中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

三波段大口径宽角度红外反射镜的研制

张静 王鹤 付秀华 潘永刚 林兆文 魏乃光 李冬旭 刘泽钰 杨飞

Development of a large-aperture wide-angle reflector for triple-band infrared applications

ZHANG Jing, WANG He, FU Xiu-hua, PAN Yong-gang, LIN Zhao-wen, WEI Nai-guang, LI Dong-xu, LIU Ze-yu, YANG Fei

引用本文:
张静, 王鹤, 付秀华, 潘永刚, 林兆文, 魏乃光, 李冬旭, 刘泽钰, 杨飞. 三波段大口径宽角度红外反射镜的研制[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025–0101
ZHANG Jing, WANG He, FU Xiu-hua, PAN Yong-gang, LIN Zhao-wen, WEI Nai-guang, LI Dong-xu, LIU Ze-yu, YANG Fei. Development of a large-aperture wide-angle reflector for triple-band infrared applications[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0101

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2025–0101

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究

Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror

中国光学（中英文）. 2022, 15(4): 740 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0005

大口径光学望远镜拼接镜面关键技术综述

Overview of key technologies for segmented mirrors of large–aperture optical telescopes

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 973 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0109

基于差分传递函数法的大口径平面镜检测

Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 992 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0122

机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计

Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 578 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0194

大口径巡天望远镜分区域曲率传感方法研究

Sub region curvature sensing method for survey telescope with larger aperture

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 358 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0117

矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计

Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 306 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0130

文章编号　2097-1842(xxxx)x-0001-10

三波段大口径宽角度红外反射镜的研制

张　静[1], 王　鹤[1,2], 付秀华[1,2], 潘永刚[2,3], 林兆文[2,3], 魏乃光[4], 李冬旭[4], 刘泽钰[4], 杨　飞[5]
（1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 中山研究院, 广东 中山 528436;
3. 中山吉联光电科技有限公司, 广东 中山 528436;
4. 山东有研国晶辉新材料有限公司, 山东 德州 253000;
5. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000）

摘要: 多波段红外探测器可同步获取多波段辐射信息, 在目标识别、分类、测温及信息提取等方面显著优于单波段红外探测器, 因而成为红外探测器核心研究方向之一。三波段大口径宽角度红外反射镜作为多波段红外探测器的关键光学元件, 其性能优劣直接决定探测精度。在设计阶段, 本文选用 Ge、ZnS 和 YbF_3 三种材料, 基于高反射膜的设计理论, 通过光谱叠加法结合 TFCalc 软件优化获得结构合理的红外反射镜膜系。在制备阶段, 采用离子源辅助沉积, 通过优化沉积工艺解决了膜层脱落的问题。在光谱测试阶段, 通过膜厚误差实验和 YbF_3 工艺实验解决了样品光谱漂移的现象。测试结果表明, 该红外反射镜在 45°入射时, 3~5 μm 波段平均反射率为 96.93%; 8~12 μm 波段平均反射率为 96.54%; 1.064 μm 反射率为 94.64%, 在 270 mm×270 mm 口径内 3~5 μm、8~12 μm 波段的光谱非均匀性为 4.83%。参照国标 GJB 2485A-2019 作为环境测标准, 所制备样品成功通过附着力测试和高低温测试, 满足多波段红外探测器的使用要求。

关　键　词: 大口径红外反射镜; 全介质膜系设计; 三波段高反射; 离子辅助沉积工艺
中图分类号: O484　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2025-0101　　**CSTR:** 32171.14.CO.2025-0101

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 中山市引进创新团队项目（No. CXTD2023008）; 德州市重大科技创新工程项目（高分辨率红外热成像用 CVD ZnSe 制备关键技术研究）; 吉林省科技发展计划项目资助（No. 20230101008JC）
Supported by introducing innovative new team projects in Zhongshan City (No. CXTD2023008); Dezhou City major scientific and technological innovation project (research on key preparation technologies of CVD ZnSe for high-resolution infrared thermal imaging); Jilin Provincial Science and Technology Development Program Project Funding (No. 20230101008JC)

Development of a large-aperture wide-angle reflector for triple-band infrared applications

ZHANG Jing[1], WANG He[1,2], FU Xiu-hua[1,2], PAN Yong-gang[2,3], LIN Zhao-wen[2,3], WEI Nai-guang[4], LI Dong-xu[4], LIU Ze-yu[4], YANG Fei[5]

（1. *College of Optoelectronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;

2. *Zhongshan Research Institute*, *Changchun University of Science and Technology*, *Zhongshan* 528436, *China*;

3. *Zhongshan Gilion Optoelectronics Technology Co.*, *Ltd.*, *Zhongshan* 528437, *China*;

4. *Shandong Youyan Guojinghui New Materials Co.*, *Ltd.*, *Dezhou* 253000, *China*;

5. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130000, *China*）

Abstract: Multi-band infrared detectors can simultaneously capture radiation information across multiple wavelengths, offering significant advantages over single-band infrared detectors in target recognition, classification, temperature measurement, and information extraction. Consequently, they have become a central focus of infrared detector technology research. As a key optical component of multi-band infrared detectors, the performance of the three-band large-aperture wide-angle infrared mirror directly determines detection accuracy. In the design phase, this study selected three materials: Ge, ZnS, and YbF_3, based on high-reflectivity coating design principles, and optimized a structurally robust infrared reflector coating system through spectral superposition combined with TFCalc software. During the preparation stage, ion-source-assisted deposition was employed, and the issue of film delamination was resolved by optimizing the deposition process. During spectral testing, problems related to spectral drift in the samples were addressed through film thickness error experiments and optimization of the YbF_3 process. Test results indicate that, at an incident angle of 45°, the infrared mirror achieves an average reflectance of 96.93% in the 3−5 μm spectral band, 96.54% in the 8−12 μm spectral band, and 94.64% in the 1.064 μm spectral band, the spectral non-uniformity within the 270 mm×270 mm aperture for the 3−5 μm and 8−12 μm spectral bands is 4.83%. In accordance with the national standard GJB 2485A-2019 (Environmental Test Standard), the prepared samples successfully passed adhesion and high and low temperature tests, meeting the application requirements for multi-band infrared detectors.

Key words: large-aperture infrared mirror; all-dielectric film system design; three-band high reflection; ion-assisted deposition process

1 引 言

随着伪装技术发展与目标探测难度增加，传统单波段红外探测器因光谱信息获取单一，在复杂环境中适应性差、误报率高，难以满足目标识别与抗干扰任务需求[1]。相较之下，多波段红外探测器由于可同时获取多个红外波段的辐射信息，在目标的识别、分类、测温和信息提取等方面远超单波段红外探测器，因此成为红外探测器的核心研究方向之一[2-3]。为满足多波段红外探测器的高性能需求，其核心元件之一的多波段红外反射镜需在多波段均保持高反射率。按镀膜材料，红外反射镜可分为全金属反射镜、金属-介质复合反射镜和全介质反射镜三类。前两类具备宽反射带宽、角度不敏感、制备工艺简单等优势，但

存在吸收损耗大、反射率偏低等不足[4]; 全介质反射镜具备反射率高、抗损伤能力强、性能稳定等优势, 但其制备工艺通常更为复杂[5]。随着红外探测器探测精度的不断提高, 全介质反射镜成为研究的热点。

近年来, 国内外针对红外反射镜进行了较为深入的研究, Qi 等[6] 使用 Ge 和 ZnS 材料研制了在 3~5 μm 波段平均反射率为 95.1% 的反射镜; Neto 等[7] 使用 Ge 和 ZnSe 材料研制了在 3~5 μm 波段、8~14 μm 波段平均反射率分别为 94.3% 和 85.5% 的反射镜; Hao 等[8] 设计了一种高红外反射率、低微波反射率的一维光子晶体, 在 3~5 μm 波段的平均反射率为 99.4%; 王雅颖等[9] 使用 Ge 和 ZnSe 材料设计了在 3~5 μm 波段、8~12 μm 波段平均反射率分别为 83.6% 和 83.2% 的反射镜, 并通过在膜层结构的最上层添加 MgF_2 薄膜, 从理论上实现了可见光波段的低反射率。

据资料显示, 现有全介质红外反射镜研究的波段多集中于中波红外与长波红外, 且基板口径普遍较小, 主要因大口径基板上沉积多层全介质反射薄膜需面临光谱漂移、膜层脱落、破裂及均匀性差等问题。为解决上述问题, 本文采用光谱叠加法, 将膜系设计总厚度从 54.3 μm 降低至 20.4 μm; 同时, 采用离子源辅助技术, 通过优化沉积工艺以及膜厚误差实验, 解决了膜层脱落和光谱漂移的问题。因此, 本研究对大口径全介质反射镜的设计与制备瓶颈提供了有效解决方案, 对提升先进红外探测器系统性能具有一定意义。

2　膜系设计

2.1　技术指标

根据多波段红外探测器的使用要求, 红外反射镜的技术指标如表 1 所示。

表 1　红外反射镜的技术指标

Tab. 1　Technical specifications of infrared mirror

参数	规格		
入射角	30°~60°	30°~60°	30°~60°
波长范围	1.064 μm	3~5 μm	8~12 μm
反射率	>93%	>93%	>93%
非均匀性	-	5%	5%

2.2　设计理论

根据高反射膜的设计理论[10], 将$(HL)^P H$作为初始膜系, 其中H、L代表光学厚度为四分之一设计波长的高、低折射率膜层, p为膜系的周期数。根据薄膜设计理论, $Sub|HL|Air$的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_H\cos\delta_L - \dfrac{\eta_L}{\eta_H}\sin\delta_H\sin\delta_L & i\left(\dfrac{1}{\eta_L}\cos\delta_H\sin\delta_L + \dfrac{1}{\eta_H}\cos\delta_L\sin\delta_H\right) \\ i(\eta_H\cos\delta_L\sin\delta_H + \eta_L\cos\delta_H\sin\delta_L) & \cos\delta_H\cos\delta_L - \dfrac{\eta_H}{\eta_L}\sin\delta_H\sin\delta_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_S \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中导纳η_j为:

$$\eta_j = \begin{cases} \dfrac{n_j}{\cos\theta_j} & \text{p-polarized light} \\ n_j\cos\theta_j & \text{s-polarized light} \end{cases}, \tag{2}$$

式中相位厚度δ_j为:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda}\eta_j d_j\cos\theta_j, \tag{3}$$

故$Sub|(HL)^p H|Air$的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}^p [H] \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta'_s \end{bmatrix}, \tag{4}$$

则根据菲涅尔公式可推导出斜入射时多层膜的反射率为:

$$R = \frac{(M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta'_S - M_{21} - M_{22}\eta'_S)}{(M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta'_S + M_{21} + M_{22}\eta'_S)} \times \frac{(M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta'_S - M_{21} - M_{22}\eta'_S)^*}{(M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta'_S + M_{21} + M_{22}\eta'_S)^*}, \tag{5}$$

以上公式中: $\begin{bmatrix} B_1 \\ C_1 \end{bmatrix}$称为膜系的特征矩阵, B_1 为界面处归一化的总切向电场强度; C_1 为界面处归一化的总切向磁场强度, η_0、η_H、η_L、η_s分别为空气、高折射率材料、低折射率材料和基板的修正导纳, θ_j为光入射至第j层的入射角, d_j为第j层的膜层厚度, 当$0.5|m_{11}+m_{22}|=1$、$\delta_H=\delta_L$可得高反带的波长带宽公式:

$$\Delta\lambda \approx \frac{4\lambda_0}{\pi}\arcsin\left(\frac{\eta_M-\eta_L}{\eta_M+\eta_L}\right) \quad , \qquad (6)$$

光斜入射时，可通过上述公式分别计算全介质高反膜的反射率与高反射带宽。若不考虑膜层吸收与散射，理论反射率主要取决于膜系层数(层数越多，反射率越高)；高反射带宽主要取决于两种材料的折射率差值(差值越大，带宽越宽)。

2.3 红外反射镜的设计

根据红外反射镜技术指标，薄膜材料透明区需涵盖短波红外、中波红外及长波红外。常用高折射率材料有 ZnS、ZnSe，二者折射率相近，但 ZnSe 机械性能较差、易潮解，故选择 ZnS 为高折射率材料[11-12]。常用低折射率材料有 YbF_3、YF_3，同种工艺、相同厚度的 YbF_3 与 YF_3 中，后者应力更大且易脱膜、膜裂，故选择 YbF_3 为低折射率材料[13-14]。

针对反射镜的光谱要求，选择的基础膜系为 Sub|3.13(ML)^4 3.13M 2.69L 2.31(ML)^4 2.31M 1.72L 1.31(ML)^4 1.31M L 0.78(ML)^5 0.78M 0.47L 0.27(ML)^6 0.27M|Air，其中 M、L 分别代表光学厚度为四分之一设计波长的 ZnS 和 YbF_3 膜层，参考波长为 4 μm，经 TFCalc 设计软件优化，膜层总厚度为 54.3μm，但是该膜系制备后，发生严重的脱膜现象，根据文献 [15] 可知，膜层厚度过厚会导致应力加大易脱落.

重新设计反射镜膜系，折射率高于 ZnS 的常用材料为 Ge，其在 4 μm 波段的折射率为 4.22 且与 ZnS 匹配良好，其高折射率特性与 ZnS 组合时，因折射率差值增大可拓宽高反射带宽，同时减少实现相同反射率所需膜层数，从而降低总厚度[16]。然而，Ge 在 1.7 μm 波段之前有较大的消光系数，会导致 1.064 μm 波段的反射率显著下降。为提高 1.064 μm 波段的反射率，使用光谱叠加法实现三波段的反射，具体结构如图 1 所示：P1 为 Ge 和 ZnS 材料所构成的膜堆，置于邻近基底一侧用以反射 3~5 μm 和 8~12 μm 波段；P2 为 ZnS 和 YbF_3 材料所组成的膜系，置于邻近空气的一侧用以反射 1.064 μm 波段。该设计的依据在于，P_1 膜系因高低折射率材料差值大，较少层数即可实现更高反射率与更宽高反射带宽；P_2 膜系材料透明区覆盖短波至长波红外，反射 1.064 μm 的同时，不影响 3~5 μm、8~12 μm 波段。

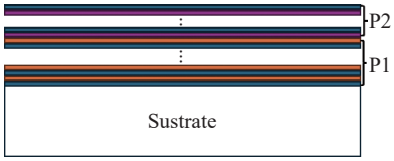

图 1 膜系结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of film system structure

引入 Ge 材料后的膜系基本结构为 Sub|2.75 (HM)^3 2.75H 2.228M 1.788(HM)^3 1.788H 1.403M 1.1(HM)^4 1.1H 0.963M 0.825(HM)^4 0.825H 0.468M 0.275(ML)^7 0.275M|Air，其中 H 代表光学厚度为四分之一设计波长 Ge 膜层，参考波长为 4 μm。使用 TFCalc 软件优化，设置优化条件为：在 30°、40°、50°、60°四个角度下，8~12 μm 波段、3~5 μm 波段和 1.064 μm 的反射率均大于 95%。优化后的膜层结构如图 2 所示，总厚度为 20.43 μm。在入射角 30°~60°时的光谱如图 3 所示，3~5 μm 波段的平均反射率为 99.3%，8~12 μm 波段的平均反射率为 98.5%，1.064 μm 波段的平均反射率为 98.0%。

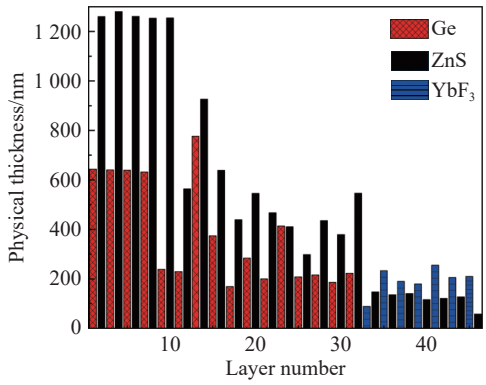

图 2 膜层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of film layer structure

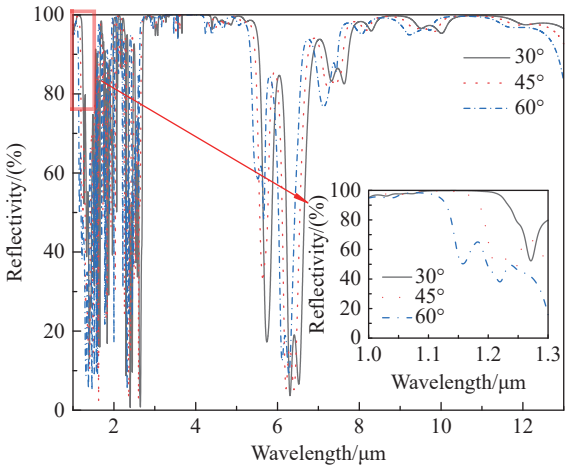

图 3 红外反射镜理论设计图

Fig. 3 Theoretical design diagram of infrared mirror

3　薄膜制备

实验设备使用 GT-1350 型真空镀膜机, 该设备配有六探头晶控系统、8 位旋转阻蒸、E 型电子枪、空心阴极离子源和伞形工件盘。沉积前使用酒精乙醚混合溶液擦拭基板, 保证清洁, 当烘烤温度为 150 °C、腔室真空度达到 5×10^{-4} Pa 时, 采用离子束预处理技术对基底表面进行清洗, 离子源参数为 200 V、3A, 持续 3 min; 然后进行红外反射镜的沉积, 具体沉积工艺如表 2 所示。

表 2　Ge、ZnS 和 YbF_3 沉积工艺参数

Tab. 2　Deposition process parameters of Ge, ZnS and YbF_3

材料	沉积速率 /(nm·s^{-1})	本底真空 /(×10^{-4}Pa)	转速 /(rad·min^{-1})	沉积温度 /°C
Ge	0.4	5	25	150
ZnS	1.5	5	25	150
YbF_3	0.5	5	25	150

在制备完成后对样品进行牢固度测试, 使用 3M 胶带粘拉, 薄膜脱落, 使用 Lambda 1050 分光光度计对拉膜后的样品进行测试, 结果如图 4 所示, 从图中可以看出拉膜后的光谱图与基板的光谱图一致, 表明薄膜完全脱落。

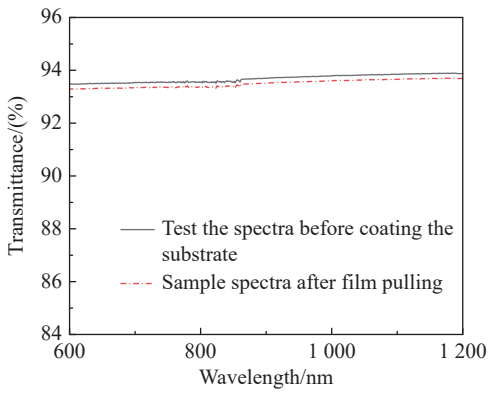

图 4　基板镀膜前和脱膜后光谱对比图

Fig. 4　Spectral comparison plot before and after substrate coating removal

薄膜的附着力可分为简单附着和扩散附着。简简单附着指薄膜与基板间存在清晰分界面, 两不相似/不相容表面接触时易形成; 扩散附着指薄膜与基板通过相互扩散或溶解形成渐变界面, 粒子动能较大时易形成[17]。由于本实验所使用的基板为石英玻璃, 当薄膜沉积在基板表面时, 附着力的类型为简单附着, 该附着方式容易脱落。根据文献 [18] 可知, 采用离子源辅助制备薄膜可提升膜层与基板间的附着力, 因离子源辅助沉积能提高薄膜粒子能量, 使附着方式从简单附着向扩散附着转变。

3.1　工艺优化

制备 P1 膜系(前 32 层)进行牢固度实验, 沉积工艺具体参数同表 2 一致。在实验中全程采用离子源辅助, 发现膜层不脱落但反射率降低, 分析原因, 主要是离子源阳极板表面杂质污染膜层所致。因此, 分别在前几层采用离子源辅助制备膜系, 如表 3 所示, 研究了在第一层(Ge 层)采用不同工艺参数的离子源辅助对膜层牢固度的影响。

表 3　第一层离子源工艺参数表

Tab. 3　Process parameters table of first-layer ion source

样品编号	膜层	阳极电压/V	离子束电流/A
1#	Ge	80	0.4
2#		100	0.5
3#		120	0.4
4#		150	0.5

研究发现, 仅在第一层采用离子源辅助时, 1#、2#、3#、4#实验样品在水煮、拉膜实验后均发生脱膜, 对拉膜实验后的样品测试光谱图如图 5 所示。

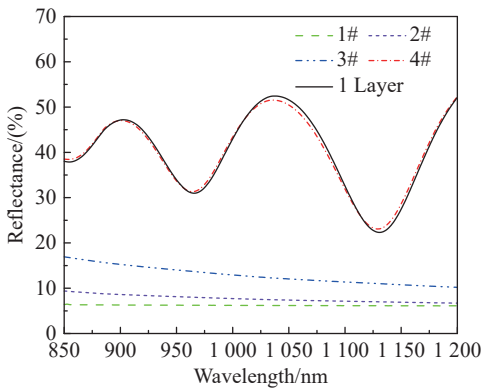

图 5　拉膜后各样品光谱与第一层设计光谱对比图

Fig. 5　Spectra of each sample after pulling film were compared with the first layer design spectra

由图 5 可知, 1#、2#、3#样品完全脱膜, 4#样品从膜系的第二层处脱落, 因此优化离子源参数

为 150 V、0.5 A，用该参数辅助沉积前两层膜进行 P1 膜系的制备。在制备完成后，经过水煮和拉膜实验的测试光谱与实际设计的 32 层光谱一致，如图 6 所示。从测试结果分析，在对整个膜系的前两层膜进行离子辅助沉积时，提高了膜层的附着力，使整个膜系由简单附着转变为扩散附着。

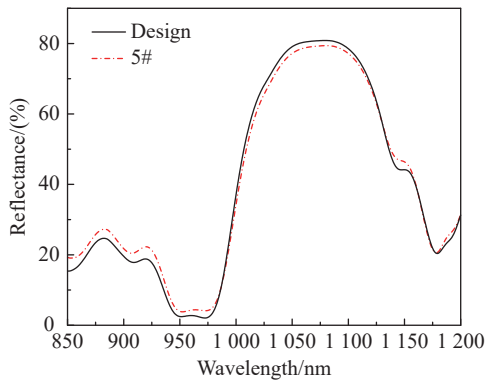

图 6　拉膜后样品光谱与前 32 层设计光谱对比图

Fig. 6　Spectra of sample after pulling film were compared with the first 32 layers design spectrum

4　测试与分析

4.1　光谱测试与分析

使用 Spectrum Two 型傅里叶红外光谱仪和 Lambda 1050 分光光度计对样品，以及水煮实验后的样品进行测试，在 45°入射角下，反射率光谱如图 7、图 8 所示。

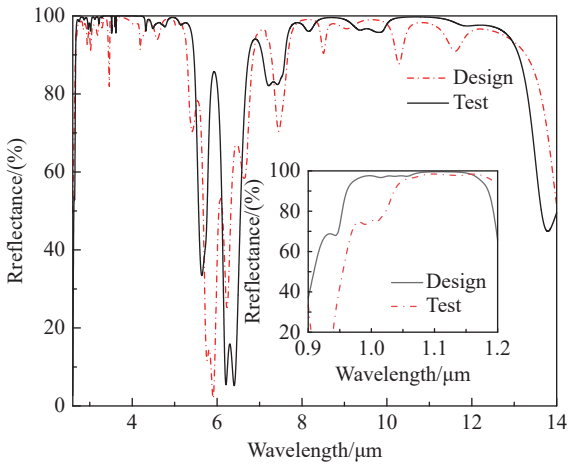

图 7　设计与测试光谱对比图

Fig. 7　Comparison plot between design spectrum and test spectrum

测试光谱相对设计光谱往长波方向漂移了约 40 nm；水煮后光谱相对水煮前光谱向长波方向漂移了约 50 nm。经过分析，图 7 的漂移是由于实际沉积厚度与设计厚度的偏差，图 8 的漂移则因为膜层结构疏松导致的。

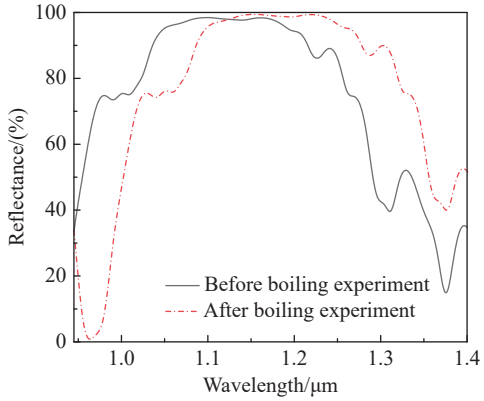

图 8　水煮实验前后 1.064 μm 光谱对比图

Fig. 8　Comparison plot of 1.064 μm spectra before and after boiling treatment

4.2　膜厚误差实验

为解决光谱漂移问题，在保证工艺参数一致的前提下，分别在硅基板上和石英基板上镀制具有明显光谱特征的 Ge-ZnS 膜层和 ZnS-YbF_3 膜层。Ge-ZnS 膜系为 Sub| H 2L 2H 2L H |Air，参考波长为 7μm；ZnS-YbF_3 膜系为 Sub| H 2L 2H 2L H | Air，参考波长为 2 μm，通过 TFCalc 软件拟合得到 Ge 和 ZnS 的厚度比例因子分别为 1.02 和 0.95，实验结果如图 9、图 10 所示。

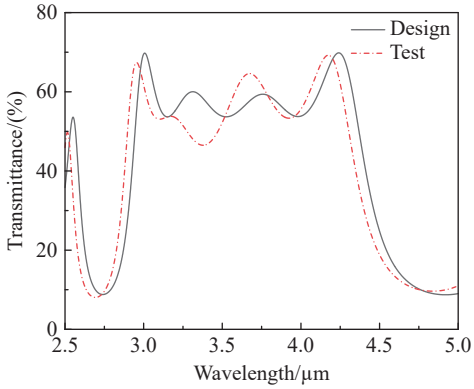

图 9　Ge-ZnS 膜层设计与测试光谱对比图

Fig. 9　Comparison plot of Ge-ZnS film design and test spectrum

将上述制备的两样品进行水煮实验，测试结果如图 11、12 所示，从测试结果分析，图 8 光谱

漂移的原因是由于 YbF_3 结构疏松导致的。

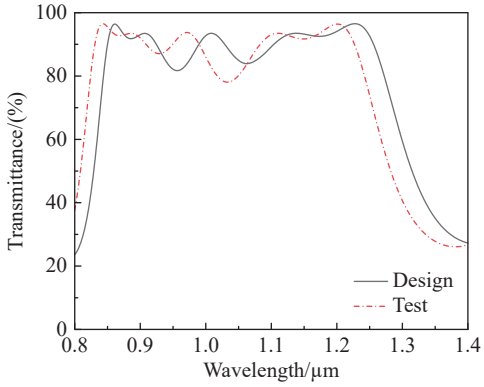

图 10　ZnS-YbF_3 膜层设计与测试对比图

Fig. 10　Comparison plot of ZnS-YbF_3 film design and test spectrum

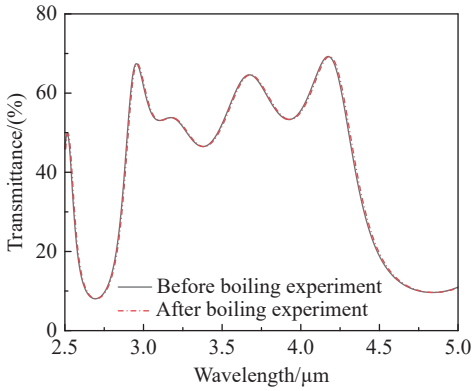

图 11　Ge-ZnS 水煮实验前后光谱对比图

Fig. 11　Comparison plot of Ge-ZnS film spectra before and after boiling experiment

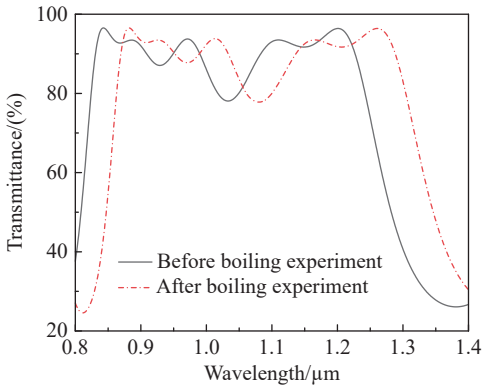

图 12　ZnS-YbF_3 水煮实验前后光谱对比图

Fig. 12　Comparison plot of ZnS-YbF_3 film spectra before and after boiling experiment

4.3　YbF_3 工艺实验

为验证 YbF_3 膜层的结构致密性, 采用表 2 所示的 YbF_3 膜制备工艺参数, 并根据表 4 采用不同能量的离子源辅助, 在石英基板上镀制 300 nm 厚度的 YbF_3 单层膜。

表 4　YbF_3 材料离子源工艺参数

Tab. 4　Process parameters of YbF_3 material ion source

样品编号	材料	阳极电压/V	离子束电流/A
1#		100	1
2#	YbF_3	150	2
3#		200	3

实验测试发现, 随着离子源能量增大, 样品在水煮处理后的光谱漂移量逐渐减少, 当空心阴级离子源参数为 200 V、3 A 时, 该样品在水煮处理前后的光谱漂移量为 0.024%, 具体结果如图 13 所示。

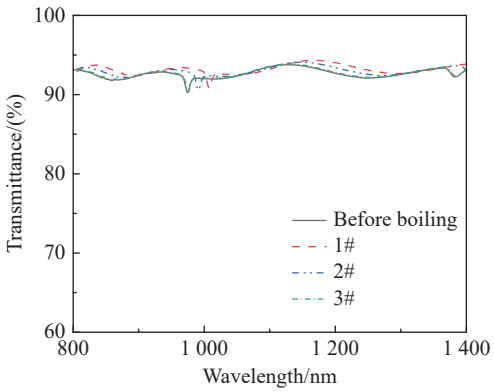

图 13　YbF_3 膜层水煮实验前后光谱图

Fig. 13　Comparison plot of YbF_3 film spectra before and after boiling experiment

4.4　工艺调整

据膜厚误差实验获得的 Ge 和 ZnS 厚度比例因子修正膜厚, 结合 YbF_3 工艺实验的离子源参数, 对 P2 膜系中 YbF_3 膜层采用离子源辅助, 重新制备红外反射镜样品。45°入射角下, 样品 3~5 μm、8~12 μm、1.064 μm 波段平均反射率分别为 96.93%、96.54%、94.64%, 满足设计指标。TF-Calc 反演表明, 实测反射率低于理论值主因是膜厚误差: 8~12 μm 因第 3~6 层少镀 3.7%、第 11~14 层少镀 6.3%; 3~5 μm 因第 16~20 层少镀 5.2%; 1.064 μm 因第 35~44 层少镀 5.7%。水煮实验前后光谱图如图 15 所示, 光谱几乎重合, 表明膜层致密度良好。

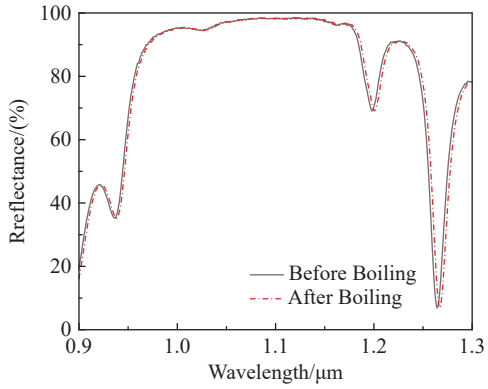

图 15　1.064 μm 水煮实验前后光谱对比图

Fig. 15　Comparison plot of the 1.064 μm spectrum before and after boiling experiment

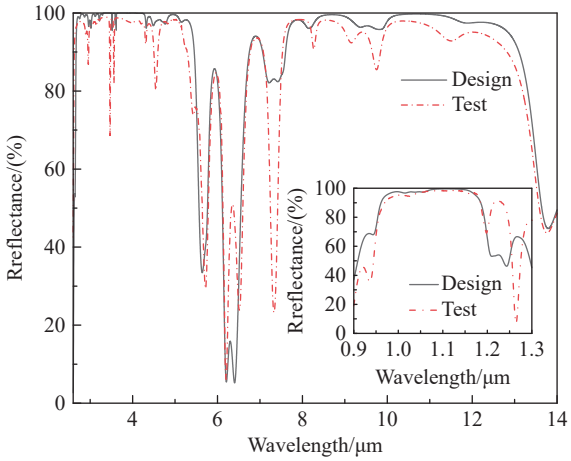

图 14　红外反射镜样品测试与设计对比图

Fig. 14　Comparison plot of infrared mirror sample testing and design

4.5　非均匀性测试

虽然在制备单层膜时对设备的均匀性进行了修正，多层膜表面没有明显的色差，但是为了精确测试样品的光谱均匀性，在镀制高反膜时，在工件夹具上放置 4 个专门测试均匀性的石英测试片，工件夹具如图 16 所示，主要测试工件在径向分布的膜层厚度。

在 45°入射角下，在 3~5 μm、8~12 μm 处的漂移量如图 17 所示，根据光谱非均匀性公式 σ：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(R_i(\lambda)-\bar{R}(\lambda)\right)^2}\times 100\% \quad , \quad (7)$$

计算得出 270×270 mm 口径内 3~5 μm、8~12 μm 波段光谱非均匀性为 4.83%，满足技术指标，式中 N=4 为所测数据点的总数，$R_i(\lambda)$为第 i 个采样点在波长 λ 处的光谱值，$\bar{R}(\lambda)$为所测数据峰值反射率的平均波长。

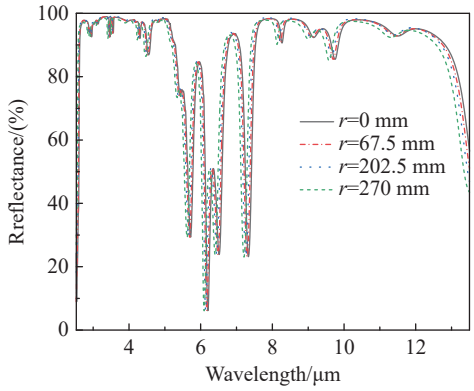

图 16　公件夹具示意图

Fig. 16　Schematic diagram of workpiece fixture

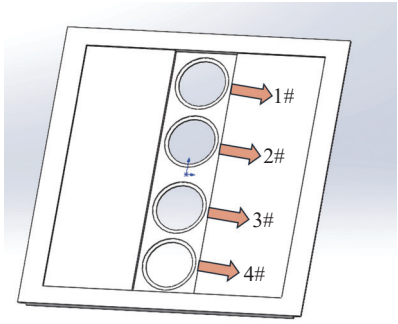

图 17　测试片反射率光谱图

Fig. 17　Reflectance spectral plot of test sample

4.6　环境测试

参考国军标 GJB 2485A-2019 作为环测标准：

1)附着力实验：使用宽度为 2mm 的 3M 胶带，粘贴在所制备样品的不同位置，迅速拉起，反复多次，并检查胶带和样品表面后是否有膜层脱落。

2)高低温实验：所制备样品分别在 71 °C±2 °C 和−46 °C±2 °C 的温度中保温两个小时，恢复常温后膜层无起皮、脱膜、裂纹、汽包等缺陷。

所制备的样品在完成环境测试并放置一段时间后，样品表面无裂纹、汽包以及其他不良影响，环境测试后的样品如图 18 所示。

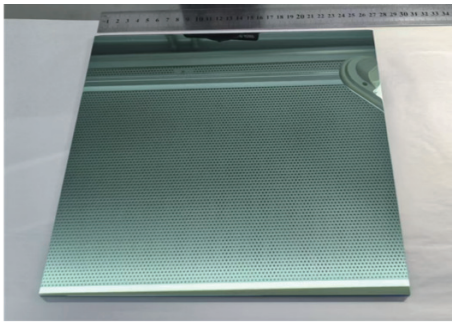

图 18　环境测试后样品图

Fig. 18　Post-environmental test sample image

5　结　论

本文针对多波段红外探测器的使用需求，研制了覆盖短波红外、中波红外、长波红外三波段的大口径宽角度全介质反射镜。为解决膜层脱落问题，设计中通过光谱叠加法引入 Ge 作为高折射率材料实现三波段反射，该结构在降低膜系总厚度、保证 1.064 μm 波段高反射率的同时，拓展了 Ge 材料应用范围；制备中研究离子源辅助沉积对膜层附着力的影响，通过拉膜及光谱测试分析，最终确定膜系前两层采用离子源辅助沉积。为解决制备后光谱漂移问题，本文通过膜厚误差实验确定 Ge 和 ZnS 材料厚度比例因子并修正膜厚，实现膜厚精确监控；为解决样品水煮后光谱漂移现象，通过对膜厚误差实验样品水煮并经光谱测试分析，发现此现象由 YbF_3 膜层结构疏松所致，进而通过 YbF_3 工艺实验确定其离子源参数。实验结果表明，三波段的反射率均大于 93%，然而，三波段的反射率与理论设计仍存在一定偏差，如何进一步提高三波段的反射率，将是后续研究的重点内容。

参考文献:

[1] 唐利孬, 聂志强, 任丽, 等. 激光/可见光双波段复合光电制导组件共口径光学系统设计[J]. 光子学报, 2025, 54(6): 0622001.
TANG L N, NIE Z Q, REN L, *et al*.. Optical design of common aperture laser/visible light dual-band composite photoelectric guidance component[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2025, 54(6): 0622001. (in Chinese).

[2] 耿海涛, 虞林瑶, 张葆. 大变倍比制冷型红外双波段变焦光学系统设计[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(6): 1431-1441.
GENG H T, YU L Y, ZHANG B. Design of cooled infrared dual-band zoom optical system with large-magnification-ratio[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1431-1441. (in Chinese).

[3] 张璐, 李冬冰, 付志凯. 多谱段红外探测器组件的光学工程化设计[J]. 红外, 2025, 46(4): 20-26.
ZHANG L, LI D B, FU ZH K. Optical engineering design of multispectral infrared detector assembly[J]. *Infrared*, 2025, 46(4): 20-26. (in Chinese).

[4] 徐旭. 大口径主镜薄膜制备及其特性研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2018.
XU X. *Study on preparation and characterization of optical coatings for large-aperture primary mirrors*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese).

[5] FIELD E S, KLETECKA D E. Impact of contamination and aging effects on the long-term laser damage resistance of $SiO_2/HfO_2/TiO_2$ high reflection coatings for 1054 nm[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(10): 105105.

[6] QI D, WANG X, CHENG Y ZH, *et al*.. Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications[J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 52-56.

[7] ZHANG J K, LIU R H, ZHAO D P, *et al*.. Design, fabrication and characterization of a thin infrared-visible bi-stealth film based on one-dimensional photonic crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(1): 195-202.

[8] HAO K Z, WANG X, ZHOU L, *et al*.. Design of one-dimensional composite photonic crystal with high infrared reflectivity and low microwave reflectivity[J]. *Optik*, 2020, 216: 164794.

[9] 王雅颖, 鲍学聪, 王长昊, 等. Ge/ZnSe 一维光子晶体设计及其可见/红外反射光谱调控[J]. 有色金属工程, 2024, 14(11): 35-40,48.
WANG Y Y, BAO X C, WANG CH H, *et al*.. Design of Ge/ZnSe one-dimensional photonic crystal and visible/infrared reflectance spectroscopy control[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(11): 35-40,48. (in Chinese).

[10] 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, 2006: 107-112.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al*. . *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 107-112. (in Chinese).

[11] 孟阳, 陶海军, 刘华松, 等. 厚度对 ZnS 薄膜光学特性与力学特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(3): 20240515.
MENG Y, TAO H J, LIU H S, *et al*.. Effect of thickness on the optical and mechanical properties of ZnS thin films[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(3): 20240515. (in Chinese).

[12] 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 G Y, XU L, FAN J, *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. (in Chinese).

[13] 马秋静, 段微波, 于天燕, 等. 组分掺杂对 YbF_3 薄膜材料光学和理化特性的影响及其在红外光学薄膜元件制备中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2025, 44(1): 86-96.
MA Q J, DUAN W B, YU T Y, *et al*.. The effect of doping on the optical and physicochemical properties of YbF_3 and its application in infrared coatings[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2025, 44(1): 86-96. (in Chinese).

[14] 付秀华, 刘瑞奇, 朱忠尧, 等. 大角度双波段探测成像分光器件的研制[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1403101.
FU X H, LIU R Q, ZHU ZH Y, *et al*.. Fabrication of large-angle dual-band detection imaging splitter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(14): 1403101. (in Chinese).

[15] 师云云, 徐均琪, 刘政, 等. 多波段大口径全介质高反膜的设计与制备[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 335-341.
SHI Y Y, XU J Q, LIU ZH, *et al*.. Design and preparation of large aperture high reflective films composed entirely of dielectric materials for multi-band application[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 335-341. (in Chinese).

[16] 付秀华, 任开发, 王奔, 等. 用于地表温度探测 10μm~11μm 带通滤波器的研制[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1138-1146.
FU X H, REN K F, WANG B, *et al*.. Development of 10 μm~11 μm bandpass filter for surface temperature detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(6): 1138-1146. (in Chinese).

[17] 肖定全, 朱建国, 朱基亮, 等. 薄膜物理与器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 196-198.
XIAO D Q, ZHU J G, ZHU J L, *et al*. . *Thin Film Physics and Devices*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 196-198. (in Chinese) **(查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)**.

[18] FU X H, FU G Y, DONG S T, *et al*.. Development of low-stress double-pass filter device for methane and ethane flammable gas detection system[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(21): 9902.

作者简介：

张　静(1984—), 女, 吉林省长春市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2015 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事光学薄膜、光学工艺等方面的研究。E-mail: 465589960@qq.com

王　鹤(1999—), 男, 河南省新乡市人, 长春理工大学硕士研究生在读, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: 1658707501@qq.com