

3.2~3.8 μm 和4.9~5.4 μm 红外双色滤光片的研制

周晟 王凯旋 刘定权 胡金超 李耀鹏 王曙光

Research on infrared dual-color filters with 3.2~3.8 μm and 4.9~5.4 μm bands

ZHOU Sheng, WANG Kai-xuan, LIU Ding-quan, HU Jin-chao, LI Yao-peng, WANG Shu-guang

引用本文:

周晟, 王凯旋, 刘定权, 胡金超, 李耀鹏, 王曙光. 3.2~3.8 μm 和4.9~5.4 μm 红外双色滤光片的研制[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 536-543. doi: 10.37188/CO.2020-0206

ZHOU Sheng, WANG Kai-xuan, LIU Ding-quan, HU Jin-chao, LI Yao-peng, WANG Shu-guang. Research on infrared dual-color filters with 3.2~3.8 μm and 4.9~5.4 μm bands[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 536-543. doi: 10.37188/CO.2020-0206

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0206>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双波段芯片集成封装组件的低温光谱量化

Low temperature spectroscopy quantification of integrated dual band chip package

中国光学. 2017, 10(6): 744 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0744>

双色荧光辐射差分超分辨显微系统研究

Dual-color fluorescence emission difference super-resolution microscopy

中国光学. 2018, 11(3): 329 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0329>

高反射光学薄膜激光损伤研究进展

Research progress in laser damage of high reflective optical thin films

中国光学. 2018, 11(6): 931 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0931>

浸没式光刻投影物镜光学薄膜

Optical coatings for projection objective immersion lithography

中国光学. 2018, 11(5): 745 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0745>

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学. 2019, 12(2): 294 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294>

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

3.2~3.8 μm 和 4.9~5.4 μm 红外双色滤光片的研制

周 晟^{1,3}, 王凯旋^{1,2,3}, 刘定权^{1,2,3*}, 胡金超¹, 李耀鹏¹, 王曙光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: 双色滤光片在其任意一个几何位置上, 均能够有效透过两个精确控制的光谱通道, 它可以提升光学探测装置对目标的识别能力。本文选用单晶 Ge 作为基片, Ge 和 ZnSe 分别作为高低折射率膜层材料, 研制了一种包含 3.2~3.8 μm (通道 1) 和 4.9~5.4 μm (通道 2) 两个通道的红外双色滤光片。在高真空中以热蒸发的方式镀制了滤光片的光学膜层, 采用单波长的极值百分比光学监控 (POEM) 方法控制膜层的光学厚度。在 100 K 低温下, 通道 1 的平均透射率为 94.2%, 顶部波纹幅度为 5.7%; 通道 2 的平均透射率为 96.5%, 顶部波纹幅度为 0.6%。在两个通道之间 (4.0~4.7 μm) 的截止区域内, 平均透射率小于 0.16%。该红外双色滤光片具有良好的光学稳定性, 有利于高速运动目标的识别。

关键词: 光学薄膜; 双色滤光片; 红外; 低温光谱

中图分类号: O484

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0206

Research on infrared dual-color filters with 3.2~3.8 μm and 4.9~5.4 μm bands

ZHOU Sheng^{1,3}, WANG Kai-xuan^{1,2,3}, LIU Ding-quan^{1,2,3*}, HU Jin-chao¹, LI Yao-peng¹, WANG Shu-guang¹

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

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

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

* *Corresponding author, E-mail: dqliu@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: The dual-color (dual band-pass) filter is a new type of optical element that includes two precisely controlled spectral channels at any geometric position and can improve the target recognition ability of optical detection devices. Single crystal Ge is used as a substrate, and Ge and ZnSe are used as high (H) and low (L) reflective index thin film materials, respectively. An infrared dual-color filter is designed with two band-pass channels: 3.2~3.8 μm (channel 1) and 4.9~5.4 μm (channel 2). Thin films are fabricated by thermal evaporation in a high vacuum chamber, and the film thickness are monitored using the POEM (Percent of Optical Extreme Monitoring) strategy. At a working temperature of 100 K, the average transmittance of channel 1 was 94.2%, and its top ripple amplitude was 5.7%; the average transmittance of channel 2 was 96.5%, and its top ripple amplitude was 0.6%. In the cut-off range between the two channels (4.0~4.7 μm), the aver-

收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61705248)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61705248)

age transmittance was no more than 0.16%. The infrared dual-color filter has good optical stability, which is conducive to the recognition of high-speed moving targets.

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

1 引言

红外感知技术在光学遥感、物联网、夜间行驶和安防等领域都有良好的现实应用和发展前景^[1-3]。红外滤光片作为常用的光谱获取元件,有高度精确的光谱,易于和感光器件结合,方便应用在各种静止、移动、地面和空间使用的红外探测装置上^[4-5]。实际应用环境中,可见光和红外背景干扰明显增加,加上复杂的光电环境,单波段红外成像系统常常会被干扰辐射误导,出现探测不到目标或者虚警的情况。因此,需要发展红外双色探测技术,利用目标的两个特征光谱、两个光谱的和以及两个光谱的差分等多种形式的信号,综合判断被探测目标,减少辐射干扰带来的影响,提高探测的准确性^[6]。

红外双色滤光片是红外双色探测技术的核心元件^[7],是一种包含两个光谱通道的多层膜干涉滤光片,可以在任意几何点上形成两个光谱通道,并且可有效拦截工作光谱以外的光学辐射能量。它在成像时没有位置差和时间差,对高速运动目标成像具有独特优势。双色滤光片还是一种新型的无源光学元件,不需要额外的机电装置。在对于具有两种特定特征波长的探测应用中,对提高系统的集成度有非常大的优势。与滤光片阵列排布的双光谱器件相比,双色滤光片制备工艺更加单一,不会产生通道间的光线串扰问题,性能也更加稳定可靠。

在红外遥感领域,采用双色探测技术的公开报导比较少,最典型的是 20 世纪 90 年代,美国国家海洋与大气管理局在对 GOES-Q 卫星进行改进时,提出了一种用于中、远红外区的双色薄膜器件的方案,但没有公开显示的数据。Brian T.Sullivan 等人用 35 层的非规整膜系完成了 420~580 nm 范围内的双带通滤光片的研制^[8]。王懿喆提出了一种利用缓冲层和组合膜系设计双色滤光片的设计方法^[9],其设计较为复杂,需要进行等效层的替换,并且不同膜系间需要加入缓冲层匹配,

入、出射介质也需要进行匹配,工艺实现难度较大。蔡渊等人基于组合 Fabry-Perot 膜系设计中波红外双色滤光片^[10],但此方法设计出的双色滤光片的两个通道存在一个最近距离,该最近距离的大小受通道带宽的影响。

本文介绍了一种 3.2~3.8 μm 和 4.9~5.4 μm 波段的低温双色滤光片,其膜系基于负滤光膜系和长、短波截止膜系组合而成。膜层镀制时采用单波长的极值百分比光学监控 (POEM) 方法进行膜厚控制,从而保证了膜层控制精度^[11]。此外,还研究了双色滤光片在低温条件下的光谱变化情况。

2 膜系设计

双色滤光片的膜系设计通常采用两种方法来实现。第一种是以 Fabry-Perot (F-P) 膜系为基础结构的膜系设计^[10],这种方法是由分布在基片两侧的两个单 F-P 带通膜系组合而形成双色通道,其中一侧的膜系需要对另一侧的 F-P 通带进行增透,如图 1 所示。对于这种设计方法,由于两个单带通膜系彼此相互独立,故其中心波长位置和带宽可以单独确定,且两个通带的相对位置可以连续调整。但是,对于两个通道相隔较近,或者带宽较宽的情况,很难设计到令人满意的设计结果。

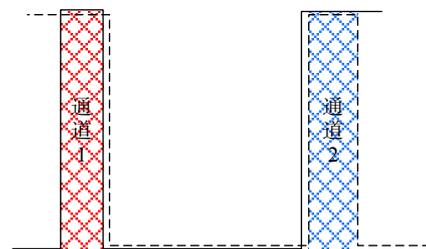


图 1 两个单 F-P 带通膜系组合而成的双色滤光片

Fig. 1 Dual-color filter composed of two single F-P band-pass filters

第二种是基于负滤光膜系和宽带通膜系组合而成的双色滤光片膜系设计^[7, 12]。基片一侧的负滤光膜系负责控制通带中间的位置和两个通道之间的带外抑制;基片另一侧的宽带通膜系负责控制通带两端的位置和通道两侧的带外抑制,如

图 2 所示。这种设计方法需要控制的参数较多,光谱定位难度较大,但对于两个通道相隔较近,带宽较宽的情况,具有良好的设计结果。

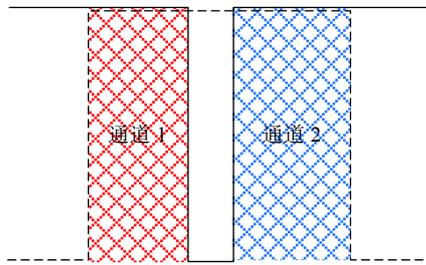


图 2 负滤光膜系和宽带通膜系组合而成的双色滤光片
Fig. 2 Dual-color filter composed of a notch filter and a wide band-pass filter

本文设计的红外双色滤光片包含 $3.2\sim 3.8\ \mu\text{m}$ (通道 1) 和 $4.9\sim 5.4\ \mu\text{m}$ (通道 2) 两个通道,两个通道间隔较窄,并且通道 1 的通带较宽,适合第二种设计方法。由于滤光片的整体通带 ($3.4\sim 5.3\ \mu\text{m}$) 很宽,宽带通膜系的顶部波纹振幅很难压缩,故在设计时将短波截止(长波通)膜系融合到一侧的负滤光膜系中,另一侧的长波截止(短波通)膜系也仅优化通带范围内的顶部波纹。

2.1 负滤光膜系设计

基片材料和膜层材料选用在中波红外波段的高透明材料。基片选用单晶 Ge, 折射率约为 4.0; 高折射率膜层材料选用 Ge, 折射率约为 4.1; 低折射率薄膜材料选用 ZnSe, 折射率约为 2.4。负滤光膜系的基本结构是 $(0.5H\ \beta L\ 0.5H)^n L$, 其中, H 表示光学厚度为 $1/4$ 波长的 Ge 膜层, L 表示光学厚度为 $1/4$ 波长的 ZnSe 膜层。通过改变系数 β 可以调整两个通带之间的间距,也就是负滤光片的光谱宽度。通过改变周期次数 n 可以调整负滤光膜系的光谱陡度。

本文中,根据通道间距和陡度需求,设定 $\beta=3, n=12$, 则负滤光膜系的初始结构为 $(0.5H\ 3L\ 0.5H)^{12} L$, 给定目标值,同时设置通带内 ($3.2\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.9\sim 5.4\ \mu\text{m}$) 高透、通道间 ($4.0\sim 4.7\ \mu\text{m}$) 截止和短波侧 ($<3.0\ \mu\text{m}$) 截止,再进行全局和插值优化,得到如下膜系结构:

Sub | 0.100H 6.197L 1.216H 3.712L 0.671H
1.518L 1.669H 2.775L 2.304H 1.588L 1.570H
3.781L 0.181H 2.198L 1.788H 1.813L 2.392H
2.699L 1.759H 1.073L 0.968H 5.256L | Air。

其中,设计波长 $\lambda_1=2200\ \text{nm}$, Sub 表示基片(单晶 Ge), Air 表示入射介质(空气),优化后的负滤光膜设计曲线如图 3 所示,没有考虑减少 Ge 基片的背面反射。

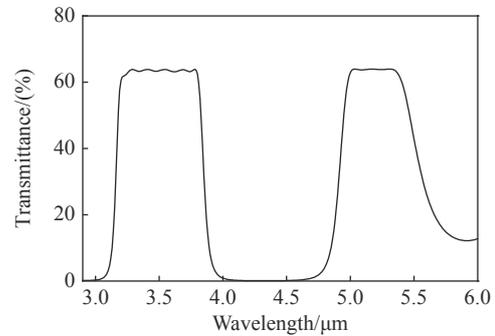


图 3 设计的含有短波截止膜系的负滤光膜系透射曲线
Fig. 3 Transmittance curve of notch filter films with long-pass filter

在负滤光膜系中,各层薄膜的厚度误差对光谱的影响程度不同。膜层沉积过程中产生的误差并不会因为膜层的厚薄有很大的区别,所以采用光学厚度的绝对误差评估膜厚对光谱的影响较为合理。为了使不同膜层的厚度误差对光谱的影响程度对比更为明显,采用 $0.1\ \text{qw}$ ($1/4$ 波长) 的光学厚度误差对负滤光膜系两侧通带的顶部波纹振幅进行了误差分析,如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

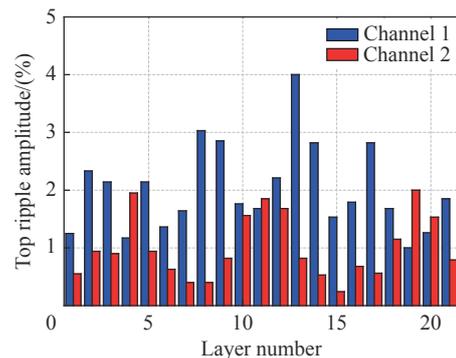


图 4 负滤光膜系各层薄膜在 $0.1\ \text{qw}$ ($1/4$ 波长) 光学厚度误差时顶部波纹振幅的变化

Fig. 4 The top ripple amplitude variation of each layer of a notch filter when the optical thickness error is $0.1\ \text{qw}$ ($1/4$ wavelength)

图 4 中横坐标对应第 N 层膜,纵坐标对应第 N 层膜的膜厚误差所造成的顶部波纹振幅的变化量。从图 4 中可以看到,第 13 层的膜厚误差对通道 1 的光谱影响最大,第 19 层的厚膜误差对通

道 2 的影响最大。相对而言, 通道 1 的灵敏度更高一些, 这是由于通道 1 的带宽更宽, 并且在负滤光膜系中融合了短波截止膜系的缘故。

2.2 长波截止膜系设计

长波截止膜系是一种常见的光学膜系结构, 可以采用经典的设计方法^[13]。设置初始膜系结构为 (0.5L H 0.5L)¹⁰, 高折射率膜层 H 选用 Ge 材料, 低折射率膜层选用 ZnSe 材料。

为了得到更为平坦的透射带, 该截止膜系仅优化通带范围内的顶部波纹, 优化后的膜系结构如下:

Sub | 0.178L 3.288H 2.978L 2.891H 2.377L 2.364H 2.297L 2.649H 2.916L 2.502H 1.908L 2.104H 2.144L 3.484H 2.558L 1.621H 1.876L 2.533H 3.608L 1.053H 1.490L | Air。

设计波长 $\lambda_2=2650$ nm, 优化后的长波截止膜系的透射光谱曲线如图 5 所示, 此设计没有考虑减少 Ge 基片背面的反射。

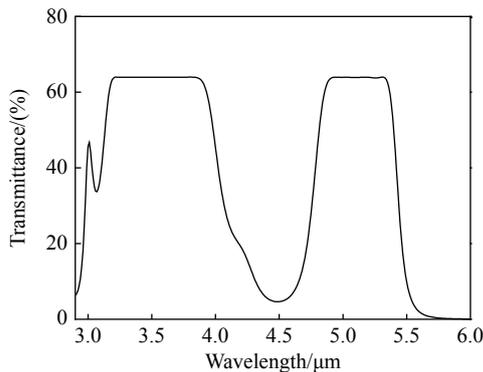


图 5 设计的长波截止膜系透射光谱曲线
Fig. 5 Transmittance curve of the designed short-pass filter

负滤光膜系和长波截止膜系组合后得到双色滤光片, 其透射光谱曲线如图 6 所示。

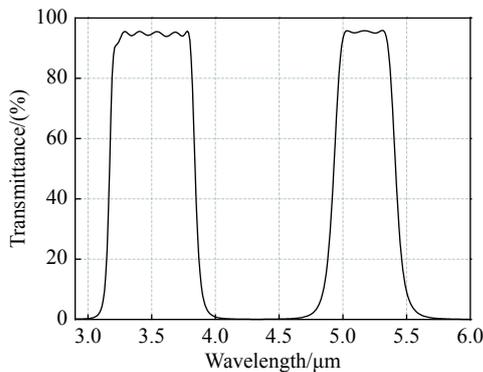


图 6 设计的双色滤光片透射光谱曲线
Fig. 6 Transmittance curve of the designed dual-color filter

3 滤光薄膜制备

薄膜制备采用蒸发沉积的方式在高真空条件下实现。镀膜设备是德国布勒莱宝光学 (Buhler Leybold Optics) 公司生产的 ARES1110 型镀膜机, 光控型号为 OMS5000, 波长控制范围为 400~2400 nm。Ge 薄膜沉积采用电子束蒸发沉积技术, ZnSe 薄膜采用电阻热蒸发沉积技术。在膜层生长过程中, 基片沉积温度保持在 (150±10) °C 内。为提高膜层与基板的结合力, 镀膜前用离子源对 Ge 基片表面进行离子束轰击, 以清除表面的残余污染, 激活表面原子活性。薄膜沉积生长的工艺参数见表 1。

表 1 Ge 和 ZnSe 薄膜沉积工艺参数

Tab. 1 Deposition parameters of the Ge and ZnSe films

	deposition rate/ (nm·s ⁻¹)	chamber pressure/ (10 ⁻⁴ Pa)	rotation rate/ (rad·min ⁻¹)
Ge layers	0.6	5~8	30
ZnSe layers	2	5~8	30

负滤光膜系和长波截止膜系的结构都比较复杂, 采取了全非规整层的设计, 敏感膜层较多。镀膜过程中采用直接光学监控方式, 原位测量镀膜过程中测试片, 即产品的透射率。使用德国布勒莱宝公司编写的 MCalc 软件设计膜厚监控曲线, 采用单波长的光学极值百分比监控策略 (POEM) 控制膜层的厚度。

负滤光膜系的监控波长选用 2 110 nm, 监控设计曲线如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。

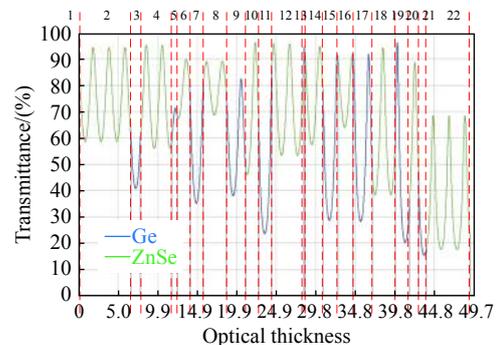


图 7 负滤光膜系的单波长 (2 110 nm) 直接监控设计曲线
Fig. 7 Designed curve of 2 110 nm single-wavelength direct monitoring of the notch filter

图 7 中蓝色曲线和绿色曲线分别表示 Ge 膜层和 ZnSe 膜层在 2 110 nm 监控波长下透过率随光学膜厚的变化情况。在监控波长选择时,需要确保任一膜层的监控停止位不能距离下一个极值点太近,如保持 $(T_{\max} - T_{\min}) \times 4\%$ 以上距离,这样可以较为精确地监控每一层薄膜的光学厚度。

与负滤光膜系的情况类似,长波截止膜系的监控波长选用 2 026 nm, 监控设计曲线如图 8 (彩图见期刊电子版)所示。

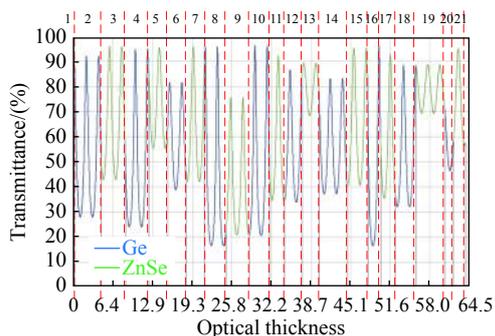


图 8 长波截止膜的单波长(2 026 nm)直接监控设计曲线
Fig. 8 Designed curve of 2 026 nm single-wavelength direct monitoring of the short-pass filter

4 测量与讨论

4.1 光谱测量

使用美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Spectrum GX 型傅立叶红外光谱仪分别对单面镀制的负滤光膜、长波截止膜和完整的双色滤光片进行透射光谱测量,测量结果如图 9、图 10 所示。

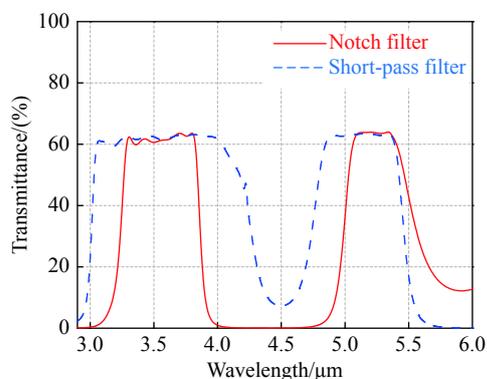


图 9 Ge 片上单面镀制的负滤光膜和长波截止膜的测量光谱

Fig. 9 Measured spectra of the notch filter and the short-pass filter coatings both on one side of Ge substrate

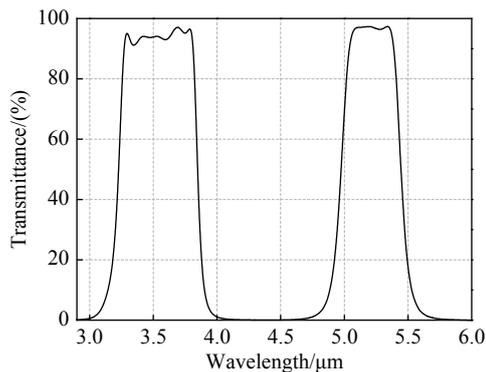


图 10 双色滤光片测量光谱

Fig. 10 Measured spectrum of the dual-color filter

从测试结果可以看到,负滤光膜短波透射区的顶部波纹略差于设计效果。这是由于短波侧的通带范围较宽,膜系中的敏感膜层较多,故每一层膜厚的轻微误差都会导致顶部波纹振幅变大,这是各层综合误差累加后产生的结果,在整个膜系的研制过程中难以避免^[14]。

负滤光膜的长波透射区和长波截止膜都达到了设计效果,这得益于采用了直接光学监控方法和 POEM 监控方式。间接监控等方式由于镀膜过程中膜料减少,监控片与实际滤光片样品上膜厚的 Tooling 值(相对比例值)将发生改变^[15],这个动态改变会产生监控误差,而直接光学监控方法可以直接测量滤光片膜层光学厚度的变化。单波长 POEM 监控方式有两个好处:一是避免了单色仪切换波长造成的监控误差;二是在极值点附近,监控曲线的变化速率缓慢,控制误差较大,而非极值点位置监控曲线的变化速率较快,通过计算机辅助计算和监控策略设计,可以得到较为精确的膜厚控制效果。

4.2 低温光谱特性

本文中的双色滤光片的工作温度为 100 K,故需要测量滤光片的低温光谱。测量时将样品安装在样品台上并放置在透光的低温杜瓦中,杜瓦放置于光谱仪的光路中,光线垂直透过样品,样品台放置在真空环境中,并将温度控制在 (100 ± 0.5) K 范围。测量得到的双色滤光片常温和低温透射光谱,见图 11。

从测试结果可以看到,双色滤光片在 100 K 低温条件下,通道 1 (3.2~3.8 μm) 的平均透射率为 94.2%,通道 2 (4.9~5.4 μm) 的平均透射率为 96.5%。在通道间 (4.0~4.7 μm) 的截止区,平均透

过率控制在 0.16% 以内。两个通带的边缘陡度 $g = |\lambda_{0.8} - \lambda_{0.1}| / \lambda_{0.5}$ 和顶部波纹振幅 $\Delta = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ 的数值见表 2。

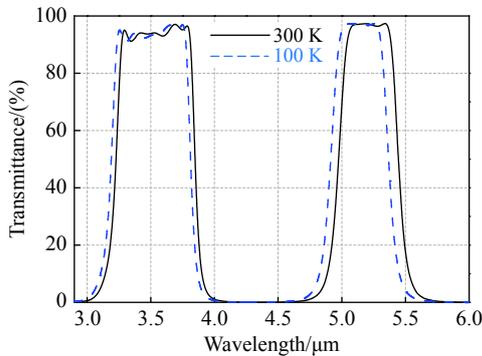


图 11 双色滤光片在 300 K 和 100 K 温度下的透射光谱
Fig. 11 Spectra of dual-color filter at 300 K and 100 K temperatures

表 2 两个通带的边缘陡度和顶部波纹振幅

Tab. 2 Edge steepness and top ripple amplitudes of the two channels

	Edge steepness of the left side	Edge steepness of the right side	Top ripple amplitude
Channel 1 (3.2~3.8 μm)	3.5%	2.1%	5.7%
Channel 2 (4.9~5.4 μm)	2.7%	2.2%	0.6%

随着温度的降低, 双色滤光片的透射光谱曲线向短波方向移动。两个通带半功率点位置的变化情况如表 3 所示。

表 3 温度由 300 K 变化至 100 K 时两个通带半峰波长位置的移动情况

Tab. 3 Half-peak wavelength point shift of the two channels when the temperature changes from 300 K to 100 K (nm)

	Left side $T_{0.5P}$ wavelength point shift	Right side $T_{0.5P}$ wavelength point shift
Channel 1 (3.2~3.8 μm)	-43	-49
Channel 2 (4.9~5.4 μm)	-67	-73

滤光片的低温光谱较常温光谱向短波方向移动, 光谱形状未发生明显变化。低温光谱向短波方向移动的因素包括膜层的折射率、基片和膜层的线膨胀系数、材料的泊松比、膜层的聚集密度等^[16-18]。其中, 线膨胀系数在低温下会使膜层的物理厚度 d 减小, 从而降低膜层的光学厚度 nd , 使光谱向短波方向移动。实际上, 物理厚度 d 的

变化量非常小, 与折射率引起的变化量相比为非主要因素^[19]。光谱向短波方向移动的主要原因是 Ge 膜层和 ZnSe 膜层的折射率 n 随温度 T 发生改变。图 12 和图 13 分别是蓝宝石基片上单层 Ge 薄膜和单层 ZnSe 薄膜的常温和低温透射光谱。

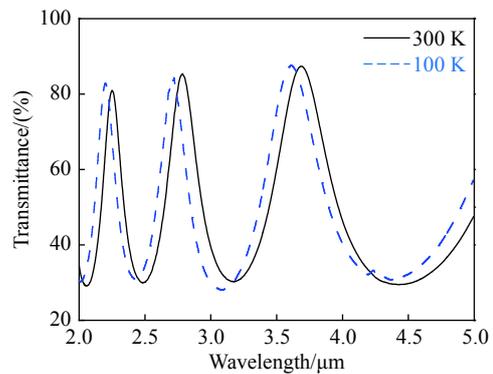


图 12 300 K 和 100 K 温度下, Ge 单层膜的透射光谱
Fig. 12 Transmittance spectra of the Ge single film on Al_2O_3 at 300 K and 100 K temperatures

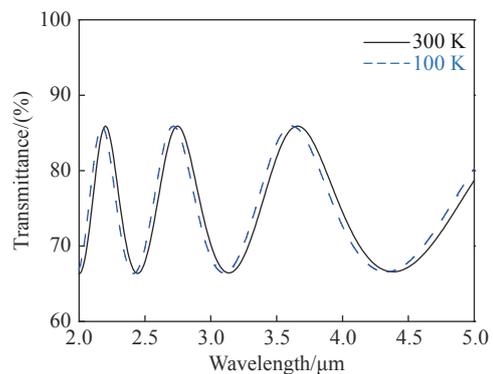


图 13 300 K 和 100 K 温度下, ZnSe 单层膜的透射光谱
Fig. 13 Transmittance spectra of ZnSe single film on Al_2O_3 at 300 K and 100 K temperatures

从图 12 和图 13 可以看出, Ge 膜层和 ZnSe 膜层的光学厚度 nd 值在低温下变小。由于物理厚度 d 的变化量很小, 可以忽略不计, 因此, Ge 膜层和 ZnSe 膜层的折射率 n 会随温度降低而减小。使用美国 SCI 公司商用的 FilmWizard 软件对材料的光学常数进行拟合。拟合时采用 Cauchy 模型, 通过调整变量, 使拟合曲线无限接近透射率测量曲线。图 14 和图 15 分别给出了 Ge 和 ZnSe 单层膜在 300 K 和 100 K 温度下的折射率色散曲线。由于这种变化具有确定性, 在膜系设计和滤光片制备时, 可以根据实际需要提前向长波方向预置漂移量。

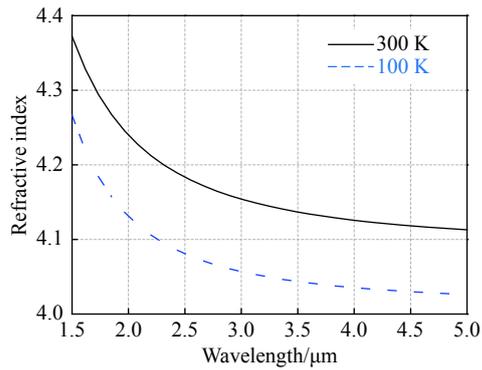


图 14 300 K 和 100 K 温度下, Ge 单层膜的折射率色散曲线
Fig. 14 Refractive index dispersion curves of the Ge single film on Al_2O_3 at 300 K and 100 K temperatures

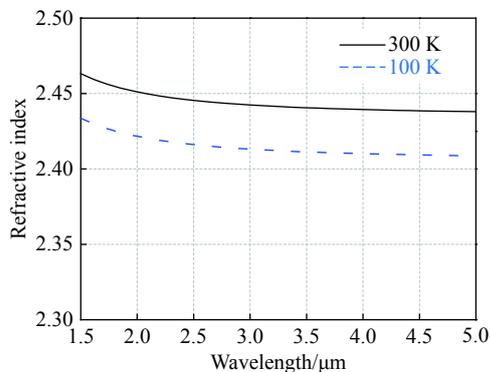


图 15 300 K 和 100 K 温度下, ZnSe 单层膜的折射率色散曲线
Fig. 15 Refractive index dispersion curves of ZnSe single film on Al_2O_3 at 300 K and 100 K temperatures

5 结 论

通过对双色滤光片两种设计方法的分析,结合红外双色滤光片的光谱特性,选用 Ge 和 ZnSe 分别作为高低折射率膜层,在 Ge 基片的两面分别设计了负滤光膜系和长波截止膜系,组合形成了包含 3.2~3.8 μm (通道 1)和 4.9~5.4 μm (通道 2)两个通道的双色滤光片。采用直接光学监控法结合单波长的光学极值百分比监控方式(POEM)控制膜层厚度。以电子束和电阻热蒸发的方式,分别完成了 Ge 和 ZnSe 多层膜制备。在 300 K 和 100 K 温度下分别测量了双色滤光片的透射光谱。测试结果显示,在低温情况下双色滤光片的光谱向短波方向移动,产生漂移的主要原因是 Ge 膜层和 ZnSe 膜层的折射率在低温下变小。双色滤光片通道 1 的平均透射率为 94.2%,顶部波纹振幅为 5.7%,左右两侧边缘陡度分别为 3.5%和 2.1%;通道 2 的平均透射率为 96.5%,顶部波纹振幅为 0.6%,左右两侧边缘陡度分别为 2.6%和 2.2%。在两个通道之间(4.0~4.7 μm)的截止区域内,平均透射率小于 0.16%。该红外双色滤光片具有良好的光学稳定性,有利于高速运动目标的识别。

参考文献:

- [1] LI P, CAI Q, ZHANG J G, *et al.*. Observation of flat chaos generation using an optical feedback multi-mode laser with a band-pass filter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17859-17867.
- [2] 李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1410-1416.
LI H G, YANG H R, XUE ZH L, *et al.*. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1410-1416. (in Chinese)
- [3] INOUE Y, HAMADA T, HASEGAWA M, *et al.*. Two-layer anti-reflection coating with mullite and polyimide foam for large-diameter cryogenic infrared filters[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): D22-D28.
- [4] 乔铁英, 蔡立华, 李宁, 等. 基于红外辐射特性系统实现对面目标测量[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 804-811.
QIAO T Y, CAI L H, LI N, *et al.*. Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 804-811. (in Chinese)
- [5] NOULKOW N, TAUBERT R D, MEINDL P, *et al.*. Infrared filter radiometers for thermodynamic temperature determination below 660 °C[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2009, 30(1): 131-143.
- [6] 朱旭波, 彭震宇, 曹先存, 等. InAs/GaSb 二类超晶格中/短波双色红外焦平面探测器[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1104001.
ZHU X B, PENG ZH Y, CAO X C, *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)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WANG Y Z, LIU D Q, ZHANG F SH. Design and fabrication of bi-color multilayer filters for mid- and far- infrared application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5640: 42-48.
- [10] 蔡渊, 周晟, 刘定权. 基于组合Fabry-Perot膜系的中波红外双色滤光片设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0222004.
CAI Y, ZHOU SH, LIU D Q. 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] WILLEY R R. Simulation comparisons of monitoring strategies in narrow bandpass filters and antireflection coatings[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): A27-A34.
- [12] 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]. *Optics Communications*, 2019, 440: 75-82.
- [13] 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.
- [14] NOULKOW N, TAUBERT RD, MEINDL P, *et al.*. High-accuracy thermodynamic temperature measurements with near infrared filter radiometers[C]. *Proceedings of the 10th International Conference on Infrared Sensors & Systems, Nurnberg*, 2008: 219-224.
- [15] 申振峰. 特定折射率材料及光学薄膜制备[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 900-905.
SHEN ZH F. Preparation of specific refractive index material and optical thin films[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 900-905. (in Chinese)
- [16] LEMKE D, BÖHM A, DE BONIS F, *et al.*. Cryogenic filter- and spectrometer wheels for the Mid Infrared Instrument (MIRI) of the James Webb Space Telescope (JWST)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 627324.
- [17] INOUE Y, MATSUMURA T, HAZUMI M, *et al.*. Cryogenic infrared filter made of alumina for use at millimeter wavelength[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(9): 1727-1733.
- [18] HOU H G, HUSSAIN S, SHAO H CH, *et al.*. Experimental insights on factors influencing sensitivity of thin film narrow band-pass filters[J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2019, 14(11): 1548-1554.
- [19] 白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 576-580.
BAI SH Y, GU P F, LIU X, *et al.*. Optical stability of thin film filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 576-580. (in Chinese)

作者简介:



周 晟(1988—), 男, 江苏无锡人, 副研究员, 硕士, 2009年于上海理工大学光电信息工程系获得学士学位, 2012年于上海理工大学光学工程系获得硕士学位, 主要从事光学薄膜材料和器件的研究。E-mail: zhousheng@sitp.ac.cn



刘定权(1964—), 男, 陕西固城人, 博士, 研究员, 1986年于西安交通大学电子工程系获得学士学位, 1989年于中国空间技术研究院获得理学硕士学位, 2009年于中国科学院研究生院获得工学博士学位。主要从事光学薄膜材料和器件的研究。E-mail: dqliu@mail.sitp.ac.cn