

文章编号: 0253-2239(2009)05-1358-05

基于光刻工艺的阶跃滤光片式微型分光器件研制

王少伟 陈效双 陆 卫

(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)

摘要 为了消除机械掩模的尺寸限制和阴影效应,采用基于光刻掩膜的组合刻蚀法来制备阶跃滤光片,并成功地实现了 16×1 通道阶跃滤光片式微型分光器件的制备,该分光器件中滤光片单元的宽度只有 $90 \mu\text{m}$,总体尺寸不到 2 mm 。各滤光片通道分布在 632.4 nm 到 739.6 nm 之间,带宽均小于 2.9 nm ,透过率均高于 70% 。这样的阶跃滤光片最小单元尺寸可达微米量级,阴影效应可减小到微米甚至亚微米量级,与电荷耦合器件(CCD)完全匹配,可以作为微型分光器件来构建应用于空间等领域的微型光谱系统,从而促进相应光谱仪器的微型化。

关键词 光学器件; 阶跃滤光片; 微型; 分光; 光刻

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1358

Fabrication of Step Filter for Miniature Wavelength-Division Device Based on Photolithography

Wang Shaowei Chen Xiaoshuang Lu Wei

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The combinatorial etching technique based on photolithography has been used to fabricate step filters in this paper, in order to eliminate the size limit and shadow effect of mechanical masks. A step filter with 16×1 channels for miniature wavelength-division device has been fabricated successfully. The width of a filter element is only $90 \mu\text{m}$ and the total size of the wavelength-division device is less than 2 mm . The filter channels distribute from 632.4 nm to 739.6 nm with bandwidth narrower than 2.9 nm and transmittance higher than 70% . The filter element size of the step filter can be as small as in micro scale and the shadow effect of mechanical masks can be decreased to micro or sub-micro scale. Such step filters match with CCD completely and can be used as miniature wavelength-division device to compose a miniature spectral system for space applications etc.

Key words optical devices; step filter; miniature; wavelength-division; photolithography

1 引 言

分光技术是光谱仪器中的核心技术之一,已经广泛应用于科研教学、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。传统的分光方式主要有光栅、棱镜和傅立叶变换等方法。虽然这些方法大多可以进行全谱扫描,分辨率高,但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和可靠性;而且光栅和棱镜

式系统的结构过于庞大,难以实现微型化,对于现场和野外,尤其是空间应用等对有效载荷和可靠性要求特别苛刻的领域使用极其不利^[1~3]。

随着光谱仪器的微小型化,楔形滤光片^[4]和通过声、光、电、热等手段实现的可调谐滤光片等,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,受到越来越多的关注。王少伟等^[5,6]

收稿日期: 2008-00-00;收到修改稿日期: 2008-00-00

基金项目: 国家自然科学基金(60508018, 60711120168, 10874196)、上海市青年科技启明星及跟踪计划(05QMX1459, 08QH14025)、上海市研发基地协作能力建设专项(08DZ2201000)和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿资助课题。

作者简介: 王少伟(1974-),男,博士,副研究员,主要从事光学薄膜和光子晶体等方面的研究。

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

于 2003 年提出了阶跃滤光片式微型分光器件的设计,随后分别采用组合刻蚀方法^[1,7-9]和组合镀膜方法^[3,10]首次实现了红外和可见波段阶跃式集成滤光片的高效制备,只需 N 次叠加刻蚀或叠加镀膜,就可获得 2^N 单元的集成滤光片,集成度最高达到 128 通道,并展示了阶跃滤光片作为微型分光器件来构造牢固和高分辨率微型光谱仪的可行性^[11]。然而,先前的工作都是通过机械掩模来实现的,虽然工艺特别简单,但由于现有行业加工能力的限制,在金属薄片上只能加工窗口尺寸(或线宽)大于 $100\ \mu\text{m}$ 的图形,单元尺寸无法做得更小;而且通常机械掩模的厚度都在 $50\ \mu\text{m}$ 以上,否则容易变形,这样由于阴影效应(靠近窗口边缘部分与掩模厚度相当的窗口区域内并不能按照所设计的厚度进行刻蚀或沉积)造成单元之间的区域损伤也在 $50\ \mu\text{m}$ 以上;再加上机械的对准精度很差(在几十微米以上),多次叠加刻蚀或镀膜会造成单元之间至少几十微米的无效区域。因此,通过机械掩模所制备的阶跃滤光片尺寸无法进一步缩小,而且由于阴影效应对准精度的原因,各单元之间的边界难以清晰分辨。为此,本文采用图形精度和对准精度都非常高的光刻掩膜取代机械掩模,通过组合刻蚀技术实现了阶跃滤光片式微型分光器件的制备,使得最小单元尺寸可达微米量级,阴影效应也可减小到微米甚至亚微米量级。

2 膜系设计与实验

2.1 膜系设计

首先,从 Fabry-Perot(F-P)结构滤光片出发,以 $685\ \text{nm}$ 为设计波长 λ_0 ,采用五氧化二钽(Ta_2O_5 , $n=2.17$)和二氧化硅(SiO_2 , $n=1.46$)为高、低折射率材料,设计出中心波长为 $740\ \text{nm}$ 的超窄带滤光片结构:

$$\text{Glass}/m(1\text{H } 1\text{L})1\text{H}x\text{L}m(1\text{H } 1\text{L})1\text{H}/\text{Air}$$

其中 $m(1\text{H } 1\text{L})1\text{H}$ 、 $x\text{L}$ 和 $m(1\text{H } 1\text{L})1\text{H}$ 分别为下反射膜系、间隔层和上反射膜系,上、下反射膜系完全相同,形成镜面对称;H 和 L 分别表示光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的高、低折射率层; m 为反射膜堆高、低折射率材料的叠层次数, m 越大则通道越窄; x 为间隔层厚度因子,在同一取值范围内($1 < x \leq 3$, $3 < x \leq 5$, ...)越大则相应通道中心波长越长。根据 F-P 结构滤光片的特性——通道位置与间隔层的厚度成正比,当间隔层材料的折射率固定时,其通道位置就与间隔层的厚度成正比(仅限 $1 < x \leq 3$ 的取值范围内,其他范围偏离线性关系),即可由上式中的

x 调节。基于此,提出阶跃滤光片结构,只需将间隔层设计制备成台阶状(其他各层结构完全相同),就可以实现一系列通道位置各不相同的窄带滤光片的集成,并已通过机械掩模方式,分别采用组合刻蚀法和组合镀膜法非常快速地实现了阶跃滤光片的制备。本文在初始设计中 m 和 x 分别取 6 和 2.512,拟通过组合刻蚀法将间隔层制成厚度分布在 $2.512\ \text{L} \sim 1.673\ \text{L}$ 之间的 16 个台阶,以实现通道分布在 $740 \sim 649\ \text{nm}$ 之间的窄带滤光片的集成。所设计 16 通道阶跃滤光片中各单元的透射谱如图 1 所示,各通道均匀分布在 $649 \sim 740\ \text{nm}$ 之间;带宽非常窄,介于 $0.9\ \text{nm}$ 和 $1.7\ \text{nm}$ 之间,其中 $x=2$ 时的通道带宽最小, x 减小或增大都会使带宽展开。

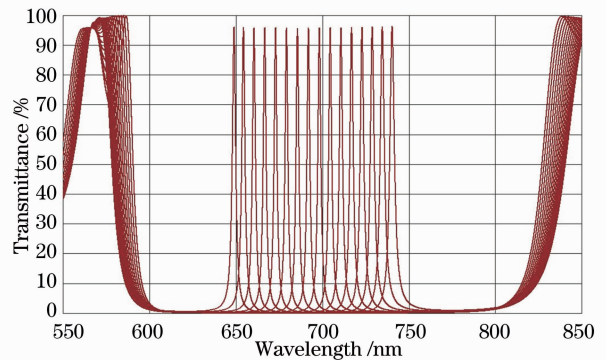


图 1 所设计 16 通道阶跃滤光片各单元透射谱

Fig. 1 Designed transmission spectra of each element on the 16 channels step filter

与楔型滤光片相比,阶跃滤光片单元内光谱处处相同、光谱性能更佳,而不象楔型滤光片那样是渐变、平均的效果;阶跃滤光片不同通道单元之间相互独立,因而相邻通道之间的中心波长既可以离得很近,也可以隔得很远,而楔型滤光片受楔形角和相邻通道间隔尺寸的限制(其光谱特性随楔形角的增大而急剧变差)光谱难以分得很开,否则总体尺寸就会过大,难以进一步微型化;而且阶跃滤光片可以轻易实现二维集成,楔型滤光片则很难。

2.2 实验

整个膜系的镀制过程采用进口电子束蒸发设备来完成,机器型号为日本 OPTORUN 公司生产的 OTFC MA04AAG01002。间隔层台阶的制备是关键,由于相邻通道间隔最小只有 $6\ \text{nm}$,对刻蚀的控制精度要求很高,具体采用英国 OXFORD 公司的 Ionfab 300plus 离子束刻蚀系统来完成,只需 4 次组合刻蚀,即可获得 16 个不同厚度的间隔层台阶,具体工艺过程参见文献^[1,7,8],平均刻蚀速率最低达到 $0.1\ \text{nm/s}$ 。本工作的重点是在整个制备过程中

引入光刻工艺,采用光刻掩膜替代先前工作中所用的机械掩膜,以期消除机械掩模的尺寸限制和阴影效应,所有光刻过程均在国产劳动牌光刻机上完成,

光刻胶为型号 AZ1500 的正薄胶。具体工艺参数如表 1 所示。

表 1 光刻工艺参数

Table 1 Parameters of photolithography

| Spin speed r/min | Pre-bake | | Exposure time /s | Developing time /s | Firmly treatment | |
|---------------------|----------------------------|-----------|---------------------|-----------------------|----------------------------|---------|
| | Temperature / $^{\circ}$ C | Time /min | | | Temperature / $^{\circ}$ C | Time /s |
| 4000 | 80 | 15 | 20 | 40 | 100 | 30 |

各微型滤光片单元透射谱的测试采用改造的微型拉曼光谱仪(Dilor Lab Ram-Infinity)进行。

影效应得到极大改善。

3 结果与讨论

3.1 光刻工艺对阶跃滤光片性能的改进

掩模的作用是实现对不同区域的选择性刻蚀或镀膜。在进行刻蚀或镀膜时,由于掩模本身具有一定厚度,都会在边缘部分产生阴影效应,造成边缘部分与厚度相当范围内的一个不均匀区域,因此,掩模的厚度越薄阴影效应就越小。当采用机械掩模时,由于目前行业加工能力的限制,在保证图形结构和掩模基本不变形的前提下,最薄只能做到 $50\ \mu\text{m}$ 。图 2(a)是厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的机械掩膜照片,将其用于选择性镀膜后,从图 2(b)上可以看出由于阴影效应,边界部分存在明显的不均匀区。

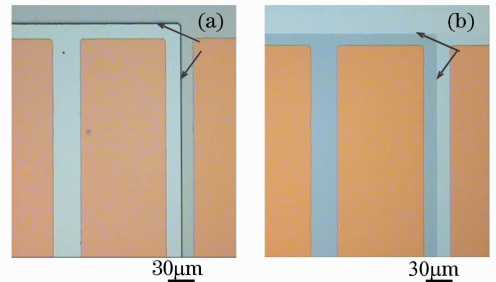


图 3 光刻掩膜(a)及刻蚀后(b)照片

Fig. 3 Photos with photo-lithography mask (a) and after etching (b)

改用光刻掩膜后不仅可以极大地改善阴影效应,而且由于光刻是一种制图精度极高的方法,目前最小的成熟工艺尺寸已经达到 $50\ \text{nm}$ 以内,即使是很普通的国产光刻机最小图形线宽也能达到将近 $1\ \mu\text{m}$ 。通常电荷耦合器件(CCD)等探测器光敏元的最小尺寸都在 $5\ \mu\text{m}$ 以上,红外波段的探测器光敏元尺寸至少也有几十微米。因此,相比而言,引入光刻工艺后的尺寸限制和阴影效应基本消除了。

除了掩模(或膜)的尺寸限制和阴影效应外,叠加刻蚀或镀膜时的对准精度也非常重要,因为即使单元尺寸可以做得很小、阴影效应也很小,但如果对准精度很差,相邻单元之间的边界依然会有一个很大的损伤区域(比如机械掩模为几十微米),从而导致整个器件尺寸还是无法进一步减小。本工作采用光刻工艺后叠加刻蚀或镀膜时的对准精度也得到了极大提高。原先采用机械掩模时的对准精度只有几十微米,现在采用光刻掩膜,即使是很普通的国产光刻机,对准精度也可以提高一个量级以上,达到 $1\ \mu\text{m}$ 左右。如图 4 所示,前后两次光刻的对准十字标记重合得很好。前面一次光刻对准十字的宽度为 $20\ \mu\text{m}$,为了保证前后两次光刻图形尽量对准,后面一次光刻的对准十字宽度为 $26\ \mu\text{m}$ 左右。这样,完全对准时两边各有 $3\ \mu\text{m}$ 的距离,只要前面一次光刻对准十字在后面一次光刻对准十字内,图形之间上下和左右的对准精度就在 $3\ \mu\text{m}$ 以内。因此,图 4

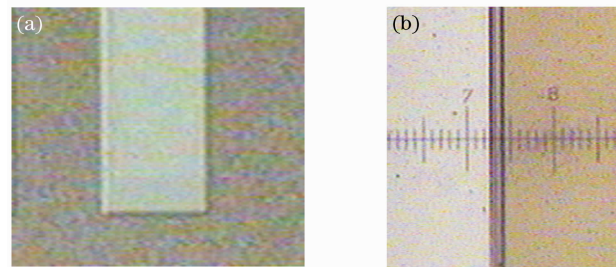


图 2 最薄机械掩膜($T=50\ \mu\text{m}$)及其所产生的阴影效应照片。(a)机械掩膜照片,(b)阴影效应造成的不均匀区

Fig. 2 Photos of the thinnest mechanical mask ($T=50\ \mu\text{m}$)

(a) and the inhomogeneous area caused by shadow effect (b)

本文采用光刻掩膜取代机械掩膜以实现选择性刻蚀,所用光刻胶为型号 AZ1500 的正薄胶,匀胶转速为 $4000\ \text{r/min}$ 时的涂敷厚度可薄至 $1\ \mu\text{m}$ 以内,如图 3(a)所示,图中箭头所指位置为光刻胶边缘,左边为刻蚀窗口区域,右边和上边为光刻胶保护区域。图 3(b)为完成刻蚀去掉光刻胶后的照片,其放大倍数为图 2(b)的 2.5 倍,从图 3 可以看出,刻蚀区域的边界非常清晰,而且几乎看不出边缘部分有不均匀的区域。因此,改用光刻工艺之后,相应的阴

结果显示对准精度达到了 $1\ \mu\text{m}$ 左右。

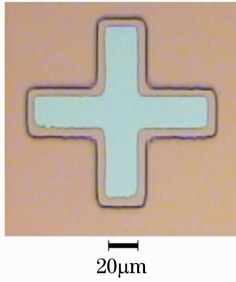


图 4 两次光刻之间的对准标记照片

Fig. 4 Photo of mark between two photo-lithography processes

3.2 基于光刻工艺的阶跃滤光片

3.1 节结果表明,引入光刻工艺后,机械掩模的尺寸限制和阴影效应基本消除,对准精度也得到了极大提高。采用基于光刻工艺的组合刻蚀方法实际制备出了 16×1 通道阶跃滤光片,如图 5(a)所示,整个阶跃滤光片的总体宽度不到 $2\ \text{mm}$;滤光片单元的宽度只有 $90\ \mu\text{m}$,如图 5(b)放大照片所示,其中各单元之间白色部分为金属光栏,可以防止相邻通道之间相互串光。

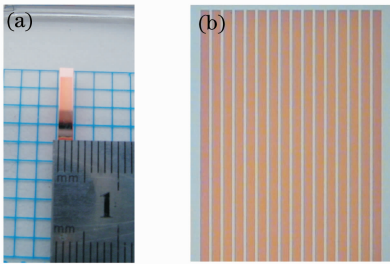


图 5 实际制备的 16×1 通道阶跃滤光片(a)及其局部放大(b)照片

Fig. 5 Photos of fabricated 16×1 channels step filter

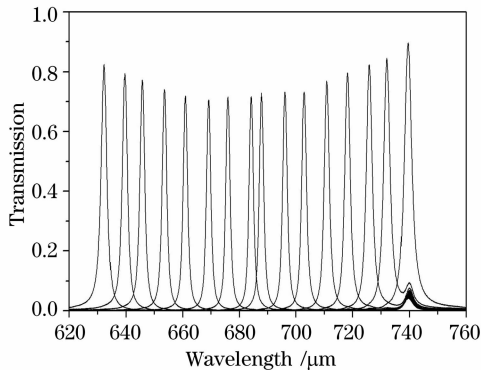


图 6 实际制备 16×1 通道阶跃滤光片各单元的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of each element on the fabricated 16×1 channels step filter

所制备 16×1 通道阶跃滤光片各单元的透射谱如图 6 所示,各通道分布在 $632.4\sim 739.6\ \text{nm}$ 之间;带宽均小于 $2.9\ \text{nm}$,最小达到了 $1.6\ \text{nm}$,相应的光谱分辨率优于 $3\ \text{nm}$;透过率均高于 70% ,与设计结果相当吻合。与设计结果略有差别的地方在于不少单元的透射谱中,除了本身的通道透射峰外,还有一个波长在 $740\ \text{nm}$ 附近一个很小的次峰,该次峰很可能是光刻过程中光刻胶残留引起的,可以通过去胶机去胶等方式消除。

这样的阶跃滤光片光谱分辨率能做到 $2\ \text{nm}$ 甚至更高,而且最小单元尺寸可达微米量级,阴影效应也可减小到微米甚至亚微米量级,与 CCD 完全匹配,可以作为一种新型的微型分光器件来构建应用于空间等领域的微型光谱系统,从而促进相应光谱仪器的微型化。目前,在空间生物实验领域已有具体应用需求,相关工作正在进一步深入开展。

4 结 论

本文通过引入光刻工艺,基本消除了机械掩模的尺寸限制和阴影效应,并极大地提高了叠加刻蚀或镀膜的对准精度,最小单元尺寸和对准精度可达微米量级,阴影效应可减小到微米甚至亚微米量级。采用基于光刻掩膜的组合刻蚀法成功制备出了 16×1 通道阶跃滤光片,该滤光片单元的宽度只有 $90\ \mu\text{m}$,总体尺寸不到 $2\ \text{mm}$ 。各滤光片通道分布在 $632.4\ \text{nm}$ 到 $739.6\ \text{nm}$ 之间,带宽均小于 $2.9\ \text{nm}$,透过率均高于 70% 。上述结果表明,基于光刻工艺所制备的阶跃滤光片式微型分光器件与 CCD 完全匹配,特别适用于现场、野外和空间应用等对有效载荷和可靠性要求特别苛刻的领域,有利于促进相应光谱仪器的微型化。

致谢 特别感谢上海技术物理研究所李宁研究员、孙璟兰研究员和孟祥建副研究员在器件工艺上提供的便利和帮助,张波副研究员和复旦大学陈张海教授在光谱测量上给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Huang Xiangcheng, Yang Yiming, Shi Jiantao *et al.*. The research of multispectral micro-array filters [J]. *Optical Instrument*, 1999, **21**(4~5): 223~228

- 黄相成,杨益民,师建涛等. 多光谱微型列阵滤光器的研制[J]. 光学仪器, 1999, **21**(4~5): 223~228
- 3 Wang Shaowei, Li Ming, Xia Changsheng *et al.*. Integrated filter array fabricated by using the combinatorial deposition technique [J]. *Optical Instrument*, 2006, **28**(4): 124~128
王少伟,李明,夏长生等. 组合镀膜法制备集成滤光片列阵[J]. 光学仪器, 2006, **28**(4): 124~128
- 4 Aram M. Milica. Linear wedge spectrometer[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1298**: 127
- 5 Wang Shaowei. Study on novel optical and electrical functional materials [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, 2003
王少伟. 新型光、电功能材料研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2003
- 6 Shaowei Wang, Wei Lu, Xiaoshuang Chen *et al.*. Filter-type of wavelength division component [P]. Chinese patent No. ZL 2003 1 0108346. 5
王少伟,陆卫,陈效双等. 滤光片式分光元件[P]. 发明专利号: ZL 2003 1 0108346. 5
- 7 Shaowei Wang, Xiaoshuang Chen, Wei Lu *et al.*. Integrated optical filter arrays fabricated by using the combinatorial etching technique[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 332~334
- 8 Shaowei Wang, Dingquan Liu, Bin Lin *et al.*. 16×1 integrated filter array in the MIR region prepared by using a combinatorial etching technique[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**: 637
- 9 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
- 10 Shaowei Wang, Ming Li, Changsheng Xia *et al.*. 128 channels of integrated filter array rapidly fabricated by using the combinatorial deposition technique[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**: 281
- 11 Shaowei Wang, Changsheng Xia, Xiaoshuang Chen *et al.*. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 632~634
- 12 Kaushik S, Stallard B R. A two-dimensional array of optical interference filters produced by lithographic alterations of the index of refraction[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2532**: 276