

文章编号: 1672-8785(2019)08-0019-05

3.7~4.8 μm 中红外带通滤光膜研制

岳 威 梁灵芬 王嘉欣 张 阔 刘连泽

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 以光学薄膜理论为出发点, 系统介绍了3.7~4.8 μm 带通滤光膜的理论设计与优化、实际生产制备以及成品测试方法。考虑到膜料性能及膜层匹配等问题, 分别选用锗和一氧化硅作为高低折射率材料, 并以氧化铝作为薄膜基底。确定了滤光膜的基础膜系, 并使用 Filmaster 软件对膜系进行了设计和优化计算。在薄膜蒸镀过程中, 根据材料选取合适的镀制工艺。通过温度控制、离子辅助等方法研制出了可靠性与光谱特性皆优的带通滤光膜, 并对其光谱特性及膜层质量等进行了测试。根据设计目标修改工艺参数, 最终确定可行的工艺流程, 从而研制出了符合光学性能设计指标的3.7~4.8 μm 带通滤光膜。

关键词: 带通滤光膜; 中红外; 膜系设计; 工艺参数

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.08.003

Development of 3.7–4.8 μm Mid-infrared Band-pass Filter

YUE Wei, LIANG Ling-fen, WANG Jia-xin, ZHANG Kuo, LIU Lian-ze

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the theory of optical thin film, the theoretical design and optimization, actual production, and finished product testing methods of 3.7–4.8 μm band-pass filter are introduced. In view of the problems of film properties and layers matching, Ge and SiO are respectively selected as high and low refractive index materials, and alumina is used as the substrate. The basic membrane system of the filter film is determined, and the membrane system is designed and optimized by using the Filmaster software. In the film evaporation process, a suitable plating process is selected according to the materials. The band-pass filter film with excellent reliability and spectral characteristics is developed by temperature control and ion assistation, and its spectral characteristics and film quality are tested. The process parameters are modified according to the design goals, and the feasible process is finally determined to develop a 3.7–4.8 μm band-pass filter conforming to the design requirements for optical performance.

Key words: band-pass filter; mid-infrared; membrane system design; process parameter

收稿日期: 2019-07-23

作者简介: 岳威(1980-), 男, 甘肃兰州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学薄膜技术研究。

E-mail: ywei2003@sina.com

0 引言

随着薄膜光学的不断发展和薄膜元件的广泛应用,制造出光学性能优异的带通滤光膜具有重要的研究意义。带通滤光膜可被用来获取所需波段的光能量,同时抑制其余波段的光透射。在光学薄膜领域,3~5 μm 波段是三个常用的大气窗口之一。在此波段,带通滤光膜常被用在新型红外热像仪、导弹制导系统、中红外激光器以及卫星传感器等领域。提高光电成像与探测系统的精度和拓宽其应用波段已成为近年来的一个热门研究对象。在此背景下,我们研制了可有效提高中红外探测器灵敏度的3.7~4.8 μm 带通滤光膜。同时,镀制高性能带通滤光膜也会对探测器或激光系统起到良好的保护作用^[1]。

1 带通滤光膜的设计

1.1 薄膜材料的选择

带通滤光膜的膜层厚度一般较大,故选取折射率差值尽可能大的高低折射率材料,以减小薄膜厚度与设计难度,便于薄膜的实际制备^[2]。

由于硒化锌机械强度较低、硫化锌易升华的特性会给镀制过程增加难度,而锗则具有大折射率、低熔点、高机械性能等优点,所以将锗选定为高折射率材料^[3]。由于氟化钷的折射率在透明区不稳定,氟化铟与高折射率材料锗的结合力不好,而一氧化硅镀制工艺成熟,且各方面性能较好,所以将一氧化硅选定为低折射率材料。同时,将氧化铝作为基底材料。

1.2 带通滤光膜的设计与优化

中红外带通滤光膜一般分为窄带滤光膜和宽带滤光膜两类。本文所研究的3.7~4.8 μm 带通滤光膜的相对带宽大于50%,故认定其为宽带滤光膜。它大多采用长波通与短波通滤光膜相结合的结构来设计。

因为中红外带通滤光膜的膜层总厚度较大,所以优先考虑将长波通与短波通滤光膜分

别镀制在基片两个表面上的情况,以减少膜层数。此时,两者的透过带重合,截止带则可分别抑制长短波的带外光能量,从而在有效减小膜层厚度的同时,提高环境稳定性且便于监控^[4]。为了提高通带的透过率,对两面膜系进行全局优化,即在常用膜系的基础上采用非等厚周期的方法对其进行设计^[5]。

首先设计短波通滤光膜系。采用G|(HL)ⁿ|A的基本膜系结构来进行设计,其参考波长为6160 nm。图1为未经优化的初始透过率曲线图。

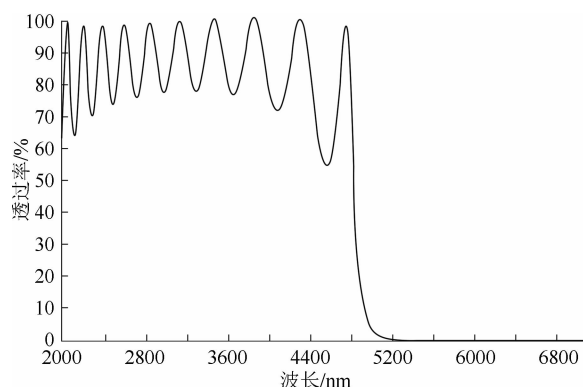


图1 未经优化的初始透过率曲线图

此时,通带基本满足所需波段,但还需展宽,且平均透过率不高。通带波纹波动较大,需要进行波纹压缩。经软件模拟计算,通过非等厚周期的方法优化膜层厚度,得到了经初步优化的透过率曲线(见图2)。

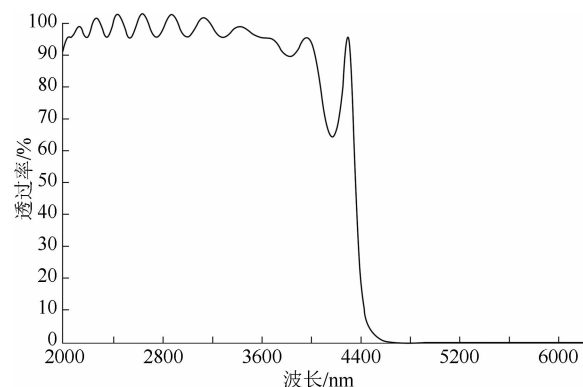


图2 经初步优化的透过率曲线图

此时,通带波纹比初始膜系时平整但仍有波动,需进一步压缩。且在4.8 μm 附近有陷波,平均透过率不足70%。考虑加镀平滑层

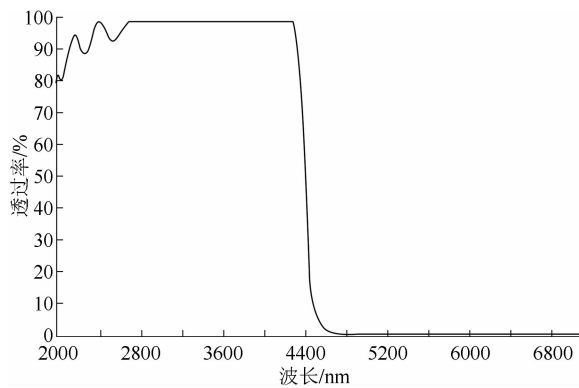


图 3 短波通滤光片的透过率曲线图

的同时压缩波纹。经膜系优化计算后, 得到了最终短波通滤光片的透过率曲线(见图 3)。膜系结构如下:

0.194H 0.090L 1.481H 1.126L 1.026H 1.011L
1.006H 0.996L 0.987H 1.001L 0.986H 0.992L
1.009H 0.990L 1.026H 1.042L 1.023H 0.519L
H:Ge, L:SiO₂。

同理, 采用 $G|(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^n|A$ 的基础膜系来设计长波通滤光片, 其参考波长为 2675 nm。图 4 为未经优化的初始透过率曲线图。

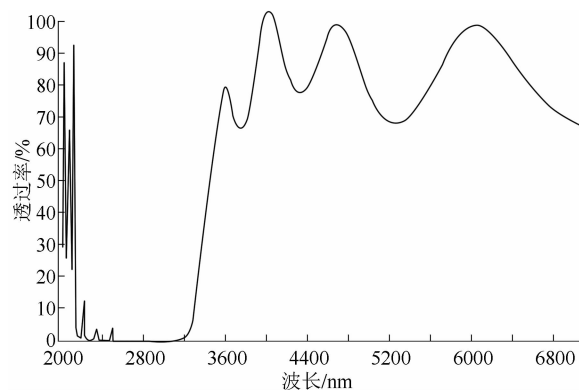


图 4 未经优化的初始透过率曲线图

此时, 该膜系通带处的透过率曲线浮动大, 平均透过率不高, 需要进行截止带展宽以及波纹压缩^[6]。经膜系叠加、波纹压缩等优化步骤后, 得到了最终长波通滤光片的透过率曲线(见图 5)。膜系结构如下:

0.241H 0.870L 0.577H 0.259L 0.548H 0.444L
0.586H 0.704L 0.550H 0.712L 0.748H 0.494L
0.617H 0.733L 0.614H 0.588L 0.891H 0.658L
0.368H 0.501H 1.065L 0.955H 0.984L 0.935H

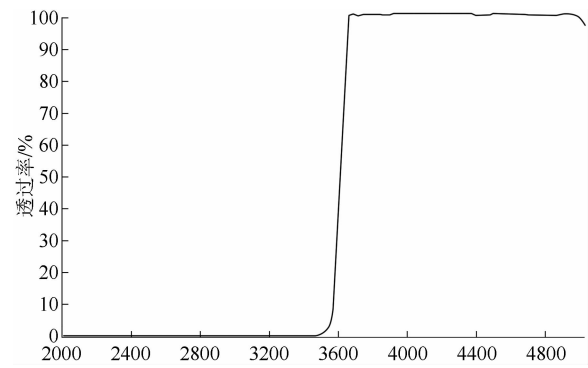


图 5 长波通滤光片的透过率曲线图

1.016L 1.041H 1.047L 0.970H 0.963L 0.973H
1.131L 1.019H 0.921L 0.923H 1.001L 1.207H
1.027L 0.402H。

在确定长短通滤光片的膜系结构后, 对两种滤光膜进行了叠加, 得到了图 6 所示的最终效果。此时, 该膜系在规定波段的平均透过率大于 95%, 且波纹较平整, 过渡带的陡度满足要求, 截止带的平均透过率小于 1%, 截止度良好。但在薄膜镀制的实际生产与实验中, 长短波结合的方式存在抑制带互相影响的问题。

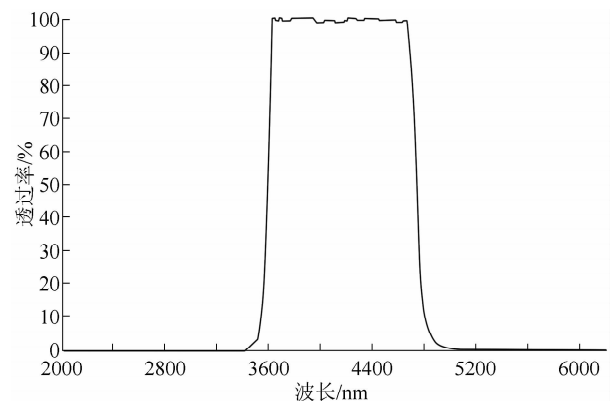


图 6 带通滤光片的透过率曲线图

2 带通滤光膜的制备与检测

在实际制备中, 受工艺参数以及其他不可控因素的影响, 可能会镀制出测试性能与理想参数有所偏差的薄膜。因此, 需要研究制备过程中的工艺参数及相关技术, 并根据实际制备的成品测试性能作出相应改进, 从而在工艺上制造出与理论设计指标相符、光学厚度与实际厚度相等、抗损伤阈值高的理想薄膜。这对于

研制高性能带通滤光膜来说至关重要^[7]。

首先对氧化铝基片进行透过率曲线测试(结果见图 7)。从图 7 中可以看出,在 3.7~4.8 μm 波段,氧化铝基底的透明度较高,不会对薄膜制备的其他环节造成不良影响。

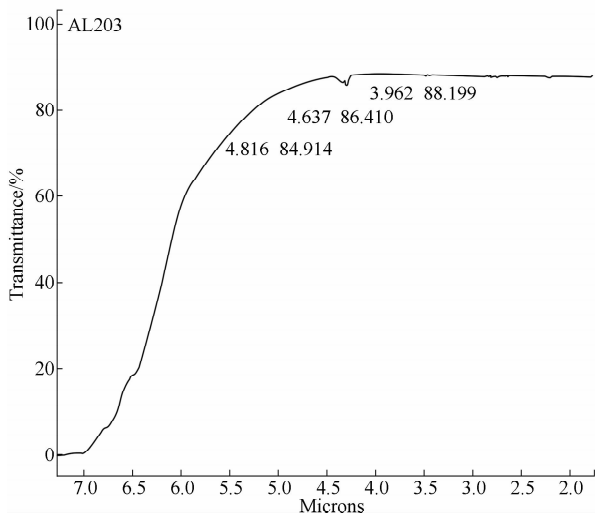


图 7 氧化铝基底的透过率曲线

实验中所使用的镀膜设备为 WTX1100 型镀膜机,蒸发系统采用电子束加热法。膜层厚度控制系统以晶振为主。表 1 列出了第一次镀膜实验的工艺参数。

表 1 第一次镀膜实验的工艺参数

参数	数值
真空度	2.0×10^{-4} mbar
基片加热温度	100 $^{\circ}\text{C}$
锆沉积速率	1 nm/s
一氧化硅沉积速率	1.5 nm/s
离子源的偏置电压	150 V
离子源的环流	1.5 A

在得到带通滤光膜成品后,使用 IR3100 分光光度计对其进行了光谱特性测试(结果见图 8)。

此时,滤光膜截止带的截止度良好,而通带的平均透过率远不及 85% 以上。在 4.1~4.4 μm 处,波纹有明显凹陷,且通带波纹波动较大。误差主要来源于制备过程中工艺参数与其他不可避免的设备及环境误差等。因为设备与环境的部分误差属于不可控因素,所以改

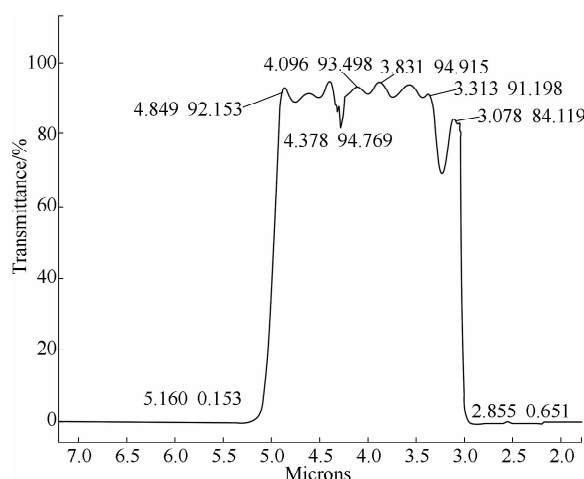


图 8 第一次镀制滤光膜的光谱曲线

进工艺参数是寻求最优化制备的前提条件^[8-9]。

通过多次工艺试验,最终确定了制备带通滤光膜时所使用的工艺参数(见表 2)。

表 2 最终工艺参数

发射 电流	辉光电压	功率	偏置电压	环流
50.2 A	112.8 V	5.7 kW	124.4 V	1.73 A
真空度为 2.4×10^{-4} mbar; 温度为 150 $^{\circ}\text{C}$; 氩气流量为 16 sccm				

图 9 和图 10 所示分别为最终成品及其光学特性检测结果。可以看出,该带通滤光膜在 3.7~4.8 μm 波段的平均透过率大于 90%,其余波段均可实现高截止,平均透过率小于 1%。该结果与理论设计中的软件仿真结果相似,较好地满足了设计目标对产品的要求。

我们分别对该滤光膜的正反面进行了表面检测和附着力测试。在膜层表面上未发现有明显裂纹、针孔、气泡等破损;在采用剥离法对薄膜力学特性进行检测时,未发现薄膜脱落现象^[10]。

3 结束语

本文基于光学薄膜理论,在对比和分析各种红外光学材料后,分别选用锆、一氧化硅和氧化铝作为高折射率材料、低折射率材料和基底材料,并利用 Filmaster 软件设计出了符合要求的带通滤光膜的膜系



图 9 镀制完成的带通滤光膜

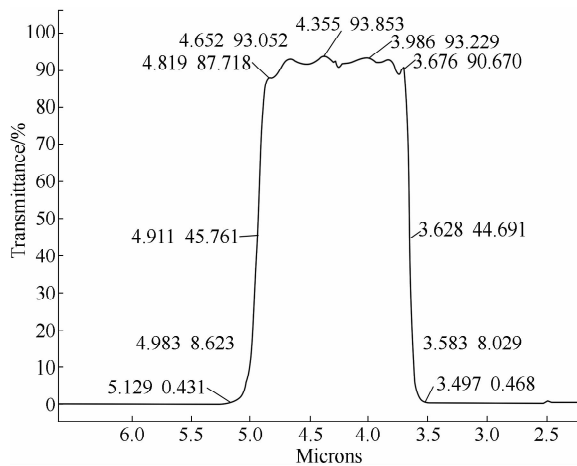


图 10 最终成品的透射率光谱曲线

结构。在实际制备中,着重对真空度、沉积速率、温度以及离子源等方面进行了优化,并确定了一系列工艺参数。最终研制出的中红外带通滤光膜在入射角为 0° 的情况下, $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段的透过率平均值大于 92%,截止波段的透过率平均值小于

1%,并具有良好的环境适应性。我们后续将会在离子辅助对膜层的影响方面开展持续研究。

参考文献

- [1] 张建付,杨崇民,刘青龙,等. 中波红外宽带通滤光片的研制 [J]. 应用光学, 2013, 34(4): 695-699.
- [2] 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
- [3] 林永昌,卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 1990.
- [4] 沈远香,黄晓霞,王永惠. 光学薄膜的研究新进展及应用 [J]. 四川兵工学报, 2012, 33(8): 105-107.
- [5] 董小燕,龚斌,李雅丽. 光学薄膜及其应用方面的研究 [J]. 物理与工程, 2012, 32(5): 14-18.
- [6] 刘华松,姜承慧,李士达,等. 真空热处理对硫化锌薄膜光学与微结构特性的影响 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2038-2045.
- [7] 朱震. 光学薄膜在激光与红外技术中的应用 [J]. 激光与红外, 2006, 36(Z): 792-796.
- [8] 张殷华,黄伟,张云洞. 几种红外薄膜材料的光学特性 [J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 104-108.
- [9] 王英剑,王靖,宋永香,等. 白宝石窗口增透膜的研究 [J]. 中国激光, 2001, 28(8): 765-768.
- [10] 李定,熊胜明. 离子束溅射氧化物薄膜的中红外特性 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 219-223.