

文章编号: 0253-2239(2010)02-0597-05

红外短波/长波分色片的研究

章岳光 王 颖 孙雪铮 沈伟东 刘 旭 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 短波红外/长波红外分色片在红外双波段成像光学系统中起着重要的作用。分析了分色片基板和薄膜材料的选择。选定硒化锌为基板,采用 Ge, ZnSe 和 YbF₃ 作为薄膜材料进行了优化设计,并对沉积温度和蒸发速率等工艺条件进行了优化,用电子束蒸发方法制备了该分色片,其反射率和透射率都达到了 93% 以上,已成功应用于实际光学系统中。

关键词 薄膜光学;分色片;硒化锌基板;红外双波段成像光学系统

中图分类号 TB443 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0597

Design and Fabrication of Short-Wave /Long-Wave Infrared Dichroic Beam Splitter

Zhang Yueguang Wang Ying Sun Xuezheng Shen Weidong Liu Xu Gu Peifu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Short-wave /long-wave infrared dichroic beam splitters take an important role in two-band infrared imaging optical systems. The choice of substrate and coating materials are discussed. Ge, ZnSe and YbF₃ were chosen as film materials and ZnSe as substrate; The coating reflecting the shortwave infrared light while transmitting the longwave infrared (8 ~ 12 μm) light is analyzed, and the beam splitter is manufactured by electronic-beam evaporation. The measured reflectivity and transmittance of corresponding band are all above 93%. Such dichroic beam splitters have been successfully applied to the actual optical system.

Key words optical thin film; dichroic beam splitter; ZnSe substrate; two-band infrared imaging system

1 引 言

随着光电武器系统的发展,红外热像仪被广泛装备在军事领域中。同时,军事侦察要求红外成像仪具有更远的作用距离、更高的图像分辨率、更强的环境和气候适应性。在新型红外成像技术^[1,2]的研发上,传统的单波段红外成像正在向多光谱红外成像、超光谱红外成像和双色偏振红外成像发展。上述新型的红外成像技术要求光学系统同时可以探测多个光谱段的信息,而分色片可把入射光束分别导向不同波段对应的探测器,因此在红外热像仪中有着广泛的应用。短波红外/长波红外分色片就是其中的一种。

2 原理与设计

2.1 原理

短波/长波红外双波段成像系统的光学系统原理如图 1 所示,入射辐射经全反射卡塞格林系统后,入射到与系统光轴成 45°角放置的短波红外/长波红外分色片,透射长波红外(8.0~12.0 μm)波段的辐射,反射短波红外(1.0~2.5 μm)波段的辐射,实现长波红外辐射和短波红外辐射的分离,经聚焦后到相应辐射波段的探测器上,实现长波红外波段和短波红外波段双波段成像。

根据光学系统的要求,分色片的具体指标如下(其中 T_{ave} 与 R_{ave} 分别表示平均透射率与平均反射

收稿日期: 2009-02-19; 收到修改稿日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(60778025)和浙江大学国防预研基金资助课题。

作者简介: 章岳光(1968—),男,副研究员,主要从事光学与光电子薄膜等方面的研究。

E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn

率,45°测量):

短波红外(1.0~2.3 μm)反射率 $R_{\text{ave}} \geq 95\%$;长波红外(8.0~12.0 μm)透射率 $T_{\text{ave}} \geq 90\%$;或者透射波段与反射波段反过来。

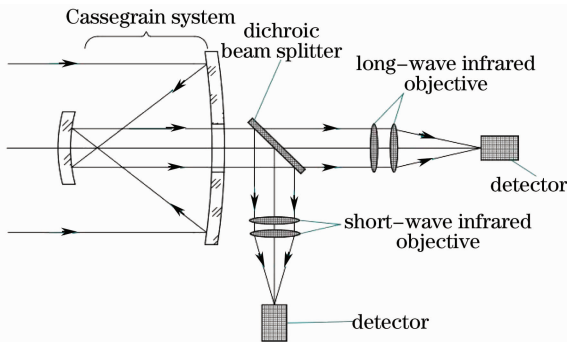


图1 长波红外/短波红外双波段成像光学系统原理图

Fig. 1 Optical system of two-band imaging system

2.2 设计

2.2.1 分色片的选择

对于短波红外/长波红外分色片,可以选择反射短波红外,透射长波红外的长波通方式,也可以选择反射长波红外,透射短波红外的短波通方式。对于前者,基板的选择主要考虑长波红外高透即可,因此可以选择锗(Ge),硫化锌(ZnS)或硒化锌(ZnSe);对于后者,选择短波红外有尽量高透射率的基底材料,如红外石英,ZnSe等就可以满足要求,这里采用ZnSe为基板材料。8.0~12.0 μm 区的反射薄膜,如果选择介质薄膜,则薄膜厚度会很厚,若采用金属介质诱导薄膜^[3],虽然薄膜厚度可以减薄,但含有金属银的膜系环境稳定性差,易发生破裂脱落,另外在短波红外区的诱导增透效果也不够好。相对的长波通方式的厚度可以减少很多,综合考虑,决定采用长波通叠加的方式。

2.2.2 薄膜材料的选择

在短波红外和长波红外同时高透的材料不多,高折射材料可以选择ZnS或ZnSe,低折射率材料主要是氟化物。ZnS和ZnSe是两种很成熟的薄膜材料,ZnSe有较高的折射率。Ge在1.7 μm 以下有明显吸收,但在1.7 μm 以上直至长波红外均有良好的光机性能。常用的低折射率氟化物有氟化钇(YF₃)、氟化钡(BaF₂)、氟化钍(ThF₂)和氟化镱(YbF₃)等,其中ThF₂虽然光机性能优良,却有放射性;YF₃在长波红外大于11 μm 后有较大的吸收^[4~6];BaF₂薄膜的表面粗糙度比较大,在薄膜较厚时会在短波长处产生很大的散射;而YbF₃材料不但在可见至红外波段基本无吸收,还同时具有优

良的机械性能^[7],因此最终选择ZnS,ZnSe和YbF₃作为薄膜材料进行初始设计。

2.2.3 膜系设计

文献中有关红外不同光谱区分色片的报道不多,主要集中在研制中波红外和长波红外分色片^[8],通常采用长波通的方法设计,但没有给出实验结果;另外还有可见/长波红外的分色片^[9],也是采用长波通设计,由于使用了吸收型高折射率膜料硅(Si),因此薄膜在400~600 nm的反射很低。但对短波红外和长波红外进行分束的分色片尚未见文献报道。

由于该分色片的工作波段较宽,在进行膜系设计前需要知道薄膜材料在近红外到长波红外区的光学常数。通过在K9基板和ZnSe基板上沉积薄膜,分别测其透射率和反射率,采用包络线法求得相应波段的光学常数。设计的重点是在保证光学特性的基础上,如何减小薄膜的总厚度,既减少制备难度,提高薄膜的使用寿命,又可以保持基板面形,而且可以降低吸收和散射损耗。

ZnSe和YbF₃在短波红外区均有良好的光机性能,因此以这两种材料作为高低折射率材料配对来设计分色片。由于折射率比太小,反射带要覆盖1.0~2.3 μm 区域,必须四对以上的长波通叠加,膜层数多达50层以上,膜层厚度超过15 μm ,理论平均反射率在97%以上。但实际制备时会有较多的困难,而且层数太多,厚度太厚引起的制备误差和吸收散射损耗将大大增加。而Ge跟YbF₃配对则有很大的折射率比,其反射带宽度为^[10]

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right), \quad (1)$$

式中 n_H 和 n_L 分别为高、低折射率材料的折射率。由Ge/YbF₃组合的折射率可知, Δg 可达0.3,远比ZnSe/YbF₃组合的0.14要大,而且每个反射对的厚度可以大大减薄。因此可以采用Ge/YbF₃配对设计针对1.7~2.5 μm 的反射膜。而1.0~1.7 μm 的波段仍然采用ZnSe/YbF₃反射膜对。

因此膜系设计时把反射1.7~2.5 μm 波长的Ge/YbF₃反射膜堆放在靠近基板侧,同时把反射1.0~1.7 μm 波段的ZnSe/YbF₃膜对放在靠近空气侧,同时为增加薄膜的牢固度,最外层用ZnS材料作为保护层,即初始膜系为

$$S | 0.95(0.5\text{HL}0.5\text{H})^3 0.63(0.5\text{ML}0.5\text{M})^4 \\ 0.5(0.5\text{ML}0.5\text{M})^4 | \text{Air},$$

其中H,M,L分别代表光学厚度为四分之一波长的Ge,ZnSe,和YbF₃,S表示基板侧。最后用商用薄

膜软件作厚度优化即可。

图 2(a)和图 2(b)分别是短波红外及长波红外的设计透射和反射光谱,需要说明的是,设计时要把薄膜材料的色散考虑在内,这时膜层数减少为 17 层,厚度减小到 $3.4 \mu\text{m}$ 。作为对比,表 1 列出了几种不同材料搭配设计的初始结构,优化后的总厚度

及其光学特性。虽然第一种设计的设计反射率相对较低,但考虑其厚度和制备难易情况,仍不失为一种较佳的设计。尽管 Ge 薄膜在 $1.7 \mu\text{m}$ 以下有较大的吸收,分色片在 $1.0 \sim 2.3 \mu\text{m}$ 仍有较高的反射率,平均反射率为 96.5%。

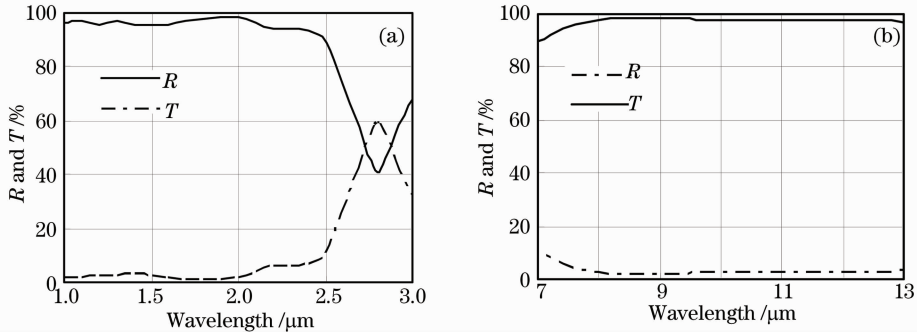


图 2 短波红外及长波红外的设计透射和反射光谱

Fig. 2 Calculation spectrum of the beam splitter for short-wave infrared region and long-wave infrared region

表 1 设计膜系的特性对比

Table 1 Performance comparison of designed multilayer thin films

Coating material	Start design	Total thickness	Rave / %	Tave / %
		/nm	($1.0 \sim 2.3 \mu\text{m}$)	($8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$)
Ge/YbF ₃ /ZnSe	(0.5ML0.5M) ⁴ 0.5(0.5HL0.5H) ⁴	3400	96.4	98.0
Ge/ZnS/ZnSe/ YbF ₃	(0.5MN0.5M) ⁵ 0.72(0.5HL0.5H) ⁸ 0.54(0.5HL 0.5H) ⁸	7500	97.2	98.0
ZnSe/YbF ₃	(0.5HL0.5H) ⁶ 0.8(0.5HL0.5H) ⁷ 0.64(0.5HL 0.5H) ⁷ 0.51(0.5HL0.5H) ⁶	13600	98.5	98.0

3 制备和测试

制备该分色片的关键是严格控制镀膜工艺,降低 Ge 在近红外区的吸收。薄膜的制作是在成都南光机器有限公司生产的 DM-700 型镀膜机上完成的,基板为直径 60 mm 的 ZnSe。镀制的关键是沉积温度和薄膜厚度的控制。由于 ZnSe 的特性对沉积温度很敏感^[1],基板温度不能选的太高,但太低又会影响薄膜的牢固度,故选择基板温度为 $230 \text{ }^\circ\text{C}$,沉积速率为 1 nm/s 。厚度控制既可采用光学监控,也可通过 MDC-360 石英晶振控制仪控制。基板的另一面镀上相应的长波红外减反射膜(45° 入射)。

除光学性能外,薄膜的牢固度和环境稳定性也是红外薄膜的主要考察指标。为提高薄膜的牢固性,必须考虑薄膜材料间的应力匹配问题。薄膜应力受多个因素影响,其中沉积温度是一个主要的控制因素。图 3 和图 4 分别为实验测得的 ZnSe 基板上沉积的 ZnSe 和 YbF₃ 两种材料应力随温度变化的关系,沉积速率均为 1 nm/s 。由图可知,ZnSe 呈

现压应力,而 YbF₃ 为张应力,Ge 的应力特性与 ZnSe 类似。为了选择合适的沉积温度,需要同时考虑 YbF₃ 和 ZnSe 这两种薄膜的应力特点,并且兼顾光学特性。对于 YbF₃ 来说,为了提高薄膜聚集密度,减少水吸收带的影响,需要选择较高的沉积温度,但是对于 ZnSe 来说,当沉积温度超过 $230 \text{ }^\circ\text{C}$,

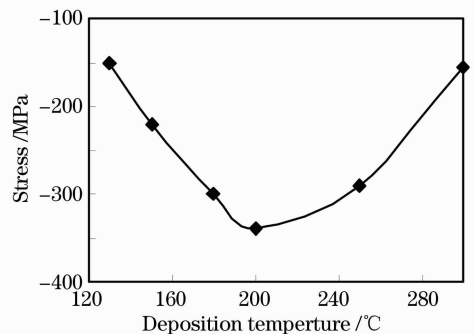


图 3 ZnSe 薄膜应力随沉积温度变化的关系

Fig. 3 Measured total stress of ZnSe films versus deposition temperature

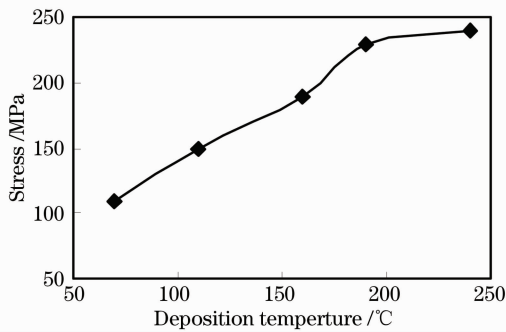


图 4 YbF₃ 薄膜应力随沉积温度变化的关系

Fig. 4 Measured total stress of YbF₃ films versus deposition temperature

成膜概率降低^[12],反蒸发严重,不利于 ZnSe 薄膜生长。综合以上特点,选择沉积温度为 230 °C,这时 YbF₃ 与 ZnSe 应力基本匹配,有利于应力的减小。

短波红外波长的反射率在 PE 公司的 $\lambda 900$ 分光光度计进行,以 45° 入射角测试,以新鲜镀制的银膜作为反射基准,测试曲线如图 5 所示。考虑银反射镜的实际反射率后,1.0~2.3 μm 波长的实测反射率约为 96.2%,与设计值接近。长波红外的透射率测试在傅里叶红外光谱仪上完成。图 6 为 45° 实测透射光谱,长波红外区的平均透射率为 93.2%。和图 2 设计曲线相比,需要注意的是 11 μm 以后,吸收逐渐增大,这可能是由于 YbF₃ 材料不够致密,水气吸附导致的吸收缘故。

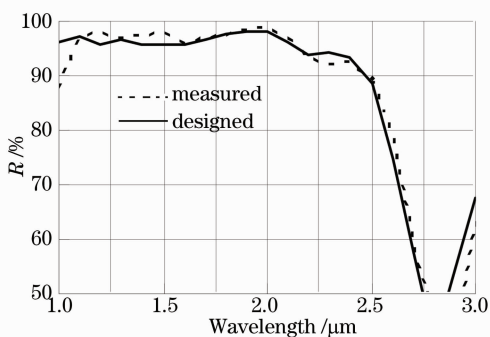


图 5 短波红外波长的反射率测试曲线(45°入射)

Fig. 5 Measured reflectivity of beam splitter in the short-wave infrared region (45° incidence)

对所研制的分色片进行环境实验,分别通过了胶带纸快速撕拉,温度实验(在 -40 ± 2 °C 和 60 ± 2 °C 的温度中各保持 2 h)和湿热实验(在温度为 45 ± 2 °C,相对湿度为 95% 的条件下连续放置 24 h),膜层均无脱落、起泡和龟裂现象,且分色片的反射率和透射率没有下降。

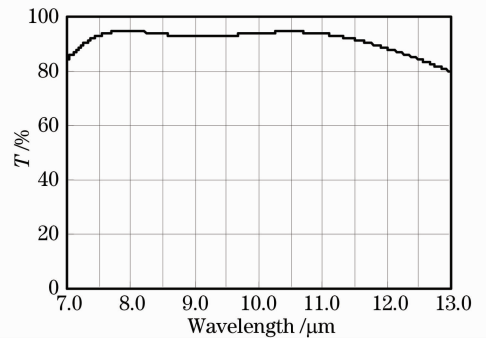


图 6 红外长波区实测透射曲线(45°入射,背面已镀有相应的增透膜)

Fig. 6 Measured transmittance of beam splitter in the long-wave infrared region (45° incidence, antireflective coating was coated on other surface)

4 结 论

在 ZnSe 基板上设计了反射短波红外、透射长波红外的分色片,通过多次实验,膜层的光学特性达到了光学系统的要求并且可经受环境实验的要求,已应用在系统中并取得了良好的效果,为以后工程项目红外光学系统的分色片的批量制备打下了良好的技术基础。

参 考 文 献

- 1 Ma Xiaoyu, Fan Zhihua, Rao Changhui *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in optical readout system of uncooled infrared imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 490~495
马晓焯, 樊志华, 饶长辉 等. 基于哈特曼波前传感器的非制冷红外成像光学读出系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 490~495
- 2 Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun *et al.*. Design of 8 × uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
徐亮, 张国玉, 高玉军 等. 8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481
- 3 Lin Bing, Yu Tianyan, Liu Dingquan *et al.*. Design and deposition of infrared/visible wideband color separation filters[J]. *J. Infrared and Millimeter Wave*, 2004, **23**(5): 393~395
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 F. Lemarquis, G. Marchand, C. Amra. Design and manufacture of low-absorption ZnS-YF₃ antireflection coatings in the 3.5~16 mm spectral range [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4239~4244
- 5 Yu Tianyan, Zhu Furong, Liu Dingquan *et al.*. Design and deposition of broadband IR antireflection coatings on ZnS lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 270~273
于天燕, 朱福荣, 刘定权 等. 硫化锌透镜中中长波红外宽带增透膜的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 270~273
- 6 D. F. Bezuidenhout, K. D. Clarke, R. Pretorius. The optical properties of YF₃ films [J]. *Thin Solid Films*, 1987, **155**: 17~30
- 7 Ying Wang, Yueguang Zhang, Weilan Chen *et al.*. Optical properties and residual stress of YbF₃ thin films deposited at different temperatures [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): c319~c323

- 8 Frederic Lemarquis, Gérard Marchand, Claude Amra *et al.*. Infrared optical filters for the infrared atmospheric sounding interferometer meteorological space instrument[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4182~4188
- 9 Ronald A. Ferrante, Timothy W. Rand, Robert Cabrera *et al.*. Visible/long-wave infrared dichroic beamsplitter [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(6): 063801-4
- 10 Tang Jinfa, Gu Peifu. Optical Thin Film and Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 75~76
- 唐晋发, 顾培夫[M]. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社, 1989. 75~76
- 11 H. R. Dobler. Infrared coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2698~2701
- 12 Elmar Ritter. Optical film material and their applications[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(10): 2318~2327

《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于2009年7月出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于2010年7月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大研究人员征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010年4月15日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn;电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部