

## 红外超宽带分光镜研究

张静 孙文瀚 付秀华 潘永刚 王奔 林兆文 石澎

### Research on infrared ultrawideband beam splitter

ZHANG Jing, SUN Wenhan, FU Xiuhua, PAN Yonggang, WANG Ben, LIN Zhaowen, SHI Peng

引用本文:

张静, 孙文瀚, 付秀华, 等. 红外超宽带分光镜研究[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1270–1276. DOI: 10.5768/JAO202445.0605001

ZHANG Jing, SUN Wenhan, FU Xiuhua, et al. Research on infrared ultrawideband beam splitter[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1270–1276. DOI: 10.5768/JAO202445.0605001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0605001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 0.2 $\mu\text{m}$ ~20 $\mu\text{m}$ 超宽光谱超材料吸波结构设计仿真

Design and simulation of 0.2  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  ultra-wide spectrum metamaterial absorption structure

应用光学. 2024, 45(5): 903–915 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501004>

#### 傅里叶变换光谱仪角镜二面角误差分析研究

Error analysis on dihedral angle of corner-cube reflectors in Fourier transform spectrometer

应用光学. 2022, 43(5): 959–966 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503005>

#### 基于衍射元件的宽光谱紫外中继光学系统研究

Ultraviolet relay optical system with wide spectrum based on diffractive elements

应用光学. 2023, 44(3): 476–483 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0301002>

#### 可见-短波红外波段光谱模块光机装调及分析

Opto-mechanical assembly and analysis of spectral module in visible-short wave infrared band

应用光学. 2019, 40(2): 193–201 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201003>

#### 15 mm ~ 300 mm宽光谱变焦光学系统设计

Design of 15 mm~300 mm wide-spectrum zoom optical system

应用光学. 2023, 44(3): 491–499 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0301004>

#### 红外光学系统光谱透射比较准技术

Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system

应用光学. 2023, 44(4): 868–873 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1270-07

# 红外超宽带分光镜研究

张 静<sup>1</sup>, 孙文瀚<sup>1</sup>, 付秀华<sup>2</sup>, 潘永刚<sup>2</sup>, 王 奔<sup>2</sup>, 林兆文<sup>2</sup>, 石 澎<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130052; 2. 长春理工大学中山研究院 光电工程学院, 广东 中山 528400;  
3. 中山火炬职业技术学院 光电信息学院, 广东 中山 528400)

**摘 要:** 超宽带分光镜是光谱分析系统中不可缺少的光学元件, 其性能直接影响傅里叶红外光谱仪的测试精度。依据光学薄膜理论, 选用 Ge、ZnSe 和 YbF<sub>3</sub> 作为镀膜材料, 结合基板实际光谱曲线, 通过光谱补偿设计方法, 结合 TFC 软件完成膜系设计。采用电子束蒸发离子束辅助沉积技术进行薄膜制备, 通过优化沉积工艺, 解决了分光镜制备过程中膜厚控制误差大导致光谱差的问题。使用 Spectrum Two 傅里叶红外光谱仪进行检测, 在 45° 入射时, 2.5 μm~20 μm 波段的平均分光比为 52:45.5, 且环境测试结果显示, 分光镜具有良好的稳定性。

**关键词:** 光学薄膜; 宽光谱红外分光镜; 光谱分析; 膜厚误差

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0605001

## Research on infrared ultrawideband beam splitter

ZHANG Jing<sup>1</sup>, SUN Wenhan<sup>1</sup>, FU Xiuhua<sup>2</sup>, PAN Yonggang<sup>2</sup>,  
WANG Ben<sup>2</sup>, LIN Zhaowen<sup>2</sup>, SHI Peng<sup>3</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130052, China; 2. School of Optoelectronic Engineering, Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, China; 3. School of Optoelectronic Information, Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** Ultra-wideband spectroscopy is an indispensable optical component in spectral analysis system, and its performance directly affects the measurement accuracy of Fourier infrared spectrometer. Based on the optical film theory, the Ge, ZnSe and YbF<sub>3</sub> were selected as coating materials. The film system design was completed combined with the actual spectrum curves of the substrate, through the spectral compensation design method, and combined with TFC software. The electron beam evaporation and ion beam assisted deposition technology was used to prepare the thin film. Through the optimization of the deposition process, the problem of poor spectrum caused by large film thickness control error during the preparation of the spectroscopy was solved. The Spectrum Two Fourier infrared spectrometer was used to detect that the average spectral ratio of 2.5 μm~20 μm band was 52:45.5 at 45° incidence. Through the environmental test, the spectroscopy has good stability.

**Key words:** optical film; wide-spectrum infrared spectroscopy; spectral analysis; film thickness error

## 引言

傅里叶红外光谱仪可以对被测样品进行定性和定量分析, 广泛应用于光谱学及宝石、气体观测等领域<sup>[1-3]</sup>。而分光镜作为傅里叶红外光谱仪的核心部

件<sup>[4]</sup>, 其作用是将入射光分为透射光与反射光, 理想情况下的分光比为 1 : 1, 由于其分光波段宽(2.5 μm~20 μm), 分光镜的设计和制作难度增加。1996 年, ROWELL N L 等使用电子束蒸发在 Mylar 膜上镀

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (11973040); 中山市社会公益科技研究项目 (2022B2005); 长春市激光智造与检测装备科技创新中心 长科技合 (2014219)

作者简介: 张静 (1984—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学薄膜研究。E-mail: 465589960@qq.com

通信作者: 孙文瀚 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜研究。E-mail: 1764555474@qq.com

Ge, 制备了一种应用在  $50\text{ cm}^{-1}\sim 550\text{ cm}^{-1}$  波段的双层独立式分束器, 其分光效率最高达到 0.5<sup>[5]</sup>。2014 年, YU T Y 等在 ZnSe 基板上采用电子束蒸发的方法使用 Ge 和 ZnS 作为高低折射率材料, 成功研制了应用于星载红外探测器的宽带分束镜, 工作波段为  $4\text{ }\mu\text{m}\sim 14.5\text{ }\mu\text{m}$ , 分光比约为 1:1<sup>[6]</sup>。同年, 美国 Spectral Systems 公司研制出第 3 代 KBr 分光镜, 工作波段为  $1.5\text{ }\mu\text{m}\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ , 但由于使用了金属膜层, 分光效率略低。2015 年, 付秀华等选用 H4 和  $\text{MgF}_2$ , 并使用电子束沉积方法在 K9 基底上设计并制备了一种  $0\sim 75^\circ$  入射,  $400\text{ nm}\sim 700\text{ nm}$  波段宽光谱 P 光分光膜, 分光比为 6:4<sup>[7]</sup>。2017 年, 刘松林等采用溅射的方法设计制备了以聚酯薄膜为基板的 Cr 膜太赫兹分束器, 其工作波段为  $0.1\text{ THz}\sim 20\text{ THz}$ , 分光比约为 20:20<sup>[8]</sup>。

据现有资料显示, 工作波段在  $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  的超宽带中性分光镜的设计与制备技术鲜有报导。本文针对宽带分光镜的需求, 围绕其分光特性展开工作, 解决超宽带分光镜设计与制备困难的问题。

## 1 膜系结构设计

### 1.1 材料选择

超宽带分光镜作为傅里叶红外光谱仪的核心光学元器件, 其色散特性会使不同波长的干涉图具有不同的横移量, 使其在横向空间内发生混叠。同时, 不同波长的干涉图具有不同的光程差偏移量, 使其在纵向空间内也发生混叠<sup>[9]</sup>。

根据分光镜的使用要求, 应选择  $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  波段, 透明度高、消光系数小、机械牢固度和化学稳定性好的材料。目前, 常用的基板材料为溴化钾 (KBr), 该材料折射率为 1.52( $10\text{ }\mu\text{m}$ ), 透明区为  $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ , 溴化钾工作波段宽, 但材料本身吸潮严重, 对工作环境要求高, 且使用寿命短<sup>[10]</sup>。硒化锌 (ZnSe) 的透明区域为  $0.6\text{ }\mu\text{m}\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ , 是一种常用的红外光学材料, 折射率为 2.4( $10\text{ }\mu\text{m}$ ), 且具有坚硬耐用、零水溶性等特点, 因此制成的分光镜具有更长的寿命<sup>[11-12]</sup>。采用  $1\text{ mm}$  厚的 ZnSe 作为分光镜的基板, 基板的光谱曲线如图 1 所示。可以看出, 在  $16\text{ }\mu\text{m}\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  波段的吸收逐渐增大。

镀膜材料选择 Ge、ZnSe 和  $\text{YbF}_3$ , 通过实验验证, 这 3 种材料的匹配度高, 在  $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  波段吸收少。通过实验测试其单层膜光谱, 拟合后 2 种材料的折射率分布如图 2 所示。

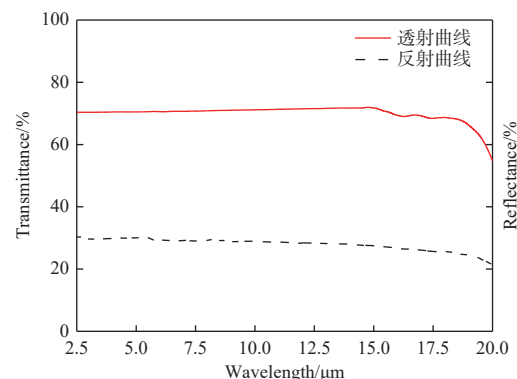
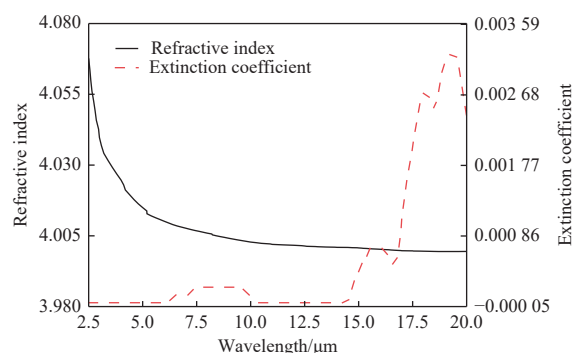
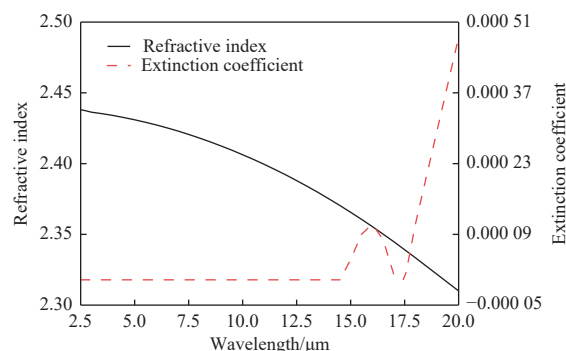


图 1 ZnSe 基板光谱图

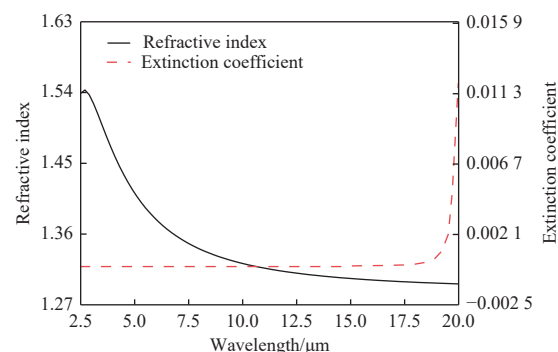
Fig. 1 Spectrum of ZnSe substrate



(a) Ge膜的折射率色散分布



(b) ZnSe膜的折射率色散分布



(c)  $\text{YbF}_3$ 膜的折射率色散分布

图 2 薄膜材料折射率色散分布

Fig. 2 Refractive index dispersion distribution of thin film materials

## 1.2 膜系设计

分光镜膜系结构的设计要考虑分光镜的 2 个面,通常为正面镀分光膜,背面镀减反膜。采用高低折射率材料 ZnSe 和 YbF<sub>3</sub>,设计参考波长为 550 nm,最终膜系为 G|0.178M 0.745N 4.766M 2.07N 3.79M 3.97N 2.44M 6.22N|A,其中 A 表示空气,G 表示基板 ZnSe,M 和 N 是有效厚度 ( $nd\cos\theta$ ) 为  $\lambda/4$  的 ZnSe、YbF<sub>3</sub> 薄膜,单面反射率光谱如图 3 所示。

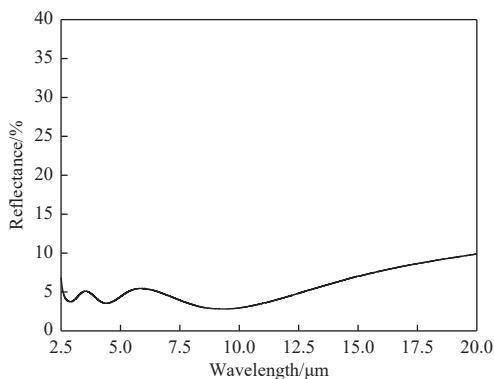


图 3 减反膜设计光谱

Fig. 3 Design spectrum of reduced reflection film

分光镜按膜层材料主要分为 3 种:金属膜分光镜、介质膜分光镜和金属-介质膜分光镜。金属膜分光镜通常在基板表面镀一层金属薄膜以增大反射率,并镀少量介质膜改良光谱。在 2.5 μm~20 μm 波段常用金属膜层材料为 Au 和 Ag,由于 Ag 化学性质不稳定<sup>[13]</sup>,会与空气中的硫化物发生反应变黑,影响分光效果,所以本设计采用的金属材料为 Au。膜层厚度为 4 nm,连接层采用 Ge,结合背面减反膜,金属膜分光镜 2.5 μm~20 μm 波段内的平均透射率为 59.9%,平均反射率为 30.1%,虽然其制作简单,但分光效果并不理想。

4 nm 的 Au 膜已具备一定的分光效果,只需再增加反射膜将长波反射率提高,变成金属-介质膜分光镜即可,确定膜堆为 G|HU(HL)<sup>2</sup>|A,其中 A 表示空气,G 表示基板 ZnSe,H 和 L 是有效厚度为  $\lambda/4$  的 Ge、ZnSe 薄膜,U 表示 Au 膜,设计参考波长为 2 000 nm。使用 Variable Metric 与 Needle 法进行结合优化,优化后的膜堆为 G|0.04H U(4 nm) 0.95H 0.63L 0.4H 0.44L 1.92H 0.59L|A,总厚度为 723.23 nm,结合背部减反膜,金属-介质膜分光镜在 2.5 μm~20 μm 波段内理论设计的平均透射率为 52.7%,平均反射率为 44%。虽然相比于纯金属膜分光镜,其分光效果更佳,但 Au 膜太薄,其对光谱影响的敏感度较高,采用电子束沉积的方式,4 nm 的膜厚很

难精确控制。

由于 ZnSe 基板在 15 μm~20 μm 存在吸收,需要在此波段进行光谱补偿,透射率的补偿量计算公式如下:

$$C(\lambda) = 50\% - \frac{1 - \alpha(\lambda)}{2} \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (2)$$

式中:  $\alpha(\lambda)$  为吸收率;  $R(\lambda)$  为反射率;  $T(\lambda)$  为透射率。

分光镜的设计依据薄膜设计理论,采用的初始膜堆为 G|2L(HL)<sup>3</sup>|A,当中心波长处的透过率接近 50% 时,确定初始膜堆为 G|2L(HL)<sup>13</sup>|A,其中 A 表示空气,G 表示基板 ZnSe,H 和 L 是有效厚度为  $\lambda/4$  的 Ge、ZnSe 薄膜,设计参考波长为 1 500 nm。由于 ZnSe 基板在 15 μm~20 μm 波段存在吸收,所以在此波段将透射优化目标提高  $C(\lambda)$ ,具体目标如图 4 所示。

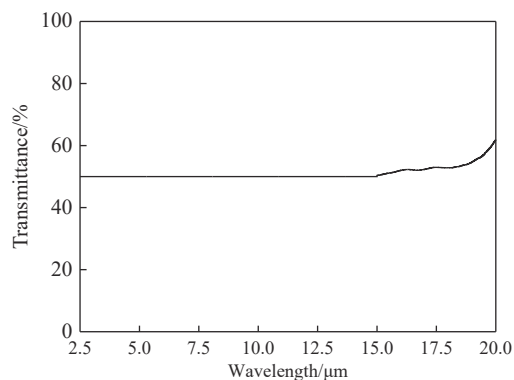
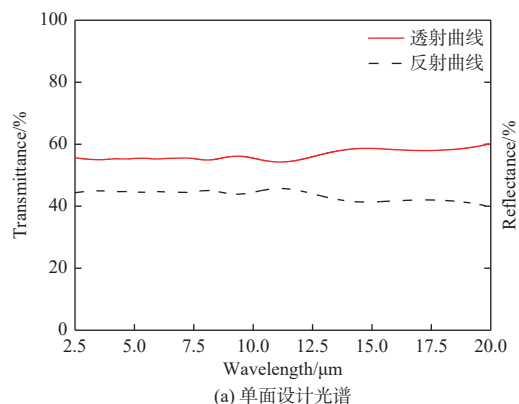


图 4 优化目标

Fig. 4 Optimization goals

优化后的膜系为 23 层, G|0.008H 2.88L 0.17H 2.88L 0.26H 2.79L 0.33H 2.77L 0.36H 2.78L 0.35H 2.88L 0.28H 3.17L 0.17H 3.86L 0.17H 3.24L 0.47H 2.18L 1.13H 1.16L 4H|A,总厚度为 5 315.71 nm,光谱如图 5 所示。



(a) 单面设计光谱

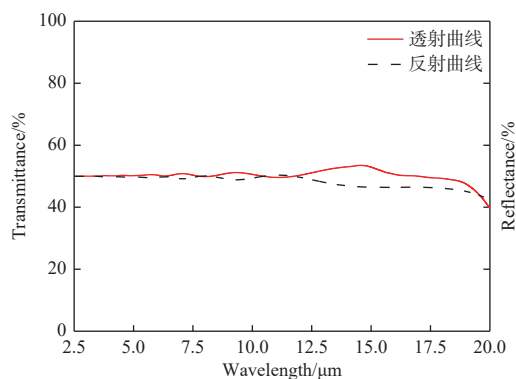
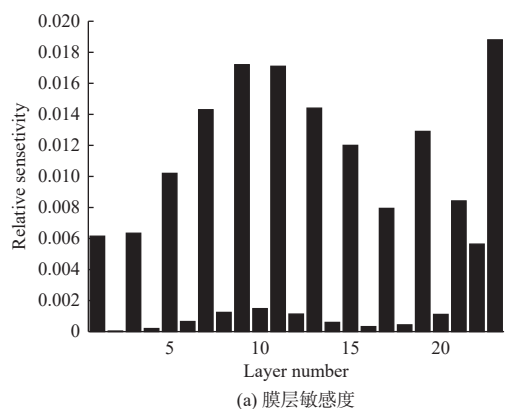


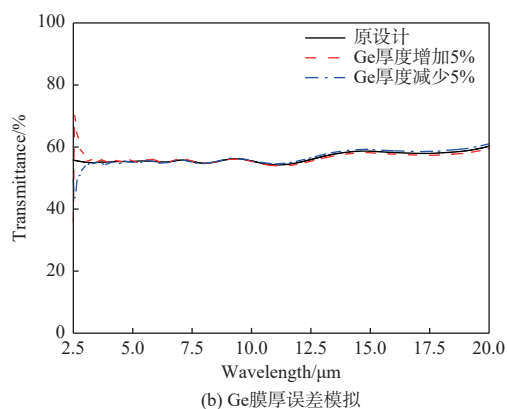
图5 分光膜设计光谱

Fig. 5 Design spectrum of spectroscopic film

针对设计的膜系结构,结合实验设备对膜厚进行误差分析,以透过曲线为例,通过 TFC 软件得到每一层的敏感度,结果如图 6(a)所示。Ge 膜层的敏感度较高,通过交互式分析法对 Ge 整体膜层厚度进行误差模拟,厚度变化在 $\pm 5\%$ 时,光谱改变较小,结果如图 6(b)所示。



(a) 膜层敏感度



(b) Ge膜厚误差模拟

图6 膜厚误差分析

Fig. 6 Membrane thickness error analysis

结合背部减反膜,该分光镜整体设计结果如图 7 所示。

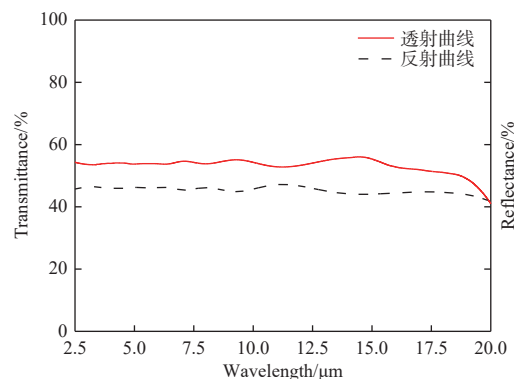


图7 分光镜设计光谱

Fig. 7 Design spectrum of beam splitter

介质膜分光镜在  $45^\circ$  入射时,理论设计的  $2.5\ \mu\text{m} \sim 20\ \mu\text{m}$  波段的平均透过率为 53.3%, 平均反射率为 45.3%。

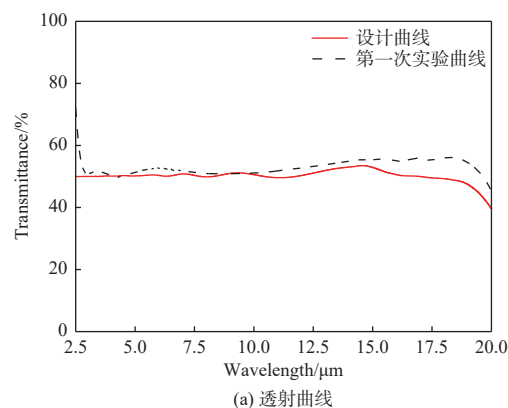
## 2 薄膜的制备

使用光驰 OTFC-1300 真空镀膜设备进行制备,该设备配置了  $270^\circ\text{E}$  型电子枪和霍尔离子源。由于膜层厚度并非规整并且有薄层,所以采用石英晶体振荡法进行膜厚控制。在镀膜前使用离子源对 ZnSe 基板表面清洁 120 s。镀制增透膜时,由于  $\text{YbF}_3$  应力较大易脱膜,全程采用离子源辅助镀膜。

不同沉积温度下的膜层性质有所不同<sup>[14-15]</sup>,为了使薄膜具有良好的机械性能,通过多次实验测试,基板温度为  $150^\circ\text{C}$ , ZnSe 沉积速率为  $1.5\ \text{nm/s}$ , Ge 和  $\text{YbF}_3$  的沉积速率为  $0.6\ \text{nm/s}$  时,膜层质量较好。

## 3 实验结果与分析

使用 Spectrum Two 傅里叶红外光谱仪对分光膜进行测试,  $45^\circ$  入射时的结果如图 8 所示。测试结果显示,  $2.5\ \mu\text{m} \sim 20\ \mu\text{m}$  波段的平均透过率为 53%, 平均反射率为 46.6%。



(a) 透射曲线

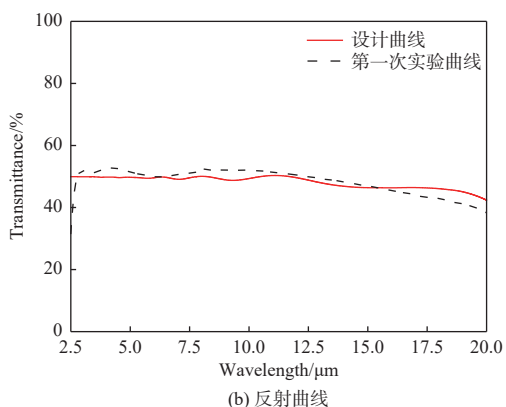


图 8 分光膜测试光谱

Fig. 8 Test spectrum of spectroscopic film

从实验结果可以看出,与未镀制减反膜双面设计曲线相比,短波处还存在一定误差。采用逆向分析法将结果数据作为离散目标导入 TFC 软件中,与设计曲线进行对比,运用交互式分析,在原膜系基础上进行模拟,发现 Ge 实际沉积的膜厚比

设计膜厚得多,而且每层多镀的比例并不相同。实验过程中,出现了 Ge 蒸镀速率不稳定的现象,在 0.3 nm/s~0.9 nm/s 之间跳动。

从实验结果分析,Ge 膜的各层厚度误差不同,主要原因是由于沉积速率不稳定,导致各层残余蒸镀厚度不确定引起的。在蒸镀时,由于 Ge 是半导体材料,其能量反射率高,电子枪的束流不断增高才能达到设定的速率,而铜坩埚内 Ge 材料表面温度与底部温度差异大,材料表面沸腾,导致蒸镀速率跳动。降低沉积速率后,Ge 的蒸发依然不稳定。改善的方法是:使用石墨坩埚承载 Ge 材料,放入铜衬套内,与铜衬套之间保持配合间隙,起到了一定的隔热效果,Ge 材料受热时相对温差小,蒸发速率趋于稳定。

表 1 提供了优化后的工艺参数。图 9 为双面镀制后的分光镜测试光谱曲线图。

表 1 分光镜工艺参数

Table 1 Process parameters for beam splitters

| Material         | Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$ | Rate / $\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$ | Chamber pressure/ $10^{-4}$ Pa | Ion beam source   |            |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------|
|                  |                                            |                                      |                                | Screen voltage /V | Current /A |
| Ge               | 150                                        | 0.6                                  | 4                              | 0                 | 0          |
| ZnSe             | 150                                        | 1.5                                  | 4                              | 200               | 1          |
| YbF <sub>3</sub> | 150                                        | 0.6                                  | 4                              | 300               | 4          |

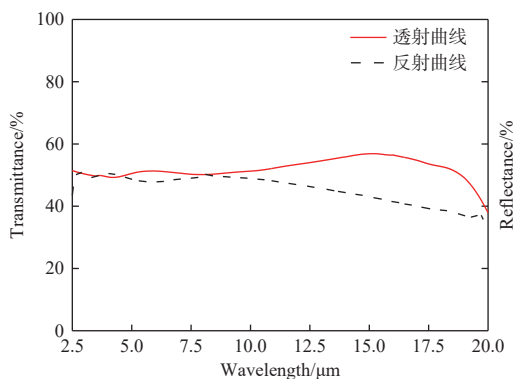


图 9 最终实验结果

Fig. 9 Final experimental results

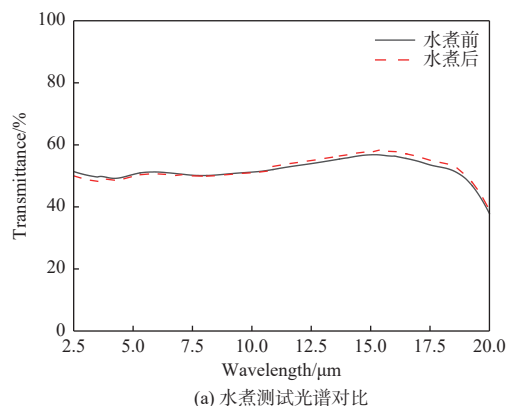
从图 9 可以看出,2.5  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  波段的平均透过率为 52%,平均反射率为 45.5%,与设计曲线接近。

#### 4 膜层性能测试

为保证该分光镜在各种环境下均能正常工作,需要对样品进行环境测试,测试项目及结果如下。

1) 牢固度测试 将粘性强度不小于 3 N/cm<sup>2</sup> 的胶带粘在膜层表面,并沿垂直方向反复拉扯,重复 10 次,膜层表面并无脱落现象。

2) 水煮测试 使用去离子水水煮,达到沸腾后,将待测样品放置到水煮锅中进行水煮试验,水煮 15 min 后测试,不存在外观改变且光谱变化在 1% 左右,符合 GB/T 26332.3-2015 光学薄膜环境使用性标准,结果如图 10(a) 所示。



(a) 水煮测试光谱对比

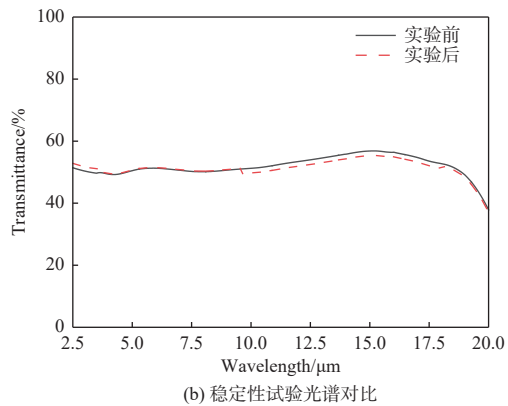


图 10 环境测试结果

Fig. 10 Environmental test results

3) 稳定性测试 将样品放在空气中暴露 480 h 后, 光谱变化在 1% 左右, 结果如图 10(b) 所示。

## 5 结论

根据分光膜的设计理论, 采用锗、硒化锌和氟化镱为镀膜材料, 通过对基板和材料进行分析, 采用光谱补偿的方法, 设计并优化了膜系结构。通过改进沉积工艺, 优化工艺参数, 解决了制备过程中沉积速率不稳定及膜厚误差大导致的光谱变差问题。采用电子束蒸发离子束辅助沉积的方法, 研制了  $45^\circ$  入射,  $2.5\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$  波段平均分光比为 52 : 45.5 的超宽带分光镜。经过测试, 该分光镜性能良好, 环境适用性强。此外, 随着光谱仪在应用中的需求不断增加, 如何进一步拓宽分光波段, 实现更精确的分光要求, 成为今后的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 张小倩, 周翠. 红外探测器相对光谱响应测试[J]. *红外*, 2020, 41(6): 1-6.  
ZHANG Xiaoqian, ZHOU Cui. Measurement of relative spectral response of infrared detector[J]. *Infrared*, 2020, 41(6): 1-6.
- [2] 李桂颖, 张灵翠. 傅里叶变换红外光谱仪在宝石学中的应用[J]. *中国宝石*, 2022(5): 12-20.  
LI Guiying, ZHANG Lingcui. Application of Fourier transform infrared spectroscopy in gemology[J]. *China Gems & Jades*, 2022(5): 12-20.
- [3] 车轲, 刘毅, 蔡兆男, 等. 便携式傅里叶变换红外光谱仪在大气温室气体观测中的应用进展[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 44-54.  
CHE Ke, LIU Yi, CAI Zhaonan, et al. Review of atmo-

- spheric greenhouse gas observation and application based on portable Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(1): 44-54.
- [4] 段微波, 刘保剑, 庄秋慧, 等. 应用于空间遥感系统的红外光学薄膜研究进展[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 1-27.  
DUAN Weibo, LIU Baojian, ZHUANG Qiuhui, et al. Research progress of infrared thin film coatings applied in space remote sensing systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 1-17.
- [5] ROWELL N L, WANG E A. Bilayer free-standing beam splitter for Fourier transform infrared spectrometry[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2927-2933.
- [6] YU T Y, LIU D Q, QIN Y. Broadband infrared beam splitter for spaceborne interferometric infrared sounder[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6513-6517.
- [7] 付秀华, 张于帅, 寇洋, 等. 智能眼镜影像系统宽光谱广角度分光膜的研制[J]. *光子学报*, 2015, 44(3): 0331002.  
FU Xiuhua, ZHANG Yushuai, 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.
- [8] 刘松林, 薄报学, 邹仪宣, 等. 基于超薄金属薄膜的超宽频太赫兹分束器[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 393-397.  
LIU Songlin, BO Baoxue, ZOU Yixuan, et al. Ultrawideband terahertz beam-splitter based on ultrathin metallic films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 393-397.
- [9] 吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间调制傅里叶变换光谱仪分束器色散特性研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 91-97.  
LYU Jinguang, LIANG Jingqiu, LIANG Zhongzhu. Study on chromatic dispersion of beam splitter in spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 91-97.
- [10] HEANEY J B, BRADLEY S E, STEWART K P, et al. Beamsplitter material comparison: KBr and ZnSe[J]. *SPIE*, 1999, 3756: 65-78.
- [11] 么艳平, 刘景和. ZnSe 红外窗口材料的性能及其制备[J]. *人工晶体学报*, 2006, 35(1): 183-187.  
YAO Yanping, LIU Jinghe. Property and fabrication of ZnSe infrared window material[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(1): 183-187.
- [12] 卢利平, 刘景和, 李建立, 等. ZnSe 单晶生长及性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2005(2): 215-218.

- LU Liping, LIU Jinghe, LI Jianli, et al. Growth of ZnSe single crystal and its optical properties[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005(2): 215-218.
- [ 13 ] MELPIGNANO P, CIOAREC C, CLERGEREAUX R, et al. E-beam deposited ultra-smooth silver thin film on glass with different nucleation layers: an optimization study for OLED micro-cavity application[J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(6): 1111-1119.
- [ 14 ] 赵广宇, 徐莉, 范杰, 等. 衬底温度对电子束沉积 ZnSe 薄膜性能影响研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 0631001.
- ZHAO Guangyu, XU Li, FAN Jie, et al. Influence of substrate temperature on properties of ZnSe thin films deposited by electron-beam evaporation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(6): 0631001.
- [ 15 ] 许培忠, 严义埏. 锗膜沉积工艺的实验研究[J]. *红外研究*, 1989(5): 343-348.
- XU Peizhong, YAN Yiyun. Experimental study on the deposition of germanium film[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 1989(5): 343-348.