

可见与远红外分色滤光片的研制

杨洁,付秀华,张静
(长春理工大学,吉林 长春 130022)

摘要:分色滤光片对成像光谱技术起着重要的作用。本文介绍了一种多通道成像系统中使用的宽光谱分色滤光片,实现了在锗基底上 45° 倾斜使用时,将 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 光谱分成两束光。借助OptiLayer膜系设计软件,得到易于制备的膜系结构,经过多次实验,确定合理的工艺参数,最终得到了光谱性能和理化性能较好的分色片。

关键词:分色滤光片;优化设计;离子辅助沉积;环境可靠性
中图分类号:0484 **文献标识码:**A

Study and fabrication of far-infrared and visible separation filter

YANG Jie, FU Xiu-hua, ZHANG Jing
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Far-infrared and visible separation filter plays an important role in imaging spectrum technique. In this paper, a kind of separation filter used in multichannel imaging system is introduced, It can divide $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ and $8 \sim 12 \mu\text{m}$ light into two beams of light when it is used at 45° degrees on Ge base. By using OptiLayer software, we have obtained the structure of film which is easy to preparation, and determined the reasonable technique parameters after many experiments. Finally we make the filter with well optical and physics characteristics.

Key words: separation filter; optimization design; ion assistant deposition; environment reliability

1 引言

当今,红外成像技术凭借其良好的隐蔽性、抗电磁干扰能力和识别能力在军事领域中得到了广泛的应用。红外与可见、近红外相结合的宽光谱光学系统中使用的分色滤光片,覆盖光谱范围宽,光谱性能指标高,对环境可靠性要求高,这给设计和制备都带来了极大难度。

根据光学系统的要求,在 45° 倾斜的平板基底上,需要将 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的光谱分成两部分,一部分波段高透过,另一部分波段高反射,且需要通过高低温、湿度、盐雾等环境可靠性试验。

2 膜系设计

2.1 方案的确定

该分色滤光片的设计有两种方案,一种方案是透射 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 、反射 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,另一种方案是反射 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 、透射 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段。

第一种方案是利用诱导增透原理,将金属超薄银膜在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 波段的反射性能转变成透射性能。该方案在制备工艺上存在较大的困难,首先,难以准确得到超薄银膜的光学常数(包括折射率和消光系数);其次,制备时银膜的厚度控制只能采用石英晶体振荡控制法,该方法精度低、误差大。因此,实际制备出的分色片难以达到仪器的使用要求。

第二种方案是选择单晶锗作为基底,利用长波通干涉截止滤光片的设计原理,将规整的 $\lambda/4$ 多层介质膜叠加,得到很高的反射率,通过借助膜系设计软件的自动优化功能,使得远红外的透射率也能达

作者简介:杨洁(1985-),女,硕士研究生,主要从事光学薄膜的研究。E-mail: yangjie8567@126.com

收稿日期:2010-10-22;修订日期:2010-11-18

到要求。这种方法制备的分色片性能非常好,反射率和透射率均在 95% 以上^[1]。本文主要针对该种方案进行讨论。

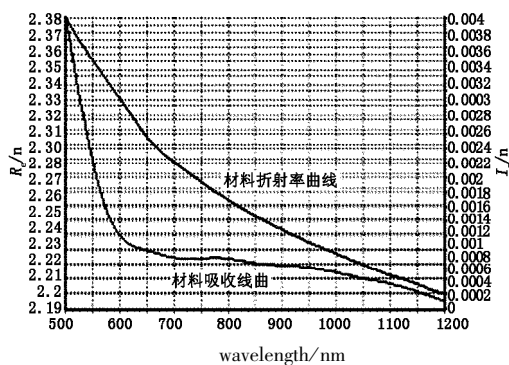
2.2 材料的选择

目前,可见和远红外光谱区均能使用的薄膜材料非常有限。常用的高折射率材料有硒化锌(ZnSe)、硫化锌(ZnS)等,与之匹配的低折射率材料有氟化钙(CaF₂)、氟化钡(BaF₂)、氟化镱(YbF₃)、氟化钇(YF₃)等^[2]。

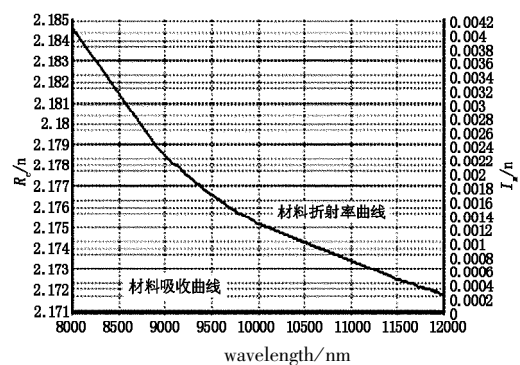
选择薄膜材料时,需要综合考虑其透明区、折射率、附着力、硬度、应力等特性,最终选择 YbF₃ 作为低折射率材料,ZnS 作为高折射率材料。

2.3 材料光学常数的确定

考虑到基底温度、沉积速率、真空度、沉积方式、离子束辅助等工艺参数对材料光学特性的影响,首先要确定材料的光学常数。实验在如下的条件下进行:①基底温度为 150 ℃;②本底真空度为 3×10^{-3} Pa;③ZnS 采用电子束蒸发、YbF₃ 采用热阻蒸蒸发,蒸发速率分别为 1 nm/s 和 0.6 nm/s;④CC105 - 宽束冷阴极离子源驱动电压 70 V、中和电压 14 V^[3]。将所测得的数据导入 OptiLayer 膜系设计软件的 OptiChar 模块,进行材料色散和吸收系数的模拟,经过多次修正,得到材料的折射率 n 、吸收系数 k 分布图如图 1 和图 2 所示。

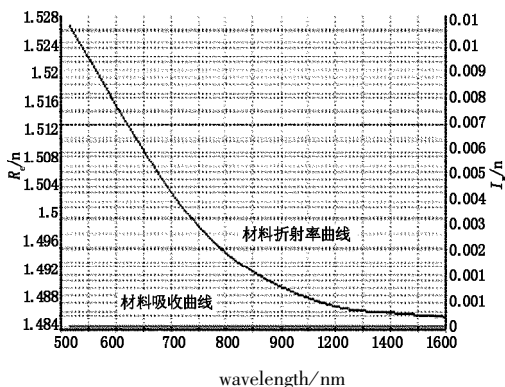


(a) 0.5 ~ 1.2 μm ZnS 材料的 n, k 曲线图

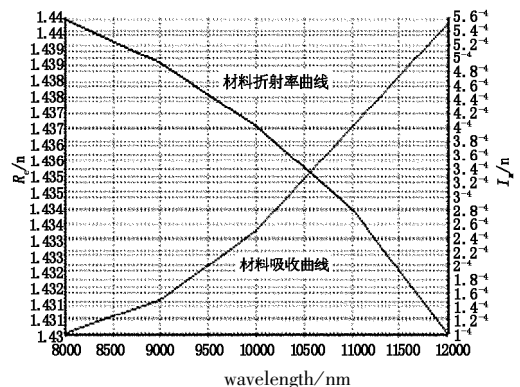


(b) 8 ~ 12 μm ZnS 材料的 n, k 曲线图

图1 ZnS 材料的 n, k 曲线图(n - 折射率; k - 吸收系数)



(a) 0.5 ~ 1.2 μm YbF₃ 材料的 n, k 曲线图



(b) 8 ~ 12 μm YbF₃ 材料的 n, k 曲线图

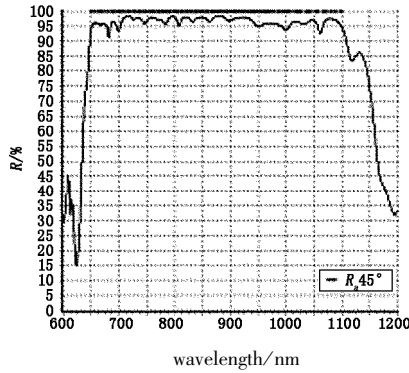
图2 YbF₃ 材料的 n, k 曲线图(n - 折射率; k - 吸收系数)

2.4 膜系设计及优化

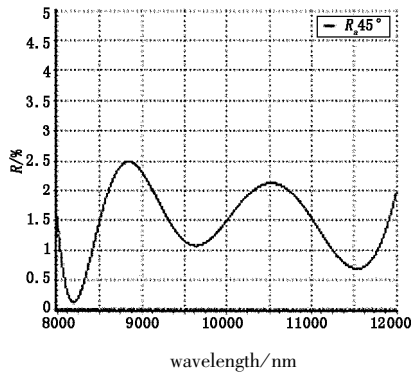
由滤光片的参数要求分析可知,该分色滤光片与长波通滤光片相似,利用长波通滤光片的基本对称周期结构(0.5 H L 0.5 H)的叠加并使用多个反射堆拓宽反射带,选定 Sub| (0.4 H 0.8 L 0.4 H) * 6 (0.5 H L 0.5 H) * 7 (0.65 H 1.3 L 0.65 H) * 6 | A 作为膜系的初始结构,借助软件的优化功能,得到膜系结构如下:

Sub|13.20 H 13.73 L 1.61 H 1.69 L 1.25 H

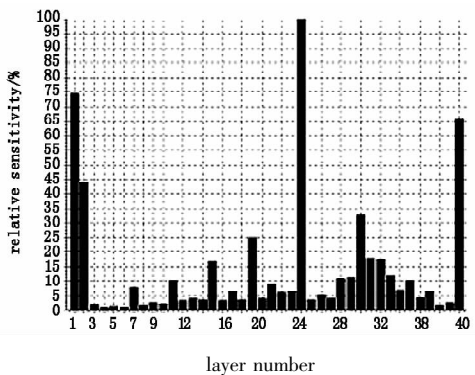
1.11 L 2.04 H 1.22 L 1.10 H 1.26 L 1.93 H 1.29 L 1.05 H 1.23 L 2.06 H 1.17 L 1.11 H 1.11 L 2.24 H 1.10 L 1.05 H 1.15 L 0.94 H 4.83 L 0.78 H 1.27 L 0.84 H 1.37 L 0.91 H 1.46 L 0.96 H 1.30 L 0.98 H 1.07 L 1.06 H 1.05 L 1.17 H 1.10 L 1.30 H 15.73 L | A, 其中 Sub 为基底 Ge, H 为 ZnS, L 为 YbF₃, A 为空气,入射角为 45°,中心波长为 850 nm。暂不考虑基底背面的反射,其光谱曲线及相对灵敏度如图 3 所示。



(a) 0.6 ~ 1.2 μm 波段理论设计光谱反射率曲线



(b) 8 ~ 12 μm 波段理论设计光谱反射率曲线



(c) 膜层的相对灵敏度曲线

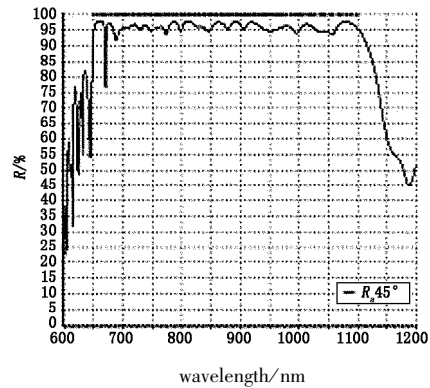
图3 理论设计光谱反射率曲线

从图3(a)和图3(b)可以看出,设计曲线完全满足要求,然而利用 Optilayer 软件对其进行产前误差评估 Pre-production Estimator of Error 发现,其产后评估曲线与设计曲线差异很大,并且从膜层的相对灵敏度图也可看出,各膜层的灵敏度较大,给膜系的制备造成极大的困难^[4]。

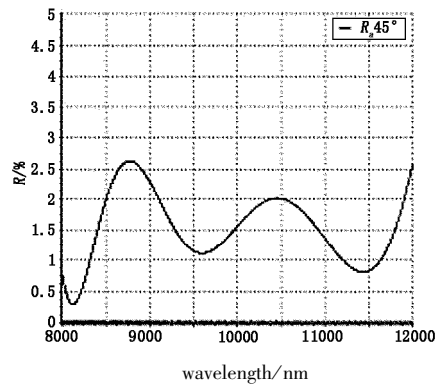
为解决上述问题,先利用 Optilayer 膜系设计主程序的 Thin layer removal 和 design cleaner 功能去除其薄层及对评价函数影响较小的膜层,再结合 Needle Optimization AUTO 中多种优化方法得到理想膜系,其产后评估曲线与设计曲线差异很小,但是在可见与近红外的反射区波段波纹较多,影响了反射区的平均反射率,仍不符合设计要求。

考虑到既要满足设计要求,又要兼顾制备要求,对膜系的结构再次进行优化,对较厚的膜层减薄,对敏感层厚度进行修正,得到膜系如下:

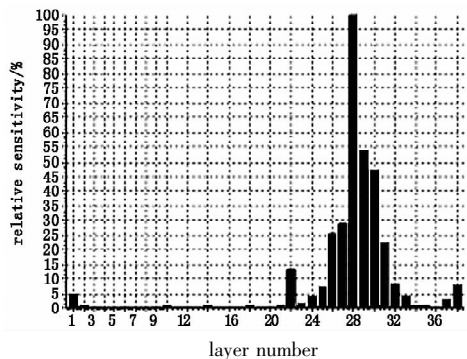
Sub|14.31 H 11.40 L 2.13 H 1.06 L 1.32 H 2.02 L 1.19 H 1.20 L 1.11 H 2.22 L 1.05 H 1.27 L 1.06 H 2.11 L 1.16 H 1.17 L 1.17 H 2.156 L 1.15 H 1.11 L 1.07 H 4.73 L 0.93 H 1.22 L 0.87 H 1.31 L 0.88 H 1.42 L 0.96 H 1.29 L 0.98 H 1.168 L 0.99 H 1.08 L 1.02 H 1.05 L 3.82 H 15.51 L|A, 理论光谱曲线如图4所示。



(a) 0.6 ~ 1.2 μm 波段理论设计光谱反射率曲线



(b) 8 ~ 12 μm 波段理论设计光谱反射率曲线



(c) 膜层的相对灵敏度曲线

图4 理论设计光谱反射率曲线

从图4可以看出,敏感层明显减少,0.6 ~ 1.2 μm 波段反射次峰减少,满足设计要求。

由于锗的折射率较高,在 8 ~ 12 μm 存在 36%

的单面剩余反射率,故分色滤光片背面必须镀制宽带增透膜。设计膜系如下($\lambda_0 = 1.2 \mu\text{m}$):Sub|2.53 M 2.33 H 3.09 M 5.66 L 1.39 M|A。H表示Ge,M表示ZnS,L表示YbF₃,A表示空气。

3 制备工艺

实验使用的设备是Denton的Integrity镀膜机,此设备配有CC-105宽束冷阴极离子源、平面行星夹具、全自动光控装置。镀制前先用石油除去抛光时带来的污渍,再浸泡在乙醇中10~20 min,然后擦拭干净,放入真空室中。当真空度抽至 6×10^{-2} Pa时,打开烘烤,烘烤温度设置为150℃,恒温1 h后,打开离子源轰击基底15 min,立即开始蒸镀。

膜厚监控采用下反射式光学监控法,具体的工艺参数与确定材料光学常数时实验参数一致,在此不再赘述。

4 测试结果与分析

4.1 光谱测试

分色滤光片实测光谱曲线如图5及图6所示。短波部分使用日本岛津公司的UV-3150分光光度计测试,长波部分使用Perkin-Elmer公司的Spectrum 100 OPTICA傅里叶变换红外光谱仪测试。基片采用1 mm厚的Ge平片,测试45°透射率时使用可任意旋转平台附件。

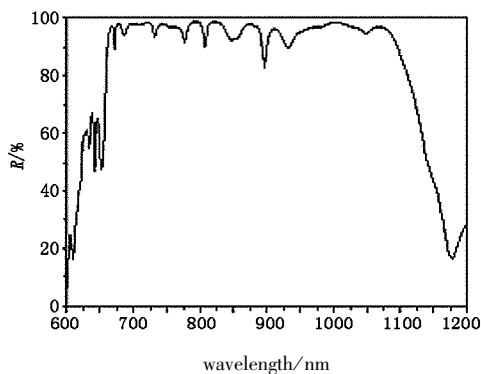


图5 Ge基底上400~1000 nm波段处实测曲线

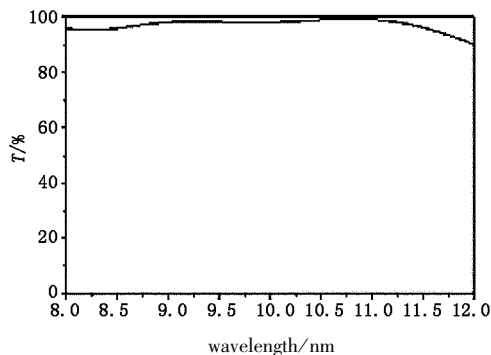


图6 Ge基底上6~11 μm处实测曲线

由图可以看出,可见与近红外波段(0.65 ~

1.1 μm)的平均反射率为94.89%,远红外波段(8~12 μm)的平均透射率为97.1%。0.65~1.1 μm波段的平均反射率略低于设计值,这可能是由于拟合的材料光学常数与实际制备的材料折射率有差异,但基本满足设计要求。

4.2 可靠性测试

为了保证分色滤光片可靠、耐用,参照国军标,对样品进行了环境可靠性试验。

(1)膜层附着力测试:使用2 cm宽、剥离强度不低于2.74 N/cm胶带纸牢牢贴在膜层表面上,垂直迅速拉起后,无脱膜现象。

(2)湿热测试:在温度为 (50 ± 2) ℃、湿度为95%~100%的条件下保持24 h,膜层未出现起皮、脱膜、裂纹、起泡等现象。

(3)高低温测试:将样品放入高低温箱中,镀膜件在 (-60 ± 2) ℃和 (70 ± 2) ℃的温度中各保持2 h(温度的变化速率不得超过2℃/min),再放置到室温(16~32℃)后,膜层未出现起皮、脱膜、裂纹、起泡等现象。

(4)盐溶性测试:在室温(16~32℃)下,经4.5%氯化钠溶液浸泡24 h,膜层未出现起皮、脱膜、裂纹、起泡等现象。

(5)水溶性测试:在室温(16~32℃)下,经蒸馏水浸泡24 h,膜层未出现起皮、脱膜、裂纹、起泡等现象。

上述测试完成后再次测试样品的反射率、透过率光谱曲线基本没有变化。

5 结论

采用全介质薄膜材料,通过Optilayer软件进行产前分析,利用离子辅助蒸发技术,使用IC5石英晶控制速率和全自动光控监控厚度,减少膜厚控制误差,并解决了膜层牢固性问题,所镀制的薄膜与理论膜系较接近,满足使用要求。

参考文献:

- [1] Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Infrared dichroic filter used for multi-channel image-forming system [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27 (5): 1-4. (in Chinese)
段微波,刘定权,张凤山.一种用于多通道成像系统的宽光谱红外分色片[J].红外与毫米波学报,2008,27 (5): 1-4.
- [2] Pan Yongqiang, Zhu Chang. High performance infrared antireflection films on ZnSe substrate for 8~12 μm [J].

- Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 394 - 396. (in Chinese)
- 潘永强, 朱昌. 硒化锌基底 8 ~ 12 μm 高性能增透膜的研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 394 - 396.
- [3] Lin Bing, Yu Tianyan, Liu Dingquan, et al. Design and deposition of infrared/visible wide-band color separation filters[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(5): 393 - 395. (in Chinese)
- 林炳, 于天燕, 刘定权, 等. 红外/可见光宽带分色片设计与制备[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5): 393 - 395.
- [4] Li Daqi, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Design and fabrication of 6.4 ~ 15 μm broadband antireflection coatings[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(2): 135 - 137. (in Chinese)
- 李大琪, 刘定权, 张凤山. 6.4 ~ 15 μm 宽带增透膜的设计与制作[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 135 - 137.