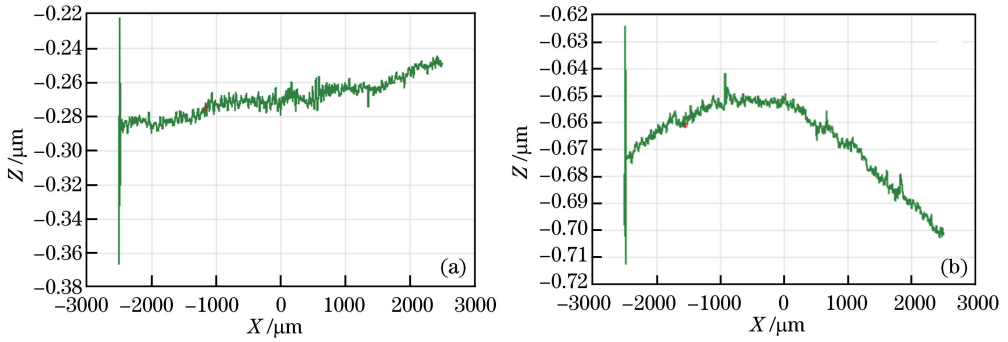


图 7 台阶仪测试的镀膜前后表面曲率。(a)镀膜前;(b)镀膜后

Fig. 7 Surfaces curvature of before and after coating tested by the step meter. (a) Before coating; (b) after coating

其中 $E_s = 21.8 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.24$, $d_s = 3 \text{ mm}$, $d_f = 400 \text{ nm}$, $a = 5 \text{ mm}$ 。计算得到薄膜的应力 $\sigma_s = 6.884 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ 。薄膜应力与薄膜柱体的作用力密切相关, M-11 的应力值为 10^5 N/cm^2 数量级, 属于高聚集密度薄膜, 柱体之间空隙很小, 因而它们之间产生一个排斥力, 其宏观应力呈现压应力。

3.4 膜系修正

在设计薄膜结构时, 一般应使张应力和压应力交替出现, 这样可以削弱薄膜中累计应力, 从而增加膜层的牢固性。ZnS 的应力为压应力, YbF₃ 的应力为张应力, 从应力角度分析重新设计膜系, 第一层镀制 100 nm 的 M-11, 第二层镀制 50 nm 的 YbF₃, 重新优化设计, 得到膜系: Sub | 1.05M 0.48L 1.08H 2.23L 0.83H 2.38L 0.26H 4.18L 1.01H 0.71L 4.18H 0.63L 1.75H 1.34L 1.24H 3.41L | Air, 其中 M 代表 M-11。理论设计的双面透过率光谱如图 8 所示, 在 1.4~2.5 μm 平均透过率为 97.51%, 在 3.5~4.5 μm 波段平均透过率为 98.32%。

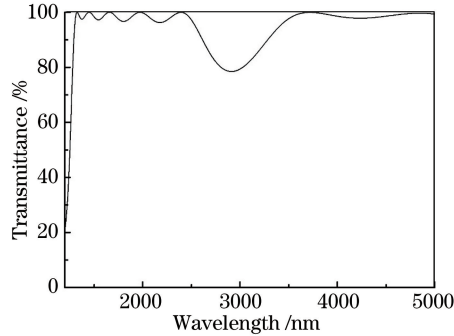


图 8 理论设计透过率光谱曲线

Fig. 8 Transmission spectrum of theoretical design

实验工艺参数如表 4 所示。

表 4 M-11、ZnS 和 YbF₃ 沉积工艺参数

Table 4 Deposition process parameters of M-11, ZnS and YbF₃

Material	Substrate temperature / °C	Filling gas	Degree of vacuum / Pa	Deposition rate / (nm · s ⁻¹)	Ion source anode current / A	Ion source anode voltage / V
M-11	150	O ₂	1.5×10^{-2}	0.5	5	180
ZnS	150	Ar	1.5×10^{-2}	0.7	5	180
YbF ₃	150	Ar	1.5×10^{-2}	0.8	5	180

镀制第一层薄膜时充入氧气, 第一层镀制结束后改充氩气并抽真空到 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 继续镀制。全程通过调节充气流量保持真空度在 $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 并在镀制完成后进行退火处理^[14]。实验后实验样品经过牢固度测试, 膜层未脱落且无损伤, 如图 9 所示, 符合检测要求。

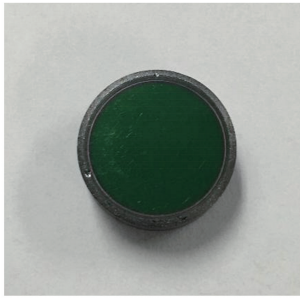


图 9 薄膜图片

Fig. 9 Picture of coating thin film

4 光谱测试

采用 UV-3150 分光光度计(岛津公司,日本)对 1.4~2.5 μm 波段进行光谱特性测试,利用 Varian600-IR 傅里叶红外光谱仪对 3.5~4.5 μm 波段进行光谱特性测试,测试结果如图 10 所示。

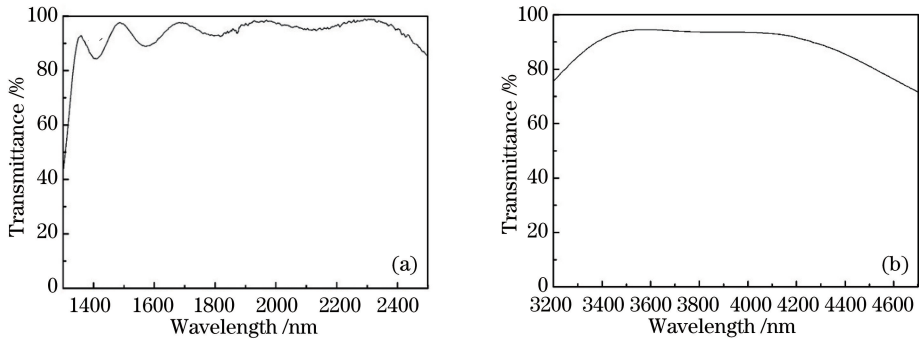


图 10 实际测试双面透过率曲线。(a) 1.4~2.5 μm ; (b) 3.5~4.5 μm

Fig. 10 Transmittance curve of both sides in actual test. (a) 1.4~2.5 μm ; (b) 3.5~4.5 μm

该滤光膜在 1.4~2.5 μm 波段平均透过率达到 95.8%,在 3.5~4.5 μm 波段平均透过率为 96.7%。测试结果与设计曲线相比有微小差异,经模拟分析,光谱曲线的变化主要是由于膜厚监控误差造成的。表 5 为多次实验中选取 4 次实验结果的残余蒸镀量,并计算出 4 次实验的平均值。

表 5 4 次实验结果的残余蒸镀量及平均值

Table 5 Residual deposition and its average value of the four experimental results

Number of layers	Residual deposition				Average value
	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3	Experiment 4	
1	0.5	0.7	0.7	0.6	0.625
2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.475
3	0.8	0.6	0.4	0.5	0.575
4	0.6	0.7	0.4	0.4	0.525
5	0.6	0.5	0.4	0.7	0.55
6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.55
7	0.5	0.7	0.5	0.5	0.55
8	0.6	0.5	0.6	0.6	0.575
9	0.6	0.5	0.8	0.5	0.6
10	0.5	0.8	0.5	0.5	0.575
11	0.8	0.6	0.6	0.5	0.625
12	0.5	0.5	0.5	0.6	0.525
13	0.6	0.6	0.7	0.4	0.575
14	0.6	0.6	0.5	0.5	0.55
15	0.7	0.7	0.7	0.5	0.65
16	0.6	0.6	0.5	0.5	0.55

用膜层物理厚度减去相应膜层的残余蒸镀膜量平均值,修改膜系,重新实验后得到如图 11 所示的光谱曲线。

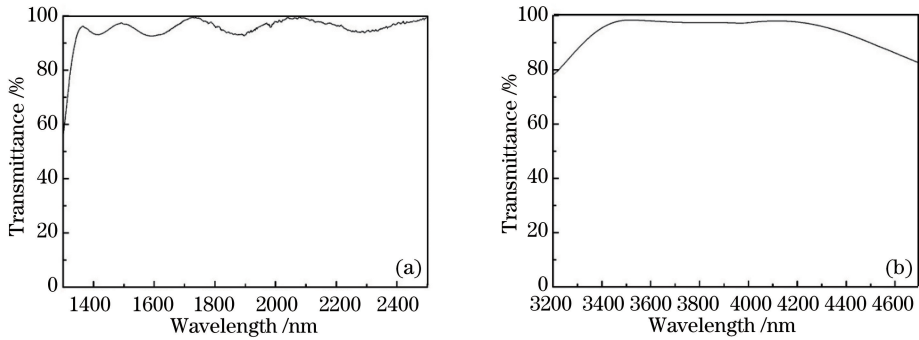


图 11 实际测试双面透过率曲线。(a) 1.4~2.5 μm ; (b) 3.5~4.5 μm

Fig. 11 Transmittance curve of both sides in actual test. (a) 1.4~2.5 μm ; (b) 3.5~4.5 μm

该滤光膜在 1.4~2.5 μm 波段平均透过率为 96.3%,在 3.5~4.5 μm 波段平均透过率为 97.4%。测试结果与减去残余蒸镀膜前测试曲线相比透过率有所提高,满足使用要求。

5 结 论

基于硫系玻璃,选择 ZnS、YbF₃ 和 M-11 作为镀膜材料,利用膜系设计软件完成了短中波红外成像系统减反膜的设计。通过计算材料的热应力,研制了一种混合材料 M-11 作为连接层,研究沉积工艺,并进行了应力分析,确定其应力特性,从而解决了硫系玻璃基底镀膜脱膜的问题。根据新材料的光学常数,修正膜系设计,并采用电子束蒸发和离子辅助沉积技术研制了短中波减反射膜。但是实验结果与理论相比透过率低,因此通过改进工艺、提高设计方法、寻找新材料以提高透过率是今后研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Shi Haodong, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.* Design of large relative aperture infrared athermalized optical system with chalcogenide glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622002.
史浩东, 张 新, 曲贺盟, 等. 基于硫系玻璃的大相对孔径红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622002.
- [2] 陶光明. 新型硫系玻璃红外材料的制备及其性能研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [3] Yan Chunyang, Wu Lihua, Dai Shixun, *et al.* CO₂ laser power delivery characteristics of Ge-Sb-Se glass fibers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0803001.
严春阳, 吴丽华, 戴世勋, 等. Ge-Sb-Se 硫系玻璃光纤的 CO₂ 激光导能特性[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0803001.
- [4] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, *et al.* Chalcogenide glass and their infrared optical application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 847-852.
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847-852.
- [5] Abdel-Moneim N S, Mellor C J, Benson T M, *et al.* Fabrication of stable, low optical loss rib-waveguides via embossing of sputtered chalcogenide glass-film on glass-chip[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(2): 351-361.
- [6] Huddleston J, Novak J, Moreshead W V, *et al.* Investigation of As₄₀Se₆₀ chalcogenide glass in precision glass molding for high-volume thermal imaging lenses[C]. SPIE, 2015, 9451: 94511O.
- [7] Wang Jing, Wu Yuehao, Jiang Bo, *et al.* Application of chalcogenide glass in designing a long wavelength infrared athermalized wide-angle lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1211008.
王 静, 吴越豪, 姜 波, 等. 硫系玻璃在无热化长波红外广角镜头中的应用[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1211008.
- [8] Yang Jiaqiang, Peng Qingqing, Liu Lin, *et al.* Design of refractive/diffractive hybrid optical athermalization lens based on chalcogenide glass[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 225-229.
杨加强, 彭晴晴, 刘 琳, 等. 基于硫系玻璃的折衍混合光学无热化镜头设计[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 225-

- [9] Fu Qiang, Zhang Xin. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208223.
付 强, 张 新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208003.
- [10] Fu Xiuhua, Wang Gang, Liu Dongmei, *et al.* Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0107001.
付秀华, 王 刚, 刘冬梅, 等. 可见与红外制导系统高通滤光片的研制 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0107001.
- [11] Wang Xiaozeng. The analysis of thermal stress and deformation of GaN films on the substrate of Al_2O_3 . [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041602.
王小增. Al_2O_3 衬底上 GaN 薄膜热应力和变形极差分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041602.
- [12] Fu Xiuhua, Pan Yonggang, Dong Jun, *et al.* The characteristics of connecting layer material on TeO_2 crystal surface by thermal stress method [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0131001.
付秀华, 潘永刚, 董 军, 等. 用热应力法研究二氧化碲晶体表面连接层材料的特性 [J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0131001.
- [13] Gu Peifu, Zheng Zhenrong, Zhao Yongjiang, *et al.* Study on the mechanism and measurement of stress of TiO_2 and SiO_2 thin-films [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6459-6463.
顾培夫, 郑臻荣, 赵永江, 等. TiO_2 和 SiO_2 薄膜应力的产生机理及实验探索 [J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6459-6463.
- [14] Tian Guanglei, Shen Yanming, Shen Jian, *et al.* Influence of technological conditions of deposition process on microstructure of thin films [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 673-678.
田光磊, 申雁鸣, 沈 健, 等. 制备工艺条件对薄膜微结构的影响 [J]. 中国激光, 2006, 33(5): 673-678.