

文章编号:1002-2082(2013)04-0695-05

中波红外 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 宽带通滤光片的研制

张建付,杨崇民,刘青龙,王养云,谢辉,黎明,
刘永强,杨华梅,米高园,李明伟

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:中波红外宽带通滤光膜通常膜系层数多,膜层总厚度非常大(厚度达到 $10\ \mu\text{m}$ 左右),膜层的镀制工艺难度较大。通过分析红外带通滤光片几种设计方法的特点,并结合实际镀制工艺技术,采用了长波通与短波通及非规整薄膜设计技术相结合的方法,设计了以锗材料为基底的中波 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 宽带通滤光膜。该设计大幅度降低了膜层的总厚度(约为 $8.65\ \mu\text{m}$),缩短了膜层的镀制周期,提高了膜层的牢固度;在膜层的镀制工艺过程中,通过改变薄膜材料的蒸发速率、修正蒸发硫化锌材料时电子枪的扫描方式、调整蒸发材料在坩埚中的装载方法,使膜层获得了优异的光谱性能,其通带平均透过率大于 96% ,截止区域的平均透过率小于 1% 。

关键词:宽带通滤光片;膜厚控制精度;膜层总厚度

中图分类号:TN205

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0407002

Study and preparation of mid-wave infrared $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ broad band pass filter

ZHANG Jian-fu, YANG Chong-min, LIU Qing-long, WANG Yang-yun, XIE Hui,
LI Ming, LIU Yong-qiang, YANG Hua-mei, MI Gao-yuan, LI Ming-wei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The plating process of the mid-wave infrared broad-band pass filter is difficult because of multi-layers, and the total thickness of film layers is very big (the thickness is up to about $10\ \mu\text{m}$). Through analysis of the design features of several infrared band pass filters, and combining with the actual plating technology, the $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ broad-band pass filter with germanium substrate was designed by using the method of combining long-wave-pass, short-wave-pass and irregular film design technology. The design reduces the total thickness of film (about $8.65\ \mu\text{m}$) greatly as well as the deposition time, and the firmness of the film is improved. The film obtains excellent spectral properties by changing the evaporation rate of film materials, correcting the scan mode of the electron gun when vaporizing the ZnS material, and adjusting the loading method of the evaporation material in the crucible. The average transmittance is more than 96% in the passband and less than 1% in cut-off region.

Key words: broad band pass filter; film thickness control accuracy; total thickness of film layers

引言

随着红外技术的发展和对外红外材料研究的深入,红外探测装置在辨别目标、确认目标和排除干

扰等方面的能力越来越强^[1],在机载、舰载、弹载、车载等各种作战武器平台上的应用也越来越广泛。为了实现全天候作战,各种作战武器平台无

收稿日期:2013-01-10; 修回日期:2013-03-10

作者简介:张建付(1979—),男,河南林州人,高级工程师,主要从事光学薄膜技术研究工作。

E-mail: zjf205@126.com

不装备红外光电系统。中波红外波段是非常重要的
的大气窗口,在航天、气象、遥感等领域有着广泛
的应用。由于和长波红外相比,中波红外在光学
材料的选择上具有无可比拟的优越性,所以在机
载、弹载高速武器平台上的红外系统,越来越多地
采用中波红外,例如美国具有雷达隐身功能的四
代战机 F22、F35 等。高性能中波红外光电探测器
为了提高其信噪比^[2],在光学系统中常常需要采
用高质量的红外带通滤光片将不必要的光进行过
滤,从而提高其探测和识别目标的能力^[3]。宽带
通滤光片由于其通带较宽,在通带的两边还都要
截止,所以通常膜层数会很多,在红外波段,最
直接的结果就是导致膜层总厚度非常大,从而给
膜层镀制带来一系列的工艺问题。所以设计膜系
的时候,在保证光谱性能满足要求的前提下,要尽
量降低膜层的总厚度。

1 膜系设计

1.1 材料选择

考虑到宽带通滤光片的膜系数层数较多,所以
选用了折射率较高的锆作为高折射率材料,以减
少膜系的层数和降低膜系的总厚度,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。
在红外材料中,锆和硫化锌材料属于强度相对较
高,吸收相对较低的材料^[4]。

1.2 膜系设计

带通滤光片的设计通常可以采用长波通滤光
膜和短波通滤光膜的组合结构,F-P 结构或多半
波结构^[5]。而对通带为 3 μm~5 μm 这么宽的通带
宽度,采用 F-P 结构或多半波结构,是无法实现
的,所以我们考虑采用长波通滤光膜和短波通滤
光膜的组合结构。

1.2.1 基底前后表面分别镀制长波通和短波通

因为膜层的总厚度较大,所以首先考虑将膜
层厚度分散的方法,即在锆基底的一面镀制长波
通,另一面镀制短波通,组合后实现宽带通的功能。
因为锆基底的折射率较高,所以规整膜系的
通带波纹较大^[6-8],平均透过率较低。为了使膜层
与基底、膜层与入射介质(空气)可以实现更好的
折射率匹配,以提高通带的透过率,我们在设计长
波通和短波通的时候,对膜系进行了全局优化,即
采用非规整膜层进行了设计。长波通的膜系为

Sub/0.0793L1.1839H0.5011L0.7953H1.1943L

0.7451H0.9305L1.1934H0.9845L0.8186H1.1629
L1.2229H0.7636L0.9202H1.5768L0.7208H0.5574
L2.1271H1.7192L/Air

参考波长 λ₀=2 μm,其中 Sub 为锆基底,H 为
锆材料,L 为硫化锌材料,膜层总厚度为 4 μm,其
理论光谱透过率曲线如图 1 所示。

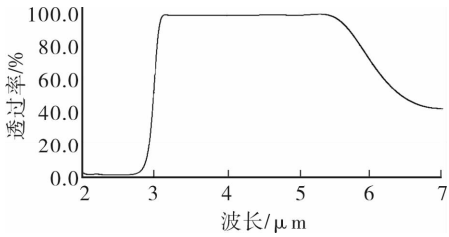


图 1 长波通光谱透过率曲线

Fig. 1 Long-wave-pass spectral transmittance curve
短波通膜系为

Sub/0.1048L0.2522H1.1667L1.0927H1.0483
L1.0095H1.0085L1.005H0.9911L1.0026H1.0016
L1.0077H1.0670L1.2736H0.2534L0.3062H0.3903
L0.1636H0.6878L0.2305H0.1683L0.6502H0.5779L/Air

参考波长 λ₀=6 μm,其中 Sub 为锆基底,H 为
锆材料,L 为硫化锌材料,膜层总厚度为 9 μm,其
理论光谱透过率曲线如图 2 所示。

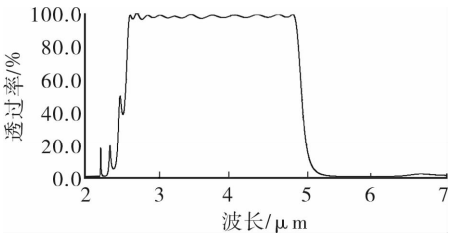


图 2 短波通光谱透过率曲线

Fig. 2 Short-wave-pass spectral transmittance curve

长波通与短波通组合后的光谱曲线如图 3
所示。

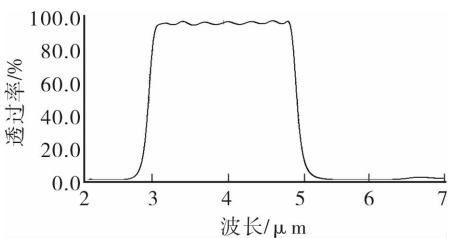


图 3 长波通与短波通组合后的光谱透过率曲线
Fig. 3 Spectral transmittance curve combined
long-wave-pass and short-wave-pass

这种组合结构获得的通带平均透过率大于
96%,截止带的截止度及过渡带的陡度满足要求。

但在膜层镀制实验中发现,因为长波通和短波通要分两次分别镀制,由于各种控制误差的存在,导致长波通和短波通的过渡带位置不稳定,从而导致宽带通滤光片的通带宽度不稳定^[9-10]。

1.2.2 长波通和短波通镀在基底的同一面

为了解决因为长波通和短波通分两次分别镀制而引起的通带宽度不稳定的问题,我们考虑将长波通和短波通在基底的同一个面上镀制。为了使得基底、膜层及入射介质(空气)的折射率更好地匹配,我们将长波通和短波通的膜系的两端膜层设置为非规整膜层,其膜系结构为

Sub/0.3138L0.8774H0.673L0.8H0.8L0.8H0.8L0.8H0.8L0.8H0.8L0.8H0.8L0.8H0.6588L1.0274H0.0895L1.7055H2.3132L2H2L2H2L2H2L2H2L2H2L2H2L2H2.0532L2.2255H0.9768L0.3693H0.5771L1.2906H1.2547L/Air

参考波长 $\lambda_0 = 3 \mu\text{m}$,其中 Sub 为锗基底,H 为锗材料,L 为硫化锌材料,膜层总厚度为 13.845 μm ,其理论光谱曲线如图 4 所示。

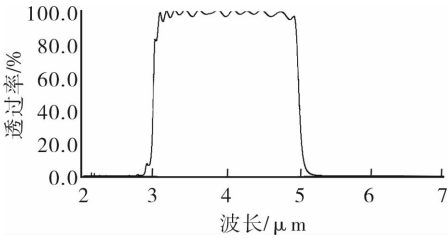


图 4 长波通和短波通镀在基底的同一面的透过率曲线
Fig. 4 Spectral transmittance curve when long-wave-pass and short-wave-pass are on same side

长波通和短波通镀在同一面,由图 4 可以看出,介质带的截止度非常好,但通带的波纹幅度较大,所以考虑将膜系进行全局优化,全部采用非规整膜层,优化后的膜系为

Sub/0.2059L0.8594H0.7949L0.5406H0.8391L1.0078H0.6261L0.6988H1.0385L0.8236H0.6356L0.8845H0.8752L0.7985H0.8204L0.6800H0.7863L1.3567H0.3889L0.5212H1.6815L1.2537H0.0671L0.896H1.8094L2.1743H1.8095L2.1289H1.8304L2.0998H1.8641L2.0772H1.9169L2.0704H2.1288L1.2713H0.2073L0.7351H1.623L0.1956H1.2012L0.5926H0.4289L1.672H1.2627L/Air

参考波长 $\lambda_0 = 3 \mu\text{m}$,其中 Sub 为锗基底,H 为锗材料,L 为硫化锌材料,膜层总厚度为 13.22 μm ,

其理论光谱曲线如图 5 所示。

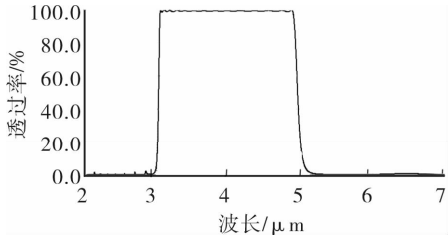


图 5 经过全局优化后的宽带通滤光片透过率曲线
Fig. 5 Broad band pass filter transmittance curve after global optimization

将长波通和短波通镀在基底的同一面,并全部采用非规整膜层后,膜系截止带的截止度、过渡带的陡度、通带的透过率获得大幅提升,光谱性能极为优良。但在膜层的镀制实验中发现 13.22 μm 这样的厚度已经超出膜厚控制系统的控制范围,膜层镀到 11 μm 以后,晶体片的振荡频率已降至 4 MHz 以下,且蒸发速率信号已经不再稳定,甚至出现负值,之后便出现晶体片失效,使镀制实验无法继续。为了解决膜层厚度控制问题,必须降低膜层的总厚度。我们通过减少长波通和短波通的初始结构的周期数(初始结构都只给两个周期),然后采用针式插值全局优化,通过该方法获得的膜系结构,大大减少了膜系的层数和膜层的总厚度,其膜系为

Sub/0.2345L0.605H1.4276L0.2828H0.7766L1.2212H0.5839L0.722H0.9179L0.7993H0.8827L0.7661H0.632L0.9846H1.2189L0.2681H0.7425L1.8409H2.25L1.8097H2.1712L1.8307H2.1582L1.8649H2.2242L1.6568H1.1141L/Air

参考波长 $\lambda_0 = 3 \mu\text{m}$,其中 Sub 为锗基底,H 为锗材料,L 为硫化锌材料,膜层总厚度为 8.65 μm ,其理论光谱曲线如图 6 所示。

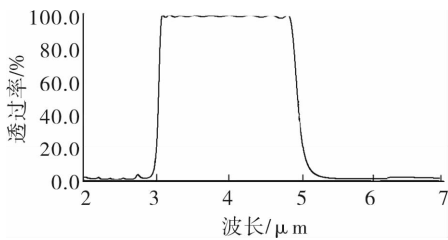


图 6 经过减薄优化后的宽带通透率曲线
Fig. 6 Theoretical spectral transmittance curve after reducing-thickness optimization

由图 6 可以看出,截止带的截止深度和过渡带的陡度满足要求,通带的透过率优良,完全满足使

用要求。通过采用针式插值全局优化的超薄层技术,大大降低了膜系的层数,使膜层总厚度大幅度下降,成功解决了膜层厚度控制问题。

2 膜层镀制

膜层在北仪 ZZSX-800 型真空镀膜机上进行镀制,采用英福康 IC5 石英晶体膜厚控制仪对膜层厚度进行监控,并采用等离子体辅助蒸发技术。两种材料都采用电子枪加热蒸发,锆材料的蒸发速率为 0.4 nm/s,硫化锌材料的蒸发速率为 1.5 nm/s,基底烘烤温度为 200 ℃,工件转速为 20 转/min,本底真空度为 2×10^{-3} Pa。

在美国尼高丽傅里叶红外光谱仪上对实验片进行了透过率测试,其测试曲线如图 7 所示。

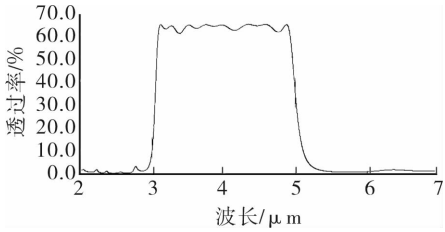


图 7 单面镀制宽带通滤光膜的实验片测试曲线

Fig.7 Single-sided coating broad band pass filter spectral transmittance test curve

另一面镀制减反射膜后的测试曲线如图 8 所示。

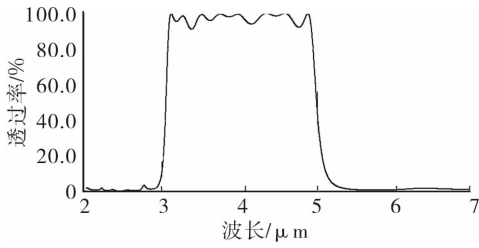


图 8 背面镀制减反射膜的宽带通滤光片的测试曲线

Fig.8 Test curve when antireflection coatings on the back of broad band pass filter

经测试,宽带通滤光片的通带平均透过率为 $T=96\%$,截止区域的平均透过率 $T<1\%$,光谱性能满足项目的使用要求。

3 实验分析

在工艺实验中我们发现,锆材料蒸发速率太大(高于 0.5 nm/s),膜层就会出现轻微吸收,并且蒸发速率越大,吸收也越大,由于膜层总厚度非常

大,所以累积后吸收就特别明显。硫化锌材料蒸发速率在高于 2 nm/s 后也会出现一定的吸收,但是相对于锆材料要小得多,硫化锌材料被电子束加热后直接升华蒸发,容易出现钻孔现象,从而影响材料的蒸发角和沉积角,会导致膜层的光学参数偏离理论值,使镀制出来的样品光谱性能变差。膜层材料消耗非常大,镀膜过程到后期在电子枪坩埚中的材料表面出现明显降低,使得材料的蒸发角及沉积角发生明显改变,影响膜层折射率的均匀性。经过多次工艺实验后,我们通过调整材料的蒸发速率、修正电子枪蒸发硫化锌材料的扫描方式并将 2 种材料都分装在多个坩埚中后,使上述问题得到明显改善。但因为膜层厚度太大,镀制时间特别长,所以镀膜材料的光学参数和理论值总存在一定的偏离,再加上膜层厚度控制也存在一定的误差(特别是镀制实验后期晶体片的振荡频率大幅下降后),所以实验样品的光谱性能和理论光谱性能存在一定的差异。

4 环境试验及强度测试

1) 高低温试验

在无包装的情况下,分别在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温中保持 24 h, $70\text{ }^{\circ}\text{C}\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温中保持 6 h,膜层均无明显变化。

2) 湿度试验

采用 KM-1000 高低温试验箱,在 $48\text{ }^{\circ}\text{C}\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下和 $96\%\pm1\%$ 的相对湿度中放置 24 h,膜层外观无变化。

3) 盐雾试验

采用上海新苗 YW-10 型盐雾试验箱,以 PH 值为 6.5~7.2 的 $5\%\pm1\%$ 的盐溶液在沉降量为 $(1\sim2)\text{ ml}/80\text{ cm}^2\cdot\text{h}$,温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下连续喷雾 24 h,膜层无明显变化。

4) 机械强度试验

在 MS-T3000 摩擦磨损实验仪上,用裹有 2 层干燥脱脂纱布的金属球,保持 4.9 N(500 g)压力下,以 2 000 转/min 的转速下摩擦 1 min,膜层表面无损伤。

5) 附着性试验

用 2 cm 宽、剥离强度不小于 $2.94\text{ N}/\text{cm}^2$ 的胶带纸粘牢在膜层表面,把胶带纸从零件的边缘朝表面的垂直方向迅速拉起后,膜层无脱落、无损伤。

5 结论

采用长波通与短波通及非规整薄膜设计技术相结合的方法设计宽带通滤光膜,可大幅度降低膜层的总厚度,缩短膜层的镀制周期,提高膜层整体厚度的控制精度,降低了膜层的镀制工艺难度,提高了膜层的牢固度。同时,在膜层的镀制过程中,通过调整薄膜材料的蒸发速率、修正蒸发硫化锌材料时电子枪的扫描方式、调整蒸发材料在坩埚中的装载方法等工艺措施,可使膜层获得优良的光谱性能。采用该方法设计以锗材料为基底的中波 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 宽带通滤光膜,其通带平均透过率大于 96%,截止区域的平均透过率小于 1%。该项技术可以应用在所有宽带通滤光片的设计,以降低膜层的总厚度,进而降低膜层镀制的工艺难度。

参考文献:

- [1] 施加宝,吴振森,曹运华,等. 海面中波红外反射率特性研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2372-2375.
SHI Jia-bao, WU Zhen-sen, CAO Yun-hua, et al. Study on reflection of sea surface in Mid-IR[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2372-2375. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 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.
CHEN Chao-ping, SHI Jian-tao, GUO Rui, et al. Design and preparation of mid-infrared bandpass filter[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 595-598. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 张佰森,陈涛,熊玉卿,等. 中波红外短波通滤光片的设计与镀制技术研究[J]. 真空与低温, 2010, 16(3): 148-152.
ZHANG Bai-sen, CHEN Tao, XIONG Yu-qing, et al. Design and preparation of medium-wave infrared short-wavelength pass filter[J]. Vacuum & Cryogenics, 2010, 16(3): 148-152. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 付秀华,董连和,付新华,等. 红外增透与保护膜技术的研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1162-1164.

FU Xiu-hua, DONG Lian-he, FU Xin-hua, et al. Study of infrared AR and protecting coating technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(12): 1162-1164. (in Chinese with an English abstract)

- [5] 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.
ZHA Jia-ming, LI Si-cheng, TANG Qian-long. Structure bandwidth estimation and adjustment of medium bandpass infrared filter[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 151-155. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 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 Jin-fa, GU Pei-fu, LIU Xu, et al. Modern optical thin-film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 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 Jin-fa, ZHENG Quan. Applied film optics [M]. Shanghai: Shanghai Technology Press, 1984. (in Chinese)
- [8] 严一心,林海海. 薄膜技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 1994.
YAN Yi-xin, LIN Hong-hai. Thin-film technology [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [9] 赵兴梅,师建涛,郭鸿香. 一种红外双半波滤光片的设计和制造方法[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 208-210.
ZHAO Xing-mei, SHI Jian-tao, GUO Hong-xiang. Design and fabrication of infrared double half-wave filter[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 208-210. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 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 Sheng-yuan, GU Pei-fu, LIU Xu, et al. Study on optical stability of thin-film filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(5): 576-580. (in Chinese with an English abstract)