

文章编号: 1001-9014(2009)04-0307-04

可见光 + 1.54 μm 激光/长波红外分色片的设计和制备

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: 可见 + 1.54 μm 激光/长波红外分色片分离可见光、激光和长波红外光, 在多通道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, 优化设计并用电子束蒸发法制备了该分色片, 其反射率和透射率都达到了 94% 以上, 已成功应用于实际光学系统.

关键词: 光学薄膜; 分色片; 多通道成像技术

中图分类号: TB443 **文献标识码:** A

DESIGN AND FABRICATION OF VISIBLE + 1.54 μm LASER/ LONGWAVE INFRARED DICHROIC BEAMSPLITTER

ZHANG Yue-Guang, WANG Ying, SUN Xue-Zheng, SHEN Wei-Dong, LIU Xu, GU Pei-Fu
(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Visible + 1.54 μm laser/longwave infrared dichroic beamsplitters, which separate the incident spectrum into visible light, laser and longwave infrared light, take an important role in multichannel imaging spectrum technique. The choice of substrates and coating materials was discussed. Then the coating design of reflecting the visible (400 ~ 800nm) and laser (1540nm) light while transmitting the longwave infrared (8 ~ 12 μm) spectrum was analysed, and the beamsplitter was manufactured by e-gun evaporation. The measured reflectivity and transmittance of the corresponding channel are all above 94% and the dichroic beamsplitters has been used in practical optical system successfully.

Key words: optical thin film; dichroic beamsplitter; multichannel imaging spectrum technique

引言

目前, 随着光电武器系统的发展, 多通道成像光电系统正逐渐应用于各种光电武器平台, 在新型红外成像技术的研发上, 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、双色偏振红外成像发展, 上述新型的红外成像技术要求与激光测距兼容或与电视兼容^[1]. 通常的光学系统都是对某一特定波长设计的, 不能包含较宽的波段范围. 三光合一光电系统就是将可见光 ($\lambda = 0.4 \sim 0.8\mu\text{m}$)、激光 ($\lambda = 1.54\mu\text{m}$)、红外 ($\lambda = 3.0 \sim 5.0\mu\text{m}$ 或 $\lambda = 8.0 \sim 12.0\mu\text{m}$) 三种不同的波段, 共一个折射光学系统的一种多波段光电系统. 这种光电系统具有结构紧凑、同轴度好、光轴稳定性好等优点. 该技术可广泛应用于机载 (光雷、吊舱、转塔等) 系统及车载、舰载武器的光电指挥系统、光电火控系统和光电跟踪

系统.

在研究该系统的过程中, 多个关键元件以及技术难题, 其中之一就是分光膜的研制. 由于系统采用共口径的光学系统, 用于分离红外波段与激光或可见光波段的红外分光膜的研制是无法避免的.

可见 + 激光/长波红外三光合一光学系统原理如图 1 所示, 入射辐射经全反射卡塞格林系统后, 口径被压缩, 经 (可见光 + 激光)/长波红外分色片后, 透射长波红外 (8.0 ~ 12.0 μm), 反射可见光 (0.4 ~ 0.8 μm) 和激光 (1.54 μm), 实现可见光 + 激光与长波红外的分离; 可见光和激光经可见光/激光分色片后, 透射激光, 反射可见光, 实现可见光和激光的分离; 三光分别聚焦到相应辐射波段的探测器上, 经图像融合后得到三光合一图像.

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: 2008-08-11, 修回日期: 2009-02-12

基金项目: 国家自然科学基金 (60778025) 资助项目

作者简介: 章岳光 (1968-), 男, 浙江诸暨人, 副教授, 主要从事光学与光电子薄膜的研究.

Received date: 2008-08-11, revised date: 2009-02-12

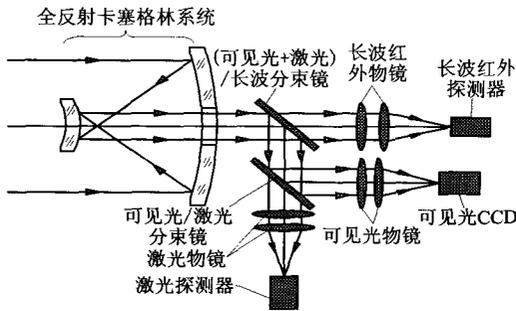


图1 (可见光+激光)/长波红外三光合一光学系统原理
Fig.1 The optical system principle of multichannel imaging system

率,45°测量):

可见光区 $0.40 \sim 0.80 \mu\text{m}$ 和激光波长 $1.54 \mu\text{m}$, 平均反射率 $R_{\text{ave}} \geq 95\%$; 长波红外 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 透射率 $T_{\text{ave}} \geq 90\%$; 或者透射波段与反射波段反过来。

1 设计

1.1 分色片的选择

对于可见光 + $1.54 \mu\text{m}$ 激光/长波红外分色片, 可以选择反射可见光和 $1.54 \mu\text{m}$ 激光, 透射长波红外, 即长波通方式; 也可以选择反射长波红外, 透射可见区和 $1.54 \mu\text{m}$ 激光, 即短波通方式。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, 硫化锌或硒化锌; 对于后者, 选择在可见区和 $1.54 \mu\text{m}$ 有尽量高透射率的基底材料, 如熔融石英, K9 玻璃等就可以满足要求。 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 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^[2], 一是承受不了激光照射, 含有金属银的膜系也不易通过环境试验, 另外也很难同时在可见区和 $1.54 \mu\text{m}$ 都达到诱导增透效果。综合考虑, 决定采用长波通叠加的方式。

1.2 薄膜材料的选择

在 ZnSe 基板上镀可见光和激光波长高反射, 长波红外高透射分色片, 其难点在于可选用的薄膜材料太少, 除了氟化物(低折射率)外, 没有其它材料可以在上述三个波段同时高透明而没有吸收。高折射率材料只能选择 ZnS 或 ZnSe, 这是两种很成熟的薄膜材料。ZnSe 有较高的折射率, 可以减小薄膜的总厚度, 但在可见光短波区有较大的吸收; 相对而言, ZnS 在可见光的吸收比 ZnSe 小, 可用于短波段。低折射率材料主要有氟化物, 如 YF_3 , BaF_2 或 YbF_3 等, YF_3 在可见光区有较大的吸收^[3,4], 而 BaF_2 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 YbF_3 材料不但具有良好的光学性能, 其机械性能也很好^[5], 与 ZnS, ZnSe 匹配良好。因此最终选择 ZnS, ZnSe 和 YbF_3 作为薄膜材料进行设计。

1.3 膜系设计

文献中有关红外和可见区分色片的报道不多, 主要是中波红外和长波红外分色片^[6], 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^[7], 也是采用长波通设计, 由于使用了吸收的高折射率 Si 膜料, 因此薄膜在 $400 \sim 600 \text{nm}$ 的反射率很低。本文所述分色片则是需要对可见区 + $1.54 \mu\text{m}$ 激光和长波红外进行分束。

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可见光到近红外及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。设计时主要考虑减小薄膜在可见光区的吸收和散射损耗, 因为 $1.54 \mu\text{m}$ 激光是作为测距用的, 能量并不高, 上述薄膜材料在该激光波长损耗较小, 不会引起薄膜的损坏。因此膜系设计时把该波长的反射膜放在靠近基板侧, 同时把反射可见光短波段的膜对放在靠近空气侧, 该膜对高折射率材料用 ZnS, 其余膜对高折射率材料用 ZnSe, 以减小薄膜总厚度。

在选定了使用的镀膜材料以后, 下一步的工作就是进行膜系设计。设计的理论依据为多层膜的特征矩阵计算法^[8]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j,$$

$$\eta_j = \begin{cases} N_j / \cos \theta_j & \text{— } p \text{ 偏振} \\ N_j \cos \theta_j & \text{— } s \text{ 偏振} \end{cases},$$

其中, δ 为薄膜的位相厚度, N 为薄膜的复折射率, d 为薄膜的物理厚度, θ 为光束在薄膜内的折射角, η 为等效导纳, 矩阵定义为基片和薄膜组合的特征矩阵。式(1)是光学薄膜计算的理论基础, 可以得出一个给定膜系的全部光学特性。

为增加薄膜的牢固度, 最外层用 ZnS 材料作为保护层, 这样初始膜系可以表示为

$$\text{S} / 1.05 (.5 \text{NL}.5 \text{N})^6 .47 (.5 \text{NL}.5 \text{N})^6 .36 (.5 \text{NL}.5 \text{N})^6 .28 (.5 \text{HL}.5 \text{H})^7 / \text{Air}$$

其中, H 代表 ZnS, N 代表 ZnSe, L 表示 YbF_3 , S 表示

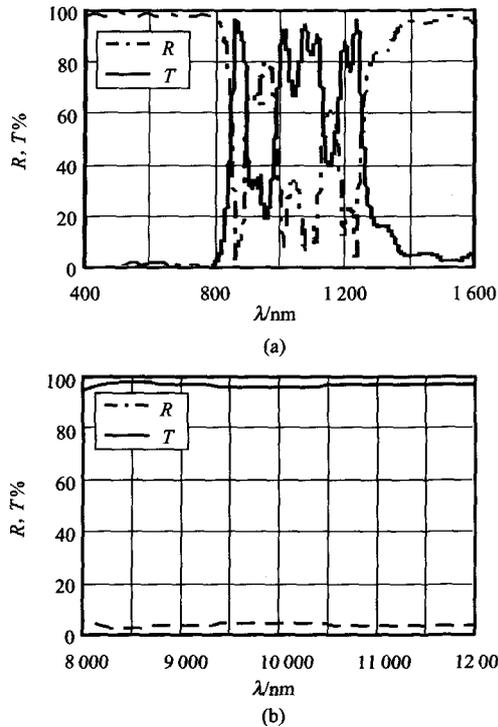


图2 可见光和激光波长 (a) 及长波红外 (b) 的设计透射和反射光谱
 Fig.2 The calculated spectrum of beamsplitter (a) for visible and laser region (b) for longwave infrared region

基板侧. 最后的膜系用商用薄膜软件, 采用单纯形法作厚度优化即可得到. 图2 为设计的光谱反射曲线, 可以看到尽管 ZnS 薄膜有较大的吸收, 在 400nm 附近分色片仍有较高的反射率.

2 制备和测试

制备该分色片的关键是严格控制镀膜工艺, 降低可见区的吸收和散射损耗. 薄膜的制作是在成都南光生产的 DM-700 型镀膜机上完成的, 基板为直径 60mm 的硒化锌. 镀制的关键是沉积温度和薄膜厚度的控制. 由于 ZnS 的特性对沉积温度很敏感^[9], 故选择基板温度为 150°. 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).

可见光区的反射率在实验室自制的反射率仪上测试, 以 45°角度入射, 分别测试 p 光和 s 光的反射率再平均得到, 测试结果见图 3 所示, 400 ~ 800nm 的平均反射率为 94.0%. 对比设计曲线, 发现在 480nm 和 610nm 附近, 有两个反射率低谷, 刚好与三个反射膜对交接波长相对应, 这可能与光控时多

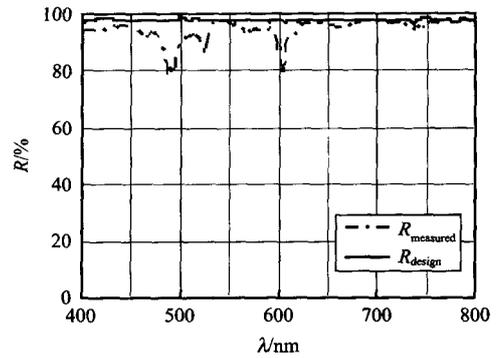


图3 可见光区反射实测曲线(45°入射)
 Fig.3 Measured reflectivity of beamsplitter in the visible region(45° incidence)

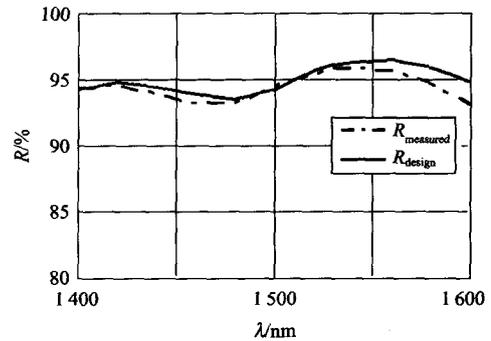


图4 激光波长的反射率测试曲线(45°入射)
 Fig.4 Measured reflectivity of beamsplitter in laser wavelength(45° incidence)

次替换监控片, 高折射率材料在监控片上和基片上凝聚系数不一引起的误差所致.

1540nm 激光波长的反射率在 PE 公司的 λ900 分光光度计上进行, 以 45°入射角测试, 以新鲜镀制的银膜作为反射基准, 测试曲线见图 4, 反射率值已经换算过, 可以看到, 实测曲线与设计曲线基本相符, 只是波长稍偏短一些. 考虑银反射镜的实际反射率后, 波长为 1540nm 处实测反射率约为 95.5%.

长波红外的透射率测试在傅里叶红外光谱仪上完成. 图 5 为长波红外区的实测曲线, 实线为 0°入射测得的透射光谱, 虚线为 45°入射测得的反射率, 因此透射极大值波长与反射极小值波长并不重合. 从反射曲线可以看到, 分色片在 8.0 ~ 12.0μm 区的平均反射率小于 4.0%, 结合透射曲线, 可以看到该区域损耗较小. 需要注意的是 11μm 以后, 吸收逐渐增大, 这可能是由于 YbF₃ 材料不够致密, 水汽吸附导致的水吸收的缘故.

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

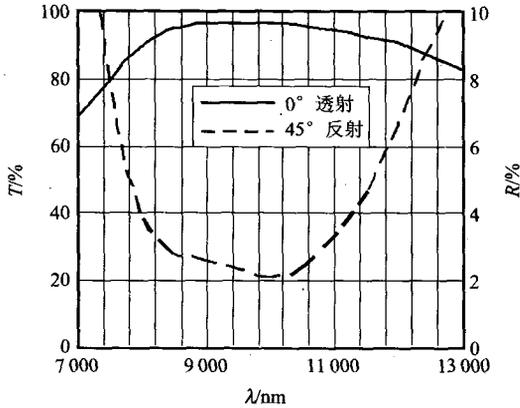


图5 红外长波区实测透射曲线(0° 入射)和反射曲线(45° 测试)(基片背面已镀相应的宽带增透膜)

Fig. 5 Measured transmittance (0° incidence, solid line) and reflectivity (45° incidence, dashed line) of beamsplitter in long-wave infrared (AR coating was deposited on the other side of the substrate)

$\pm 2^\circ\text{C}$ 的温度中各保持 2h) 和湿热实验(在温度为 $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 95% 的条件下连续放置 24h), 膜层均无脱落、起泡和龟裂现象, 且分色片的反射率和透过率没有下降。

3 结语

在硒化锌基板上设计了反射可见光和 1540nm 激光, 透射长波红外的分色片。通过多次实验, 膜层的特性达到了光学系统的要求并且可经受环境试验的要求, 已应用在系统中并取得了良好的效果, 为以后工程项目中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。

REFERENCES

- [1] CHANG Jun, LIU Li-Ping, WANG Yong-Tian, *et al.* Dual band infrared optical system with large field of view and aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常军, 刘莉萍, 王涌天, 等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(3): 170—172.
- [2] LIN Bing, YU Tian-Yan, LIU Ding-Qua, *et al.* Design and deposition on of infrared/visible wideband color separation filters[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林炳, 于天燕, 刘定权, 等. 红外/可见光宽带分色片设计与制备. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5): 393—395.
- [3] Lemarquis F, Marchand G, Amra C. 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.
- [4] Bezuidenhout D, Clarke K, Pretorius R. The optical properties of YF₃ films[J]. *Thin Solid Films*, 1987, **155**: 17—30.
- [5] WANG Ying, ZHANG Yue-Guang, CHEN Wei-Lan, *et al.* Optical properties and residual stress of YbF₃ thin films deposited at different temperatures[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): 319—323.
- [6] Lemarquis F, Marchand Ge' rard, Amra C, *et al.* Infrared optical filters for the infrared atmospheric sounding interferometer meteorological space instrument[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4182—4188.
- [7] Ronald A F, Timothy W R, Robert C, *et al.* Visible/long-wave infrared dichroic beamsplitter[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(6), 063801—4.
- [8] TANG Jin-Fa, GU Pei-Fu. *Optical Thin Film and Technology* [M]. Beijing: Mechanical Industrial Press (唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社), 1989, 19—21.
- [9] Dobler H R. Infrared coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2698—2701.