

组合套镀法制备 2.0~2.4 μm 波段 8 通道微型集成滤光片

罗海瀚 李耀鹏 蔡清元 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 利用组合套镀法布里-珀罗结构光学薄膜滤光片间隔层的方法,选取锗和一氧化硅分别作为高低折射率膜层材料,在短波红外区域 2.0~2.4 μm 光谱范围内,设计并制备了 8 通道集成窄带滤光片,单个光谱通道的有效透光区域的宽度为 450 μm ,其间有 30 μm 的挡光过渡带。各通道的峰值光谱透射率大于 65%,滤光片的半峰全宽为 8~13 nm,相对带宽在 0.33%~0.65%之间。

关键词 薄膜;光学薄膜;集成滤光片;间隔层;组合套镀

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1107001

Fabrication of 8-Channel Micro Integrated Filter in 2.0~2.4 μm by Combine Masks and Plating

Luo Haihan Li Yaopeng Cai Qingyuan Liu Dingquan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Using the method to combine masks and plating the spacer layer of the Fabry-Perot filter, germanium and silicon oxide are selected as the high and low index coating materials, 8-channel integrated filter is designed and fabricated with an effective light-transmitting width of 450 μm separated by a block of 30 μm for each channel in the spectral regions of 2.0~2.4 μm . For each channel, the maximum transmittance is greater than 65%, the full width at half maximum (FWHM) is 8~13 nm, as well as, the relative bandwidth is between 0.33%~0.65%.

Key words thin film; optical film; integrated filter; spacer layer; combine masks and plating

OCIS codes 310.6870; 160.4760; 310.6860; 230.4170

1 引言

高光谱技术通常是指将几十个光谱通道集中在一个光学通道上的技术。高光谱遥感技术^[1,2]与传统的全色、多光谱遥感相比,在地物识别方面具有明显的优势。20 世纪 80 年代初期高光谱遥感技术出现后,在许多发达国家发展迅速,应用领域也日趋广泛并更加成熟。研制出多通道的高光谱红外集成滤光片与面阵探测器配合,使光谱仪缩小体积、减轻重量、提高可靠性,成为一项对于空间等特殊应用非常重要的关键技术^[3]。

带通滤光片^[4]以及单个高光谱滤光片的研制已经十分成熟,但是对于将多个分辨率高,尺寸微小的滤光片集成在一个基片上,同时保证良好的滤光片性能指标是十分困难的工作。而滤光片数量的增多

和性能指标的相互影响,使得薄膜制备的成品率呈指数下降。许多薄膜科研工作者致力于多通道滤光片的研究,有人采用法布里-珀罗(F-P)滤光片中缺陷层厚度变化对通道数目、位置的影响形成多通道^[5];也有人提出过线性渐变滤光片^[6,7],希望通过探测器和滤光片的位置对准,从而在一个滤光片上对多个中心波长位置进行测量;也有采用组合套刻的方法在一个基片上形成阶跃滤光片的方法制作了多通道滤光片^[8~13]。这些方法各自具有特色,也取得了一定的成果。

本文通过采用组合套镀的方法,通过多次在光刻胶掩膜形成的图形上套镀一定厚度的间隔层形成阶跃滤光片的方法,在 2.0~2.4 μm 光谱范围内,制备了 8 通道集成滤光片。组合套镀的方法可以实

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-07-05

作者简介: 罗海瀚(1984—),男,博士,主要从事薄膜光学与技术等方面的研究。E-mail: jxndlhh@sina.com

现对间隔层台阶高度的精确控制。相对于之前的组合套刻的方法,它可以解决刻蚀对薄膜材料的限制,使得集成滤光片制备从镀膜、光刻、刻蚀三种制备技术减少为只需要镀膜和光刻两种制备技术,提高实际可操作性。

2 基本原理和膜系设计

红外集成滤光片是根据 F-P 多光束干涉仪制成的干涉膜系。F-P 干涉仪是由两块相同的、间距为 d 的平行反射板组成。当两块反射板具有同样高的反射率时,干涉仪对某一波段实现高透,中间间距 d 的位置称为间隔层,调整间隔层的厚度,可以改变高透的波长范围。

根据膜系的特征矩阵方程^[14]

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

式中 η_j 为第 j 层薄膜的有效导纳, δ_j 为膜层的相位厚度,且 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$ 。膜系的透射率为

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (2)$$

式中 η_0 为入射介质的导纳。

对于 F-P 型的滤光片,有经典公式:

$$\begin{cases} T = T_0 / (1 + F \sin^2 \theta) \\ T_0 = T_1 T_2 / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 \\ F = 4 \sqrt{R_1 R_2} / (1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 \\ \theta = (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta) / 2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 R_1, R_2, T_1 和 T_2 分别表示上、下反射膜系的反射率和透射率, φ_1 和 φ_2 为上、下反射膜系的反射相位,而 δ 为间隔层的相位厚度。

透射率的极大值位置,即中心波长 λ_0 可确定为

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \left(\varphi_1 + \varphi_2 - 2 \frac{2\pi}{\lambda} n d \right) = -k\pi, \quad (4)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + [(\varphi_1 + \varphi_2) / (2\pi)]} = \frac{2nd}{m}, \quad (5)$$

式中 $m = k + (\varphi_1 + \varphi_2) / (2\pi)$ 。通过(5)式,得出通过改变间隔层的厚度,即可以调整中心波长的位置。

基于上述理论原理,在 $2.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 的红外光谱范围内设计 8 个通道。设计中,考虑到后续研究工作中光谱通道的增加和光谱波段的扩展。同时,考虑到红外探测器(如 PbSe 等)在 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 这个光谱波段内探测响应随波长增加而递增。故选取

基础膜系的参考中心波长为 2373 nm ,设计膜系为 $S | \text{HLHLHL} \ x\text{H} \ \text{LHLHLHL} | \text{A}$ 。其中 S 表示基片为 Al_2O_3 (宝石片),折射率 $n_s = 1.70$ 。A 表示入射介质即空气,L 表示 $1/4$ 中心波长光学厚度的低折射率膜层,材料为 $\text{SiO}_2, n_L = 1.79$ 。H 表示 $1/4$ 中心波长光学厚度的高折射率膜层,材料为 $\text{Ge}, n_H = 4.1$ 。 $x\text{H}$ 表示 F-P 滤光片的间隔层,其中 x 为间隔层厚度的修正系数。

设计相邻波段的间隔层物理厚度差为 10 nm ,间隔层厚度从 216 nm 变化到 286 nm ,相应的中心波长在 $2.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 之间。使用 Film Wizard 膜系设计软件,膜系设计曲线如图 1 所示。

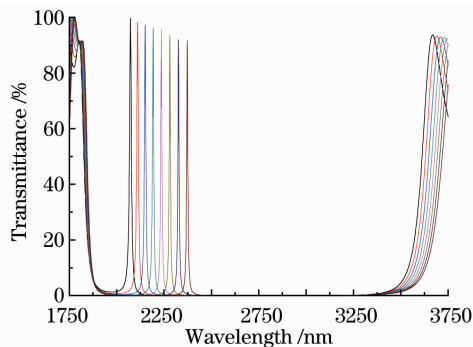


图 1 不同的间隔层厚度条件下的透射率设计曲线
Fig. 1 Transmittance designed curve at different spacer layer thicknesses

从图 1 可见,在不考虑薄膜材料光学色散和基片背面反射的条件下,在 $2.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 波段内设计的各通道透射率均在 90% 以上,带宽在 $8 \sim 13 \text{ nm}$ 范围,相对带宽在 $0.3\% \sim 0.6\%$ 范围。该膜系具有良好的窄带滤波性能,属于高光谱滤光片。光谱峰值透射率随波长增加略有降低,这是因为在薄膜最外层镀制了一层低折射率匹配层的关系。这正好可以和探测器的响应规律互补,并可以使光谱透射率

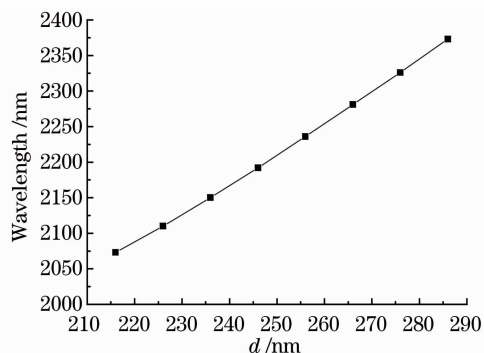


图 2 间隔层厚度与峰值波长的对应关系
Fig. 2 Relationship between spacer layer thickness and peak wavelength

得到提高。设计曲线在 2.5~3.2 μm 波段的截止带可以方便以后对集成滤光片覆盖的光谱范围进行扩宽。

图 2 是设计的各通道峰值波长位置随间隔层厚度变化的对应关系。从图中可以看出，二者基本呈线性的关系。这和(5)式的结论是契合的。

3 组合套镀制备集成滤光片

集成滤光片的有效区域大小为一个长 2 mm，宽 3.84 mm 大小的长方形，在此区域上套镀形成 8 通道集成滤光片。集成滤光片为在宽度方向上一维排列，保持相同光谱。考虑单个滤光片之间需要有挡光过渡带，设计挡光过渡带宽度为 30 μm。8 通道集成滤光片的结构示意图如图 3 所示。

由图 3 可知，滤光片的通道结构实际上是以 480 μm 为单元的周期结构。采用组合套镀的方式

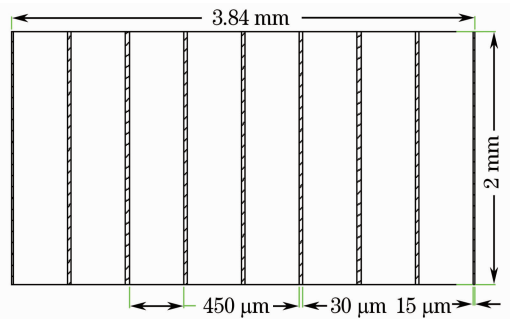


图 3 8 通道集成滤光片结构示意图

Fig. 3 Sketch of a 8-channel integrated filter

来实现间隔层厚度的变化，则只需要 3 次套镀间隔层即可实现 8 通道结构。图 4 是套镀 8 通道滤光片所需的掩膜版。套镀时的图形通过光刻胶掩膜形成。每次镀制完成后去除旧光刻胶，再光刻新的光刻胶图形，如此光刻、套镀 3 次即形成 8 通道图形结构。

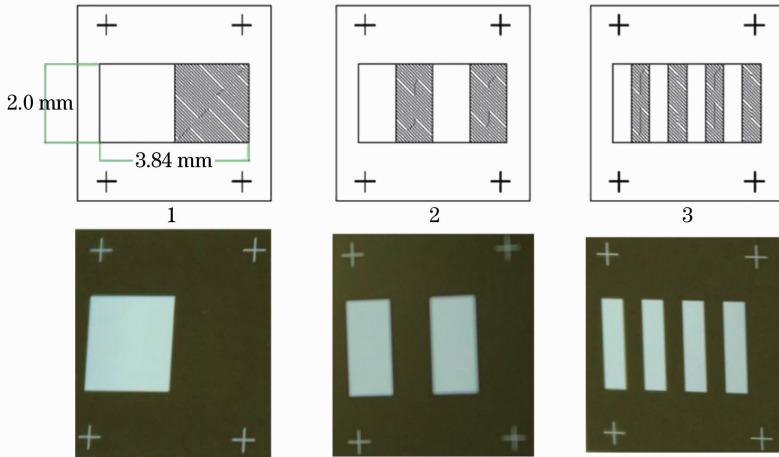


图 4 制作 8 通道滤光片用组合掩膜版

Fig. 4 Combination mask for fabrication of 8 channel filter

图 5 是集成滤光片套镀制备过程示意图。图 5 (a)首先镀制下反射堆膜系和部分间隔层；(b)第一次套镀间隔层厚度 40 nm，形成 2 通道；(c)第二次套镀间隔层厚度 20 nm，形成 4 通道；(d)第三次套镀间隔层厚度 10 nm，形成 8 通道；(e)镀制剩余间隔层和上反射堆膜系，即完成集成滤光片的镀制过程。至于挡光过渡带在基片背面对应位置镀制铬膜即可实现。

薄膜的制备采用国产的 ZZS800-3/G 型箱式光学镀膜机。常规蒸镀薄膜时，沉积温度设定为 250 °C。在套镀间隔层台阶时，沉积温度设定为 100 °C。均在达到设定温度后恒温烘烤 2 h 后再开始沉积。锗材料使用电子枪蒸发蒸镀，一氧化硅材料使用钨舟阻蒸蒸镀。蒸发速率和沉积厚度通过美

国 INFICON 公司的 IC/5 deposition controller 的石英晶振仪控制。锗材料的沉积速率控制为 0.4 nm/s，一氧化硅的沉积速率控制为 1 nm/s。

4 实验结果与分析

采用显微光谱仪对集成滤光片进行透射率光谱的测量。图 6 为 8 通道集成滤光片各通道透射率光谱测试曲线。中心波长在 2.0~2.4 μm 之间，其峰值透射率在 65%~76% 之间，带宽在 8~13 nm 范围，相对带宽在 0.33%~0.65% 范围。由于组合套镀制备薄膜时，沉积温度从 250 °C 降为 100 °C，使得材料的吸收和散射有所增加，所以最后结果使得各通道的峰值透射率相比设计降低了 15% 左右。而通道带宽和相对带宽基本和设计一致，属于高光谱

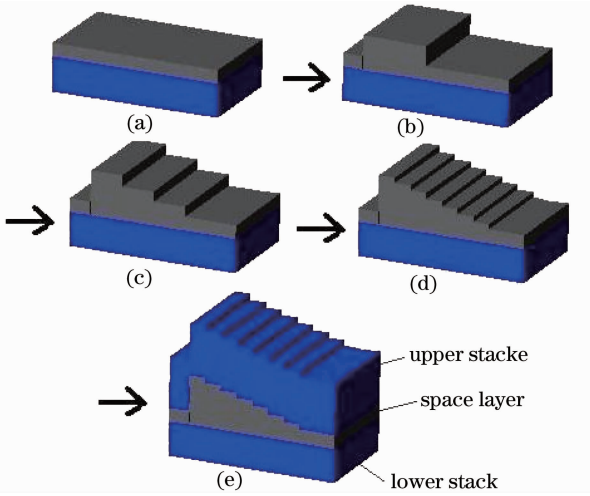


图 5 集成滤光片套镀制备过程示意图
Fig. 5 Diagram of combine masks and plating process for the integrated filter

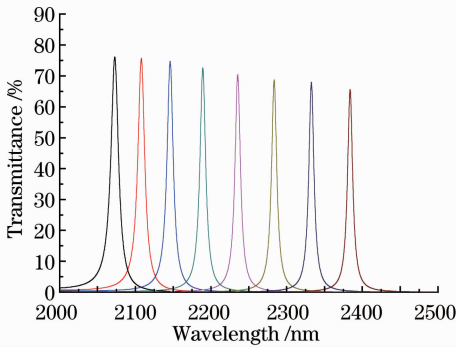


图 6 8 通道集成滤光片各通道透射率测试光谱曲线
Fig. 6 Each measured transmittance curve of the 8-channel integrated filter

滤光片。

图 7 中分别给出了设计时和实际测得的各通道的峰值位置。其中带圆点实线为设计的峰值位置，带三角虚线为实际测量的峰值位置，相对偏差小于 0.5%。镀制次数越多的通道，其峰值位置偏差越大。这是因为每次沉积薄膜误差累计的结果。降低

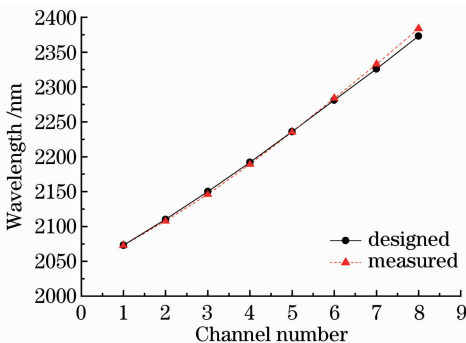


图 7 8 通道的峰值波长位置
Fig. 7 Peak position of 8 channel filter

这些误差将在以后的研究工作中探索。

5 结 论

以法布里-珀罗滤光片为基础,通过采用组合套镀改变间隔层厚度的方法,在短波红外区域 2.0~2.4 μm 制备出了 8 通道的高光谱红外集成滤光片,透射率峰值均在 65% 以上,各个光谱通道的半峰全宽在 8~13 nm,相对带宽在 0.33%~0.65% 范围。

参 考 文 献

- 1 Yang Guopeng, Yu Xuchu, Feng Wufa *et al.*. The development and application of hyperspectral RS technology[J]. *Mapping Aviso*, 2008, **10**: 1~4
杨国鹏, 余旭初, 冯伍法 等. 高光谱遥感技术的发展与应用现状[J]. *测绘通报*, 2008, **10**: 1~4
- 2 Yang Yuezong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107
- 3 Luo Haihan, Yin Xin, Duan Weibo *et al.*. Design and error analysis of 32-channel integrated infrared filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100506
罗海瀚, 尹欣, 段微波 等. 32 通道红外集成滤光片的设计和误差分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100506
- 4 Cai Yuan, Liu Dingquan, Luo Haihan. Design and fabrication of 3.5~4.0 μm band-pass filter working at cryogenic temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0107001
蔡渊, 刘定权, 罗海瀚. 3.5~4.0 μm 低温光谱带通滤光片的设计与研制[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0107001
- 5 Lin Xiaoyan, Wu Yonggang, Tian Guoxun *et al.*. Design of three-channel filters for the channel positions adjusted separately[J]. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*, 2008, **7**(3): 23~26
林小燕, 吴永刚, 田国勋 等. 通道位置可独立调整的三通道滤光片设计[J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2008, **7**(3): 23~26
- 6 张凤山, 潘建东, 张素英 等. 8~14 μm 线性渐变滤光器[P]. 实用新型专利: ZL95244913.7, 1996
- 7 Chen Tao, Luo Chongtai, Liu Hongkai *et al.*. Development of multi-band linear variable filters [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7): 72~75
陈焱, 罗崇泰, 刘宏开 等. 多光谱带通线性渐变滤光片的研制[J]. *光电工程*, 2007, **34**(7): 72~75
- 8 Lin Bing, Liu Dingquan, Li Daqi *et al.*. Fabrication of middle infrared 8-channel micro integrated filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1316~1319
林炳, 刘定权, 李大琪 等. 8 通道微型集成滤光片的研制[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1316~1319
- 9 Lin Bing, Yu Tianyan, Li Daqi *et al.*. Study of fabrication of 16-channel micro integrated filter[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(4): 287~290
林炳, 于天燕, 李大琪 等. 16 通道微型集成滤光片制备技术的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(4): 287~290
- 10 Wang Shaowei, Wang Li, Wu Yonggang *et al.*. Arrays of narrow bandpass filters fabricated by combinatorial etching technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 746~751
王少伟, 王利, 吴永刚 等. 组合刻蚀法制备窄带滤光片阵列[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 746~751
- 11 Wang Shaowei, Chen Xiaoshuang, Lu Wei. Fabrication of step filter for miniature wavelength-division device based on

- photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (5): 1358~1362
- 王少伟, 陈效双, 陆卫. 基于光刻工艺的阶跃滤光片式微型分光器件研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1358~1362
- 12 Hongfei Jiao, Yonggang Wu, Guoxun Tian *et al.*. Two-chamber integrated multichannel narrowband filter prepared by a multistep etching method[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(6): 867~871
- 13 Hongfei Jiao, Xinbin Cheng, Tao Ding *et al.*. Narrowband multichannel filters[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(s1): 192~195
- 14 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 20~160
- 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. 20~160

栏目编辑: 马沂