

文章编号: 0253-2239(2008)01-0189-05

提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法

孟祥峰 李立峰

(清华大学精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 现代亚微米光栅的应用通常要求栅脊侧壁陡直。通过比较两种配备不同离子源的刻蚀机的反应离子束刻蚀结果,认为影响亚微米光栅侧壁陡直度的一个重要因素是离子束发散角(束散角),且小束散角有利于获得陡直的光栅侧壁。国内应用最广泛的双栅考夫曼刻蚀机束散角较大(大于 13°),致使用常规方法获得的熔石英光栅的侧壁倾角仅为 77° 。针对此刻蚀机,尝试了三种提高侧壁陡直度的方法:旋转倾斜刻蚀法、交替倾斜刻蚀法和二次金属掩模法,分别把侧壁倾角提高到 86° 、 86° 和 82° 。最后从掩模侧壁收缩速率和槽底部与顶部离子通量的差异对束散角对侧壁陡直度的影响给予解释,并说明了上述三种方法的工作机理。

关键词 物理光学; 衍射光栅; 亚微米光栅; 反应离子束刻蚀; 侧壁陡直度

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

Methods for Increasing Sidewall Steepness of Reactive Ion-Beam Etched, Sub-Micrometer-Period Gratings

Meng Xiangfeng Li Lifeng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Modern application of sub-micrometer-period gratings often requires the grating profile to be rectangular with steep sidewalls. By comparing cross sections of gratings made by reactive ion-beam etching in two etchers equipped with different types of ion-beam sources, we find that the divergence of ion-beam strongly influences the sidewall steepness of sub-micrometer-period gratings fabricated by using reactive ion-beam etching. All conditions being equal, a smaller divergence angle renders higher sidewall steepness. The divergence angle of the two-grid Kaufman ion-beam source that is widely used in China at present is typically larger than 13° , limiting the attainable sidewall angle of gratings in etched fused silica to be only 77° , unless a special measure is taken. Using such an ion-beam source, we experimented with three etching methods (rotation-tilt method, alternate-tilt method and metallic-mask recoating method), and increased the sidewall angle of sub-micrometer-period fused silica gratings to 86° , 86° and 82° , respectively. Two mechanisms by which the ion-beam divergence affects the sidewall steepness are considered: the shrinkage rate of the mask's sidewalls and the difference between the ion fluxes at the bottom and the top of the grooves. The roles of these two mechanisms in the three etching methods are also explained.

Key words: physical optics; diffraction grating; sub-micrometer-period grating; reactive ion-beam etching; sidewall steepness

1 引 言

现代亚微米光栅常采用矩形的槽形结构^[1~3],要求制作出的光栅具有一定的侧壁陡直度。这一方面是为了获得较深的槽,否则如果侧壁不够陡直,相

邻的两个栅脊的侧壁底部会连在一起,限制光栅的槽深;另一方面是为了使光栅具有预期的光学性能,如衍射效率、偏振特性和光栅体内场分布等。反应离子束刻蚀是制作这种矩形亚微米光栅的一种常用

收稿日期: 2007-05-30; 收到修改稿日期: 2007-07-25

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 孟祥峰(1982—),男,辽宁人,博士研究生,主要从事光栅的离子束刻蚀及其在线监测方法方面的研究。

E-mail: mengxiangfeng00@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 李立峰,男,北京人,教授,博士生导师,主要从事衍射光栅的电磁场理论方面的研究。

E-mail: lifengli@tsinghua.edu.cn

方法^[1~3],它采用离子轰击溅射与化学反应相接合的原理实现对目标材料的刻蚀。

在一项近期的科研工作中,需要在 SiO₂ 薄膜上刻蚀出亚微米周期的矩形槽形光栅,使用的是一台目前国内应用最为广泛的基于双栅考夫曼(Kaufman)离子源的刻蚀机(双栅考夫曼刻蚀机),但无论如何调整掩模参量、离子源电学参量、刻蚀工作气体及其配比,都无法获得侧壁陡直的光栅。之后,借用了一台基于三栅射频离子源的刻蚀机(三栅射频刻蚀机),仅使用其最常用的掩模参量、离子源电学参量和刻蚀工作气体就轻而易举地得到了侧壁陡直的光栅。导致这两台刻蚀机刻蚀的光栅侧壁陡直度反差如此之大的原因是其离子束的发散角(束散角)差距很大——双栅考夫曼刻蚀机的束散角太大。以此假设为前提,接受现有条件的限制,本文设计并尝试了三种提高侧壁陡直度的方法,获得了初步的成功。鉴于双栅考夫曼刻蚀机在国内离子束刻蚀微加工领域中的广泛使用,而三栅射频刻蚀机在国内实属凤毛麟角,在此介绍这些补救的方法。

本文比较了两种配备不同离子源的刻蚀机的反应离子束刻蚀结果,给出了三种提高光栅侧壁陡直度的工艺方法及其实验结果。最后对离子束束散角影响光栅侧壁陡直度的机理进行了定性的理论分析。

2 两种刻蚀机的反应离子束刻蚀结果

所制作光栅的材料为 SiO₂ (薄膜),周期为 675.7 nm,刻蚀槽深约为 700 nm。反应离子束刻蚀光栅所使用的工作气体是 CHF₃。光栅形貌采用扫描电子显微镜进行测量。

2.1 光栅掩模

为了使刻蚀出的光栅具有足够大的槽深,光栅的掩模应具有一定的抗刻蚀能力。我们曾经使用单纯的光刻胶掩模,但是其刻蚀速率较大。为了达到足够大的刻蚀槽深,必须制作较高的光刻胶掩模,而制作高掩模是比较困难的。因此,采用了上层为光刻胶、下层为铬组成的混合掩模。其具体的制作方法如下:在清洁好的 SiO₂ 基板上蒸镀约 100 nm 厚的铬膜,接着在其上旋涂 300~400 nm 厚的光刻胶,再通过全息曝光,并在实时监测光栅衍射效率的情况下制作出露底的光刻胶掩模^[4];然后将光刻胶掩模在 90 °C 恒温下烘干,再使用正入射的氩离子束将铬膜刻穿,即可制作出光刻胶与铬组成的混合掩模。

2.2 两种刻蚀机简介及其反应离子束刻蚀结果

本文使用的两种离子束刻蚀机分别是北京埃德

万斯离子束研究所生产的 LKJ-1C-150 型双栅考夫曼刻蚀机和中国科学技术大学国家同步辐射实验室研制的 KZ-400 型三栅射频刻蚀机。双栅考夫曼刻蚀机采用考夫曼离子源,由屏栅和加速栅组成双栅离子光学系统,其工件台可以方便地调整倾角和绕自身的法线旋转。三栅射频刻蚀机采用美国 Veeco 公司的条形射频离子源,离子光学系统为屏栅、加速栅和减速栅组成的三栅系统,其工件台由伺服电机控制,可以实现对工件的往复扫描刻蚀。

双栅考夫曼刻蚀机的基本电学参量为离子能量 450 eV、离子束流 80 mA、加速电压 220~240 V。三栅射频刻蚀机的基本电学参量为离子电压 500 V、离子束流 250 mA、加速电压 200 V。由于两种刻蚀机离子源的工作原理不同,特别是组成离子光学系统的栅数不同,所以它们的束散角存在较大差距。束散角是指从单一栅孔发射出子束的外围轮廓与离子源栅面法线之间的夹角,反映了离子束的准直程度。按照文献[5]中的方法,通过测量束流密度的分布,计算出了双栅考夫曼刻蚀机的束散角,约为 13°。但由于刻蚀机内部结构的限制,该测量结果偏小,实际的束散角应大于 13°。三栅射频刻蚀机的束散角约为 3°^[6],远小于前者。

在离子束正入射的条件下,使用两种刻蚀机分别得到如图 1 和图 2 所示的典型刻蚀结果。其中,三栅射频刻蚀机刻蚀后的光栅未经过残余掩模的清洁处理,实际的 SiO₂ 光栅栅脊为图中剖面线所标示的区域。使用双栅考夫曼刻蚀机刻蚀的 10 片光栅的平均侧壁倾角(侧壁与光栅平面之间的夹角,由扫描电子显微镜照片中光栅轮廓的最小二乘直线拟合得到,如图 1 中 α 角)为 77°,而使用三栅射频刻蚀机刻蚀的 6 片光栅均只有顶部有收缩的迹象,其下的大部分区域都很陡直,侧壁倾角接近 90°。可见,使用双栅考夫曼刻蚀机刻蚀的光栅侧壁陡直度较差。

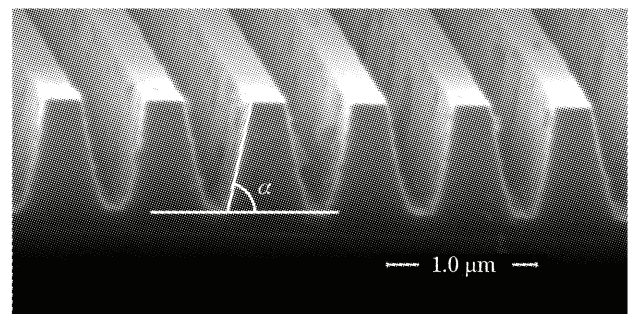


图 1 双栅考夫曼刻蚀机离子束正入射条件下得到的光栅
Fig. 1 Grating etched by two-grid Kaufman ion-beam etcher under normal incidence

为了克服这一缺点,进行了大量的实验,使用不同高度的掩模,改变离子源的电学参量——离子能量、离子束流和加速电压等,在工作气体中加入氧气和氩气,以及改变各种工作气体的配比。然而,实验结果表明所有这些努力对于提高双栅考夫曼刻蚀机刻蚀的光栅侧壁陡直度都是无效的。

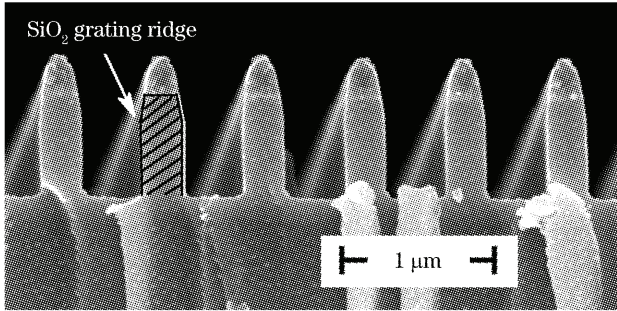


图2 三栅射频刻蚀机离子束正入射条件下得到的光栅
Fig. 2 Grating etched by three-grid RF ion-beam etcher under normal incidence

对比两种刻蚀机的性能参量,初步认为影响反应离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的一个重要因素是离子束的发散角,直接使用束散角大的双栅考夫曼刻蚀机正入射刻蚀不能获得侧壁陡直的亚微米光栅。

3 提高亚微米光栅侧壁陡直度的三种方法

为了提高使用双栅考夫曼刻蚀机刻蚀的光栅侧壁陡直度,设计并尝试了三种方法,并通过实验验证了其可行性。

3.1 旋转倾斜刻蚀法

由于反应离子束刻蚀的机理比较复杂,所以其离子束入射角度对侧壁陡直度的影响也比较复杂,实验方法是主要的分析手段^[7]。本文进行了改变离

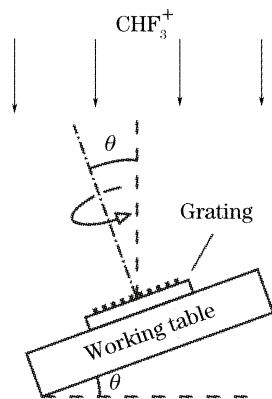


图3 旋转倾斜刻蚀法的示意图
Fig. 3 Schematic of rotation-tilt etching method

子束入射角度的刻蚀实验。

将待刻光栅用真空硅脂平坦地粘在工件台上,调整工件台的倾斜角度,使光栅法线与离子束的入射方向成 θ 角;在刻蚀时,使工件台绕其法线以10 r/min的速度匀速旋转,如图3所示。在 $\theta=20^\circ$ 的情况下,侧壁陡直度得到了很大改善,如图4所示。刻蚀的6片光栅的平均侧壁倾角为 86° 。

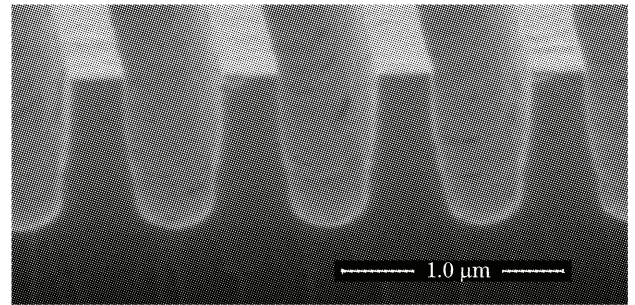


图4 采用旋转倾斜刻蚀法制作的光栅
Fig. 4 Grating fabricated with rotation-tilt etching method

3.2 交替倾斜刻蚀法

对于工件台不能旋转的离子束刻蚀机,旋转倾斜刻蚀法不再适用。为此,本文设计了交替倾斜刻蚀法,旨在利用离子束倾斜入射来提高光栅的侧壁陡直度。

将待刻光栅粘在工件台上,使光栅栅线与工件台俯仰运动的转轴平行(即与图3所示的光栅安装方式相同,栅线垂直于纸面),这样在改变工件台的倾角时,就使光栅绕其栅线方向旋转了相同的角度。在反应离子束刻蚀过程中,工件台不旋转,通过外置的调节手柄使工件台反复、交替地倾斜 $\pm\theta$,同时保证两个倾斜方向的刻蚀时间相等。这种方法的实质是使离子束反复、交替地以与光栅法线成 $\pm\theta$ 的方向刻蚀光栅,如图5所示。在 $\theta=10^\circ$ 、两边各刻蚀4次、每次75 s的情况下,得到的光栅的平均侧壁倾角为 86° ,如图6所示。

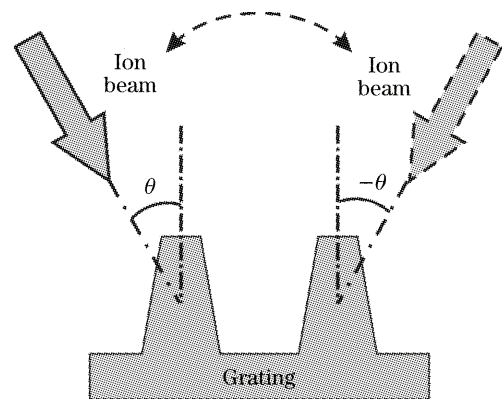


图5 交替倾斜刻蚀法的等效原理
Fig. 5 Principle of alternate-tilt etching method

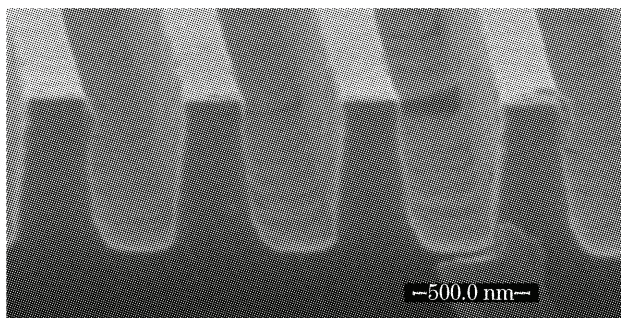


图 6 采用交替倾斜刻蚀法制作的光栅

Fig. 6 Grating fabricated with alternate-tilt etching method

3.3 二次金属掩模法

在离子束刻蚀中,掩模的特性对刻蚀的结构有直接影响。为了进一步提高掩模的抗刻蚀能力,采用了在刻蚀一定深度后重新镀制金属掩模继续刻蚀的方法^[1]。

使用反应离子束正入射对光刻胶与铬组成的混合掩模进行刻蚀,通过控制刻蚀时间,使得到的光栅槽深约为 300 nm。再利用丙酮超声清洗清除光刻胶,用化学方法脱铬,去除刻蚀后剩余的掩模。由于刻蚀的槽深较浅,所以光栅的侧壁较陡直。接着,在光栅主平面内,分别沿与光栅法线成 $\pm 45^\circ$ 的两个方向,为其镀制铬膜,借助阴影效应使铬膜仅均匀地包裹在光栅顶部,即得到了新的铬掩模,如图 7 所示。然后,对重新镀制了铬掩模的光栅继续进行反应离子束刻蚀,直至达到需要的槽深。最后,再利用化学方法进行脱铬处理,即可得到侧壁较陡直的光栅,如图 8 所示。刻蚀的 4 片光栅的平均侧壁倾角为 82° 。从图中可以看出,得到的光栅栅脊分为宽度不同的两部分:上半部分较窄,下半部分较宽。虽然两部分栅脊的侧壁倾角均在 85° 以上,但它们的宽度有一定差异,导致整个栅脊的平均侧壁陡直度受到影响。

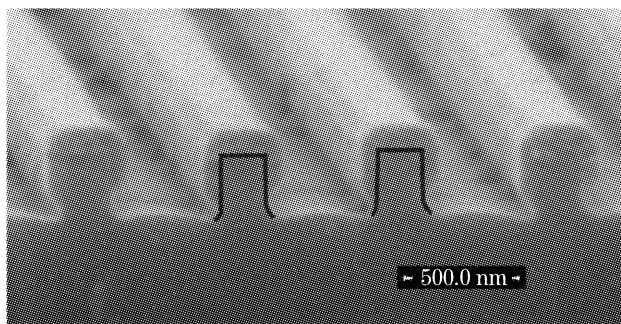


图 7 重新镀制的铬光栅掩模

Fig. 7 Recoated chromium grating mask

此方法的关键在于重新镀制金属掩模这一工序。由于实验条件所限,使用的是一台电阻加热式蒸发镀膜机,根据镀膜的时间来控制膜的厚度,得到

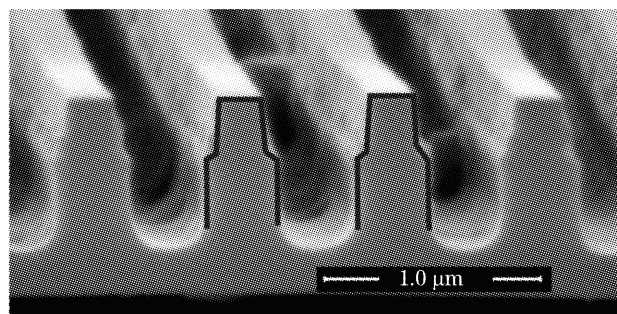


图 8 采用二次金属掩模法制作的光栅

Fig. 8 Grating fabricated with metallic-mask recoating method

的新金属掩模侧壁较厚,而且膜厚左右不对称。这也是导致光栅栅脊出现上下宽度不同的两部分的原因。采用定向性好、沉积速率稳定的镀膜方式,会更有利于控制金属掩模的形貌,从而进一步提高最终刻蚀得到的光栅的侧壁陡直度。

4 束散角影响亚微米光栅侧壁陡直度的机理

首先,离子束的发散角会影响掩模侧壁收缩的速率,进而影响光栅侧壁陡直度。当束散角较大时,离子束沿光栅面方向的刻蚀速率较大,导致掩模侧壁很快形成倾角较大的“刻面”(facet)^[8]。随着刻蚀的进行,刻面会沿其法线方向移动,当它移动到掩模和被刻材料的交界面后,掩模的底部宽度开始减小。由于掩模底部和被刻材料的栅脊顶部在交界面处的宽度是相等的,那么随着掩模底部的收缩,栅脊顶部也在收缩,而且越接近顶部的栅脊宽度越小,从而形成倾斜的光栅侧壁。当束散角较小时,刻面向交界面的移动速度较慢。在其移动到交界面之前,刻蚀出的光栅侧壁较陡直;而在其移动到交界面之后,光栅的侧壁仍然会由于掩模侧壁的收缩而产生倾斜,图 2 所示的刻蚀结果很好地说明了这一点。

其次,离子束的发散角会影响槽底部与顶部的离子通量的差异,进而影响光栅侧壁陡直度。当束散角较大时,随着刻蚀槽深的增大,与光栅面法线方向夹角较大的离子会被栅脊遮挡(形成再溅射),不能到达光栅槽的底部,导致槽底部的离子通量明显小于槽顶部的离子通量,特别是对侧壁刻蚀影响较大的大角度入射的离子通量更是如此。那么,光栅槽底的横向刻蚀速率会明显低于槽顶的横向刻蚀速率,最终导致光栅侧壁倾斜。

对于旋转倾斜刻蚀法和交替倾斜刻蚀法来说,它们都是通过改变离子束的入射角度,使槽底部和顶部的离子通量的差异减小,进而提高光栅的侧壁

陡直度。然而,它们并不能减缓掩模侧壁收缩的速率,况且到达槽底部和顶部的离子通量的差异仍然存在,致使它们不能制作出侧壁倾角为 90° 的光栅。而二次金属掩模法则利用了新的金属掩模良好的抗刻蚀能力,减缓甚至抑制了掩模侧壁收缩的进程,进而提高了光栅的侧壁陡直度。虽然这种方法不能减小槽底部和顶部的离子通量的差异,但是新的金属掩模将槽顶部包裹了起来,避免了其进一步的刻蚀,这对侧壁陡直度的提高是有很大帮助的。

5 结 论

离子束的发散角是影响反应离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的一个重要因素,小的束散角有利于获得高的光栅侧壁陡直度。定性分析了束散角对反应离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的影响机理。对于束散角较大的双栅考夫曼刻蚀机,直接使用正入射的反应离子束刻蚀,得到的光栅侧壁倾角仅为 77° 。使用旋转倾斜刻蚀法和交替倾斜刻蚀法得到的光栅侧壁倾角达到了 86° ,而使用二次金属掩模法得到的光栅侧壁倾角也有 82° 。

虽然二次金属掩模法需要镀制金属掩模和再次刻蚀,工序最为复杂,但它不需要调节工件台的角度,也不需要旋转工件台,对于工件台不能调节角度和旋转的刻蚀机来说,它是三种方法中唯一可行的一种。旋转倾斜刻蚀法和交替倾斜刻蚀法均只需要一次反应离子束刻蚀即可完成,工序比较简单。特别是,旋转倾斜刻蚀法只需要在刻蚀前调整好工件台的状态,刻蚀过程中无需进行其他操作,工艺操作最为简单、易于控制,是使用工件台能够调节角度和进行旋转的刻蚀机时的首选方法。对于使用工件台可以调节角度但不能旋转的刻蚀机来说,可以选择

交替倾斜刻蚀法。

致谢 感谢中国科学技术大学国家同步辐射实验室的付绍军教授和刘颖博士为使用 KZ-400 型三栅射频刻蚀机进行光栅刻蚀实验提供了条件并给予技术指导。感谢曾理江教授在光栅制作工艺方面的指导。感谢林慧同学制作了束流密度测量系统。

参 考 文 献

- 1 T. Clausnitzer, J. Limpert, K. Zollner *et al.*. Highly efficient transmission gratings in fused silica for chirped-pulse amplification systems[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34): 6934~6938
- 2 H. T. Nguyen, J. A. Britten, T. C. Carlson *et al.*. Gratings for high-energy petawatt lasers[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5991**: 59911M-1~8
- 3 K. Hehl, J. Bischoff, U. Mohaupt *et al.*. High-efficiency dielectric reflection gratings; design, fabrication, and analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(30): 6257~6271
- 4 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Method for controlling groove depth and duty cycle of rectangular photoresist gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1285~1291
赵劲松,李立峰,吴振华. 一种控制矩形光刻胶光栅槽深和占宽比的方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1285~1291
- 5 G. Aston, H. R. Kaufman, P. J. Wilbur. Ion beam divergence characteristics of two-grid accelerator systems[J]. *AIAA J.*, 1978, **16**(5): 516~524
- 6 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China. *Development Report of a Large Ion-Beam Etcher* [R]. 2003, 11~13
中国科学技术大学国家同步辐射实验室. 大型离子刻蚀机研制报告[R]. 2003, 11~13
- 7 Liu Jinsheng. *Ion Beam Technology and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. 202~206
刘金声. 离子束技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 202~206
- 8 H. I. Smith, R. C. Williamson, W. T. Brogan. Ion beam etching of reflective array filters [C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1972. 198~201