

离子蚀刻闪耀光栅

严国荣

一、前言

全息光栅有很多优点,诸如:(1)由于线槽间隔的精度极高,故不会出现鬼线,而且杂光也少;(2)可以比较容易地做出很细的线槽间隔;(3)与历来的机刻光栅相比,可节省不少制造费用和时间。但是,光栅的衍射效率十分敏感地依附于线槽的形状,为获得高的衍射效率,必须使线槽具有特定的形状。在机刻光栅的情况下,线槽呈三角形,具有某种闪耀效应,因而提高了衍射效率。但在全息光栅的情况下,一般难以控制线槽的形状,从而很难提高衍射效率。为克服此缺点,至今已提出了若干种方法,用来控制全息光栅的线槽^[1~6]。但是,在这些光学方法中,由于闪耀角与使用的光的波长有固定的关系,难以形成所要求的角度。

1976年以来,日本的青柳克信等人^[7~9]提出了用离子蚀刻来控制槽形,从而出现了一种比较理想的方法。由于使用了易于控制的离子束,因而不仅槽形控制简便,而且能做出任意线槽间隔光栅的闪耀角。下面,就离子蚀刻全息光栅的有关问题,作一简单综述。

二、关于全息光栅的制作

在制作全息光栅的干涉系统中,常用氩离子或氦镭激光器作为光源。这是因为,对氩离子激光器的 4579\AA 振线及氦镭激光器的 3250\AA , 4416\AA 振线,光刻胶都能很好地感光。为制作优质的光栅,必须用高质量的扩束器透镜。此外,透镜前面的空间滤波器,其针孔也必须很小,以便提高光束的质量。另外,在平面光栅的情况下,光的准直性会影响线槽间隔的精度,因而也必须予以注意。

光刻胶多半使用 Shipley AZ-1350。根据所要求的膜层厚度,或以原液、或以香蕉水进行稀释,并经过仔细的过滤后,再在转台上涂布于试件。当然,试件也必须充分洗净。

图1示出转台转速与膜层厚度之间的关系。在离子蚀刻的情况下,必须根据光栅的线数及蚀刻条件,来选择合适的胶层厚度。

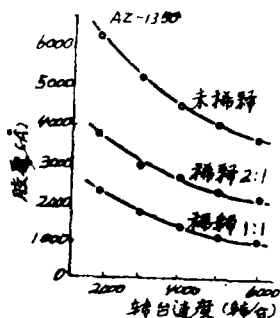


图1 转速与光刻胶厚度

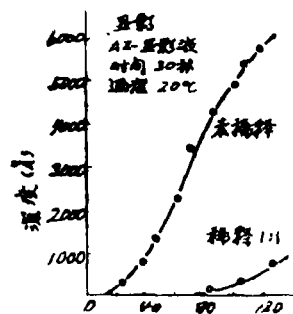


图2 AZ-1350的特性曲线

图 2 示出 AZ-1350 的特性曲线。由于光刻胶及显影液的特性曲线未必都是线性的，故所制光栅的形状将随曝光及显影条件而有很大的变化。在用离子蚀刻法制作光栅的情况下，用作模板的光栅形状究竟如何为好，对此，目前研究得还不够充分。

三、基板的选定⁽¹⁰⁾

用离子蚀刻法来控制全息光栅的槽形时，基板材料的选择十分重要。作为基板材料，它必须满足如下条件：

- (1) 蚀刻速度足够快；
- (2) 可得到高的表面精度；
- (3) 对温度变化要稳定。

金属材料虽然蚀刻速度快，但其表面粗糙，故不适用。玻璃一类的材料则恰恰相反：表面比较光滑，但其蚀刻速度很慢，故也不适用。这样，就寄希望于高分子有机材料。

表 1 各种材料的蚀刻速度

材	料	蚀 刻 速 度	Å/分
AZ-1350		550	
环氧树脂		550	
聚碳酸脂		600	
聚苯乙烯		300	
酚醛树脂		450	
PMMA		800	

表 1 列出了各种有可能用作光栅基板的高分子材料相对于氩离子的蚀刻速度（照射角为 60° ，加速电压为 1 千伏，束流密度为 1 毫安/厘米²）。由表可见，环氧树脂虽然表面光洁，稳定性也好，很有希望用作基板材料，但对制作高效率的光栅来说，其蚀刻速度仍然慢了一些。另外，聚碳酸酯，酚醛树脂及聚苯乙烯都各有一些缺点，故至今仍未用作基板。只有 PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）最适于作基板材料。

但是，由于 PMMA 具有热可塑性，对温度变化极为敏感，故仅其本身是得不到高的表面精度的。为克服此缺点，可以在高精度研磨的玻璃板上先形成 PMMA 的薄膜，并由此获得表面精度与温度特性大致与玻璃相同的基板⁽¹¹⁾，其结构如图 3 所示。

图 4 示出了比较表面精度的实验结果。分别使用了上述结构的基板 (A) 及相同尺寸的

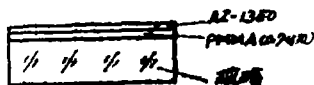


图 3 光栅垫板的结构

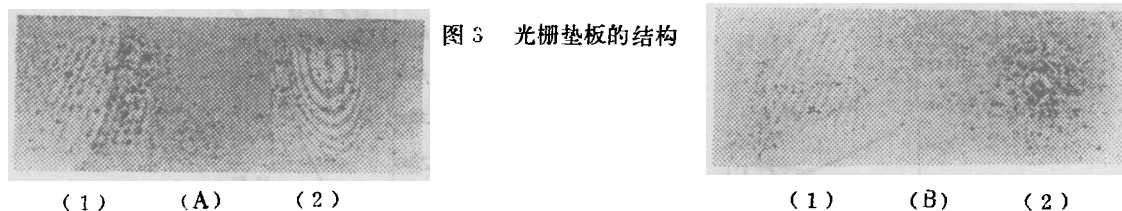


图 4 表面精度的比较：(1)玻璃板上形成的 PMMA 薄膜，(2)相同尺寸的 PMMA 平板，(A)室温，(B)升温到 45°C

PMMA 基板 (B)。在不同的温度下, 得到了不同的牛顿环, 从而可以看出这两种基板对温度变化的稳定性如何。

另外, PMMA也好, AZ-1350也好, 其离子蚀刻速度都是在 60° 附近为最大, 在 90° 时为零。由于它们的蚀刻特性非常相似, 故有利于用离子蚀刻来制作自息光栅。

四、全息光栅的离子蚀刻

进行离子蚀刻时所用的模板, 其制作过程如 2 节所述。由于离子蚀刻是在同一条件下进行的, 因此, 常常要求制作相同的全息光栅来作模板。这样, 就必须象 M. J. Beesley 等所述的那样, 一边观察一边显影。

图 5 示出离子蚀刻装置的草图。如图所示, 该装置是由离子源及加工室所组成。辉光放电室内产生的氩离子, 由冷阴极上的加速电极予以加速, 再被引向加工室的试件台。在蚀刻绝缘体的情况下, 为避免试件带电所引起的麻烦, 可用由中和器产生的电子来中和离子。试件台相对于离子束的方向, 可在 $0\sim 90^\circ$ 的范围内任意调节。还可以通过马达传动、相对于离子束沿 X-Y 方向移动, 而不改变光栅的线槽方向。这样, 就有可能在试件整个面上进行均匀的离子蚀刻。此外, 为防止由离子束引起的试件发热, 应对试件台进行水冷。

图 6 示出离子束入射角与闪耀角之间的关系。由图可见, 二者之间有很好的线性关系。图中所示的闪耀角可由表示最大衍射效率的波长 λ 。(闪耀波长) 来求出。

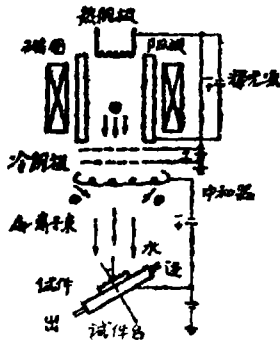


图 5 离子蚀刻装置的示意图

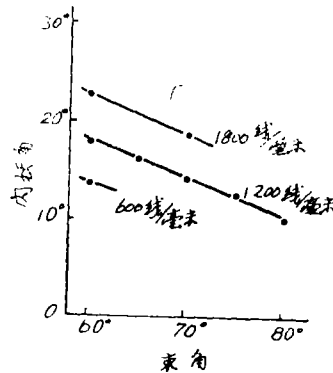


图 6 PMMA 光栅的闪耀角与离子束入射角

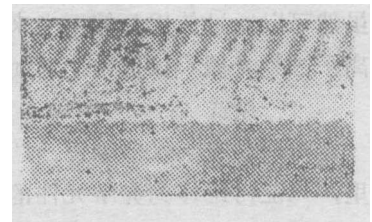


图 7 离子蚀刻光栅的线槽断面

图 7 所示的 SEM 照片示出了入射角为 65° 时蚀刻出的光栅线槽断面, 其闪耀角完全符合于图 6 所示的数值。线槽断面的三角形随蚀刻时间而变化。时间一长, 顶点就成圆形, 若再继续下去, 三角形就被破坏, 衍射效率随之下降。因此, 必须注意在适当的时间停止蚀刻。

五、离子蚀刻全息光栅的特性

1. 衍射效率

测定衍射效率的 Littrow 型双路单色仪 (double monochromator), 其光学系统如图

8 所示。在单色仪的第一路中，一般都使用棱镜。但是，为了提高长波段的波束纯度，有时也换用光栅。在紫外区，光源可用重氢灯，从可见到近红外区则使用钨丝灯。探测器用波长范围宽、灵敏度高的 R955 型光电倍增管。此外，为了测定相应于各个偏振分量的衍射效率，在狭缝的靠近光源的一侧，安置了一个起偏器，使 P 分量与 S 分量的单色光入射到第二路上的被测光栅。这里，P 分量的电矢量平行于光栅线槽，而 S 分量一垂直于光栅线槽。

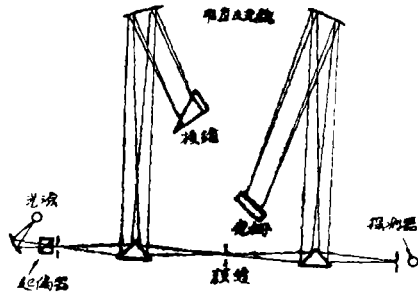


图 8 Littrow 型双路单色仪的光学系统

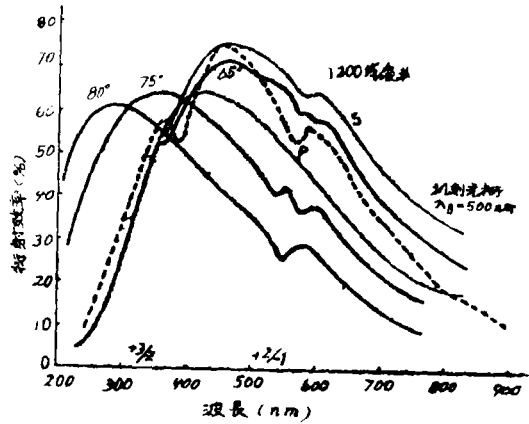


图 9 离子蚀刻光栅的一级衍射效率曲线

图 9 示出了离子蚀刻全息光栅的衍射效率。由图可见，当离子束入射角为 65° 时，衍射效率达 73%，与同图示出的波长为 500 毫微米的机刻光栅大致相同。若将入射角加大到 75° 或 80° ，则最大效率就开始下降。这可能是由于模板光栅的线槽形状偏离了最佳条件所致。

在某个波长产生的衍射效率的急剧变化称之为反常。这是光栅用作分光器时的一个缺点。虽然可以通过使用 P 偏振光来避免反常的出现，但正如图 9 所示，这样就减小了衍射效率。离子蚀刻光栅不仅反常小，而且衍射效率向长波方向下降的趋势也比较缓慢。

2. 杂光

对一种光学仪器来说，产生杂光的原因是各种各样的，而且也常常是十分复杂的。在这里，只能讨论作为光学元件的光栅，其产生杂光的原因究竟何在。在光栅表面产生杂光的原因之中，有灰尘、划伤、脏物以及机刻光栅特有的刻划误差，全息光栅特有的表面微小凹凸等等。对于前几种，如果操作认真仔细，还有可能防止，而后两种则是难题。

在离子蚀刻光栅的情况下，由蚀刻面的粗糙化所引起的杂光增加，显然也是个问题。但是，最近由于在基板的制作方法方面下了功夫，以及找出了合适的蚀刻条件，蚀刻面的粗糙化已变得非常之小，使杂光减少到仅比全息光栅略大一点。

用图 8 所示的双路单色仪测定了杂光，并对各种光栅进行了比较。图 10 示出了几种光栅在 $\lambda = 410$ 毫微米及 $\lambda = 240$ 毫微米时杂光的比较。图中用点线示出的，是机刻光栅中杂光少和杂光多的两条代表性的曲线。对

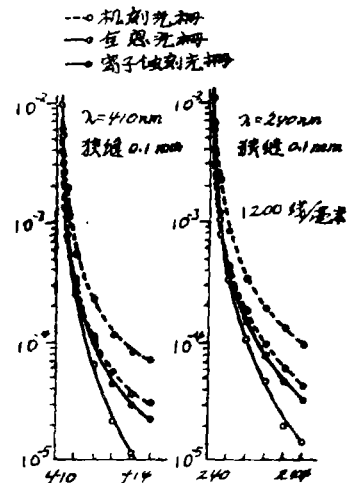


图 10 各种光栅相对于两种波长的杂光比较

一般的光栅，其杂光分布应处于这二者之间。离子蚀刻光栅的杂光虽然大于全息光栅，但与机刻光栅相比，除主线附近外，都有所改善。在主线附近，离子蚀刻之前的全息光栅也有同样的倾向。因此，如能改进模板光栅，还可能进一步减少杂光。

3. 波面精度

决定波面精度的主要因素是基板的表面精度及线槽的平行性与扭曲等等，而后者又取决于制作此模板光栅的光学系统的平行光束精度。利用 Twyman-Green 干涉仪，可以正确地测定衍射波面的精度及基板的表面精度。比较此二精度，即可知道该光学系统的平行光束精度。因此，若反馈此结果，就可以提高光束的精度。

离子蚀刻光栅的波面精度由模板光栅所决定，故必须以足够高的精度来制作此模板光栅。虽然离子束的平行度差、强度分布不均匀，也可能是变坏波面精度的另一种主要原因，但在适当的离子蚀刻条件下制成的光栅，其衍射波面的精度几乎与蚀刻前的模板光栅相同，波面精度没有下降。因此，用离子蚀刻的方法可以获得 $\frac{\lambda}{2} \sim \frac{\lambda}{10}$ 的精度。

图11示出一组在不同情况下获得的干涉条纹照片。由该照片可见，全息光栅(A)，离子蚀刻光栅(B)及基板表面(C)三者的精度几乎一样。因此，离子蚀刻并不降低精度。

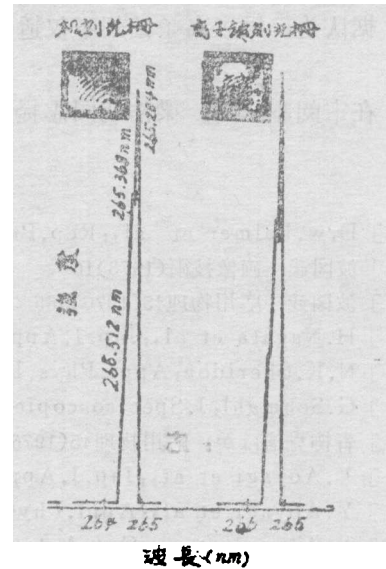
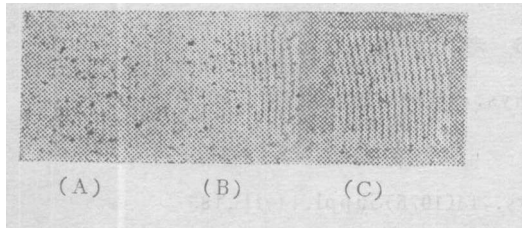


图11 波面的干涉图：(A)及(B)由不同光栅的衍射，(C)从表面反射 图12 不同光栅的分辨本领试验结果

4. 分辨本领

为研究光栅本身的分辨本领，一般，所用分光器的分辨本领至少要与光栅的理论分辨本领相同，或者要更高一些。利用自动记录分光光度计，比较了机刻光栅与离子蚀刻光栅的分辨本领。

在狭缝较宽的情况下，可用下式来求出可分辨的最小波长差 $\delta_{\lambda}^{(12-13)}$

$$\delta_{\lambda} = (wd/f\lambda) \Delta\lambda$$

这里，W是狭缝宽度，D是口径，f是焦距， $\Delta\lambda$ 是光栅的理论分辨率。自动记录分光光度计的分光器规格为：f = 400毫米，W = 0.1毫米，口径比 = 13。光栅的刻线面积为 30×30 毫米²，间距为1200线条/毫米。因而，如果以 $\lambda = 265$ 毫微米来计算， $\delta_{\lambda} = 0.15$ 毫微米。图12示出对汞的谱线265.512毫微米、265.368毫微米及265.204毫微米进行分析试验的结果。

由于光栅的衍射波面精度对分辨本领也有很大的影响，为此，在图中还示出了干涉图照

片,说明试验中所用的光栅的波面精度大致相同。

由图可知,不论那种光栅,都可清晰地分辨出 $\delta_\lambda = 0.164$ 毫微米。而在 $\delta_\lambda = 0.144$ 毫微米时,若考虑了光谱的强度差,也不妨认为是可分辨的。与机刻光栅相比,离子蚀刻光栅无疑具有良好的分辨本领。因此,只要注意不使波面精度下降,就可以用离子蚀刻法来获得性能与机刻光栅相同、甚至更好一些的光栅。

六、结束语

以上介绍了离子蚀刻光栅的制备方法及其性能测试。在440毫微米外,它的衍射效率可达73%,且衍射效率的反常情况远小于机刻光栅。波面精度也大致与全息光栅相同。此外,通过适当地选择基板材料及离子蚀刻条件,其分辨本领大致与机刻光栅相同,而其杂光略优于机刻光栅。

但是,与这里所用的PMMA相比, SiO_2 由于其良好的热稳定性和机械稳定性而被认为更适于作光栅材料,只是由于其蚀刻速度低于AZ-1350而未被选用。最近,日本的Shinji Matsui等人^[14]提出,可以利用 CF_4 反应离子蚀刻方法,来制作基板材料为 SiO_2 的光栅。据认为,反应离子蚀刻不仅适用于 SiO_2 ,而且也有可能适用于其它的基板材料。

在审阅本文时,梁浩明同志提出了一些很好的修改意见,谨表衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] E.w.Palmer et al., Rep. Prog. Phys., 38(1975)975
- [2] 波冈武: 画像技術(1973)16
- [3] 波冈武: 応用物理45(1976)655
- [4] H.Nagata et al., Jap. J. Appl. Phys., 14(1975)Suppl. 14-1P. 185
- [5] N.K.Sheridon: Appl. Phys. Letters 12(1968)316
- [6] G.Schmahl; J. Spectroscopical Soc. Japan 23(1974)Suppl. 13
- [7] 青柳克信ほか: 応用物理45(1976)657
- [8] Y.Aoyagi et al., Jap. J. Appl. Phys., 15(1976)721
- [9] Y.Aoyagi et al., Appl. Phys. Letters 29(1976)303
- [10] Y.Aoyagi et al., Opt. Acta 23(1976)701
- [11] 佐野一雄ほか: 分光研究26(1977)327
- [12] Y.Aoyagi et al., Opt. Commun, 29(1979)253
- [13] 佐野一雄: 応用物理48(1979)539
- [14] S.Matsui et al., Jap. J. Appl. Phys., 19(1980)L126