

文章编号:1001-5078(2017)06-0740-05

· 红外材料与器件 ·

## 中波红外双通道带通滤光片的研制

王松林,米高园,张建付,杨崇民,刘青龙,王颖辉,韩俊  
(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

**摘要:**采用在单晶锗基底的两面分别设计中波红外带通滤光膜和中波红外负滤光膜的方法,设计了一种光谱性能优良的中波红外双通道带通滤光片。以适当的工艺技术完成了膜层的制备,并测试了实验样片的红外透射率光谱。结果显示,制备的中波红外双通道带通滤光片的通带透过率以及截止带截止深度均良好。由实验结果分析可知,镀膜材料蒸发角的变化和各层膜厚误差的累积,是导致实验片的测试光谱在截止带内出现两个较强的次峰,以及中间截止带略微偏移的主要原因。

**关键词:**双通道带通滤光片;中波红外;截止带;透过率

**中图分类号:**TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.06.017

## Study and preparation of mid-infrared dual channel band-pass filter

WANG Song-lin, MI Gao-yuan, ZHANG Jian-fu, YANG Chong-min,  
LIU Qing-long, WANG Ying-hui, HAN Jun  
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A mid-wave infrared dual channel band-pass filter with good spectral property was designed by coating a mid-infrared band-pass filter film on Ge substrate one side and a mid-infrared negative filter film on the other side. Films were deposited by different processes, and the infrared transmittance of the filter was tested by infrared spectrometer. The results show that band-pass transmittance and the cut-off depth of rejection zone are both good. The change of evaporation angles and accumulation of layer thickness errors are main causes that there are two stronger second peaks in rejection zone and the middle of the rejection zone slightly shifts.

**Key words:** dual channel band-pass filters; mid-wave infrared; rejection zone; transmittance

### 1 引言

光学薄膜滤光器件已广泛应用于光学仪器、光纤通信、光学遥感、航空航天、气象、遥感、国防等领域<sup>[1-3]</sup>。在机载、舰载、弹载、车载等各种作战武器平台的红外探测装置上<sup>[4]</sup>,为了提高红外探测的信噪比,常常使用红外带通滤光膜,以提高红外探测器件识别目标的能力。在一些特殊的红外探测器设计

中,为了简化整机光学系统结构、减轻整机载荷,需要用到一种特殊的滤光片,多通道带通滤光片就是其中一种。多通道带通滤光片是具有两个或两个以上的通带,与较宽的截止带组合,形成同时可传输多个信号的滤光器件。相比于一般的单带通滤光片,多通道滤光片可以传输更多的信息量<sup>[1]</sup>。本文设计了一种可用于中波红外的双带通滤光膜,采用电

子束蒸发的方式制备出光学性能良好的滤光膜。

## 2 膜系设计

### 2.1 材料选择

考虑到宽带通滤光片的膜层层数较多,所以选用了折射率较高的锗作为高折射率材料,以降低膜系的层数和膜系的总厚度,并选用与之应力匹配极为优良的硫化锌作为低折射率材料。在红外薄膜材料中,锗和硫化锌材料属于强度相对较高,吸收相对较低的材料。

### 2.2 双通道带通滤光片结构分解

对于中波红外波段的双通道带通滤光片,若采用一般的膜系设计与优化方法,势必导致设计的膜层层数过多,并且膜层厚度很厚,将会给薄膜制备工艺带来很大的困难。为此,可以考虑将双通道带通滤光膜分解为两面不同的膜系结构,正反面的膜系进行组合能够获得所需的光谱指标。

这里采用的一种分解方法是,在单晶锗(Ge)基底(折射率约4.1)的一面镀制带通滤光膜;另一面镀制负滤光片。负滤光片是指从一段光谱中除去某一波带的滤光片,表现在光谱性能上,即是某一光谱范围高反射、其余波段范围高透射的滤光膜<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3 膜系设计

对于中波红外带通滤光膜,可以参考文献[4]中的设计方法,以一个长波通滤光膜和一个短波通滤光膜进行组合。长波通膜系初始结构设为 Sub/(0.5HL0.5H)<sup>12</sup>,中心波长为 $\lambda_0 = 2800$  nm,入射角度为 $0^\circ$ ;短波通膜系初始结构设为 Sub/(0.5LH0.5L)<sup>8</sup>,中心波长为 $\lambda_0 = 5800$  nm,入射角度为 $0^\circ$ 。其中,H表示膜层厚度为 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 的锗(Ge)

薄膜材料(折射率约4.12),L表示膜层厚度为 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 的硫化锌(ZnS)薄膜材料(折射率约2.24),Sub表示单晶Ge基底,指数表示膜堆周期数。

对长波通膜系的初始结构进行全局优化、针式插值优化,得到如下膜系结构:

Sub /1.0044H 0.7654L 0.7076H 1.0482L  
1.2407H 0.9931L 0.9253H 0.9732L 1.0741H  
1.1876L 1.0436H 0.9509L 0.9308H 0.9461L  
0.9441H 0.3972L 0.5910H 0.9596L 0.9140H  
0.8021L 0.8276H 0.9716L 0.3482H 0.5684L  
1.1084H 1.6757L/Air

其中,中心波长为 $\lambda_0 = 2800$  nm,Air为入射介质(空气)。设计的长波通滤光膜理论透过率光谱如图1

所示。

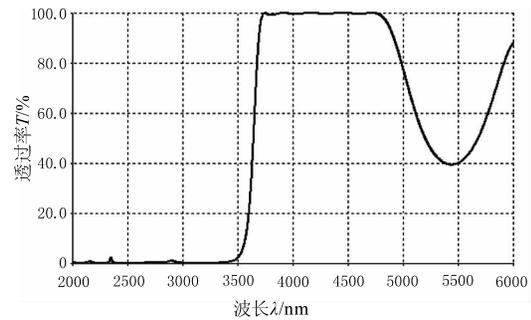


图1 长波通滤光膜透过率光谱

Fig. 1 Long-wave-pass spectral transmittance curve

对短波通膜系的初始结构进行全局优化、针式插值优化,得到如下膜系结构:

Sub/0.8123H 1.2111L 1.0083H 1.0198L  
1.0658H 0.9688L 0.9837H 1.0549L 0.9726H  
0.9653L 1.0486H 1.0043L 0.9419H 1.0519L  
1.0563H 0.9035L 0.9890H 0.2272L 0.1305H  
0.0253L/Air

其中,中心波长为 $\lambda_0 = 5800$  nm,Air为入射介质(空气)。设计的短波通滤光膜理论透射率光谱如图2所示。

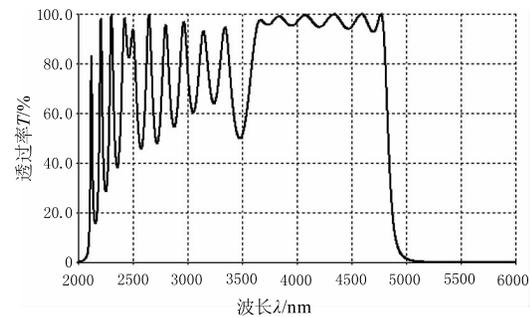


图2 短波通滤光膜透过率光谱

Fig. 2 Short-wave-pass spectral transmittance curve

将长波通与短波通膜系组合后,对整体膜系结构进行全局优化,并采用针式插值法对膜系进行优化,最终得到优化后的膜系结构为:

Sub / 0.9649H 0.636L 0.18H 1.486L 0.6448H  
0.3518L 1.0728H 1.064L 1.0222H 0.0435L  
1.6162H 2.0633L 1.0239H 0.9024L 0.5943H  
0.9582L 0.9779H 2.166L 0.8726H 0.5648L  
0.8545H 1.0345L 1.546H 0.9378L 0.6866H  
0.7944L 1.0229H 1.5722L 0.9835H 0.5087L  
0.6334H 1.7651L 0.8286H 0.3595L 0.6427H  
1.7719L 0.815H 0.5479L 0.5502H 1.6634L  
1.6382H 0.8365L 0.2117H / Air

中心波长 $\lambda_0 = 3000$  nm,膜层总厚度为 $10.869 \mu\text{m}$ 。

S 其中, H 和 L 分别表示光学厚度为  $\frac{1}{4}\lambda_0$  的 Ge 和 ZnS 薄膜材料, Sub 表示单晶 Ge 基底, Air 为入射介质(空气)。优化后的中波红外 3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  带通滤波片理论透过率光谱曲线如图 3 所示。

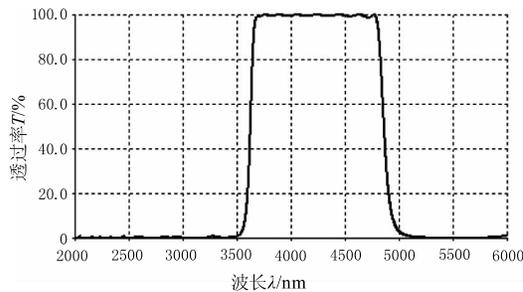


图3 中波红外 3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  带通滤波片透过率  
Fig. 3 Mid-wave infrared 3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  band-pass filter spectral transmittance curve

另一面镀负滤光膜,以 L H (L4H)<sup>12</sup> L 为初始结构<sup>[7]</sup>,给定目标值,然后进行全局优化和针式插值优化方法,得到如下膜系结构:

Sub / 1.485L 2.5425H 1.6022L 1.6419H  
0.2288L 0.6991H 1.6414L 1.5517H 1.6581L  
2.1389H 1.717L 1.5634H 2.6849L 1.8803H  
1.6737L 1.6723H 1.8819L 1.8403H 1.6776L  
1.6549H 0.5392L 0.372H 1.6823L 1.5919H  
1.8317L 2.0949H 1.6193L 1.5238H 1.5670L  
0.5455H 0.5627L 1.5296H 1.5009L 2.6046H / Air。

其中, H 和 L 分别表示光学厚度为  $\frac{1}{4}\lambda_0$  的 Ge 和 ZnS 薄膜材料, Sub 表示单晶 Ge 基底, Air 为入射介质空气,中心波长  $\lambda_0 = 3000 \text{ nm}$ ,膜层总厚度为 13.505  $\mu\text{m}$ 。优化后的负滤光膜理论透射光谱曲线如图 4 所示。

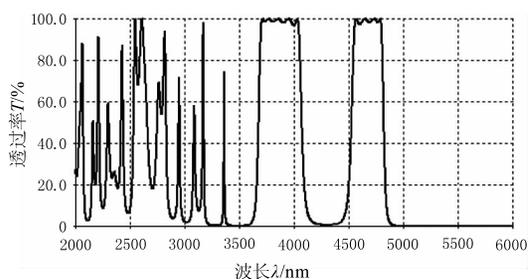


图4 中波红外负滤光膜透过率  
Fig. 4 Mid-wave infrared negative filter spectral transmittance curve

在 Ge 基底的两面分别设计以上两种膜层,最终得到理论透过率光谱曲线如图 5 所示。

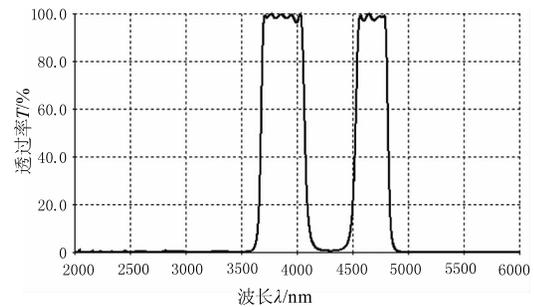


图5 中波红外双通道带通滤波膜透过率光谱

Fig. 5 Mid-wave infrared dual channel filter spectral transmittance curve

由图 5 可以看出,设计的中波红外双通道带通滤波膜光谱曲线良好,两个透过带 3.7 ~ 4.0  $\mu\text{m}$  和 4.55 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  波段内,平均透过率分别为 98.65% 和 98.14%,通带内最小透过率为 96.5%,透过率优良;截止带 2.0 ~ 3.6  $\mu\text{m}$  和 4.9 ~ 6.0  $\mu\text{m}$  波段内,平均透过率分别为 0.189% 和 0.0145%,最大透过率 1.14%; 4.2 ~ 4.4  $\mu\text{m}$  波段内,平均透过率 0.7506%,最大透过率 1.265%,截止度良好。

### 3 膜层沉积工艺

膜层沉积方式、基底烘烤温度、薄膜沉积速率、真空度、离子源辅助等工艺条件对光学薄膜的光谱性能影响很大<sup>[8-9]</sup>,因此在制备整个膜系之前,首先要对两种薄膜沉积工艺参数进行详细摸索,选取适当的工艺参数,才能够制备出所需的膜层。

实验采用北京北仪 ZZSX - 800 型真空镀膜机,以 IC/5 石英晶体膜厚控制仪监控膜层厚度,用电子束加热蒸发的方式沉积 Ge 和 ZnS 薄膜材料,其中 Ge 薄膜材料的蒸发速率控制在 0.3 ~ 0.5 nm/s, ZnS 薄膜材料的蒸发速率控制在 2.0 ~ 3.0 nm/s,基底烘烤温度设定为 220  $^{\circ}\text{C}$ ,工件架架转速为 35 转/min,镀膜时的真空室压强小于  $2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。

实验中,为了提高薄膜的附着力和膜层的耐湿热等物理性能,在沉积膜层之前,首先采用霍尔离子源对 Ge 基底进行活化轰击<sup>[10]</sup>,然后再蒸发薄膜材料。由于两个面的膜层厚度都比较厚,因此在沉积 Ge 薄膜材料时,需要特别注意 Ge 薄膜材料的沉积速率不宜过快,以免影响到薄膜表面的粗糙度<sup>[10]</sup>。

### 4 结果与分析

以上述工艺参数,在 Ge 基底的一面镀负滤光膜后,用 Nicolet MAGNA - IR 750 型红外光谱仪测试透过率,测试结果如图 6 所示。

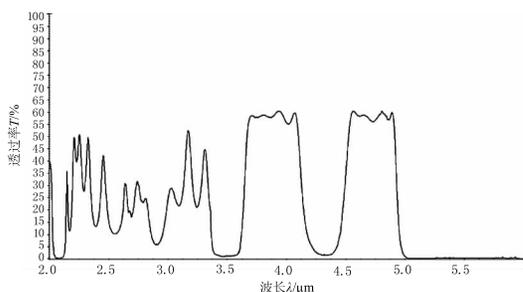


图6 Ge基底上一面镀负滤光膜测试曲线  
Fig.6 Negative filter layers deposited on one side of Ge substrate spectral transmittance test curve

测试结果显示,在4.2~4.4 μm波段内,平均透过率2.69%,最大透过率5.34%。负滤光片光谱的截止带透射率及截止带宽度,主要是由 $(aL/bH)^c$ 决定的,包括膜堆周期数 $c$ 、高低折射率差值 $(H-L)$ 以及系数 $(a$ 和 $b)$ 等因素。

在Ge基底的另一面镀制带通滤光率膜,最后的测试结果如图7所示。

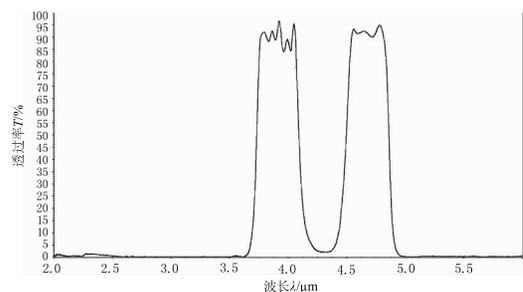


图7 Ge基底上镀双通道带通滤光膜测试曲线  
Fig.7 Mid-wave infrared dual channel pass-band filter on Ge substrate spectral transmittance test curve

从测试结果可以看出,在4.2~4.4 μm波段内,平均透过率2.7%,最大透过率5.4%。实验样片测试光谱在透射带3.7~4.0 μm和4.55~4.8 μm范围内的平均透射率分别为93.6%和94.3%,在4.0 μm附近有两个较强的干涉次峰,透射率约85.6%。出现这两个干涉次峰的主要原因有两方面,一是在沉积负滤光膜时,膜层总厚度较大,膜层厚度控制误差引起光谱在4.0 μm附近就有一个干涉次峰出现,如图6所示。负滤光膜中第22层Ge,该层设计的物理厚度为67.58 nm,采用石英晶体膜厚控制仪监控膜层厚度时,相比于其他膜层,该层最薄,其膜厚相对误差最大,对整个膜系光谱的影响,该层也是灵敏度最大的膜层。而对于沉积膜层总厚度为13.505 μm的膜系,坩埚中的薄膜材料随着膜层

的沉积而下沉的较深,以至于坩埚中材料的蒸发角发生变化,这也是引起膜厚控制的误差的一个重要原因。二是在沉积另一面的3.7~4.8 μm带通滤光膜时,膜层厚度控制误差引起的干涉次峰。截止带2.0~3.6 μm、4.9~6.0 μm范围内,截止度良好,平均透射率0.76%;但在4.9 μm附近,透射率约6.3%。这是因为在沉积带通滤光膜时,膜层层数较多(共43层),各层膜厚度误差积累效果明显,致使测试光谱出现较强的干涉次峰、波长偏移等现象。

## 5 结论

通过对中波红外双通道带通滤光膜光谱进行分解,在Ge基底的两面分别设计了中波红外3.7~4.8 μm带通滤光膜和中波红外负滤光膜,采用电子束加热沉积的镀膜方式,在ZZSX-800型真空镀膜机上完成了膜层的制备,以IC/5石英膜厚晶体控制仪监控膜层沉积厚度,用Nicolet MAGNA-IR 750型红外光谱仪测试实验结果。实验结果显示,在透射带的透过率以及截止带的截止深度良好。但由于负滤光膜的膜层厚度较厚,加上中波红外3.7~4.8 μm带通滤光膜的膜层数较多,使得在膜层沉积过程中,镀膜材料蒸发角的变化,以及各层膜厚误差的累积,导致实验片的测试光谱在截止带内4.0 μm附近出现两个较强的次峰,以及截止带波长的偏移,出现4.9 μm附近的透射率较高。测试光谱的这些缺陷,理论上可以通过文献[11]中所提到的方法减小膜厚监控误差,从而减小实测光谱与设计光谱之间的偏差。

## 参考文献:

- [1] WANG Yizhe, ZHANG Fengshan. A new kind of thin film component-Multichannel band pass filter [J]. Infrared, 2003, (1): 15-20. (in Chinese)  
王懿喆, 张凤山. 一种新的光学薄膜元件—多通道带通滤光片[J]. 红外, 2003: 15-20.
- [2] CHEN Fengjin, MA Shengxi, SU Xianjun, et al. Spectral characteristics of MWIR band-pass filters at cryogenic temperature [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(4): 635-638. (in Chinese)  
陈凤金, 马胜昔, 苏现军, 等. 低温对中波红外带通滤光片光谱特性的影响[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 635-638.

- [3] HE Zhiyu, JIAO Hongfei, CHENG Xinbin, et al. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0231002. (in Chinese)  
贺敬芝, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0231002.
- [4] ZHANG Jianfu, YANG Chongmin, LIU Qinglong, et al. Study and preparation of mid-wave infrared 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  broad band pass filter [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 695 - 699. (in Chinese)  
张建付, 杨崇民, 刘青龙, 等. 中波红外 3 ~ 5 $\mu\text{m}$  宽带通滤光片的研制[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 695 - 699.
- [5] LIU Fengyu, WU Xiaoming, ZHANG Yuansheng, et al. Film coating for narrow-band negative filter [J], Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (Supplement) : 188 - 190. (in Chinese)  
刘凤玉, 吴晓鸣, 张元生, 等. 窄带滤光片膜层的制备 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 188 - 190.
- [6] ZHANG Baisen, MA Mianjun, XIONG Yuqing, et al. Study of designing minus filters method based on rugate theory [J]. Vacuum and Cryogenics, 2010, 16(4): 219 - 223. (in Chinese)  
张佰森, 马勉军, 熊玉卿, 等. 基于 Rugate 理论的负滤光片设计研究 [J]. 真空与低温, 2010, 16(4): 219 - 223.
- [7] TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu. Modern optical thin-film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 161 - 167. (in Chinese)  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 161 - 167.
- [8] ZHU Huaxin, WANG Tongtong, GAO Jinsong, et al. Study on broad pass-band and wide rejection band of band-pass filters [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(5): 1296 - 1301. (in Chinese)  
朱华新, 王彤彤, 高劲松, 等. 宽带通截止带通滤光片研究 [J]. 人工晶体学报, 2014, 43(5): 1296 - 1301.
- [9] ZHAO Huicong. Evaporation and research on anti-radiation of bandpass filter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)  
赵会聪. 带通滤光片的镀制及抗辐照性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] CHEN Chaoping, SHI Jiantao, GUO Rui, et al. Design and preparation of mid-infrared band-pass filter [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 595 - 598. (in Chinese)  
陈朝平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备 [J]. 应用光学, 2012, 33(3): 595 - 598.
- [11] ZHANG Lichao. Accurate calibration of tooling factor for quartz crystal coating thickness monitoring technique [J]. OME Information, 2010, 27(11): 56 - 60. (in Chinese)  
张立超. 晶振膜厚监控技术中 Tooling Factor 的精确标定 [J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 56 - 60.