

用于地表温度探测 $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 带通滤波器的研制

付秀华 任开发 王奔 潘永刚 林兆文 苏久麟 董所涛 张功

Development of $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ bandpass filter for surface temperature detection

FU Xiuhua, REN Kaifa, WANG Ben, PAN Yonggang, LIN Zhaowen, SU Jiulin, DONG Suotao, ZHANG Gong

引用本文:

付秀华, 任开发, 王奔, 等. 用于地表温度探测 $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 带通滤波器的研制[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1138–1146. DOI: 10.5768/JAO202445.0601005

FU Xiuhua, REN Kaifa, WANG Ben, et al. Development of $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ bandpass filter for surface temperature detection[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1138–1146. DOI: 10.5768/JAO202445.0601005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种工作于长波红外波段的 $40\times$ 成像物镜设计

Design of $40\times$ imaging objective lens in long-wave infrared band

应用光学. 2021, 42(2): 229–235 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201004>

基于长波红外探测器的消热差轻量化光学系统设计

Design of athermal and lightweight optical system based on long-wave infrared detector

应用光学. 2021, 42(3): 429–435 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301009>

矩形波宽带通滤光膜研究

Research on rectangular-wave broadband pass filter film

应用光学. 2023, 44(1): 188–194 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105002>

傅里叶变换轮廓术中二维非对称滤波器的设计

Design of two-dimensional asymmetric filter in Fourier transform profilometry

应用光学. 2019, 40(4): 669–675 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0405002>

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>

含有双层衍射光学元件的中波/长波消热差光学系统的设计

Design of athermal MWIR/LWIR optical system with double-layer diffractive optical elements

应用光学. 2019, 40(5): 756–762 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501007>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1138-09

用于地表温度探测 $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 带通滤波器的研制

付秀华^{1,2}, 任开发^{1,2}, 王 奔², 潘永刚², 林兆文², 苏久麟², 董所涛², 张 功²

(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)

摘 要: 多谱段光谱成像仪搭载长波红外探测器可以提供空间高分辨率的地表温度信息, 研究地表温度在全球能量平衡和气候变化中具有重要意义。本文采用 $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 滤波器作为红外探测器的窗口进行地表温度探测, 分别采用 Ge 和 ZnS 作为高低折射率材料, 在 Ge 基板上设计一种宽截止、高透射的长波红外带通滤光膜; 采用真空镀膜技术在 Ge 板两面分别制备长波通和短波通滤光膜以实现带通, 其中 Ge 和 ZnS 薄膜分别以电子束和电阻热蒸发的方式沉积, 膜厚采用晶控仪控制, 通过 Matlab 软件建立膜厚沉积数学模型, 模拟并修正多层膜的 Tooling 以减少厚度误差。测试结果表明: $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 波段平均透射率达到 94.3%, 透射区波纹幅度为 1.6%; $4\ \mu\text{m}\sim 9.5\ \mu\text{m}$ 和 $11.5\ \mu\text{m}\sim 16\ \mu\text{m}$ 波段平均透射率小于 0.1%, 各项耐环境测试表明滤波器满足使用要求。

关键词: 光学薄膜; 长波红外; 带通滤波器; 厚度误差

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601005

Development of $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ bandpass filter for surface temperature detection

FU Xiuhua^{1,2}, REN Kaifa^{1,2}, WANG Ben², PAN Yonggang², LIN Zhaowen²,
SU Jiulin², DONG Suotao², ZHANG Gong²

(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)

Abstract: The multispectral spectral imager equipped with a long-wave infrared detector can provide spatially high-resolution surface temperature information, and the study of surface temperature is of great significance in the global energy balance and climate change. A $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ filter was used as the window of the infrared detector for surface temperature detection, and a wide-cutoff and high-transmission long-wave infrared bandpass filter film was designed on a Ge substrate using Ge and ZnS as the high and low refractive index materials, respectively. Vacuum coating technology was used to prepare long-wavelength pass and short-wavelength pass filter films on both sides of the Ge plate to realize the bandpass, in which Ge and ZnS films were deposited by electron beam and resistive thermal evaporation, respectively, and the film thickness was controlled by a crystal controller. The mathematical model of film thickness deposition was established by Matlab software, which simulated and corrected the tooling of the multilayered film in order to reduce the thickness error. The test results show that the average transmittance of $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ reaches 94.3%, and the ripple amplitude of the transmittance area is 1.6%, of which the average transmittance of $4\ \mu\text{m}\sim 9.5\ \mu\text{m}$ and $11.5\ \mu\text{m}\sim 16\ \mu\text{m}$ is less than 0.1%, and the filter meets the requirements of the use through various environmental tests.

Key words: optical thin films; long-wave infrared; band-pass filters; thickness errors

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-02-28

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项目 (2014219)

作者简介: 付秀华 (1984—), 女, 教授, 主要从事光学薄膜研究。E-mail: fuxiuhua@cust.edu.cn

通信作者: 任开发 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光学薄膜研究。E-mail: 923994692@qq.com

引言

应用于对地成像观测(地表温度探测)和光谱分析监测^[1]的多谱段光谱成像仪由可见近红外、短波红外、中波红外以及长波红外(long-wave infrared, LWIR)等模块共同组成。其中,得益于常温/低温目标在长波红外波段存在较强的辐射特征,采用长波红外波段的高光谱成像仪对地表温度的探测和识别优势突出,并可昼夜连续工作,具有保密性好、可靠性高和反应迅速等优点,在军事、民用等领域具有广阔的应用前景。

然而,长波红外带通滤波器作为光谱成像仪的探测窗口,复杂的制造工艺导致其光谱性能并不理想,特别是在目标信号微弱、探测距离远的情况下,探测器的信噪比和灵敏度会显著降低。因此,设计一款透射率高、截止深度深、波纹幅度小、过渡特性好的高信噪比长波红外带通滤波器,对于提高光谱成像仪精度和灵敏度至关重要。

1999 年,李少梅^[2]等人根据等效折射率理论设计了由 PbTe 和 ZnS 多层膜组成的 10.4 μm~12.5 μm 带通滤波器,理论通带平均透射率为 85 % 左右,通带波纹 4 %。2004 年,张麟^[3]等人采用 Pb-GeTe 材料作为膜系中心间隔层,镀制出 10.8 μm 长波红外带通滤波器,在低温下具有更好的光学性能及更强膜层附着力,但 PbTe 材料本身有毒,会对操作人员造成伤害。2008 年,HAWKINS G J^[4]等人制备了 10.74 μm~11.3 μm 带通滤波器,在 210 K 温度下,通带平均透过率为 81.8 %。2009 年,张佰森^[5]等人制备了 10.33 μm~12.53 μm 长波红外带通滤波器,通带平均透过率为 85 % 左右。2021 年,何虎^[6]等人研制了中心波长 10.56 μm,带宽为 175 nm 的窄带滤波器,其峰值透过率为 80.2 %。

本文依据薄膜设计理论,通过真空沉积方法研制出 10 μm~11 μm 高透射率长波红外带通滤波器,主要用于地表温度探测。

1 膜系设计

1.1 光谱选择

不同温度的物体在不同波段的辐射强度分布存在差异,因此根据需求选择合适的波段可以提高探测灵敏度和准确性。根据黑体辐射定律^[7]得到不同温度下黑体的光谱分布曲线,如图 1 所示。由图 1 可知,长波红外波段 10 μm~11 μm 作为多谱段光谱成像仪中的一个成像波段,对于常温/低温物体探测具有优势。因此,根据使用需求,选择 10 μm~11 μm 作为透射区,4 μm~9.5 μm 和 11.5 μm~16 μm 作为截止区。

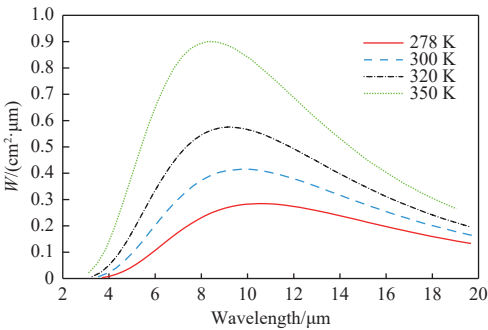


图 1 黑体辐射光谱分布曲线

Fig. 1 Spectral distribution curves of blackbody radiation

1.2 镀膜材料选择

选择镀膜材料时主要考虑其透明区、吸收区、膜层间以及膜层与基底间的匹配^[8-9]。长波红外常用的高折射率材料有 Ge、PbTe 等,低折射率材料有 ZnS、ZnSe、YF₃ 等,这些材料的光学性能与力学性能如表 1 所示。

表 1 Ge、PbTe、ZnSe、ZnS 和 YF₃ 的光学性能和力学性能

Table 1 Optical and mechanical properties of Ge, PbTe, ZnSe, ZnS and YF₃

Material	Density/ g·cm ⁻³	Acoustic impedance/ Pa·s·m ⁻¹	Refractive index	Transparent wave length/μm	Young's modulus/ GPa	Linear expansion coefficient/K
Ge	5.32	1.38×10 ⁷	4.2(10.5 μm)	2~23	103	5.5×10 ⁻⁶
PbTe	8.8	3.02×10 ⁷	5.0(10.5 μm)	1~25	54	2.8×10 ⁻⁷
Znse	5.27	2.69×10 ⁷	2.41(10.5 μm)	2~14	67	7.1×10 ⁻⁶
ZnS	4.09	1.83×10 ⁷	2.2(10.5 μm)	0.38~14	97	7.6×10 ⁻⁶
YF ₃	4.32	2.06×10 ⁷	1.49(10.5 μm)	0.35~12	115	9.2×10 ⁻⁶

根据膜系设计理论,PbTe 与 YF₃ 折射率差值大,可有效减少总膜层厚度,降低制备难度,是理想的高低折射率组合材料。但 PbTe 具有很大毒

性,会对实验人员造成伤害,YF₃ 薄膜特性为多孔柱状、低密集度,易吸收水汽,对于多层滤光膜,膜层易开裂^[10]。Ge 的折射率大约是 4.2,其物理化学

性能稳定,所以选定 Ge 为高折射率材料。低折射率材料中, ZnS 与 ZnSe 均具有优良的折射率均匀性和一致性,但与 ZnSe 相比, ZnS 硬度高,耐化学腐蚀能力强。ZnS 的折射率大约是 2.2, Ge 和 ZnS 匹配,经过实验验证可以获得稳定的膜层,因此将 ZnS 选为低折射率材料。

为了准确获得 Ge 和 ZnS 的光学常数,在锗基板上分别制备单层 Ge 与 ZnS 薄膜,测试其透射光谱,如图 2 所示。同时优化工艺条件(沉积速率、基板温度、腔体真空度、离子源辅助参数),利用膜系设计软件拟合折射率色散分布曲线,如图 3 所示。下面用实际拟合的折射率色散分布数据进行膜系结构设计。

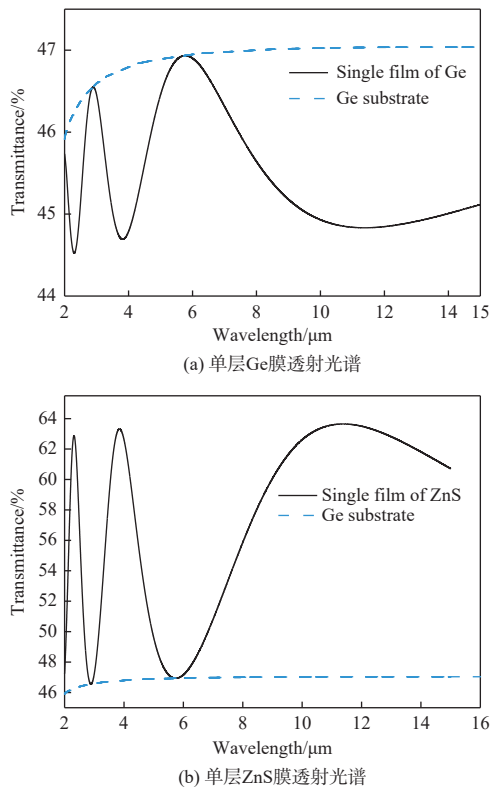
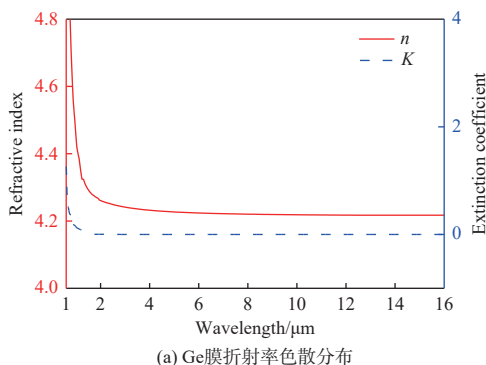
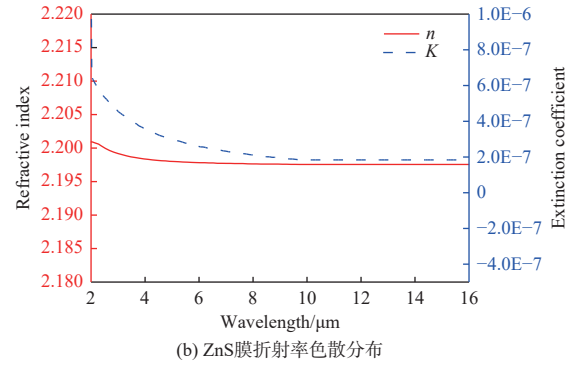


图2 单层膜的透射率光谱

Fig. 2 Transmission spectra of single-layer film



(a) Ge膜折射率色散分布



(b) ZnS膜折射率色散分布

图3 薄膜材料折射率色散分布

Fig. 3 Refractive index dispersion distribution of thin-film materials

1.3 膜系设计

针对薄膜技术指标,光谱在 $10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$ 高透过, $4\ \mu\text{m}\sim 16\ \mu\text{m}$ 高截止,依据薄膜理论进行膜系结构设计。从光谱要求可以看出,通带的宽度为 $1\ \mu\text{m}$,截止范围太宽,采用 F-B 结构设计膜系,截止带宽较窄,如果增加膜层数量,制备难度提高^[11-15]。因此采用长、短波通叠加的膜系结构进行设计,在 Ge 基板两侧分别镀制长、短波通膜系,将总膜厚分散于基板两侧,不仅减少应力,还可以获得较宽的通带和截止带。

采用对称周期膜系(pqp)结构进行设计,可表示为

$$\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^S \text{ 和 } \left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^S \quad (1)$$

其等效折射率为

$$E = n_p \left[\frac{(n_p + n_q)^2 \cos \delta_q - (n_p^2 - n_q^2)}{(n_p + n_q)^2 \cos \delta_q + (n_p^2 - n_q^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

截止深度为

$$T_r = \frac{16\eta_0\eta_s}{(\eta_H/\eta_L)^{2S} \left\{ (\eta_0 + \eta_s)^2 + [\eta_0\eta_s/\eta_p - \eta_p]^2 \right\}} \quad (3)$$

截止带相对半带宽为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\eta_H - \eta_L}{\eta_H + \eta_L} \right) \quad (4)$$

截止带宽为

$$\Delta \lambda \approx 2\Delta g \lambda_0 = \frac{4\lambda_0}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\eta_H - \eta_L}{\eta_H + \eta_L} \right) \quad (5)$$

式中: η_p 、 η_q 分别为 p、q 层的折射率; η_H 、 η_L 、 η_0 、 η_q 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; λ_0 为膜系中心波长。

根据式(3)可知,用 Ge 和 ZnS 作为高低折射

率材料时, 需要满足截止深度 $T_r \leq 0.1\%$ 的要求, 周期数 S 至少为 6。为了提高通带边缘陡度, 长短波通膜系分别设置为 $S=11$ 和 $S=10$ 。

长波通膜系结构为 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^S$, 根据光谱要求,

$$\text{Ge}|(0.5\text{HL}0.5\text{H})^{11} \quad 0.69(0.5\text{HL}0.5\text{H})^7 \quad 0.47(0.5\text{HL}0.5\text{H})^7|\text{Air} \quad (6)$$

短波通膜系为 $\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^S$, 以带通滤光参数要求确定中心波长为 13.5 μm, 截止带宽为 11.5 μm~16 μm, 根据式(3)、式(5)可得 $T_r \ll 0.1\%$, 截止带宽 $\Delta\lambda \approx 5.46 \mu\text{m}$ 。短波通膜系初始结构为

$$\text{Ge}|(0.5\text{LH}0.5\text{L})^{10}|\text{Air} \quad (7)$$

初始设计的长、短波通膜系光谱曲线如图 4 和图 5 所示。从图 4 和图 5 的光谱虚线可以看出, 通带波纹较大, 平均透过率较低, 因此借助膜系设计软件进行优化。另外, 考虑到制备误差及中心波长漂移等因素, 在优化时需要适当增加通带宽度。优化后的膜系如下。

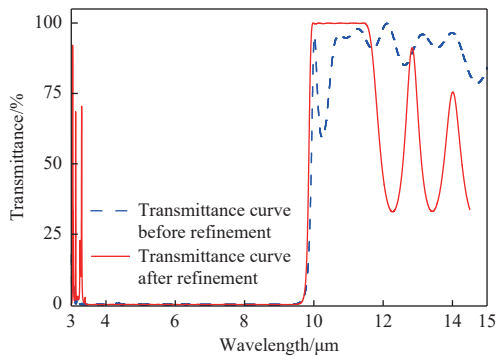


图 4 长波通膜系设计

Fig. 4 Long-wavelength pass films design

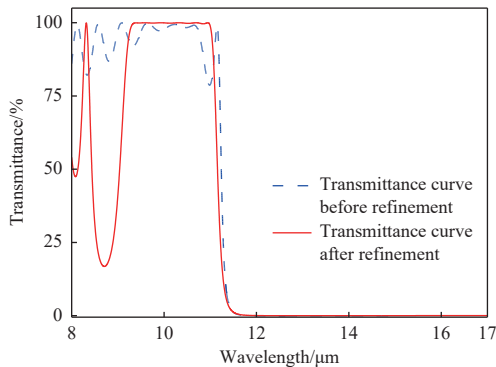


图 5 短波通膜系设计

Fig. 5 Short-wavelength pass films design

长波通膜系为: Sub| 1.0288H 0.9500L 0.5211H 1.1171L 0.9984H 1.0276L 1.1187H 0.8158L 0.9390H

其截止带宽为 4 μm~9.5 μm, 根据式(5)计算需要叠加 3 个截止膜系, 中心波长分别为 7.8 μm、5.38 μm 和 3.7 μm, 对应截止带的带宽分别为 3.15 μm、2.17 μm 和 1.48 μm。长波通膜系初始结构为

$$\begin{aligned} &1.0848\text{L} \quad 1.0060\text{H} \quad 1.0409\text{H} \quad 1.0785\text{L} \quad 0.9405\text{H} \quad 0.9308\text{L} \\ &0.9214\text{H} \quad 0.8595\text{L} \quad 0.7364\text{H} \quad 0.2912\text{L} \quad 0.8299\text{H} \quad 0.8440\text{L} \\ &0.9078\text{H} \quad 0.8925\text{L} \quad 0.7830\text{H} \quad 0.5238\text{L} \quad 0.5454\text{H} \quad 0.7268\text{L} \\ &0.7342\text{H} \quad 0.7034\text{L} \quad 0.5552\text{H} \quad 0.5133\text{L} \quad 0.7309\text{H} \quad 0.7916\text{L} \\ &0.4740\text{H} \quad 0.2450\text{L} \quad 0.7286\text{H} \quad 0.6441\text{L} \quad 0.3525\text{H} \quad 0.5350\text{L} \\ &0.6439\text{H} \quad 0.4218\text{L} \quad 0.2101\text{H} \quad 0.5368\text{L} \quad 0.5469\text{H} \quad 0.5015\text{L} \\ &0.1648\text{H} \quad 0.6212\text{L} \quad 0.6763\text{H} \quad 0.3849\text{L} \quad 0.3636\text{H} \quad 1.2659\text{L} \\ &0.7871\text{H} \quad 0.5390\text{L} \quad 0.3418\text{H} \quad 1.0297\text{L}|\text{Air} \end{aligned}$$

短波通膜系为: Sub| 1.1413L 1.2508H 0.9055L 0.9197H 1.0302L 1.1610H 0.9627L 0.9151H 0.9248L 1.0136H 1.1535L 0.9664H 0.9123L 0.9159H 0.9970L 1.2090H 0.9541L 0.8859H 0.8690L 1.2863H 0.3372L |Air

其中 Sub 为 Ge 基底, H 为 Ge 材料, L 为 ZnS 材料, 长、短波通膜层分别为 56 层和 21 层, 总物理厚度分别为 27.493 μm 和 25.125 μm。优化后的长、短波通膜系光谱曲线如图 4 和图 5 所示, 可看出通带透过率满足光谱要求。长、短波通膜系各膜层厚度与灵敏度如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出, 两种膜系均无极薄层且灵敏度较低, 为后续薄膜的制备提供了可行性。

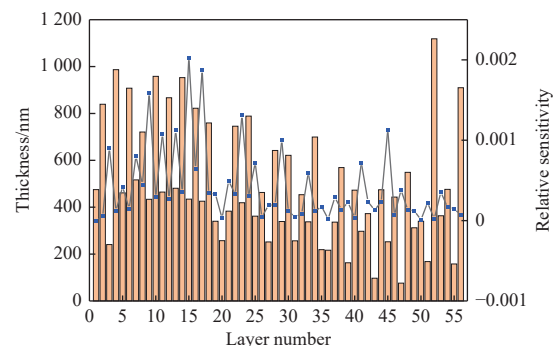


图 6 长波通膜厚与灵敏度

Fig. 6 Thickness and sensitivity of long-wavelength pass

长、短波通膜系组合的光谱透过率曲线如图 8 所示, 理论设计的数据如表 2 所示。表 2 中 T_{ave} 为通带平均透过率; $\Delta = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ 为顶部波纹振幅; K 为截止区平均透射率。

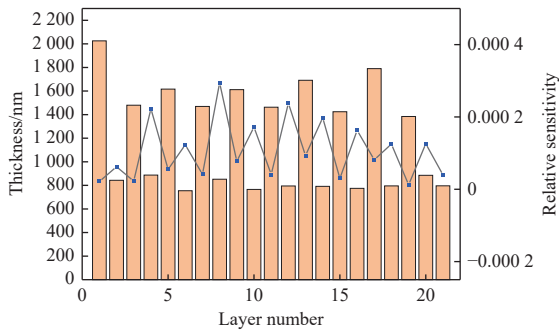


图 7 短波通膜厚与灵敏度

Fig. 7 Thickness and sensitivity of short-wavelength pass

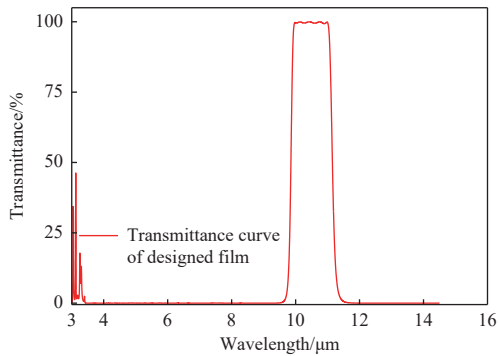


图 8 组合膜系统设计光谱曲线

Fig. 8 Spectral transmittance curve of combined membrane system design

表 2 带通滤光膜设计光学性能

Table 2 Designed optical properties of bandpass filter film

Parameter	Value/%	Wavelength/ μm
Average transmittance T_{ave}	99.73	10~11
Top ripple amplitude Δ	0.7	10~11
	0.019	4~9.5
Rejection rate K	0.031	11.5~16

2 红外带通滤光膜的研制

实验采用国泰 GT-1350 真空镀膜机进行镀制, 采用 XTC/3 晶体膜厚控制仪控制膜厚, 左侧配有八位旋转阻蒸, 右侧配置 270°e 型电子枪, 离子源为空心阴极霍尔源, 烘烤方式采用上烘烤, 烘烤温度 150℃。Ge 膜采用电子束蒸发, ZnS 膜采用电阻热蒸发, 基片用超声波清洗, 当本底真空达到 4.0×10^{-4} Pa 时, 使用离子源轰击基片 10 min。具体镀膜工艺参数如表 3 和表 4 所示。

2.1 膜厚误差分析

长、短波通膜系层数较多, 对膜厚控制要求较

表 3 离子源工艺参数

Table 3 Ion source process parameters

Name	Beam		$E/B/\%$	Gas Ar/sccm
	Voltage/V	Current/mA		
Cleaning	200	3 000	150	8
Ge	150	500	200	6
ZnS	120	500	200	6

表 4 Ge、ZnS 薄膜沉积工艺参数

Table 4 Deposition process parameters of Ge and ZnS films

Material	Substrate temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Degree of vacuum /Pa	Deposition rate/(nm/s)
Ge	150	4.0×10^{-4}	0.5
ZnS	150	4.0×10^{-4}	2.5

高, 制备难度较大, 每层膜的厚度误差经过积累最终影响光谱性能。初次制备的长波通膜系与短波通膜系光谱测试结果如图 9 和图 10 所示。从图 9 和图 10 可以看出, 实线和虚线对比, 长、短波通膜系均向长波方向漂移了 100 nm 左右, 且在光谱透射区都有不同程度的“掉坑”现象, 尤其是膜层数量较多的长波通膜系。

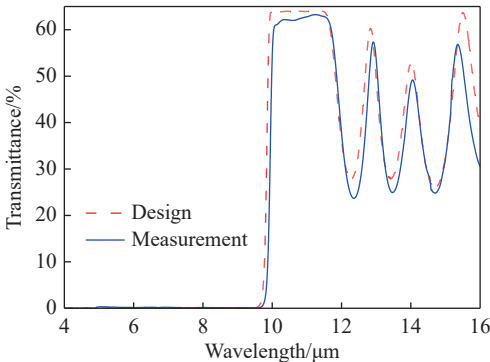


图 9 长波通膜系设计与测试光谱

Fig. 9 Design and test spectra of long-wavelength pass films

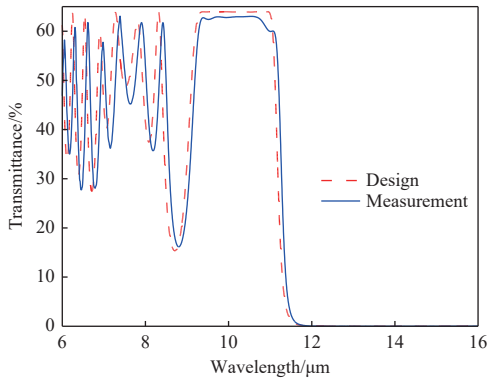


图 10 短波通膜系设计与测试光谱

Fig. 10 Design and test spectra of short-wavelength pass films

2.2 膜厚误差校正

2.2.1 Ge 膜厚度误差校正

实验发现, 当 Ge 材料蒸发的液面下降时, 蒸发源的相对位置发生改变, 图 11 为旋转球面夹具示意图。图 11 中, E 为电子枪蒸发源; Q 为工件盘顶点(晶振位置); S 为基片上任意一点; ψ 为工件盘旋转角度, 当旋转角度 $\psi=180^\circ$ 时, 式 (9) 中几何关系见图 11 所示; ρ 为基片上点 S 到转轴的距离; r 、 r_0 分别为蒸发源到 S 点和 Q 点的距离; θ 和 θ_0 分别为 S 点和 Q 点表面法线与蒸发源的距离所构成的角度; H 为工件盘高度; h 为 S 点到坩埚液面表面的距离; R 为球面夹具的曲率半径; A 为样品点 S 到球面夹具球心点的连线与转轴的夹角; φ 和 φ_0 分别为 S 点表面法线、Q 点表面法线与蒸发源表面法线所构成的角度。

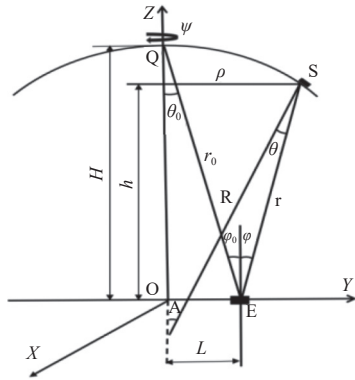


图 11 旋转球面夹具几何示意图

Fig. 11 Geometric diagram of rotary spherical fixture

电子枪蒸发 Ge 为小平面蒸发源, 其蒸发特性具有方向性, 发射限为半球。考虑非余弦分布的膜厚均匀性, 膜厚分布为

$$T = \frac{m \cos^n \varphi \cos \theta}{\pi \mu r^2} \quad (8)$$

根据图 11 几何关系和式 (8), 可得伞架旋转一周 S 点积累膜厚公式为

$$T_s = \int_0^{2\pi} \frac{mh^n [h \cos A + (\rho + L \cos \psi) \sin A]}{2\pi^2 \mu (h^2 + \rho^2 + L^2 + 2\rho L \cos \psi)^{(n+3)/2}} d\psi \quad (9)$$

式中: m 为蒸发材料的质量; n 为材料蒸发特性参数, 与材料、坩埚、电子束蒸发的发射特性等因素有关。在无修正板的情况下沉积一层 600 nm 厚的 Ge, 并测出实际膜厚, 最后计算出相对膜厚(相对膜厚为基片沉积的实际膜厚与监控厚度的比值), 如图 12 所示。图 12 中蓝色点为工件盘径向方向 9 个位置的相对厚度, 通过计算可得到 Ge 材料蒸发特性 n 值为 3.2, 黑色实线是蒸发特性 $n=3.2$

时的相对膜厚分布曲线。

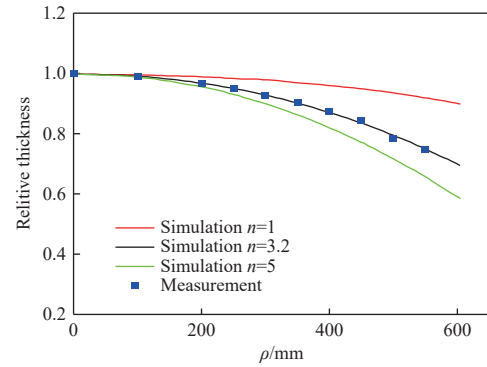


图 12 旋转球面工件盘相对膜厚分布

Fig. 12 Relative film thickness distribution of rotary spherical workpiece plate

GT-1350 真空镀膜机腔室尺寸和点 S 的位置为: $H=1\ 080\text{ mm}$, $h=1\ 010\text{ mm}$, $\rho=400\text{ mm}$, $L=330\text{ mm}$, $R=1\ 173\text{ mm}$, $r=1\ 010\text{ mm}$, $r_0=1\ 130\text{ mm}$, $\theta=16^\circ$, $\theta_0=\varphi_0=17^\circ$, $A=20^\circ$, $\varphi=4^\circ$, 修正板在伞架上对 S 点运动轨迹的遮挡角度经过测量为 $155^\circ \sim 205^\circ$ 。基于公式 (9), 应用 Matlab 软件计算模拟电子枪在点 S 处的膜厚分布模型, 点 S 沉积轨迹如图 13 所示。当膜料蒸发时, 计算 S 点旋转一周沉积膜厚 $T_s=26.27\text{ nm}$, 晶振片的监控膜厚 $T_Q=38.90\text{ nm}$, S 点相对厚度 $\frac{T_s}{T_Q}=0.6753$, S 点修正的比例系数为 $1/0.6753=1.4808$, 即 S 点设计厚度为 100 nm 时, 监控厚度为 148.08 nm。

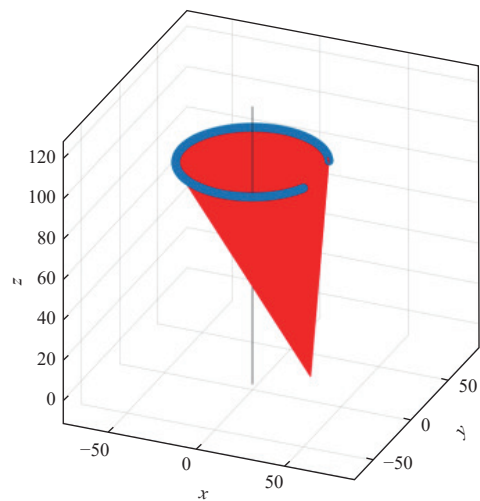


图 13 样品点 S 膜厚沉积运动轨迹

Fig. 13 Film thickness deposition motion trajectory of S-point

设液面下降高度为 d , 蒸发材料的坩埚半径 $r_1=20\text{ mm}$, 每个坩埚蒸发的总质量为 $\mu\pi r_1^2 d$, 沉积到

晶控片的膜厚为 T_d , 蒸发的材料质量与晶振片沉积膜厚的比例关系设为 k , 则 k 值计算公式为

$$k = \frac{\pi \mu r_1^2 d}{T_d} \quad (10)$$

根据长波通膜系实验数据, 将 28 层 Ge 膜均匀分布到 10 个坩埚, 每个坩埚消耗前、后的膜料质量通过高精密度天平称重, 计算得到消耗的材料质量依次为 45.55 g、36.79 g、36.60 g、33.30 g、44.23 g、36.88 g、31.48 g、30.86 g、28.59 g、26.70 g, 晶振片沉积的膜厚依次为 1 742.77 nm、1 407.26 nm、1 399.89 nm、1 273.37 nm、1 691.96 nm、1 410.57 nm、1 203.68 nm、1 179.74 nm、1 092.87 nm、1 020.64 nm。通过公式(10)计算得出 k 值, 取平均值 $k=0.026$ 15 g/nm, 然后计算得到各个坩埚下降的高度依次为 6.814 mm、5.504 mm、5.475 mm、4.981 mm、6.616 mm、5.517 mm、4.709 mm、4.616 mm、4.277 mm、3.994 mm。根据理论计算, 长、短波通 Ge 膜层膜厚误差如表 5 所示, 其中“+”表示变厚。

表 5 S 点位置 Ge 的膜厚误差

Table 5 Thickness errors at S-point position of Ge films					
Number	Design Film thickness /nm	Film thickness on the crystal oscillator/nm	Drop height of liquid level d/mm	Error value of film thickness/nm	
1	Ge 475.15	703.60	2.75	+0.273	
3	Ge 240.68	356.40	1.39	+0.342	
5	Ge 416.67	682.77	2.67	+1.03	

表 5 中数据为 1 号坩埚镀了 3 层 Ge 材料。设计的膜厚与晶振控制膜厚会随着液面的下降而变化, 按照公式(9)计算 S 点的厚度, 与设计厚度之差为膜厚误差, Ge 膜厚误差如图 14 所示。

2.2.2 阻蒸蒸发 ZnS 膜厚误差校正

为校正不同监控厚度对应的实际薄膜厚度, 将 ZnS 薄膜沉积在 $\phi 25.4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的基板上, 用 Eoptic 公司 SE-VM 型椭圆偏振仪测量得到薄膜的厚度。沉积速率和薄膜厚度均由石英膜厚控制仪来监控, 根据 ZnS 膜系厚度分布, 分别沉积的薄膜厚度为 200 nm、400 nm、600 nm、800 nm、1 000 nm 和 1 200 nm, 每种厚度沉积 3 次。ZnS 薄膜的监控厚度与实测的厚度如表 6 所示。实际厚度与监控厚度的关系如图 15 所示。

拟合数学公式为

$$Y = 0.69X - 3.38 \quad (11)$$

公式(11)可以概述监控厚度与实测厚度之间

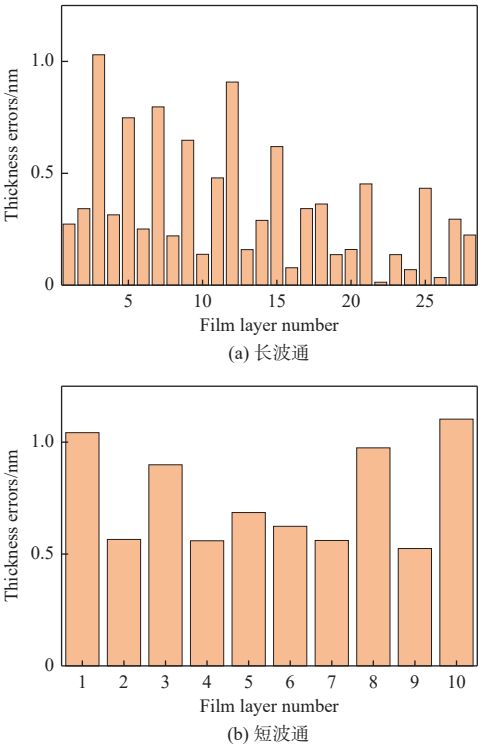


图 14 长、短波通膜系 Ge 膜的厚度误差

Fig. 14 Thickness errors of Ge film of long-wavelength and short-wavelength pass films

表 6 ZnS 薄膜的监控厚度与实测厚度对应表

Table 6 Correspondence between monitored and actual thicknesses of ZnS film	
Monitor thickness X/nm	Actual thickness Y/nm
200	134.5
400	273.1
600	409.6
800	550.2
1 000	687.5
1 200	824.2

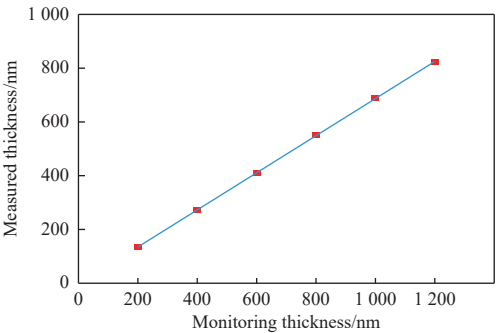


图 15 ZnS 薄膜的监控厚度与实际厚度的关系

Fig. 15 Relation between monitored and actual thicknesses of ZnS film

的关系, 以此修正 ZnS 膜层厚度。

3 测试结果分析

根据 Ge、ZnS 膜的厚度误差分析结果, 分别对 Ge、ZnS 膜层进行厚度修正, 最终制备的样片如图 16 所示。使用 Perkin Elmer 的 Spectrum 3 OPT-ICA FT-IR 红外傅里叶光谱仪进行测量, 实测光谱曲线如图 17 所示, 测试结果如表 7 所示。



图 16 制备的样片

Fig. 16 Sample prepared by experiment

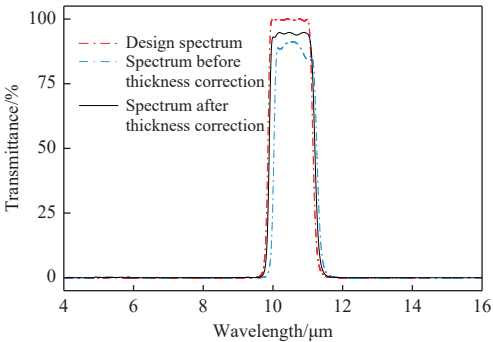


图 17 实测透过率曲线

Fig. 17 Measured transmittance curves

表 7 光谱测试结果

Table 7 Spectrum test results

Parameter	Wavelength/μm	Value/%
Average transmittance T_{ave}	10~11	94.3
Top ripple amplitude Δ	10~11	1.6
Rejection rate K	4~9.5	<0.1
	11.5~16	<0.1

测试结果表明, 经过厚度误差校正后, 制备的样片测试光谱顶部波纹得到明显改善, 另外, 通带透过率低于设计值, 分析原因可能是膜层吸收导致的。

4 环境适应性测试

为验证该滤波器的环境稳定性, 本文按照《光学膜层通用规范》对样品进行了相应的环境测试。

1) 附着力实验

样品膜层表面任意位置用玻璃刀划九宫格, 将粘性强度不小于 3 N/cm² 的 3 m 胶带粘接在膜层表面, 挤出气泡, 沿垂直方向反复拉 10 次。膜层表面无脱膜情况。

2) 水煮实验

水煮锅达到设定温度 80℃ 后, 将待测样品放置到水煮锅中进行水煮试验, 水煮 24 h, 样品在常温下静置 2 h 后使用白炽灯检查, 膜层表面未出现脱落、分层、发白、变色等不良现象, 光谱基本无变化。

3) 高低温实验。

采用 KMH-1000 试验箱, 试验箱温度设置为低温 -30℃、高温 70℃, 各保持 1 h, 温度转换 1 h, 共 24 h。测试后样品表面无氧化、无脱落和腐蚀, 附着力和耐磨性测试合格, 且光谱无明显变化。

4) 恒温恒湿实验

将样品放进 KMH-1000 试验箱, 温度设为 60℃, 相对湿度设置为 95%, 保持 48 h。测试后样品表面无变化, 光谱无明显变化。

5) 机械强度试验

使用电动铅笔硬度计, 将两层干燥的脱脂纱布包裹橡皮擦, 在 1 kg(9.8 N) 压力下, 沿着薄膜表面同一轨迹进行摩擦, 往返 40 次, 用白炽灯检查摩擦位置, 无划痕。

5 结论

本文根据带通滤波器设计理论, 针对地表温度探测要求, 采用 Ge 和 ZnS 作为镀膜材料, 在 Ge 基板两侧分别设计长波通和短波通膜系, 以电子束和电阻热蒸发方式, 在 GT-1350 型真空镀膜机上制备了长波红外带通滤波器。通过分析并建立电子枪蒸发 Ge 的数学模型, 以及拟合阻蒸发 ZnS 监控厚度与实测厚度之间的关系进行膜厚误差修正, 解决了因膜层数量多、膜层较厚而导致的膜厚误差累积引起的光谱变差问题。实际研制的带通滤波器光谱在 10 μm~11 μm 波段的平均透过率为 94.3%, 在 4 μm~9.5 μm 和 11.5 μm~16 μm 波段平均透过率均小于 0.1%, 该滤波器通过了抗环境性能测试, 具有稳定的光谱以及良好的理化性

能。随着多谱段光谱仪对探测精度要求不断提高,如何进一步提高通带透过率、减小通带波纹将成为今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 赵坚, 孟令杰, 王琦, 等. 我国高分辨率对地观测系统建设与发展[J]. *卫星应用*, 2022(11): 8-13.
ZHAO Jian, MENG Lingjie, WANG Qi, et al. Construction and development of high-resolution earth observation system in China[J]. *Satellite Applications*, 2022(11): 8-13.
- [2] 李少梅, 罗崇泰, 熊玉卿, 等. 10.4 μm ~12.5 μm 带通滤光片的设计[J]. *真空与低温*, 1999(3): 49-52.
LI Shaomei, LUO Chongtai, XIONG Yuqing, et al. Design of 10.4 μm ~12.5 μm pass-band optical filter[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 1999(3): 49-52.
- [3] 张麟, 张素英. PbGeTe 材料在长波红外低温滤光片镀膜中的应用[C]//中国仪器仪表学会 2004 年光学仪器研讨会论文集. 上海: 上海光学仪器研究所, 2004: 3.
ZHANG Lin, ZHANG Suying. The application of Pb-GeTe in deposition of low temperature long wavelength IR filters [C]//Chinese Society of Instrumentation. Proceedings of the 2004 Symposium on Optical Instruments. Shanghai: Shanghai Institute of Optical Instruments, 2004: 3.
- [4] STOLBERG-ROHR T, HAWKINS G J. Spectral design of temperature-invariant narrow bandpass filters for the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 580-596.
- [5] 叶自煜, 王多书, 张佰森, 等. 宽截止长波红外带通滤光片的研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(增刊 1): 39-41.
YE Ziyu, WANG Duoshu, ZHANG Baisen, et al. Development of infrared pass-band filters with wide rejection band[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(S1): 39-41.
- [6] 何虎, 许晴, 张杰, 等. 六氟化硫气体探测用 10.56 μm 窄带滤光片的研制[J]. *光学仪器*, 2021, 43(6): 46-51.
HE Hu, XU Qing, ZHANG Jie et al. Development of 10.56 μm NBP filter for sulfur hexafluoride gas detection[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(6): 46-51.
- [7] 段英. 红外测温目标光谱发射率特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
DUAN Ying. Study on spectral emissivity characteristic of target in infrared temperature measurement [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [8] 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.
TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology [M]. Hanzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [9] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
TANG Jinfa, ZHENG Quan. Applied thin film optics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984.
- [10] 李刚, 杜鹃, 田湫, 等. Ge 基底 8 μm ~11.5 μm 长波通滤光膜的研制[J]. *红外技术*, 2008, 30(3): 139-142.
LI Gang, DU Juan, TIAN Qiu, et al. The design and fabrication of 8 μm ~11.5 μm filter film on Ge substrate[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(3): 139-142.
- [11] 查家明, 李斯成, 唐乾隆. 红外中带滤光片的结构、带宽估算及调整[J]. *应用光学*, 2007, 28(2): 151-155.
CHA Jiaming, LI Sicheng, TANG Qianlong. Structure, bandwidth estimation and adjustment of medium band-pass infrared filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 151-155.
- [12] 王利, 王占山, 吴永刚, 等. 基于 Fabry-Perot 结构的多通道滤光片的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 643-646.
WANG Li, WANG Zhanshan, WU Yonggang, et al. Design of multiple-channel filter based on Fabry-Perot structure[J]. *Optical Precision Engineering*, 2003, 11(6): 643-646.
- [13] 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.
WANG Hang, XIONG Changxin, HE Guangzong. Design and preparation of medium-wavelength infrared band pass combined filter[J]. *Optics and Photonics Technology*, 2015, 13(4): 83-86.
- [14] 赵兴梅, 师建涛, 郭鸿香. 短波通滤光片膜系设计[J]. *应用光学*, 2006, 27(5): 415-418.
ZHAO Xingmei, SHI Jiantao, GUO Hongxiang. Film system design for short-wavelength pass filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(5): 415-418.
- [15] 朱华新, 王彤彤, 高劲松, 等. 宽通带宽截止带通滤光片研究[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(5): 1296-1301.
ZHU Huaxin, WANG Tongtong, GAO Jinsong, et al. Study on broad pass-band and wide rejection band of band-pass filters[J]. *Journal of Artificial Crystals*, 2014, 43(5): 1296-1301.