

文章编号: 0253-2239(2010)s100506

32 通道红外集成滤光片的设计和误差分析

罗海瀚 尹 欣 段微波 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 红外高光谱的应用对于微型集成滤光片的需求越来越明显。通过改变间隔层的厚度,保持基本膜系不变,在 $1.9\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 的红外光谱范围内设计了 32 通道的集成滤光片。间隔层的改变可以采取刻蚀或镀膜的方法来实现。考虑到制作工艺中存在的误差,利用光学薄膜设计软件对误差和可行性进行了分析。各个光谱通道的半峰全宽在 $5\sim 8\ \text{nm}$,光谱交叠多在 15% 以下。在现有工艺条件下,采取刻蚀法或镀膜法均能实现红外集成滤光片的制作。

关键词 光学薄膜;集成滤光片;离子束刻蚀;误差分析;间隔层

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100506

Design and Error Analysis of 32-Channel Integrated Infrared Filter

Luo Haihan Yin Xin Duan Weibo Liu Dingquan

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

Abstract There are more and more demands for micro integrated filter because of the infrared hyperspectral application. In $1.9\sim 2.4\ \mu\text{m}$ infrared spectrum, 32-channel integrated infrared filter is designed by changing the thickness of spacer layer and maintaining the basic optical layers the same. The change of the spacer layer can be realized by etching or depositing. Considering the error during fabricating, the spectrum can still meet the requirements. The half power bandwidth is $5\sim 8\ \text{nm}$, the spectrum curve across-points are lower than 15% in transmittance mostly. With the current technique, both the etching and the depositing methods can be used to fabricate the integrated infrared filter.

Key words optical films; integrated filter; ion beam etching; error analysis; spacer layer

OCIS codes 310.4165; 310.0310

1 引 言

20 世纪 80 年代初期出现的高光谱遥感技术^[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。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。通道更多、集成度更高、体积更小和重量更轻的高光谱红外滤光片成为一项需要突破的关键技术^[3]。微型高光谱红外集成滤光片与面阵探测器配合,可以使光谱仪缩小体积、减轻重量和提高可靠性,对于空间等特殊应用非常重要。

尽管单个滤光片的研制工作已经十分成熟,但

是对于将多个中心波长接近的、尺寸微小的滤光片集成在一片基片上,同时保持优良的滤光片性能指标,是十分困难的工作。另外由于滤光片数量的增多,性能指标的互相影响,使得在薄膜制作过程中的成品率急剧呈指数下降。科研工作者一直在致力于这方面的研究工作,提出过线性渐变滤光片^[4,5],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,但是在滤光片上的空间位置不能充分利用,并且对于中心波长相近的通道容易串光;也有人提出利用法布里-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^[6],此方法在通道数量上存在限

收稿日期: 2010-06-11; 收到修改稿日期: 2010-07-10

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

导师简介: 刘定权(1964—),男,博士,研究员,主要从事薄膜光学与技术等方面的研究。E-mail: dqliu@mail.sitp.ac.cn

(中国光学学会会员号:5040020002M)

制,并且通道都是在同一个滤光片上,不能满足集成化滤光片的需求。林柄等^[7~9]提出使用刻蚀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,但是中心波长间隔较大或者光谱交叠严重,需要进一步探索研究。

现有的研究均着重于可见光波段。相对于可见光区,红外波段光学膜层材料^[10]的吸收偏大,沉积工艺不同,有其特殊性。本文基于改变间隔层厚度形成阶跃滤光片的方法,设计出一种 32 通道的红外集成滤光片,相邻通道中心波长间隔约为 13 nm,同时进行了误差分析。考虑制作过程中可能的误差后,利用改进后的制作技术手段,能够实现需要的光谱。

2 基本原理

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^[11]

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

膜层的相位厚度为 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$, 以及膜系的透射率为

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

式中 η_0 是入射介质的导纳。

对于 F-P 型的滤光片,有以下经典公式:

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

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

透射率的极大值的位置,即中心波长 λ_0 由下式确定:

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + [(\varphi_1 + \varphi_2) / 2\pi]} = \frac{2nd}{m}, \quad (4)$$

式中 $m = k + (\varphi_1 + \varphi_2) / 2\pi$ 。通过(4)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。

3 膜系设计

基于上述理论原理,根据高光谱红外集成滤光片任务要求进行设计。在 1.9~2.4 μm 的红外光谱范围内划分 32 个波段,每个滤光片上波段的中心波长,在谱段范围内等间隔分布;每个波段带宽以透射率 10% 处设计,中心波长偏移量 $\lambda_0 < 2 \text{ nm}$, 波段宽度变化 $\Delta\lambda < 2 \text{ nm}$; 峰值透射率不小于 70%, 平均透射率不小于 35%, 带外响应小于 5% (波段透射率 1% 之外)。

选取基础膜系的参考中心波长为 2383 nm, 设计膜系为 G|LHLHLHLH xL HLHLHLHL|A。其中 G 表示基片为 K9 玻璃, 折射率 $n_g = 1.52$ 。A 表示入射介质即空气, L 表示四分之一中心波长光学厚度的低折射率膜层, 材料为一氧化硅 (SiO), $n_L = 1.85$ 。H 表示四分之一中心波长光学厚度的高折射率膜层, 材料为锗 (Ge), $n_H = 4.0$ 。 xL 表示 F-P 滤光片的间隔层, 其中 x 为修正系数。使用 Film Wizard 膜系设计软件, 膜系设计曲线如图 1 所示。

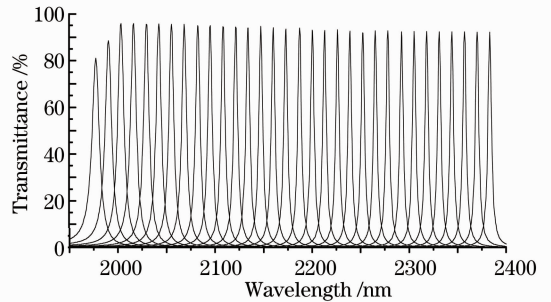


图 1 不同的间隔层厚度的透射率设计曲线

Fig. 1 Transmittance designed curves with different thicknesses of spacer layer

当中心波长为 2383 nm 时, $x = 2$; 当中心波长为 1977 nm 时, $x = 1.313$ 。相邻波段的间隔层厚度差大致约为 0.02 L~0.03L。

根据软件设计模拟结果可见,设计的膜系整体峰值透射率不小于 80%, 各光谱的半峰全宽在 5~8 nm, 在中心波长 2000 nm 之后, 峰值透射率不小于 90%。光谱交叠都在透射率 20% 以下的位置, 大部分波段的光谱交叠都在透射率 10% 以下, 满足设计要求。

可见理论上,可以得到性能优良的集成滤光片。并且通过增加反射膜堆的周期数和间隔层的级次(表现为光学厚度),可以得到半峰全宽更窄、光谱交叠更少和光谱纯度更好的滤光片。

4 误差与可行性分析

4.1 误差分析

由于采用软件所给的标准数据库材料特性进行设计,已经引入了光学常数随波长引起的变化,故在此不做另外分析,仅对中心波长的偏移进行可容误差分析。首先对各单层膜的光学厚度的变化引起的中心波长偏移的误差灵敏度进行分析。图 2 给出的是各个单层膜的误差灵敏度。定义最靠近基片的膜层为第 1 层,间隔层在第 9 层。由图 2 可以看出,间隔层的误差灵敏度要远远高于其它层。其它膜层越接近间隔层,误差灵敏度越大。

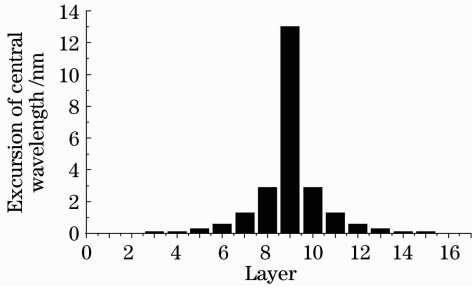


图 2 不同膜层的孤立厚度灵敏度

Fig. 2 Isolated thickness sensitivity of different layer

其次根据设计要求,中心波长偏移量 $\lambda_0 < 2$ nm。而中心波长主要由间隔层厚度 xL 决定的。根据设计膜系时的经验,只需分析两端两个波段在中心波长的允许偏移范围内容许的间隔层厚度的误差范围。对于波长最长的光谱通道,中心波长为 2383 nm,间隔层厚度为 $2L$ 。根据中心波长偏移量小于 2 nm,寻找到当中心波长左右各偏移 2 nm 时所对应的间隔层厚度分别为 $xL=1.997L$ 和 $xL=2.003L$,如图 3 所示。

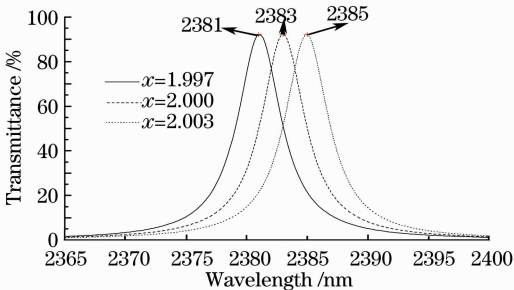


图 3 间隔层厚度误差引起的 2383 nm 处中心波长偏移时的透射率

Fig. 3 Transmittance with excursion of central wavelength at 2383 nm caused by the error of spacer layer

同理,对于最左端的中心波长为 1977 nm 的波段,在中心波长左右偏移 2 nm 时对应的间隔层厚度分别为 $xL=1.308L$ 和 $xL=1.318L$,如图 4 所示。

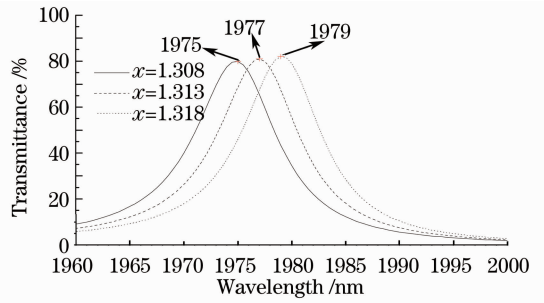


图 4 间隔层厚度误差引起的 1977 nm 处中心波长偏移时的透射率

Fig. 4 Transmittance with excursion of central wavelength at 1977 nm caused by the error of spacer layer

可见对于右端中心波长为 2383 nm 的波段,间隔层厚度允许的误差范围为 $\Delta = \pm 0.003L$ 。对于左端中心波长为 1977 nm 的波段,间隔层厚度允许的误差范围为 $\Delta = \pm 0.005L$ 。所以选择 $\Delta = \pm 0.003L$ 作为可容误差进行分析。

设计中,使用的厚度均为光学厚度。根据光学厚度等于物理厚度与折射率的乘积,以及一个 L 代表的长度是 $\lambda/4$,其中 $\lambda=2383$ nm。所以, Δ 转换成物理厚度应该为

$$\delta d = \frac{\Delta}{n_L} = \pm \frac{0.003 \times 2383/4}{1.85} \approx \pm 0.966 \text{ nm}, \quad (5)$$

即在薄膜镀制过程中,间隔层的物理厚度偏差应该不大于 0.966 nm。

对于膜系的反射堆中高低折射率膜层在薄膜制备过程中存在的误差,选取误差为 $\pm 1\%$, $\pm 0.5\%$ 的情况下,分别考虑高、低折射率膜层整体厚度误差变化对滤光片进行误差模拟,得出的结果分别如图 5、6 所示。

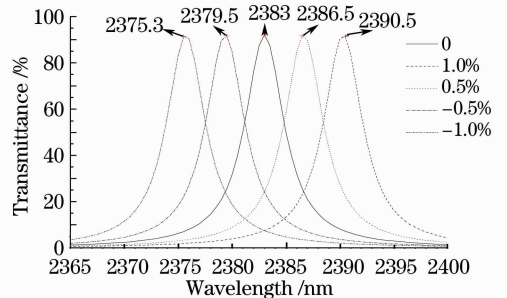


图 5 整体 H 层误差引起的中心波长偏移时的透射率

Fig. 5 Transmittance with excursion of central wavelength caused by the error of all H layers

图 5 是仅考虑 H 层整体误差引起的中心波长偏移,当 H 层整体厚度误差为 $\pm 1\%$ 时,中心波长的偏移约为 ± 7 nm;当 H 层整体厚度误差为 $\pm 0.5\%$

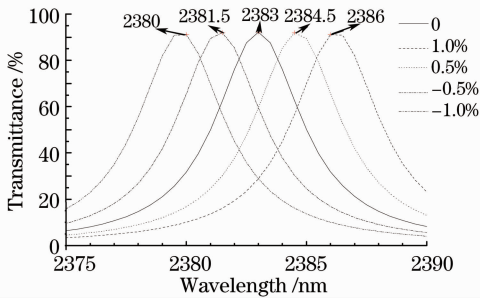


图6 整体L层误差引起的中心波长偏移时的透射率

Fig. 6 Transmittance with excursion of central wavelength caused by the error of all L layers

时,中心波长的偏移约为 ± 3.5 nm。图6仅考虑L层整体误差引起的中心波长偏移,当L层整体厚度误差为 $\pm 1\%$ 时,中心波长的偏移约为 ± 3 nm;当L层整体厚度误差为 $\pm 0.5\%$ 时,中心波长的偏移约为 ± 1.5 nm。由于设计要求的中心波长偏移为 ± 2 nm,所以H层的允许整体误差需要小于 $\pm 0.5\%$,而L层的允许整体误差约小于 $\pm 1\%$ 。

4.2 可行性分析

由于反射堆膜系在薄膜制作工艺上使用的是通常的工艺条件,在薄膜制作上是可行的。滤光片制备中,存在多种影响膜层精度的因素,例如膜层厚度的控制、温度以及真空镀膜设备各工艺参数等。其中最为核心的都反映在对于膜层厚度误差的控制上。

而对于膜厚误差的控制,在现有镀膜工艺上通过严格监控薄膜制作过程减小误差,对于控制膜层厚度误差在 0.5% 是可以实现的。由于间隔层的光学厚度的误差灵敏度最大,即间隔层的误差对于滤光片中心波长的偏移影响是最大的,也即间隔层便是要着重考虑的滤光片中的敏感关键膜层。

首先,根据设计,可知相邻间隔层光学厚度的差值在 $0.02L \sim 0.03L$ 之间。分析可行性,选择数值小的,即 $0.02L$ 进行分析。首先转换成物理厚度约为

$$\delta d = \frac{\Delta}{n_L} = \frac{0.02 \times 2383/4}{1.85} \approx 6.44 \text{ nm}, \quad (6)$$

此即为所需形成的最小间隔层厚度差。

对两种获取间隔层台阶的方法进行可行性分析。一种是采用离子束刻蚀间隔层形成台阶的方法。另一种是直接在镀制间隔层时通过套镀形成台阶的方法。

4.2.1 离子束刻蚀形成台阶的可行性分析

采用离子束刻蚀形成台阶,首先需要镀制好一

半反射堆膜系以及间隔层,然后刻蚀间隔层形成台阶后,再在上面覆盖镀制另一半反射堆膜系。镀膜的工艺手段不需改变,这样在镀膜部分,较容易得到实现。

在刻蚀形成台阶部分,由于既要满足刻蚀台阶厚度要求,又要满足中心波长偏移量转化成的刻蚀厚度误差要求,对于离子束刻蚀的速率精度提出要求。离子束刻蚀速率^[12]是指单位时间内离子从材料表面刻蚀去除的材料厚度,单位通常为 10^{-10} m/min或nm/min。刻蚀速率与诸多因素有关,包括离子能量、束流密度、离子入射方向、材料温度及成分、气体与材料化学反应状态及速率、刻蚀生成物、物理与化学功能强度配比、材料种类和电子中和程度等。通常刻蚀SiO₂的速率^[13]约为10 nm/min左右。虽然离子束刻蚀速率是一个复杂的过程,但是在其它条件保持不变的情况下,刻蚀速率和离子能量的均方根,及束流密度呈正比的关系^[14]。通过调控离子能量,可以使得SiO₂刻蚀速率降低到5 nm/min以内。此速率条件下,有足够的时间对间隔层厚度刻蚀以及误差进行控制。对于其它影响刻蚀速率的因素,特别是不同批次的样品由于薄膜状态等差异对刻蚀速率的影响,通过在刻蚀正样之前,先对同一批次的试样进行刻蚀速率的定标,调节离子能量以及束流密度得到合适的刻蚀速率之后再对正样进行刻蚀,此时通过对时间的控准即可基本得到对刻蚀深度的控准。

4.2.2 直接镀制台阶的可行性分析

逐层套镀红外集成滤光片,首先在基片上镀制前二分之一F-P滤光片膜;然后用高精度定位平台遮挡基片,镀制间隔层,形成台阶;最后镀制后二分之一F-P滤光片膜。该方法的主要工艺难点在于镀制间隔层时厚度的监控。根据实验经验,SiO₂的沉积速率约为 $4 \times 10^{-10} \sim 8 \times 10^{-10}$ m/s,则相邻间隔层沉积所需的时间差约为8~16 s。而对于间隔层的厚度的允许误差,沉积时间允许误差约为 $\pm 1.2 \sim 2.5$ s。在以上时间范围内的监控有一定困难。但是如果通过改变工艺参数,使沉积速率降到 $2 \times 10^{-10} \sim 4 \times 10^{-10}$ m/s范围,从而允许时间控制误差放宽到 $\pm 2.5 \sim 5$ s,在操作上具有可行性。

4.3 可行性对制备技术的要求

除了在制备中对膜层厚度进行准确有效的监控外,薄膜其它相关的制备技术也有所要求。薄膜制备过程中,背景真空度应达到 10^{-4} Pa量级,工作压力应保持在 $5 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ Pa范围内。真空室内温度稳定,基片的温度应控制在 250 ± 10 °C范围

内。蒸发源的功率通过石英晶振仪进行负反馈控制,以得到稳定的沉积速率,沉积速率应稳定保持在 $2 \times 10^{-10} \sim 4 \times 10^{-10}$ m/s 范围。基片架的公转速度应比较高,旋转一周的沉积误差应在许可的范围内,最好保持在 20~30 r/min。

5 结 论

以 F-P 滤光片为基础,通过改变间隔层厚度的方法,在短波红外区域 1.9~2.4 μm 处设计了 32 通道的高光谱红外集成滤光片,各个光谱通道的半功率带宽在 5~8 nm,中心波长偏移误差小于 2 nm。通过对其进行误差和制作的可行性分析,在改进现有工艺技术条件下,使用离子束刻蚀和直接镀制间隔层形成台阶的方法均能实现,其中离子束刻蚀的方法较易实现。

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 Yuezhong, 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 Lin Bing, Liu Dingquan, Kong Lingfang *et al.*. Fabrication of middle infrared 8-channel micro integrated filters [J]. *Acta Optica 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
- 4 Zhang Fengshan, Pan Jiandong, Zhang Shuying *et al.*. An 8~14 μm linear gradual changed filter [P]. Patent: ZL95244913. 7, 1996. 12
张凤山, 潘建东, 张素英等. 8~14 微米线性渐变滤光器 [P]. 实用新型专利: ZL95244913. 7, 1996. 12
- 5 Hen Tao, Luo Chongtai, Liu Hongkai *et al.*. Development of multi-band linear variable filters [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7): 72~75
陈 焘, 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
- 6 Lin Xiaoyan, Wu Yonggang, Tian Guoxun *et al.*. Design of three-channel filters for the channel positions adjusted separately [J]. *J. 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
- 7 Lin Bing, Yu Tianyan, Li Daqi *et al.*. Study of fabrication of 16-channel micro integrated filter [J]. *J. Infrared Millim. 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
- 8 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
- 9 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
- 10 Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan *et al.*. Study on optical properties of two thin film materials in medium-wave infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 177~180
段微波, 刘定权, 张凤山等. 两种中波红外薄膜材料的光学特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 177~180
- 11 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
- 12 Zhao Lihua, Zhou Minghui, Wang Shuming *et al.*. Ion beam etching [J]. *Semiconductor Technology*, 1999, **24**(1): 39~42
赵丽华, 周名辉, 王书明等. 离子束刻蚀技术 [J]. 1999, **24**(1): 39~42
- 13 Lin Bing, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. The confirmation of etch rate of optical thin film with ion etch technology [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(2): 79~82
林 炳, 刘定权, 张凤山. 离子束刻蚀光学薄膜的速率定标技术 [J]. *光学仪器*, 2004, **26**(2): 79~82
- 14 Wang Xudi, Xu Xiangdong, Liu Ying *et al.*. Ion beam etching of HfO₂ film [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 454~458
王旭迪, 徐向东, 刘 颖等. HfO₂ 薄膜的离子束刻蚀特性研究 [J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(5): 454~458