

# 红外二向色镜的设计与制备

王一坚 吴晓鸣 李 辛 刘凤玉 套格套

(中航工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

**摘要** 为了实现光谱的有效分离,二向色镜已被广泛应用于各类光学系统。针对多光谱探测系统红外二向色镜,分析了基底和薄膜材料特性,选择了锗(Ge)为基底,锗和硫化锌(ZnS)的膜料组合,以传统的长波通膜系为初始结构,借助于软件优化膜系,并对优化后的膜系进行镀制;对研制的红外二向色镜光谱特性和环境可靠性进行了测试,测试结果表明各项指标均满足系统要求。并已成功应用于红外多光谱探测系统。

**关键词** 薄膜; 二向色镜; 锗

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s116008

## Design and Fabrication of Infrared Dichroic Beam Splitter

Wang Yijian Wu Xiaoming Li Xin Liu Fengyu Tao Getao

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment of Aviation Industry Corporation of China,  
Luoyang, He'nan 471009, China)

**Abstract** In order to separate the spectrum, dichroic beam splitter has been widely used in various types of the optical system. Based on the infrared dichroic beam splitter of many-spectrum detect systems, the substrate and coating materials are analyzed. Ge and ZnS are chosen as coating materials and Ge as substrate. The initialization configuration of traditional long-wavelength pass filter is optimized by software, and optimum configuration is coated. The spectral performance and environment qualities of infrared dichroic beam splitter are tested. The results show that it meets the requirement of optical system. Such infrared dichroic beam splitter has been successfully applied to many-spectrum detect systems.

**Key words** thin films; dichroic beam splitter; germanium

**OCIS codes** 310.1860; 260.3060; 160.4670; 330.6110

## 1 引 言

随着现代光电武器的不断发展,工作于单一宽波段的热红外探测器经常会受到背景热杂波信号的干扰,并且在昼夜、夜昼交替的两个温度变化时刻,目标和背景的宽波段辐射差异基本为零,处于不可用状态。为克服单一波段热红外探测这一弱点,实现目标的有效识别,多光谱探测技术运用而生。作为多光谱探测系统中的关键元件,二向色镜(反射光与透射光具有不同的光谱成份)引导入射光束分别进入不同的探测器<sup>[1]</sup>,实现了光谱成分的有效分离。本文对多光谱探测系统中红外二向色镜的设计与制备进行了研究。

## 2 红外二向色镜的设计

某型多光谱探测系统对红外二向色镜的要求:入射角为  $45^\circ$  的情况下,对  $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$  波段的平均透射率不小于  $96\%$ ,同时对  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$  波段的平均反射率不小于  $96\%$ 。从光谱特性可知,二向色镜需反射红外中波,透射红外长波,在光学薄膜范畴属长波通滤光膜<sup>[2]</sup>。

### 2.1 基底材料的选择

目前,常用的红外中波和长波基底材料主要有:硫化锌(ZnS)、氟化钙( $\text{CaF}_2$ )、硒化锌(ZnSe)、锗(Ge)、硅(Si)。材料的相关特性<sup>[3]</sup>参见表 1。

由表 1 可知 Si 的努氏硬度最高,但在  $9\ \mu\text{m}$  后不透光,ZnS、ZnSe 和  $\text{GaF}_2$  的透光范围覆盖红外中

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-12-01

基金项目: 航空科学基金(2009zc13)

作者简介: 王一坚(1984—),男,硕士,工程师,主要从事光学薄膜设计与制造方面的研究。

E-mail: wangyijianman@126.com

波和长波,但材料硬度低。综合上述材料特性,在满足透光范围的前提下,选择努氏硬度较高,易于加工的 Ge 作为基底材料。

表 1 基底材料特性

Table 1 Material characteristic of substrate

Material	Transparency / $\mu\text{m}$	Hardness /(Kg/mm <sup>2</sup> )	Melting point / $^{\circ}\text{C}$
ZnS	0.4~14	250	1800
CaF <sub>2</sub>	0.15~12	170	1402
ZnSe	0.55~15	160	1700
Ge	1.7~23	780	936
Si	1~9	1150	1420

### 2.2 薄膜材料的选择

在 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  和 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  双波段常用的镀膜材料有:Ge、ZnSe、ZnS、氟化镱(YbF<sub>3</sub>)和氟化钇(YF<sub>3</sub>)等<sup>[4]</sup>。Ge 为高折射率膜料,也是常用的红外中波和长波半导体材料,具有良好的光机特性。ZnS 为中等折射率材料,是红外区的重要镀膜材料,常与氟化物或高折射率的半导体材料组合。ZnSe 折射率略高于 ZnS,由于膜料结构松软<sup>[5]</sup>,镀制的膜层强度差,在膜系设计和镀制过程中常用 ZnS 代替 ZnSe。YbF<sub>3</sub> 和 YF<sub>3</sub> 为低折射率膜料,国内外研究表明<sup>[6-8]</sup>在同等厚度的情况下,YF<sub>3</sub> 比 YbF<sub>3</sub> 有更大的内应力,使得膜层更容易龟裂脱膜,就解决膜层牢固度而言,YbF<sub>3</sub> 比 YF<sub>3</sub> 更具有优势。因此,可供选用的镀膜材料有 Ge、ZnS 和 YbF<sub>3</sub>,形成高低折射率搭配的膜料组合有 Ge/YbF<sub>3</sub>、ZnS/YbF<sub>3</sub> 和 Ge/ZnS。

### 2.3 膜系设计

依据红外二向色镜的光谱特性,膜层的初始膜

系为长波通结构(0.5HL0.5H)<sup>n</sup>,H 代表高折射率材料,L 代表低折射率材料。则截止带半峰全宽<sup>[9]</sup>为

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

式  $n_H$  和  $n_L$  分别为高、低折射率材料的折射率。相应的反射区域为  $1 + \Delta g$  至  $1 - \Delta g$ ,相应的波长范围为  $\lambda_1 = \lambda_0 / (1 + \Delta g)$  至  $\lambda_2 = \lambda_0 / (1 - \Delta g)$ , $\lambda_0$  为中心波长,则反射带宽度为

$$\Delta \lambda = \lambda_0 / (1 - \Delta g) - \lambda_0 / (1 + \Delta g) \approx 2\Delta g \lambda_0. \quad (2)$$

取中心波长  $\lambda_0$  为 4000 nm,由(2)式可知 Ge/YbF<sub>3</sub> ( $n_{\text{Ge}} = 4.0, n_{\text{YbF}_3} = 1.45$ )组合的膜系反射带带宽为 2480 nm,Ge/ZnS( $n_{\text{Ge}} = 4, n_{\text{ZnS}} = 2.2$ )组合的膜系反射带带宽为 1500 nm,ZnS/YbF<sub>3</sub> ( $n_{\text{ZnS}} = 2.2, n_{\text{YbF}_3} = 1.45$ )组合的膜系反射带带宽为 1054 nm。红外二向色镜的反射波段为 3700~4800 nm,带宽为 1100 nm,显然,ZnS/YbF<sub>3</sub> 组合的反射带带宽不满足系统要求。由于氟化物膜层是多孔柱状、低密集度的软膜,容易吸收水汽,导致元件的可靠性变差<sup>[10]</sup>,且制备的膜层应力大,对于蒸镀多层膜来说,膜层很容易开裂。综合考虑,Ge/ZnS 是制备红外二向色镜最佳膜料组合。

膜系(0.5HL0.5H)<sup>9</sup>,其中 H 为 Ge,L 为 ZnS,通过软件优化膜系,膜层层数降至 15 层,靠近基底的第一层和最外层均为 ZnS,总厚度约为 6.6  $\mu\text{m}$ ,忽略基底背面增透膜的影响,理论计算的光谱特性曲线见图 1。在 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  波段的平均反射率约为 99%,在 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  波段的平均透射率为 98%。

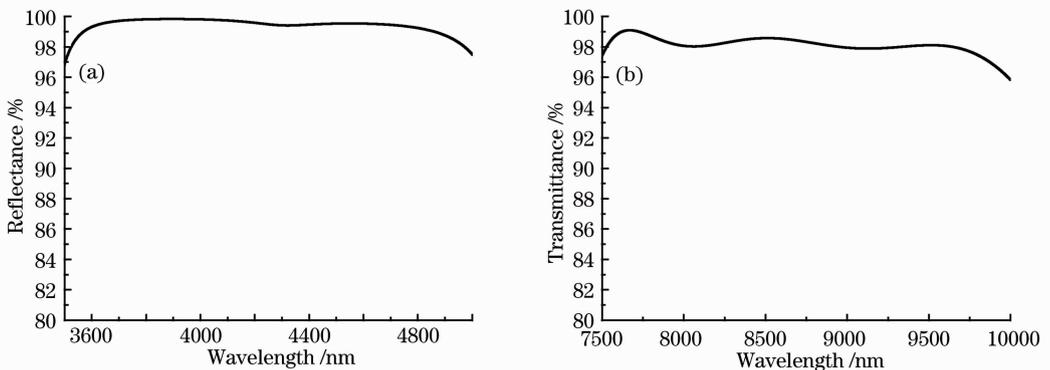


图 1 二向色镜(a)反射率和(b)透射率的理论光谱曲线

Fig. 1 Theoretical (a) reflectance and (b) transmittance curve of dichroic beam splitter

## 3 红外二向色镜膜层制备与测试

膜层的镀制试验在 optorun OTFC-1300 设备上,该设备具有冷凝泵系统、行星转动装置、射

频(RF)源,膜层厚度采用光比例监控,各层的停镀点均避开极值点,以提高膜层的监控精度。镀前采用 RF 源对基底进行轰击,基底烘烤温度为

200 °C ± 10 °C, 膜层镀制过程中的本底真空度为  $1.5 \times 10^{-3}$  Pa, Ge 膜料采用电子枪蒸镀, ZnS 采用煮舟热蒸发。淀积速率 Ge 控制在 0.5 nm/s 以内, ZnS 的控制 在 1 nm/s 以内。在红外二向色镜的另一面镀制 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  波段减反膜。

膜层的光谱特性测试是在 PerkinElmer 公司生产的 Spectrum GX 型傅里叶变换红外光谱仪上完成的。其基本性能指标是:光谱范围为  $10000 \sim 370 \text{ cm}^{-1}$ ;分辨率为  $0.2 \sim 64 \text{ cm}^{-1}$ 。测试中波反射光谱曲线时,采

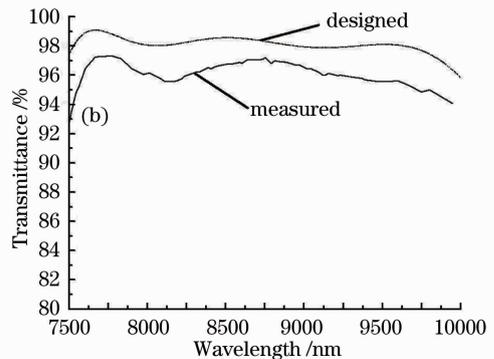
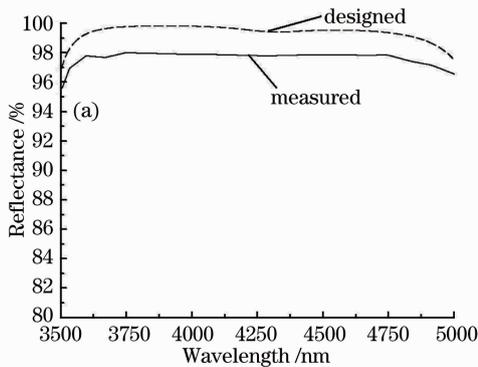


图 2 二向色镜的(a)实测反射率和(b)透射率曲线(45°入射)

Fig. 2 (a) Measured reflectance and (b) transmittance curves of dichroic beam splitter(45° incidence)

从图 2 可知,实测光谱曲线与理论设计差异主要表现在 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  波段,分析存在以下几个方面的原因:1)膜层镀制过程中厚度的监控存在一定误差;2)理论设计忽略了基底另一面增透膜的影响;3)ZnS 膜层在 9.0  $\mu\text{m}$  以后吸收逐渐增大,且镀制的 ZnS 膜层较厚,致使实测光谱在 9.0  $\mu\text{m}$  开始透射率快速下降。

## 4 环境可靠性测试

为保证红外二向色镜膜层质量的可靠性,依据 GJB 2485-95 对与样品同一批次的试片进行附着力和环境实验,实验结果和内容为:

### 1) 附着力试验

用 2 cm 宽剥离强度不小于 2.74 N/cm 胶带纸牢牢粘在膜层表面上,垂直迅速拉起后,无脱膜现象。

### 2) 盐溶性试验

将试片在室温(16 °C ~ 32 °C)下,放入质量分数为 4.5% 的食盐溶液浸泡 24 h,取出后用蘸酒精乙醚混合液的脱脂棉花擦拭,无脱膜现象。

### 3) 高低温试验

将试片暴露在  $-62 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  和  $70 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  的温度中各保持 2 h(温度的变化率不得超过  $2 \text{ °C/min}$ ),再放置到室温(16 °C ~ 32 °C)后,膜层无起皮、脱膜、

用镀有铝膜样品作为标定片,测试曲线考虑了铝膜反射率;由于样品尺寸小于通光口径,测试长波透射光谱曲线时,在测量光路中引入光阑,测试前先对仪器进行 100% 校正,然后放置样品进行测量。测试结果见图 2。红外二向色镜在 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  波段的平均反射率接近 98%;在 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  波段的最低透射率为 95.2%,峰值透射率为 97.22%,平均透射率高于 96%。

裂纹、起泡等缺陷。

## 5 结 论

通过材料特性分析,红外二向色镜选用机械特性好的 Ge 为基底材料,Ge 和 ZnS 膜料组合;所研制的红外二向色镜在 3.7~4.8  $\mu\text{m}$  波段的平均反射率接近 98%;在 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  波段的最低透射率为 95.2%,峰值透射率为 97.22%,平均透射率高于 96%。膜层附着力、盐溶性和高低温等环境可靠性测试结果满足 GJB 2485-95 要求。最终研制的红外二向色镜在红外多光谱探测系统中得到应用。

## 参 考 文 献

- Zhang Yueguang, Wang Ying, Sun Xuezheng, *et al.*. Design and fabrication of short-wave/long wave infrared dichroic beam splitter [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 597-601.  
章岳光,王颖,孙雪铮,等. 红外短波/长波分色片的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 597-601.
- Li Gang, Du Juan, Tian Qiu, *et al.*. The design and fabrication of 8~11.5  $\mu\text{m}$  filter film on Ge substrate [J]. Infrared Technology, 2008, 30(3): 139-142.  
李刚,杜娟,田湫,等. Ge 基底 8~11.5  $\mu\text{m}$  长波通滤光膜的研制[J]. 红外技术, 2008, 30(3): 139-142.
- Yu Huaizhi. Infrared Optical Material [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 148-149.  
余怀之. 红外光学材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 148-149.
- Pan Yongqiang, Zhu Chang, Hang Lingxia, *et al.*. Double

- wavelength ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$  and  $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ) high performance infrared anti-reflection coatings on germanium substrate[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(5): 372-374.
- 潘永强, 朱 昌, 杭凌侠, 等. 锗基底  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  双波段红外增透膜研究[J]. *激光与红外*, 2004, 34(5): 372-374.
- 5 Pan Yongqiang, Zhu Chang. High performance infrared antireflection films on ZnSe substrate for  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 394-396.
- 潘永强, 朱 昌. 硒化锌基底  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  高性能增透膜的研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(4): 394-396.
- 6 He Caimei, Fu Xiuhua, Zhang Jiabin, *et al.*. Study and fabrication of visible and IR dual-band broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2929-2933.
- 贺才美, 付秀华, 张家斌, 等. 可见与红外双波段宽带增透膜的研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2929-2933.
- 7 Colin Cole. Broadband Antireflection Coatings for Spaceflight Optics [D]. UK: University of Reading Department of Cybernetics, 1995. 10-20.
- 8 Moriaki Wakaki, Keiei kudo, Takehisa Shibuya. Physical Properties and Data of Optical Materials[M]. Japan: CRC Press, 2010. 143-144.
- 9 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 110-111.
- 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. 110-111.
- 10 Wang Yizhe, Zhu Furong, Zhang Fengshan. Design and fabrication of wide three band infrared antireflection coatings for Ge window from  $3.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 32-34.
- 王懿哲, 朱福荣, 张凤山.  $3.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  三波段宽带红外 Ge 窗口多层增透膜的研制[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(1): 32-34.

栏目编辑: 韩 峰