

中短波红外双带通低温滤光片的设计与制备

周 晟^{1,3}, 刘定权^{1,2,3*}, 王凯旋¹, 李耀鹏¹, 胡金超¹, 王曙光¹, 朱浩翔¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 200031;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 双带通滤光片可以在元件的任意一个几何位置上同时透过两个光谱通道, 从而实现双光谱通道的同时探测。文中研制了一种在 100 K 低温下使用的短波和中波红外双带通滤光片, 选用 Ge 和 SiO 分别作为高低折射率膜层, 在蓝宝石 (Al_2O_3) 基片上设计了具有 Fabre-Perot (F-P) 结构的短波通道滤光膜系和中波通道滤光膜系, 它们在另一通带位置兼具增透能力, 组合形成了包含短波通道 (2.60~2.85 μm) 和中波通道 (4.10~4.40 μm) 的双带通滤光片。Ge 和 SiO 薄膜分别以电子束和电阻热蒸发的方式在高真空环境中完成沉积。测试结果显示, 在 100 K 低温下, 短波和中波通道的平均透射率分别达到 91.2% 和 87.7%, 顶部波纹幅度分别为 2.1% 和 3.8%, 波长 3.00~3.95 μm 光谱区域内的截止深度低于 0.1%。该双带通滤光片在低温下的光学性能满足光学成像仪器的光谱应用要求, 有利于更加精确的红外遥感和探测。

关键词: 光学薄膜; 双带通滤光片; 低温光谱; 红外

中图分类号: O484 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210964

Design and fabrication of short and middle wavelength infrared dual band-pass filter at cryogenic temperature

Zhou Sheng^{1,3}, Liu Dingquan^{1,2,3*}, Wang Kaixuan¹, Li Yaopeng¹, Hu Jinchao¹, Wang Shuguang¹, Zhu Haoxiang¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200031, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Dual band-pass filter can simultaneously form two spectral channels to transmit at any position of the element, so as to realize simultaneous detection of dual spectral channels. In this paper, an infrared dual band-pass filter used at 100 K temperature was developed. Sapphire (Al_2O_3) was used as substrate, and Ge and SiO were used as high (H) and low (L) refractive index thin films respectively. An infrared dual band-pass filter combined with a shorter wavelength channel (2.60-2.85 μm) and a longer wavelength channel (4.10-4.40 μm) was designed and fabricated. Based on Fabre-Perot (F-P) filter structure, Ge and SiO thin films were deposited by electron beam evaporation and resistance thermal evaporation on the two sides of the substrate. At the working temperature (100 K), the filter transmittance of shorter channel is 91.2%, and the top ripple amplitude is 2.1%; the average transmittance of longer channel is 87.7%, and the top ripple amplitude is 3.8%. Between the two channels

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61705248)

作者简介: 周晟, 男, 副研究员, 硕士, 主要从事红外光学薄膜材料和器件方面的研究。

通讯作者: 刘定权, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外光学薄膜、材料和器件的研制及应用方面的研究。

(wavelength 3.00-3.95 μm), the cut-off depth is less than 0.1%. The optical performance of the infrared dual band-pass filter can meet the spectral requirements and contribute to more accurate infrared remote sensing and detection.

Key words: optical thin film; dual band-pass filter; cryogenic spectrum; infrared

0 引言

红外滤光片是一种广泛应用于遥感探测、气体分析、安防监测、气象预报和自动驾驶等领域的光谱滤波元件,它可以精确提取探测所需要的波段,并对工作波段以外的辐射能量进行抑制^[1-3]。在红外空间遥感领域,根据大气窗口通常将波段划分为短波红外(1~3 μm)、中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~14 μm)^[4]。随着红外背景干扰因素的增多,单波段探测在抗干扰方面存在一定的困难,而红外双波段探测技术因其可以同时获得两个光谱通道内的信息、具备分辨能力高、抗干扰能力强等优点,是红外探测技术发展的方向之一^[5-7]。两个光谱通道的信息配合双色探测器,可以得到两个光谱通道的差分信息、合成信息和分别的单独信息,使得探测的准确性明显提升。

不同于在一个元件上分区域镀膜实现两个光谱通道探测,双带通滤光片可以在一个元件的任意几何位置通过多层薄膜干涉同时形成两个光谱通道,并且抑制光谱通道以外的辐射能量。红外双带通滤光片可以提升工作通道内的光学效率,减少光学系统的复杂度,还能避免光谱通道间的杂光串扰问题。

相比传统的单带通滤光片,双带通滤光片在设计时需要同时平衡两个通道的光谱形状和两个通道之外的光谱抑制,在膜层制备时需要多个敏感层实现 1% 以内的高精度控制。陈友华等^[8]选用 PbTe 和 ZnSe 作为高低折射率膜层材料,设计了一种具有 5.9~6.2 μm 和 11.9~12.2 μm 的双带通滤光片,两个光谱通道的透过率分别达到 90% 和 65%; Brian T. Sullivan 等^[9]在波长 400~600 nm 的可见光范围内采用全非规整膜系研制了一种双带通滤光片,两个通带的中心波长分别为 468 nm 和 532 nm,带宽均为 10 nm; 蔡渊等^[10]提出了一种兼有增透带的 Fabre-Perot (F-P) 膜系组合设计的方法,有效解决了通道间光谱距离较大时双色滤光片的设计难题; 陈旭等^[11]采用多个截止带组合的设计方法,选用 Si 和 SiO 膜层制备了一种中心波长分别为 3.0 μm 和 4.5 μm 的双通道滤光片,两个通道的透射率分别达到 73% 和 81%,该方法对于传统设计的

继承性好,但制作时通带光谱的控制较难。

文中研制了一种在 100 K 低温环境下使用的短波和中波红外双带通滤光片。利用滤光片基片的两个表面,其上各制作一个兼有特定增透波段(另一面上的 F-P 带通波段)的 F-P 带通滤光膜系。当光线穿过滤光片时,两个设计的 F-P 带通部分能够高效率地透射,而其他波长的光线则被有效拦截,实现双带通的效果。这样做的好处是可以准确设计和镀制得到单个 F-P 带通的光谱,对另一个带通的影响较小,有利于得到好的光谱品质和成功率。设计时,考虑了常温 300 K 和低温 100 K 情况下膜层和基片的光学特性的差异,研究了双带通滤光片在常温和低温条件下的光谱变化情况。

1 膜系设计

双带通滤光片的膜系设计通常有两种方法^[12]: 第一种是通过负滤光膜系和宽带通膜系叠加的方式形成双带通滤光膜系; 第二种是基于两个兼有特定增透带的 F-P 单带通滤光膜系,叠加形成双带通滤光膜系。这样的叠加通常设置在基片的两个表面上,可以避免膜系之间的干扰。文中设计的双带通滤光片的短波通道(2.60~2.85 μm)和中波通道(4.10~4.40 μm)分别位于短波红外和中波红外区域,通道之间相隔较远,而且每个通道都有独立要求的中心波长和带宽,因此选择第二种方法进行膜系设计。

短波和中波红外滤光片常用的基片有 Ge、Si、ZnSe 和蓝宝石,其光学和力学性能如表 1 所示^[13]。

表 1 Ge、Si、ZnSe 和蓝宝石的光学和力学性能
Tab.1 Optical and mechanical properties of Ge, Si, ZnSe and sapphire

	Refractive index	Transparent wavelength/ μm	Young's modulus/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	Linear expansion coefficient/ $^{\circ}\text{C}$
Ge	4.0	2.0~12.5	10.3×10^{10}	5.5×10^{-6}
Si	3.4	1.4~8.0	13.1×10^{10}	4.2×10^{-6}
ZnSe	2.4	0.8~14.0	5.4×10^{10}	7.1×10^{-6}
Sapphire	1.75	0.2~5.0	34.5×10^{10}	6.7×10^{-6}

从表 1 可以看出,在这些材料中,蓝宝石基片在 2.6~4.4 μm 区间有良好的透明性,其线膨胀系数与膜层材料 Ge 相近,适合在低温条件下使用。因为在高温 (250 °C 左右) 条件下镀制的滤光片需要在低温 (100 K) 下工作,温度变化达到 420 °C 之多。

膜层材料选用 Ge 和 SiO₂,它们在工作通道内都有良好的光学透明性。在滤光片基片的前表面设计了 2.60~2.85 μm 单带通滤光膜系,同时设计保持了 4.0~4.5 μm 波段高透过性能;在基片的另一个表面设计 4.10~4.40 μm 的单带通滤光膜系,同时设计保持了 2.5~2.9 μm 波段的高透射性能。通过基片前后表面膜系的组合,叠加形成双带通滤光效果。

1.1 Ge 和 SiO₂ 薄膜的低温折射率

红外双带通滤光片的工作温度为 100 K,为了使滤光片在低温下具有良好的光学性能,需要采用 100 K 温度下膜层的光学参数进行膜系设计。

通过测量 Ge 和 SiO₂ 单层薄膜在常温和低温下的透射光谱,再利用 Cauchy 模型对其拟合,得到 Ge 和 SiO₂ 在常温和低温下的折射率值^[14-15]。Ge 薄膜沉积采用电子束蒸发的方式,电子枪高压为 8 kV,束流为 200 mA。SiO₂ 薄膜沉积采用电阻热蒸发的方式,阻蒸电压为 10 V,电流为 550 A。Ge 和 SiO₂ 单层膜沉积在 ZnSe 基片上,其透明光谱区域为 1~20 μm。Ge 和 SiO₂ 膜层的制备工艺参数如表 2 所示 (1 Å=0.1 nm)。

表 2 Ge 和 SiO₂ 膜层的制备工艺参数

Tab.2 Preparation parameters of Ge and SiO₂ layers

	Substrate temperature/ °C	Evaporation rate/ Å·s ⁻¹	Vacuum pressure/ 10 ⁻⁴ Pa
Ge film	250±5	6±2	6~8
SiO film	250±5	15±3	6~8

薄膜样品的低温光谱测试在 Perkin-Elmer 公司制造的 Spectrum GX 型傅里叶红外光谱仪上进行。测量时将样品台放入低温杜瓦中,样品保持在真空环境中。样品在液氮和加热器的共同作用下实现温度调节,温控精度达到±0.3 K。测量时扣除了背景影响。

图 1 和图 2 为 Ge 薄膜和 SiO₂ 薄膜在 300 K 和 100 K 温度下的透射光谱曲线。

使用 FilmWizard 软件对 Ge 和 SiO₂ 单层膜的透射光谱进行了拟合,得到了它们在 300 K 和 100 K 温度下的折射率光谱曲线,分别如图 3 和图 4 所示。

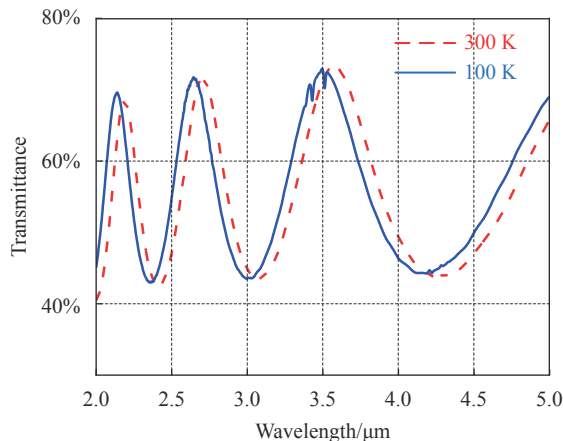


图 1 Ge 薄膜在 300 K 和 100 K 温度下的透射光谱

Fig.1 Transmission spectrum of Ge single layer film at 300 K and 100 K temperature

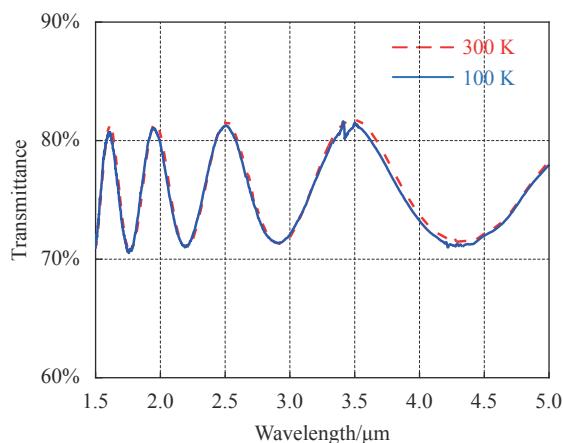


图 2 SiO₂ 薄膜在 300 K 和 100 K 温度下的透射光谱

Fig.2 Transmission spectrum of SiO₂ single layer film at 300 K and 100 K temperature

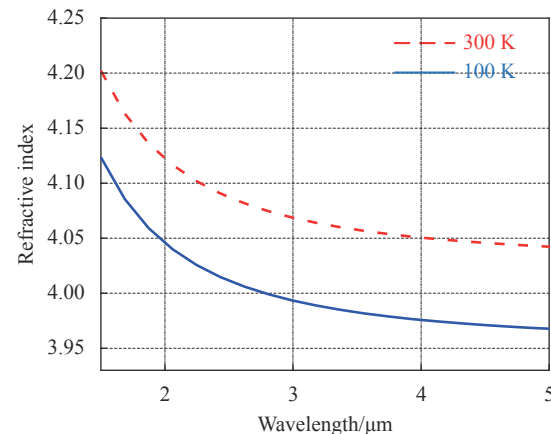


图 3 Ge 薄膜在 300 K 和 100 K 温度下的折射率拟合曲线

Fig.3 Refractive index fitting curves of Ge single layer film at 300 K and 100 K temperature

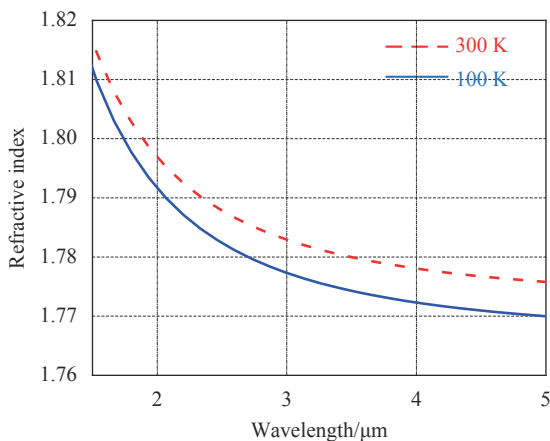


图 4 SiO 薄膜在 300 K 和 100 K 温度下的折射率拟合曲线

Fig.4 Refractive index fitting curves of SiO single layer film at 300 K and 100 K temperature

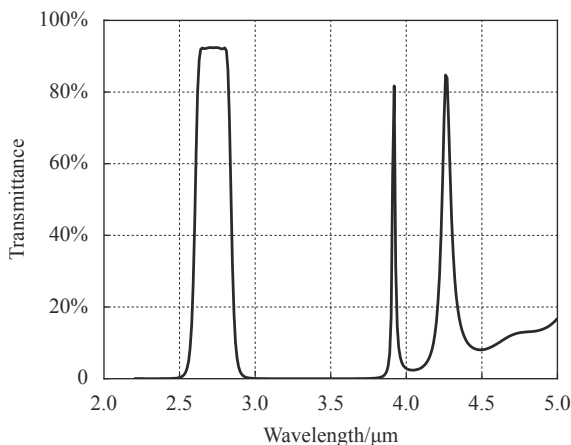


图 5 短波通道滤光膜系的设计光谱

Fig.5 Designed transmittance curve of the short-wavelength band-pass filter

1.2 短波通道滤光膜设计

F-P 膜系的结构为: [反射层 | 间隔层 | 反射层]^k, 主要有以下两种形式^[16]:

$$[\dots LHL|mH|LHL\dots]^k \text{ 或 } [\dots HLH|mL|HLH\dots]^k$$

式中: H 代表高折射率膜层; L 代表低折射率膜层; k 为正整数; m 是不小于 2 的偶数。通带宽度可表示为:

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x-1} n_g}{m\pi n_H^{2x}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m} \text{ (H 作为间隔层)}$$

或

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x} n_g}{m\pi n_H^{2x+1}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m} \text{ (L 作为间隔层)}$$

式中: n_H 和 n_L 分别为高低折射率膜层的折射率; n_g 为基板折射率; x 为反射膜内高折射率膜层数; m 为谐振腔干涉级次, 它与间隔层厚度的关系为: m=2nd/λ₀。

根据滤光片的带宽要求, 将初始膜系确定为:

$$\text{Sub.//LHL 2 HLHL 4 HLHL 4 HLHL 2 HLHL// Air}$$

对应的设计波长为 2.725 μm。经过对通道内的顶部波纹的优化, 单带通滤光片的设计光谱如图 5 所示。

可以看到, 滤光片的带宽为 262 nm, 已经在设计要求的公差范围之内, 但还无法使 4.10~4.40 μm 波段内的光波实现透射。为此, 采用了 Needle 优化算法进行辅助设计: 将单带通滤光片的膜系结构作为初始膜系, 优化目标值同时设置了通带 (2.60~2.85 μm 和 4.05~4.45 μm) 内的高透射和通道外 (2.00~2.50 μm 和 3.00~3.60 μm) 的深截止, 通过自动添加适当数量的膜层和全局优化, 使优化后膜系的透射光谱性能能够达到或接近设计要求。优化后的膜系结构如下:

$$\begin{aligned} &\text{Sub. // 1.190 L 0.200 H 4.531 L 0.689 H 0.819 L} \\ &2.410 \text{ H } 0.434 \text{ L } \dots(8 \text{ layers})\dots 2.279 \text{ H } 0.706 \text{ L } 0.837 \text{ H} \\ &1.017 \text{ L } 2.561 \text{ H } 0.441 \text{ L } 0.377 \text{ H } 0.526 \text{ L // Air} \end{aligned}$$

优化后的透射光谱如图 6 所示。

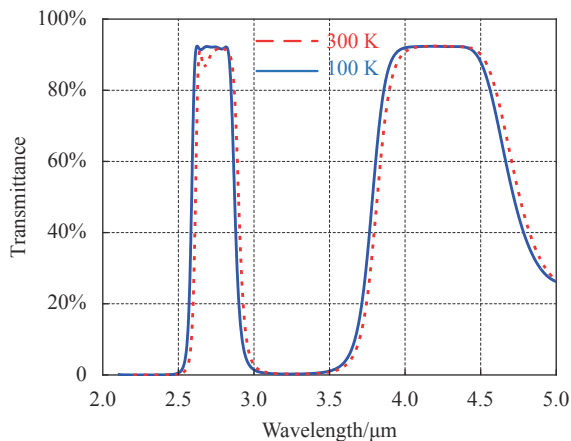


图 6 短波通道滤光膜在 100 K 和 300 K 温度下的设计光谱

Fig.6 Designed transmittance curve of the short-wavelength band-pass filter with transmitted longer band at 100 K and 300 K temperature

从设计光谱可以看到, 短波通道滤光膜系的低温光谱较常温光谱向短波方向移动, 光谱形状发生明显变化。这是由于在膜系设计时, 分别采用了 Ge 和 SiO 膜层在 100 K 和 300 K 温度下的折射率值, 如表 3 所示。

在 100 K 温度下, 膜层的折射率值和光学厚度减小, 滤光片的光谱也向短波方向偏移^[17]。光谱的偏移量可以通过计算和测量得到, 并且具有确定性。在制

表 3 Ge 和 SiO 单层膜在 300 K 和 100 K 温度下的折射率
Tab.3 Refractive index of Ge and SiO single layer film at 300 K and 100 K temperature

	300 K	100 K
Ge film	4.05	3.97
SiO film	1.78	1.77

备滤光片时, 根据实际工作温度向长波方向预设偏移量。

滤光膜系的光谱形状因温度改变也发生了明显的变化。因为滤光片在设计时采用了低温 (100 K) 下的光学参数, 在低温下能够接近理想光谱, 而在常温下通带的光学匹配不够充分。短波滤光膜系采用了非规整膜层进行设计, 各个间隔层的厚度不相等, 在折射率随温度改变的过程中, 膜层光学厚度的减小量是不相等的, 这也增加了通带光谱形状随温度变化的改变量。F-P 膜系的间隔层的光学厚度对其光谱的影响明显, 图 7 为短波通道滤光膜系的间隔层光学厚度分别改变 1%、2% 和 3% 情况下的透射光谱。

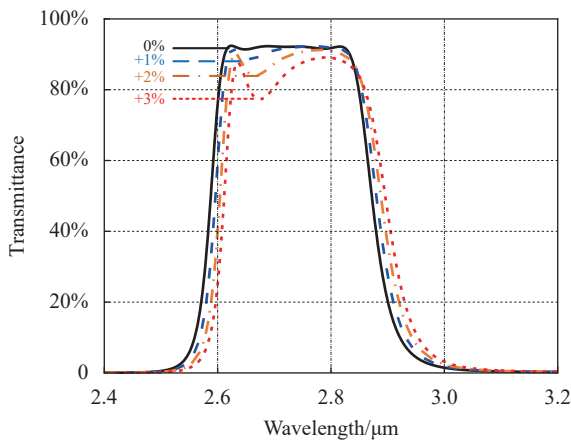


图 7 短波通道滤光膜系在间隔层光学厚度分别增加 1%、2% 和 3% 情况下的透射光谱

Fig.7 Transmission spectrum of the shorter band-pass filter film when the optical thickness of the spacer layers are increased by 1%, 2% and 3%, respectively

表 4 列出了短波通道滤光膜系在 100 K 和 300 K 温度时的平均透射率 T_{ave} 、顶部波纹振幅 ($\Delta = T_{max} - T_{min}$) 和两侧边缘陡度 ($g = |\lambda_{0.8} - \lambda_{0.1}| / \lambda_{0.5}$) 的设计值。可以看到, 短波通道滤光膜系在 100 K 工作温度时比在 300 K 温度时具有更好的光学性能。

由于采用了膜层在实际工作温度 (100 K) 下的折

表 4 短波通道滤光膜系在 100 K 和 300 K 温度下的设计光学性能

Tab.4 Designed optical properties the shorter band-pass filter film at 100 K and 300 K temperature

	100 K	300 K
Average transmittance T_{ave}	92.0%	89.9%
Ripple amplitudes Δ	1.1%	5.5%
Left edge steepness g_L	1.1%	1.2%
Right edge steepness g_R	1.8%	2.0%

射率值进行膜系设计, 低温下具有更好的光谱性能, 也更符合应用需求。

1.3 中波通道滤光膜设计

中波通道 (4.10~4.40 μm) 滤光膜系的设计思想与短波通道的相同, 基于 F-P 单通道膜系结构, 通过优化膜系, 保证 4.10~4.40 μm 通带波形良好的同时, 使得 2.5~2.9 μm 波段也能够高透过。根据滤光片的带宽要求, 初始膜系确定为:

Sub. // HLH 4 L HLH 4 L HLH 4 L HLH 4 L HL // Air

采用 Needle 优化算法通过 TFCalc 软件进行辅助设计, 同时设置了两个优化目标值: 通带内 (2.5~2.9 μm 和 4.10~4.40 μm) 的高透射和通道外 (4.60~5.00 μm 和 3.50~3.90 μm) 的高截止, 再通过自动添加适当数量的膜层和全局优化, 使优化后膜系的光谱性能符合设计要求。优化后的膜系结构如下:

Sub. // 0.062 H 0.406 L 1.306 H 3.773 L 1.175 H 1.108 L ... (8 layers) ... 0.852 H 1.127 L 0.977 H 3.851 L

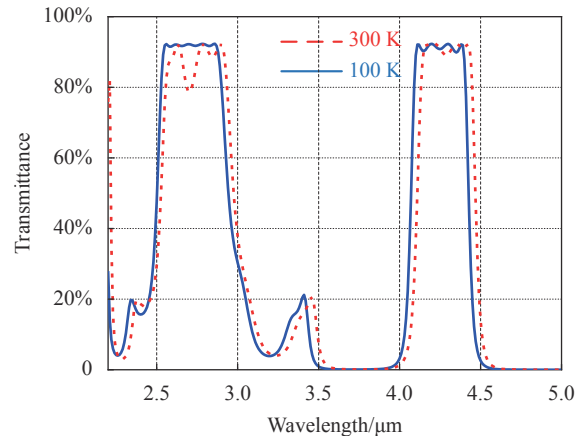


图 8 中波通道滤光膜在 100 K 和 300 K 温度下的设计光谱

Fig.8 Transmittance curves of the designed middle-wavelength band-pass filter with transmitted shorter band at 100 K and 300 K temperature

1.156 H 0.557 L // Air

中波通道滤光膜系的设计光谱如图 8 所示。

分别位于两个表面上的短波通道滤光膜系和中波通道滤光膜系, 叠加组合后综合得到了完整的双带通滤光膜系, 这一完整膜系在 300 K 和 100 K 工作温度下的透射光谱设计曲线如图 9 所示。

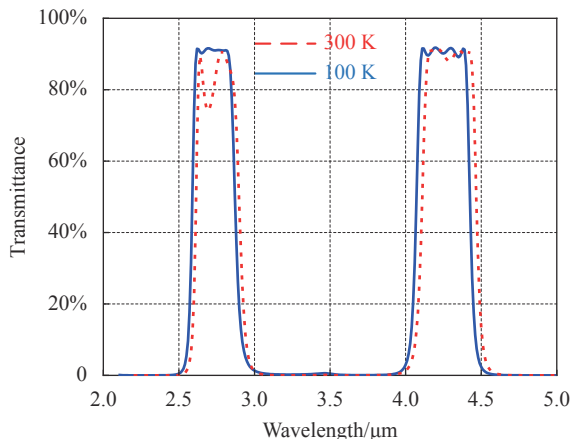


图 9 双带通滤光片在 100 K 和 300 K 温度下的设计光谱

Fig.9 Designed spectrum of the dual band-pass filter at 100 K and 300 K temperature

可以看出, 这样的设计光谱能够达到预期目标, 在两个工作光谱通道处实现了高透射的通带, 在其他

光谱波段实现了良好的截止。

2 薄膜制备

Ge 和 SiO 膜层镀制分别采用电子束和电阻热蒸发的方式, 膜厚控制采用光学监控方式。膜层沉积前用射频离子源对蓝宝石基片表面进行了清洁和激活处理。膜层沉积过程中, 基片温度保持在 $(250 \pm 10)^\circ\text{C}$ 范围内。

优化后膜系中的敏感层比较多, 对膜厚的控制精度要求较高, 采用原位透射测量的方式较好地实现了对膜层厚度的精确监控。监控曲线采用 MCalc 软件进行了预先设计, 结合单波长光学极值百分比 (POEM) 监控策略, 使得监控过程具有自补偿能力。当某一层膜的厚度出现监控误差时, 下一层膜在镀制时能够得到部分补偿, 适合 F-P 滤光膜系的膜厚监控。

图 10 给出了短波滤光膜系的预设监控曲线, 监控波长选用 2 020 nm。图中蓝色和绿色曲线分别表示在 2 020 nm 的监控波长下, Ge 和 SiO 膜层的透射率随光学厚度增加的变化情况。为保证每一层膜厚可以被精确监控, 在监控波长选择时, 尽可能使监控停止位距离下一个极值点保持 $4\% \cdot (T_{\max} - T_{\min})$ 以上距离。中波通道滤光膜系的制备和监控方法与此类似。

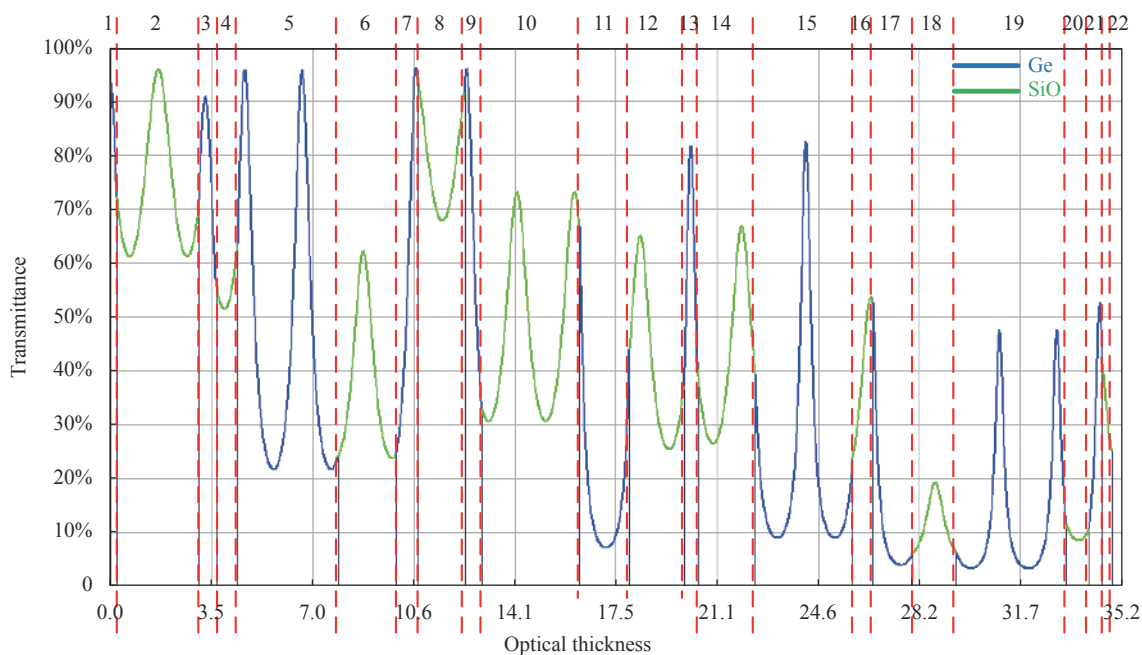


图 10 短波通道滤光膜系 2 020 nm 的单波长 POEM 预设监控曲线

Fig.10 Simulated monitor curve of single-wavelength POEM at 2 020 nm for the shorter band-pass filter film

3 测量与讨论

在 300 K 和 100 K 温度下分别测量了短波通道滤光膜系、中波通道滤光膜系和合成后双带通滤光膜片的透射光谱,测量方法与测量 Ge 和 SiO 单层薄膜透射光谱的方法相同。测量结果分别如图 11、图 12 和图 13 所示。

低温透射光谱测量结果显示,双带通滤光片在工作温度下,两个通道都具有良好的光学性能。其中短波通道(2.60~2.85 μm)和中波通道(4.10~4.40 μm)的平均透射率分别为 91.2% 和 87.7%,短波和中波通道之间(3.00~3.95 μm)的截止区域平均透过率小于 0.1%。两个通道的顶部波纹振幅和边缘陡度的数值如表 5 所示。

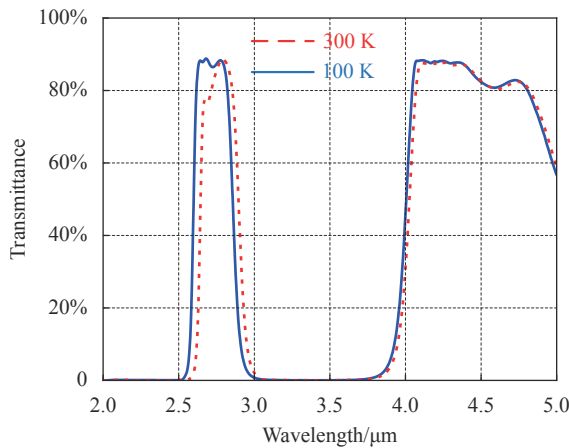


图 11 短波通道滤光膜系在 100 K 和 300 K 温度下的透射光谱测量曲线
Fig.11 Measured transmittance spectra curves of the short-wavelength band-pass filter film at 100 K and 300 K temperature

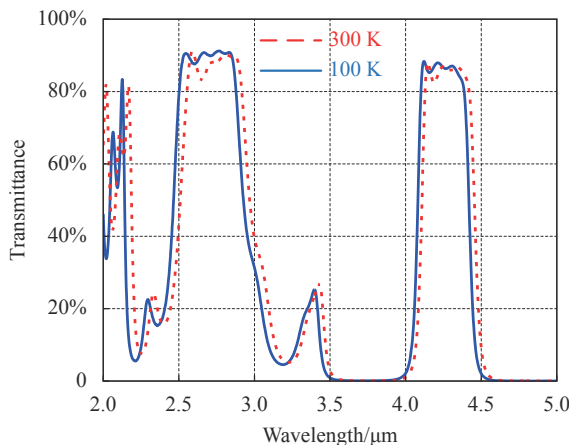


图 12 中波通道滤光膜系在 100 K 和 300 K 温度下的透射光谱测量曲线
Fig.12 Measured transmittance spectra curves of the middle-wavelength band-pass filter film at 100 K and 300 K temperature

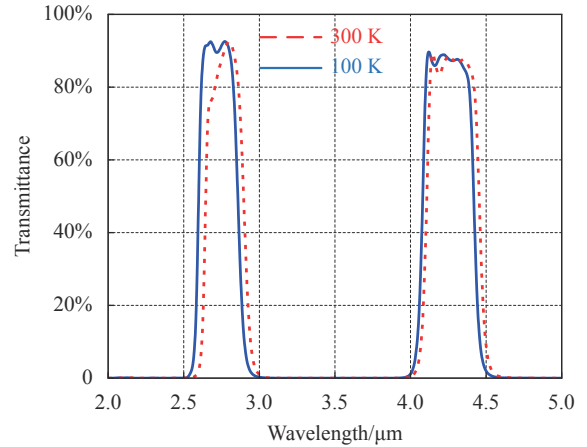


图 13 双带通滤光片在 100 K 和 300 K 温度下的透射光谱测量曲线
Fig.13 Measured spectra transmittance curves of the dual band-pass filter at 100 K and 300 K temperature

伴随着温度降低,双带通滤光片的透射光谱向短波方向移动。表 6 列出了短波和中波通道两侧半功率点的波长位置在降温过程中的偏移量。

从测试结果可以看出,双带通滤光片的透射率和顶部波纹幅度略差于设计效果,主要原因是:薄膜制备过程中存在一定的厚度控制误差,双带通滤光膜系又比较复杂,敏感层较多,各层膜厚误差累积后使得顶部波纹的幅度变大,透过率也有所降低。

图 14 中,利用 OptiLayer 薄膜设计软件对短波通

表 5 短波和中波通道的顶部波纹幅度和边缘陡度

Tab.5 Top ripple amplitudes and edge steepness of the shorter and the longer channel

	Top ripple amplitude	Left edge steepness	Right edge steepness
Short-wavelength channel (2.60-2.85 μm)	2.1%	1.6%	2.3%
Middle-wavelength channel (4.10-4.40 μm)	3.8%	1.3%	1.4%

表 6 300~100 K 降温过程中短波和中波通道的半功率点的偏移量

Tab.6 $T_{0,5P}$ position shift value of the shorter and the longer channels while temperature reduces from 300 K to 100 K

	Left $T_{0,5P}$ position shift value	Right $T_{0,5P}$ position shift value/nm
Short-wavelength channel (2.60-2.85 μm)	-48	-40
Middle-wavelength channel (4.10-4.40 μm)	-29	-36

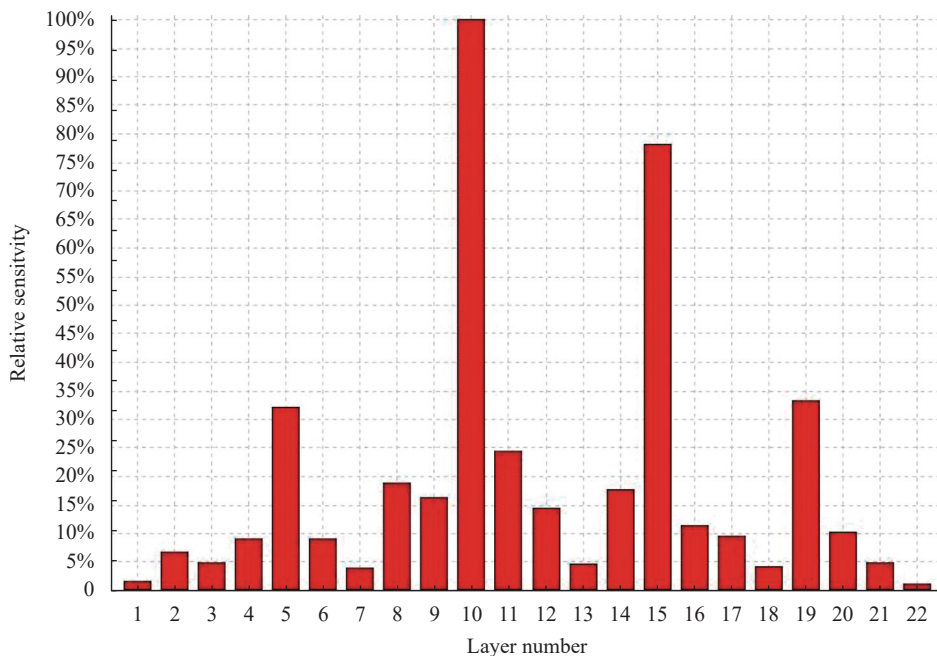


图 14 短波通道滤光膜系中各膜层的灵敏度

Fig.14 Sensitivity of each layer in the shorter band-pass filter

道滤光膜系进行了膜层误差引起光谱变化的灵敏度分析。可以看出,膜系的第 5、10、15 和 19 层的灵敏度较大,这几层都是膜系中的间隔层(谐振腔层)。可见,特别需要对间隔层的光学膜厚进行精确控制。

对短波通道滤光膜系中最敏感的第 5、10、15 和 19 层引入 1%~3% 的随机误差,观察这样的误差对透射率光谱曲线的影响。引入误差后的透射率曲线如图 15

所示。可以看出,引入误差对 4.10~4.40 μm 透射区的影响很小,但对 2.60~2.85 μm 通道的光谱形状有较大影响。超过 1% 的随机误差就会使短波通道的透射性能明显下降。在膜层实际制备过程中,通过原位透射监控方式并结合单波长光学极值百分比 (POEM) 监控策略后,将间隔层的厚度误差控制在 1% 以内,得到了透射性能良好的双带通滤光片。

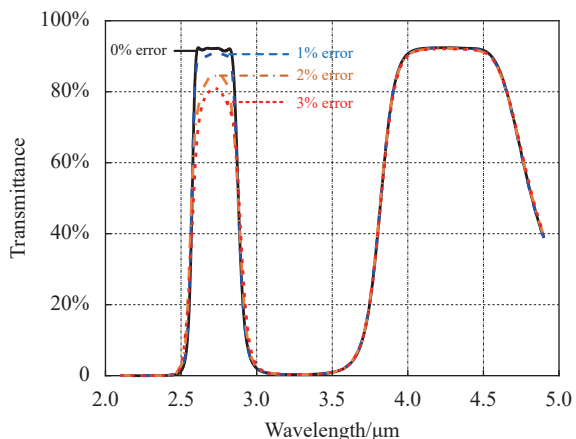


图 15 短波通道滤光膜系的第 5、10、15 和 19 层引入 1%~3% 的随机误差后的透射光谱曲线

Fig.15 Transmission spectrum curves of the shorter band-pass filter film when random errors of 1%~3% introduced into the 5th, 10th, 15th and 19th layers

4 结 论

以蓝宝石 (Al_2O_3) 为基片,用 Ge 和 SiO 作为高低折射率膜层,设计制备了兼有增透带的 Fabre-Perot 结构带通滤光膜系:短波通道滤光膜系和中波通道滤光膜系,它们分别位于基片的两个表面,这两个膜系叠加合成了双带通滤光片。设计时,膜层的光学常数选用了 100 K 低温条件下的测量数值。得到的低温滤光片包含短波通道 (2.60~2.85 μm) 和中波通道 (4.10~4.40 μm), 低温下的波形和透射光谱性能比常温下更好。Ge 和 SiO 膜层分别以电子束和电阻热蒸发方式在高真空环境中完成沉积。测量了 300 K 和 100 K 温度下双带通滤光片的透射光谱。结果显示:由于低温下膜层折射率降低,相当于膜层的光学厚度减少,使得滤光片的透射光谱向短波方向移动,漂移量在

29~48 nm 范围。短波和中波通道的平均透射率分别达到 91.2% 和 87.7%，顶部波纹幅度分别控制在 2.1% 和 3.8% 以内，波长 3.00~3.95 μm 光谱区域内的截止深度达到 0.1%。这样的红外双带通滤光片在低温下工作时能有更好的光谱，有利于更加精确的红外遥感和探测。

参考文献:

- [1] Wu LY, Pei L, Ning T G, et al. Polarization-independent, ultra-narrow band-pass and multi-wavelength tunable filter based on PS-PM-CFBG [J]. *Opt Commun*, 2019, 443: 55-62.
- [2] Du Jianxiang, Zong Xiaoying, Luo Shikui, et al. Plane wave transmitted wavefront simulation and measurement of filter with multi-spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200528. (in Chinese)
- [3] Janfaza M, Mansouri-Birjandi M A, Tavousi A. Proposal for a graphene nanoribbon assisted mid-infrared band-stop/band-pass filter based on Bragg gratings [J]. *Opt Commun*, 2019, 440: 75-82.
- [4] Lv You. Research on technology of middle-infrared based dual-band target's radiation characteristics measurement. [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
- [5] Firmansyah T, Praptodinoyo S, Wiryadinata R, et al. Dual-wideband band pass filter using folded cross-stub stepped impedance resonator [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2017, 59(11): 2929-2934.
- [6] Jeong M Y, Mang J Y. Continuously tunable optical notch filter and band-pass filter systems that cover the visible to near-infrared spectral ranges [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(8): 1962-1966.
- [7] Zhu Xubo, Peng Zhenyu, Cao Xiancun, et al. Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1104001. (in Chinese)
- [8] Chen Youhua, Wang Zhibin. Design and error analysis of infrared dual-channel band pass filter with wide rejection band for detection application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3064-3068. (in Chinese)
- [9] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Debell G W. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(28): 5493-5508.
- [10] Cai Yuan, Zhou Sheng, Liu Dingquan. Design of dual-band-pass optical filter based on combination of Fabry-Perot coatings in mid-infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222004. (in Chinese)
- [11] Chen Xu, Wu Zhiyong, Zhao Xinchao, et al. Development of mid-infrared dual-channel filter [J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(1): 32-39. (in Chinese)
- [12] Zhou Sheng, Wang Kaixuan, Liu Dingquan, et al. Research on infrared dual-color filter with 3.2-3.8 μm and 4.9-5.4 μm bands [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 536-543. (in Chinese)
- [13] Wakaki M, Kudo K, Shibuya T. Physical Properties and Data of Optical Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [14] Azcue J, Villanueva C, Sanchez A, et al. Cryogenic filter wheel design for an infrared instrument [C]//Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXII, Proceedings of SPIE, 2014, 9219: 92190B.
- [15] 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.
- [16] Tang Jinfu, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [17] Hawkins G, Hunneman R. The temperature-dependent spectral properties of filter substrate materials in the far-infrared (6-40 μm) [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, 45(1): 69-79.