

文章编号: 0253-2239(2006)05-0746-6

## 组合刻蚀法制备窄带滤光片列阵\*

王少伟<sup>1</sup> 王 利<sup>2</sup> 吴永刚<sup>2</sup> 王占山<sup>2</sup> 刘定权<sup>3</sup> 林 炳<sup>3</sup> 陈效双<sup>1</sup> 陆 卫<sup>1</sup>

{ 1 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083  
2 同济大学物理系精密光学工程技术研究所, 上海 200092  
3 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 }

**摘要:** 介绍了组合刻蚀法制备窄带滤光片列阵的基本原理和制备工艺, 这是一种效率非常高的制备方法, 只需  $N$  次刻蚀就可以完成  $2^N$  通道窄带滤光片列阵的制备, 而且可以用于制备不同波段窄带滤光片列阵。展示了可见—近红外波段 32 通道窄带滤光片列阵和中红外波段 16 通道窄带滤光片列阵的实验结果, 其中 32 通道窄带滤光片列阵的带通峰位基本呈线性分布在 774.7~814.2 nm 之间, 所有滤光片的半峰全宽都非常窄 ( $\delta\lambda < 1.5$  nm), 相应于  $\delta\lambda/\lambda < 0.2\%$ , 半峰全宽最窄的滤光片达到 0.8 nm, 相应于  $\delta\lambda/\lambda < 0.1\%$ , 其带通峰位  $\lambda = 794.3$  nm; 各通道的带通透过率在 21.2%~32.4% 之间, 大部分在 30% 左右。

**关键词:** 光学器件; 滤光片; 集成; 组合刻蚀法; 列阵; 制备

中图分类号: O484 文献标识码: A

## Arrays of Narrow Bandpass Filters Fabricated by Combinatorial Etching Technique

Wang Shaowei<sup>1</sup> Wang Li<sup>2</sup> Wu Yonggang<sup>2</sup> Wang Zhanshan<sup>2</sup> Liu Dingquan<sup>3</sup>  
Lin Bin<sup>3</sup> Chen Xiaoshuang<sup>1</sup> Lu Wei<sup>1</sup>

{ 1 State Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083  
2 Institute of Precise Optical Engineering and Technology, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092  
3 Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083 }

**Abstract:** The basic mechanism and fabrication processes of the combinatorial etching technique have been introduced. It is a high-efficiency technique for the integration of narrow bandpass filters (NBPFs). A filter array integrated with  $2^N$  NBPFs can be fabricated with only  $N$  times of etching processes, and the technique can be applied in different wavelength regions. The experimental results of the array integrated with 32 filters in the visible-NIR and the array integrated with 16 filters in the MIR have been demonstrated. The pass-bands of the former NBPFs distribute linearly in the range of 774.7~814.2 nm. All the filters' full widths at half maximum (FWHM) are very narrow and less than 1.5 nm, corresponding to  $\delta\lambda/\lambda$  of each filter less than 0.2%. The narrowest FWHM of the integrated filters comes to 0.8 nm with  $\delta\lambda/\lambda$  of 0.1% at the wavelength of 794.3 nm. The transmittances of the pass-bands are between 21.2% and 32.4%. Most of them are near 30%.

**Key words:** optical devices; filter; integration; combinatorial etching technique; array; fabrication

### 1 引 言

分光技术是多光谱检测技术中的核心技术之一, 已经广泛应用于环境监测、生物医学、科技农业和工业流程监控等军事和民用领域<sup>[1]</sup>。传统的分光

方式主要有光栅、棱镜和傅里叶变换等方法。虽然这些方法大多可以进行全谱扫描, 分辨力高, 但其缺点是都涉及机械传动装置, 不仅限制了信息读出的速度, 还大大降低了仪器的抗振性能和可靠性; 而且

\* 国家自然科学基金(60508018)、上海市青年科技启明星计划(05QMX1459)和上海市重大科研攻关课题(03dz11007)资助课题。

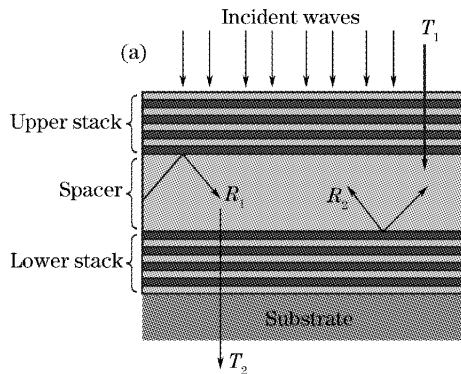
作者简介: 王少伟(1974~), 男, 广东普宁人, 副研究员, 博士, 主要从事光子晶体和光学薄膜方面的研究。

E-mail: wangshw@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2005-07-15; 收到修改稿日期: 2005-09-21

光栅和棱镜式系统的结构过于庞大,对于现场和野外,尤其是航天遥感使用特别不利。

滤光片阵列是 20 世纪 80 年代开始研究发展起来的一种微型空间滤光器。由于可与探测器阵列结合共同构成光谱可识别的探测器,大大简化分光系统,提高仪器的可靠性、稳定性和光学效率,因此新一代微小型化光谱仪器的分光系统都趋于采用这种新型结构。滤光片分光主要包括时间方式的(通过声、光、电、热等手段)可调谐滤光片,及空间方式的滤光片阵列和渐变滤光片(如楔形滤光片)。其中可调谐滤光片不能同时获取各个通道信息,而楔形滤光片在 90 年代初已作为分光元件成功应用于光谱仪<sup>[2]</sup>,但由于其原理本身的限制,无法满足光谱仪微小型化的要求<sup>[3]</sup>。目前的空间分光滤光片阵列主要通过拼接和掩膜分离方法<sup>[4,5]</sup>来实现。这两种传统制备方法的效率和成品率都非常低下,制备一个集成  $N$  单元的滤光片阵列需要  $N$  次镀膜,成品率则随集成数的增加呈指数式下降( $N$  次方),极大地制约了它的发展与应用。



本文以法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)结构滤光片为基础,提出一种高效的集成滤光片制备方法——组合刻蚀法<sup>[6~8]</sup>,介绍这种方法的基本原理和主要工艺过程的影响,并给出两个波段窄带滤光片阵列的实验结果。

## 2 基本原理和制备方案

### 2.1 基本原理

法布里-珀罗滤光片的最初形式是由两个平行的金属反射镜中间夹一个空腔构成,当两个反射镜具有同样的高反射率时,滤光片对某一波段的波长存在高透过率的特性,改变空腔的厚度可以改变透过的波长。但由于金属的吸收较大,限制了滤光片性能的提高。后来人们采用多层介质反射膜代替金属反射膜构成的全介质法布里-珀罗滤光片[如图 1(a)所示],使得滤光片的性能大大提高,全介质法布里-珀罗滤光片的典型透射谱如图 1(b)所示,其基本特性和金属法布里-珀罗滤光片保持一致。

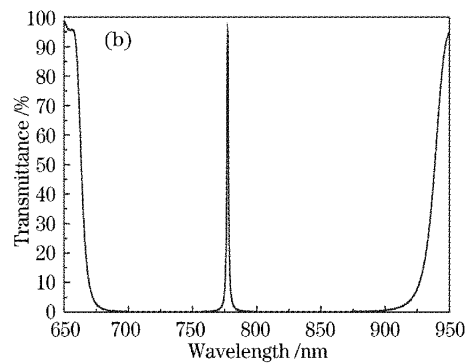


图 1 全介质法布里-珀罗滤光片结构示意图(a)和典型的透射谱(b)

Fig.1 Schematic diagram of a dielectric Fabry-Pérot type filter (a) and its typical transmittance spectrum (b)

对于法布里-珀罗型滤光片,有以下经典公式<sup>[9]</sup>:

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi} = \frac{2nd}{m}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$ 、 $n$ 、 $d$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别表示带通峰位、间隔层的折射率和厚度、以及上下反射膜系的位相,式中  $m = k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi, k = 0, 1, 2, \dots$ 。

由(1)式可知,法布里-珀罗结构滤光片的带通峰位  $\lambda_0$  与间隔层的光学厚度( $nd$ )成正比,如果不考虑间隔层材料的色散(即折射率  $n$  不随入射波长而改变),则可以通过改变间隔层的厚度  $d$  来改变滤光片的带通峰位,从而实现不同光谱通道的选择,这也正是本文方法的关键所在。

### 2.2 制备方案<sup>[10~12]</sup>

采用组合刻蚀法,通过对间隔层进行一系列不同厚度的叠加刻蚀,以获得不同厚度的间隔层阵列,进而实现窄带滤光片阵列的制备,只需  $N$  次刻蚀,即可获得  $2^N$  个单元的滤光片阵列,具体工艺过程如图 2 所示。首先,进行第一次镀膜,将下层膜系和间隔层镀好,如图 2(a)所示。然后对间隔层进行组合刻蚀,获得一系列厚度各不相同的间隔层阵列,如图 2(b)所示。在此基础上,进行第二次镀膜,将剩余的上层膜系镀完,完成整个滤光片阵列的制备,如图 2(c)所示,原先不同厚度的间隔层区域就变成了只有间隔层厚度不同、上下层膜系完全相同的窄带

滤光片,相应的带通峰位各不相同。

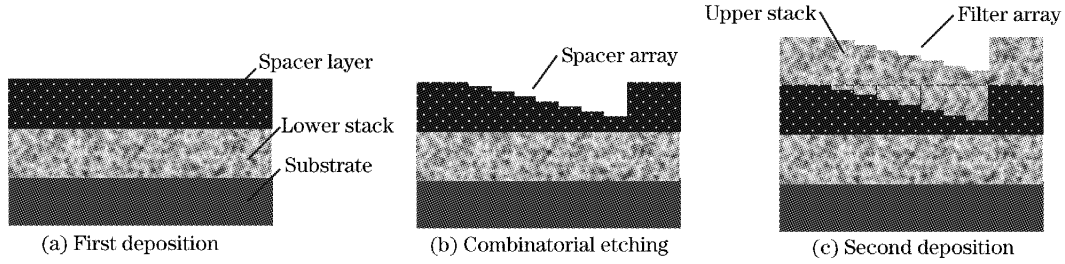


图 2 组合刻蚀法制备集成滤光片的工艺过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the fabrication procedure of filter array by using the combinatorial etching technique

其中间隔层列阵的制备是通过间隔层进行组合刻蚀来实现的,每次对不同区域进行不同厚度的刻蚀,如图 3(a)~图 3(d)所示,N 次叠加刻蚀后就可以获得  $2^N$  个厚度各不相同的间隔层单元[见

图 3(e)],间隔层的单元数随刻蚀次数的增加呈指数增长。无论集成多少单元滤光片,都只需两次镀膜,效率非常高,而且可以很容易地制备出线列或面阵滤光片。

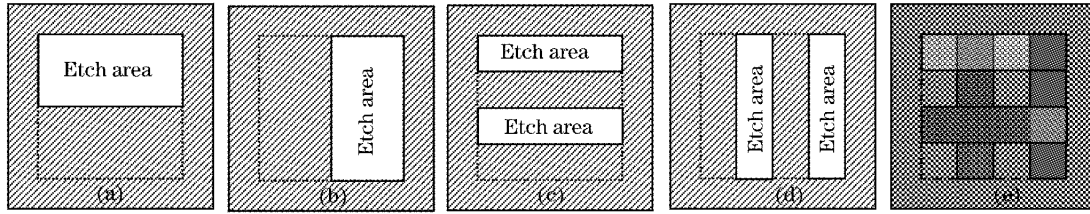


图 3 组合刻蚀工艺过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of combinatorial etching processes

### 3 工艺过程的影响

由于在窄带滤光片列阵的制备过程中引入了刻蚀工艺,而且把整个膜系分成两次镀制,因此有必要研究这些工艺过程对滤光片性能的影响。

#### 3.1 二次镀膜问题

薄膜的性能与工艺条件密切相关,如真空度、蒸发速率、烘烤时间、蒸发源特性等,尤其是衬底温度、比较片温度以及二者之间的比例关系,法布里-珀罗结构滤光片的上、下层膜系应尽可能保持一致,前后两次镀膜的差异会影响到峰值波长的定位精度,并导致滤光片光谱性能变差。为了研究二次镀膜对滤光片性能的影响程度,分别采用传统一次镀膜完成和二次镀膜完成膜系(2)的镀制:

$$(LH)_3 4L(HL)_3, \quad (2)$$

该膜系采用商业化软件 Filmstar 进行设计,其中 H 和 L 分别为锗(Ge)和一氧化硅(SiO),折射率和消光系数分别为(4.05, 0.001)、(1.79, 0.0001),衬底为 0.5 mm 厚的硅(Si)衬底,折射率为 3.5,设计波长是 2.8  $\mu\text{m}$ 。理论设计的透射谱如图 4 中的点线所示。带通峰位为 2.800  $\mu\text{m}$ ,透过率为 94.0%,相对半峰全宽为 0.7%(0.019  $\mu\text{m}$ )。采用北京仪器厂生产的

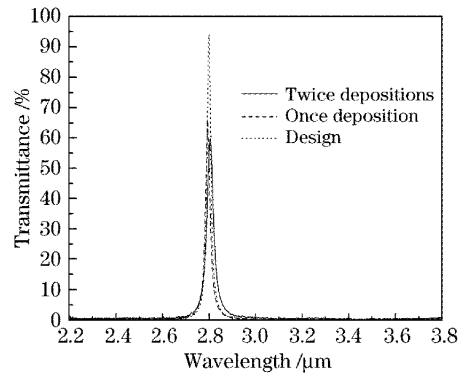


图 4 分两次完成镀膜(实线)、一次完成镀膜(虚线)滤光片及理论设计(点线)的透射谱,膜系结构:  $(LH)_3 4L(HL)_3$

Fig. 4 Transmittance spectra of the same filter structure  $(LH)_3 4L(HL)_3$  fabricated by twice deposition procedures (solid line), conventional once deposition procedure (dash line) and design result (dot line), respectively

DM450 型光学多层镀膜机的热蒸发方式进行镀制,膜厚监控为反射式光学极值监控法。镀膜过程中采用的具体工艺参量为:

本底真空度一般抽到  $2.5 \times 10^{-3}$  Pa;

镀 Ge 和 SiO 材料的基片温度为 170~180 °C;

镀 Ge 时真空度达到  $5 \times 10^{-3}$  Pa; 蒸发电流在 170~190 A;

镀 SiO 时真空度达到  $1 \times 10^{-3}$  Pa; 蒸发电流在 230~260 A。

图 4 中的虚线和实线分别为一次完成镀膜和二次完成镀膜的同一膜系滤光片透射谱。其中一次镀膜在中心波长  $2.794 \mu\text{m}$  处的相对半峰全宽达 0.8%, 和理论设计值非常接近; 而透过率为 66.0%, 明显低于理论设计值, 很可能是由于实际镀制材料的吸收比理论值大, 以及实际镀膜厚度与设计值之间有所偏离所致。二次镀膜的同一结构在中心波长  $2.805 \mu\text{m}$  处的透过率为 59.7%, 相对半峰全宽为 1.1%, 说明二次镀膜在中心波长、透过率和半峰全宽等方面均略有影响, 所得滤光片的性能比传统一次直接完成镀膜的稍差, 但二者非常接近, 总体性能没有明显下降, 二次镀膜的工艺确实可行。

### 3.2 刻蚀引起表面粗糙度问题

薄膜的表面粗糙度会影响到整个膜系的光学性质, 尤其是间隔层的影响最为明显。有必要研究引入刻蚀工艺后对薄膜表面粗糙度的影响程度。刻蚀工艺是在离子束刻蚀机(LKJ-1C)上完成的。具体

刻蚀工艺参量如下:

束流能量为 500 eV; 刻蚀台自转: 20C/min; 真空度:  $2 \times 10^{-2}$  Pa; 入射离子束角度为正入射; 束流密度为  $0.3 \text{ mA/cm}^2$ 。此工艺条件对于我们所镀制 SiO 和 SiO<sub>2</sub> 的刻蚀速率分别为 8.5 nm/min 和 14.9 nm/min。

采用原子力显微镜(Atom force microscope, AFM)分别对同一批镀 SiO<sub>2</sub> 薄膜样品的衬底表面、第一次镀膜后表面(刻蚀前)、刻蚀后表面、刻蚀后再次镀膜表面, 以及作为比较的第一次镀膜后直接再次镀膜表面(不刻蚀)进行了研究, 其中刻蚀前/后及刻蚀后再次镀膜表面的原子力显微镜照片如图 5 所示。在均方根粗糙度( $C_{\text{rms}}$ )为 0.30 nm 的衬底上第一次镀膜后, 粗糙度变为 1.34 nm, 如图 5(a)所示, 经过刻蚀后的粗糙度反而减小到 0.70 nm, 可能是由于离子束的轰击对薄膜表面的起伏程度起到一定的改善作用, 从而减小了薄膜表面的粗糙度, 如图 5(b)所示(其中的高度尺度比 a 和 c 都小); 在此基础上进行剩余膜系镀制后的表面如图 5(c)所示, 其表面粗糙度又上升到 1.38 nm, 但基本与一次镀膜的表面粗糙度(1.34 nm)相当。因此, 刻蚀工艺并未明显增大薄膜的表面粗糙度。

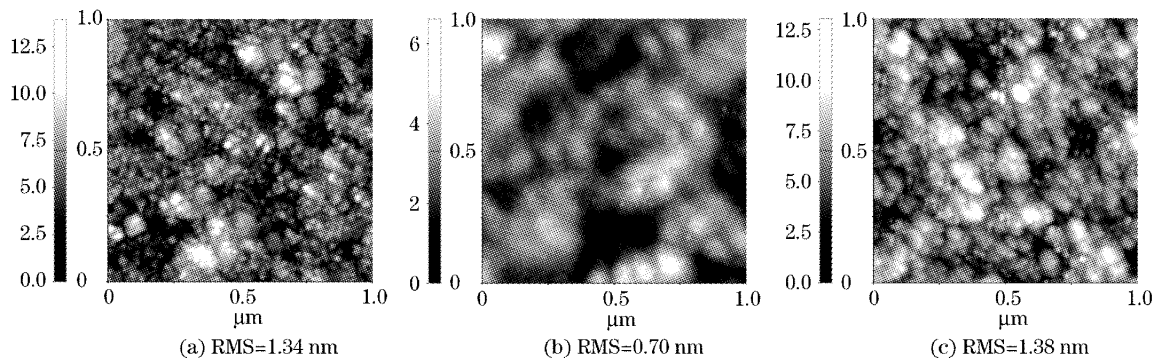


图 5 经过不同工艺过程后薄膜表面的原子力显微镜照片。(a)刻蚀前,(b)刻蚀后,(c)刻蚀后镀膜

Fig. 5 AFM pictures after different processes of combinatorial etching technique. Before etching (a), after etching (b), deposition on the surface of (c)

以上结果表明, 组合刻蚀工艺涉及到的二次镀膜问题和表面粗糙度等问题对滤光片的性能确实有所影响, 但都不明显, 整个制备方案应该是可行的。对于镀膜材料的选取与传统光学薄膜完全一样, 没有什么特殊要求, 只要镀膜材料在所需波段的透过率高、吸收小, 两种材料的折射率差别尽可能大即可。而对于间隔层材料的选取, 由于其对滤光片性能的影响最大且涉及刻蚀工艺, 因此一般间隔层材料的选取原则为吸收小、刻蚀速率适中、表面受刻蚀

影响小的材料。

## 4 实验结果与讨论

根据上述原理和制备方案, 采用组合刻蚀法和上述镀膜、刻蚀工艺, 分别通过 5 次和 4 次组合刻蚀, 制备出了可见-近红外波段集成 32 通道窄带滤光片阵列和中红外波段  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  集成 16 通道窄带滤光片阵列。

可见-近红外波段所制备的集成滤光片为  $32 \times 1$  线列, 滤光片单元的尺寸为  $0.37 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ , 基本结构为  $(\text{LH})_{10} \text{xL}(\text{HL})_{10}$ , 设计波长  $\lambda_0 = 777.4 \text{ nm}$ , 其中 L 和 H 分别为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $n_{\text{L}}d_{\text{L}} = n_{\text{H}}d_{\text{H}} = \lambda_0/4$ ,  $n_{\text{H}} = 2.11$ ,  $n_{\text{L}} = 1.48$ , 衬底为光学玻璃。由于滤光片的带通非常窄 ( $\delta\lambda < 0.2\%$ ), 属于超窄带通滤光片, 而且滤光片单元的尺寸很小, 能透过的能量非常弱, 无法采用常规的光谱仪器进行测量。因此, 采用改造后的微区拉曼光谱仪 (Dilor Lab Ram-Infinity) 对集成滤光片各单元的透射谱进行测量, 结果如

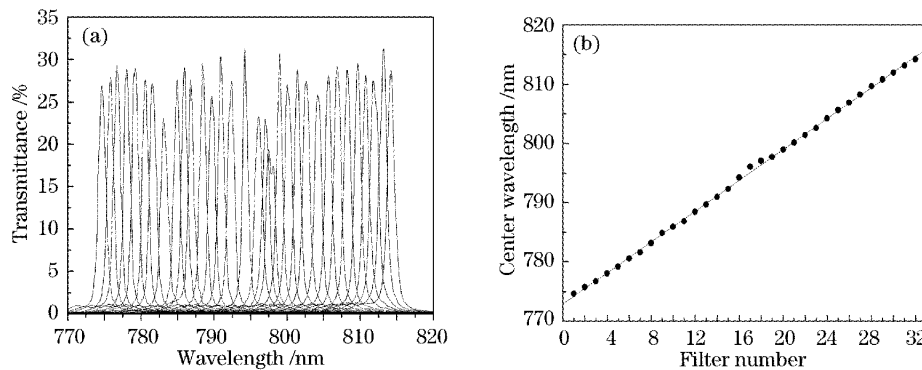


图 6 可见-近红外波段集成 32 通道窄带滤光片列阵各单元透射谱(a)和相应的带通峰位分布图(b)

Fig. 6 Transmittance spectra of each element on the filter array integrated with 32 narrow bandpass filters in the visible-NIR range (a), the passbands of each filter element (b)

中红外波段  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  集成 16 通道窄带滤光片列阵根据实际应用需求, 设计成  $16 \times 1$  的线列, 每个滤光片单元的尺寸为  $0.74 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ , 基本结构为  $(\text{LH})_4 \text{xL}(\text{HL})_4$ , 设计波长  $\lambda_0 = 2.8 \mu\text{m}$ , 由于在红外波段, L 和 H 分别采用  $\text{SiO}$  和  $\text{Ge}$ ,  $n_{\text{L}}d_{\text{L}} = n_{\text{H}}d_{\text{H}} = \lambda_0/4$ ,  $n_{\text{H}} = 4.05$ ,  $n_{\text{L}} = 1.75$ , 衬底为硅片。测量仪器为 Perkin Elmer 公司生产的 Spectrum-GX 傅里叶红外光谱仪, 由于滤光片单元的尺寸很小, 采用自行设计的狭缝宽度和位置独立可调的测量夹具进行测量, 狭缝取  $0.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 以确保整个光斑都打在滤光片单元上。各滤光片单元透射谱的测量结果如图 7 所示。除了第 8、9 个滤光片单元外, 其他滤光片单元透射峰位之间基本呈线性变化, 等间距地分布在  $2.341 \sim 2.770 \mu\text{m}$  之间。滤光片列阵中每个单元的带通都非常窄, 相对半峰全宽 ( $\delta\lambda/\lambda$ ) 均小于  $0.7\%$ , 波长选择性好, 各滤光片单元的最大透过率为  $35.9\%$ 。该滤光片列阵已成功应用于光科技专项“大气检测用新型短波红外探测器组件”, 并通过评审验收。

对于中间两个滤光片单元带通位置都偏离线性区的现象, 认为是由于刻蚀的控制精度不够高所致。

图 6(a)所示。从图上可以看出, 滤光片列阵各单元的带通峰位各不相同, 图 6(b)为相应的分布图, 图中显示出各滤光片单元透射峰位之间基本呈线性变化, 在  $774.7 \sim 814.2 \text{ nm}$  之间基本呈等间距分布, 第 17 和 18 个滤光片单元的偏离可能是由于刻蚀的控制精度不够高所致。该滤光片列阵中每个滤光片单元的带通都非常窄, 相对半峰全宽 ( $\delta\lambda/\lambda$ ) 均小于  $0.2\%$ , 因此透过率受工艺参量的影响特别大, 透过率在  $21.2\% \sim 32.4\%$ 。

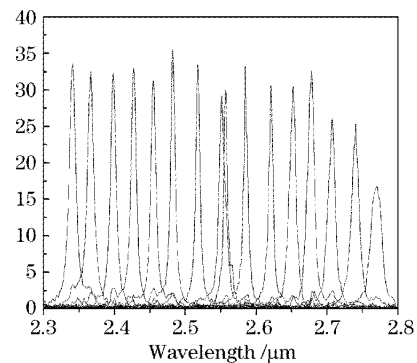


图 7 中红外波段  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  集成 16 通道窄带滤光片列阵各单元透射谱

Fig. 7 Transmittance spectra of each element on the filter array integrated with 16 narrow bandpass filters in the MIR range of  $2 \sim 3 \mu\text{m}$

在组合刻蚀过程中, 我们采用的是递减刻蚀, 即第一次刻蚀最深, 后面刻蚀深度依次递减, 由于第一次刻蚀最深, 而且是从正中间分开刻蚀区域和非刻蚀区域, 一旦控制精度不够高, 就会产生较大误差, 使前半部分滤光片单元与后半部分各滤光片单元的间隔层厚度明显偏离设计值, 导致相应带通峰位的偏离。这个问题可以通过提高刻蚀的控制精度加以解决,

尤其是一定要控制好第一次刻蚀的控制精度,经实验表明,中间滤光片单元偏离线性区的现象可以得到很好的解决。另外,所制备滤光片阵列带通透过率都不够高,很可能是因为所设计滤光片的带通都非常窄。当滤光片的相对半峰全宽低于 1% 时,滤光片的带通特性(峰位、透过率和半峰全宽)对间隔层的状态和工艺条件特别敏感,间隔层的表面粗糙度和因二次镀膜引起的上下高反膜系的光学对称问题,都会使透过率大大下降和半峰全宽明显展宽;光学对称问题和刻蚀对厚度的控制精度还会影响到滤光片的带通峰位,使其发生偏移。这些问题都需要在技术和工艺方面进一步深入研究并加以改进,以获得性能更好的滤光片阵列。

## 5 结 论

本文采用组合刻蚀法,分别通过 4 次和 5 次刻蚀工艺就制备出了中红外波段集成 16 通道窄带滤光片阵列和可见-近红外波段集成 32 通道窄带滤光片阵列,说明这种方法不但制备效率高,而且可以用于不同波段窄带滤光片阵列的制备。该方法所制备的高集成度滤光片阵列与探测器阵列完全兼容,可以大大简化分光系统,提高仪器的可靠性、稳定性和光学效率,非常有利于环保、野外、现场检测和光谱航天遥感等方面使用的光谱分析仪器的微型化和轻量化。

## 参 考 文 献

- Huang Xiangcheng, Yang Yiming, Shi Jiantao *et al.*. The research of multispectral micro-array filters [J]. *Optical Instrument*, 1999, **21**(4~5): 223~228 (in Chinese)  
黄相成,杨益民,师建涛等. 多光谱微型阵列滤光器的研制[J]. *光学仪器*, 1999, **21**(4~5): 223~228
- Aram M. Milica. Linear-wedge spectrometer[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1298**: 127
- S. Kaushik, B. R. Stallard. A two-dimensional array of optical interference filters produced by lithographic alterations of the index of refraction[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2532**: 276~281
- Cheng Shiping, Yan Yixun, Zhang Fengshan *et al.*. Development of three-channel short-wave IR spectrum distinguishable detector array[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1994, **13**(6): 401~404 (in Chinese)  
程实平,严义坝,张凤山等. 3 通道短波红外光谱可识别阵列探测器的研制[J]. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(6): 401~404
- Cheng Shiping, Zhang Fengshan, Yan Yixun. Study on the technology of preparing micro-infrared filtered array by masking and lifting-off method[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1994, **13**(2): 109~112 (in Chinese)  
程实平,张凤山,严义坝. 用掩模分离法制备微型红外滤光片阵列的工艺研究[J]. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(2): 109~112
- Shaowei Wang, Dingquan Liu, Bin Lin *et al.*. Realization of integrated narrow bandpass filters in the infrared region[J]. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(11): 1677~1683
- Shaowei Wang, Wei Lu, Pingping Chen *et al.*. Integrated narrow bandpass filters[P]. Chinese Patent, No. 200410067892. 3 (in Chinese)  
王少伟,陆卫,陈平等. 集成窄带滤光片[P]. 发明专利,申请号:200410067892. 3
- Shaowei Wang, Wei Lu, Xiaoshuang Chen *et al.*. Filter-type of wavelength division component [P]. Chinese patent No. 200310108346. 5 (in Chinese)  
王少伟,陆卫,陈效双等. 滤光片式分光元件[P]. 发明专利,申请号:200310108346. 5
- Tang Jinfu, Gu Peifu. *Film Optics and Technology* [M]. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 1999. 100~119 (in Chinese)  
唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1999. 100~119
- Shaowei Wang, Li Wang, Yonggang Wu *et al.*. Integrated optical filter arrays fabricated by using the combinatorial etching technique[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 332~334
- Wang Shaowei. Study on novel optical and electrical functional materials[D]. Dissertation of Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese)  
王少伟. 新型光、电功能材料研究[D]. 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2003
- Shaowei Wang, Dingquan Liu, Bin Lin *et al.*.  $16 \times 1$  integrated filter array in the MIR region prepared by using a combinatorial etching technique[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**(4): 637~641