

文章编号 1004-924X(2001)02-0109-06

高效平面全息衍射光栅的获取方法

赵 博¹, 齐向东²

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 从全息衍射光栅的制作原理出发, 介绍了全息光栅的主要制作方法, 并与刻划光栅对比分析了全息衍射光栅的诸多优点。通过利用光栅设计的耦合波理论对全息衍射光栅槽型、槽深及槽间距等进行了优化设计, 同时利用离子束刻蚀技术获得了高效率全息光栅。文中全面分析了制作高效率平面全息光栅的各项关键技术。

关键词: 全息光栅; 离子刻蚀; 衍射效率

中图分类号: O 436.1 **文献标识码:** A

1 引言

随着国家在高新技术领域中大型工程项目如 LAMOST 天文望远镜工程、同步辐射工程、激光核聚变工程的陆续开展, 高精度光谱分析仪器的应用领域和范围越来越广泛, 对高衍射效率、大刻划面积全息及全息离子刻蚀光栅的需求量也在逐步加大。本文试图就全息和全息离子刻蚀光栅的发展情况及制作方法做较为详细的论述。

衍射光栅的制作方法主要可以分为两种: 1) 利用光栅刻划机在光栅基底刻划出具有周期结构的刻槽, 这种光栅称为机械刻划式光栅; 2) 利用激光干涉技术, 将涂覆在光栅基底上的光致抗蚀剂曝光并显影, 在光栅基底上形成具有周期结构的刻槽, 或者进而利用离子束轰击刻槽使之成为闪耀光栅, 增强光栅的衍射效率, 这种光栅称为全息光栅或者全息离子刻蚀光栅。

机械刻划式光栅的优点是光栅的刻线密度可以进行比较灵活地调整, 衍射效率高于一般的全息光栅。刻划机分度机构普遍采用干涉反馈控制系统, 用激光的波长或光栅刻槽的空间周期作为基准, 它的刻划精度比纯机械式分度刻划机有了大幅度提高。日本的 HITACHI 公司、美国的 RICHARDSON 光栅实验室等都已研制出可以刻制不同面形(如平面、球面、非球面)光栅的光栅刻划机。但由于机械加工精度、装调精度、控制精度等因素的限制, 机械刻划式光栅仍存在一些残

余误差, 在光栅的谱面上还可产生强度可观的各种鬼线, 影响光栅在高精度光谱仪器中的应用。而且光栅刻划机的制造成本高、光栅刻划周期长、对周围环境(如温度、振动、电压波动等)的要求苛刻, 正是由于这些缺点限制了机械刻划式光栅的应用范围。随着激光技术在光栅制造领域中的应用、光学设计的计算机化、各种新材料的不断出现以及光栅理论不断发展, 全息及全息离子刻蚀光栅以其相对低廉的制造成本、较低的杂散光强度、高衍射效率和较高的破坏阈值等诸多优点, 目前正在逐步改变以机械刻划式光栅为主的市场格局, 成为衍射光栅应用的主流产品。

2 全息光栅的制作原理

根据相干原理, 当两束平行记录单色光以夹角 2θ 相交时, 如图 1 所示:

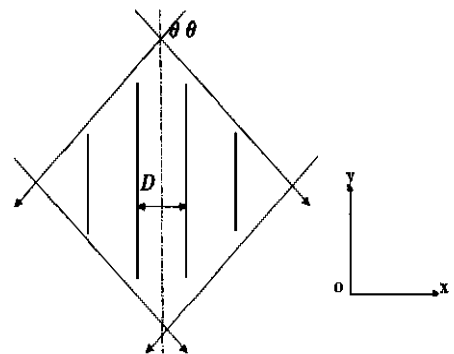


Fig 1 Interference field

在相交的区域形成了如图 1 所示的光强周期分布的干涉场, 光强分布有下式决定:

$$I = 4I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi x d}{\lambda D} \right] \quad (1)$$

式中: I_0 —入射光束的强度

d ——干涉条纹间距

λ ——入射光束波长

D ——干涉场宽度

在 x 方向上的光强分布如图 2 所示:

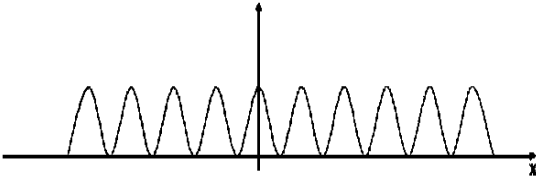


Fig 2 Distribution of the intensity

干涉条纹的间距 d 由下式给出:

$$d = \lambda_0 / 2 \sin \theta \quad (2)$$

这里 λ_0 为记录光的波长, θ 为两束记录光夹角之半。当将涂有光致抗蚀剂的光栅基底放在干涉场内曝光时, 被曝光部分的光致抗蚀剂中一些高分子聚合物就开始分解(假设记录光的波长短于某个临界值), 且分解的速度与干涉场中光强分布有关。再用显影剂将曝光区域内的分解物去除, 这样在光栅基底上就形成了具有一定深度的光栅槽形分布。光栅刻槽深度与曝光时间、显影剂浓度和显影时间成比例, 该比例是非线性的。

由于全息光栅的槽形为近似正弦曲线形状, 因而它的衍射效率要低于机械刻划式光栅。为了克服这个缺点, 在许多高精度仪器中普遍使用全息离子刻蚀光栅作为分光元件。这种光栅继承了全息光栅低杂散光的优点, 并且某些类型全息离子刻蚀光栅的衍射效率还要高于机械刻划式光栅。全息离子刻蚀光栅的制作方式基本是以全息光栅做成全息掩模板, 然后利用离子束刻蚀机以一定的角度轰击, 从而得到具备不同槽型的全息离子刻蚀光栅。

3 全息光栅衍射效率的优化设计

两束记录光在干涉场中所形成干涉条纹的光强近似正弦分布, 经显影后所形成的光栅如不经过特殊处理, 它的刻槽形状也为近似正弦形。这种槽形的衍射效率可以满足一般光谱仪器的要求, 但对于需要经过多次衍射的应用, 如激光核聚变中激光脉冲压缩光栅, 它的衍射效率就达不到使

用要求。必须对光栅槽形进行优化。耦合波方法是 80 年代提出的一种矢量理论分析方法, 它将光栅区域内的电磁场作空间谐波展开, 通过不同区域边界的电磁场边界匹配条件得到一组无限维耦合微分方程组, 采用一定的数学方法求得光栅电磁场衍射问题的精确解。这种方法已被广泛地应用于光栅结构的分析与设计中。

利用耦合波方法求解任意光栅刻槽函数的电磁场衍射边界值问题时, 主要包括三个步骤: 1) 将光栅分为许多薄层, 所分层数应足够近似光栅实际的面型函数; 2) 每个光栅薄层内的电磁场通过耦合波方法确定; 3) 在不同区域边界面上及光栅薄层之间运用电磁场边界匹配条件, 通过一定的数学方法求得各级衍射波的振幅及衍射效率。

4 全息光栅的制作方法

高效率平面全息光栅的制作过程大致可分为: 涂胶、干涉条纹记录、全息光栅的闪耀化这几个主要步骤。

第一步: 涂胶

均匀的光刻胶涂层是得到高质量全息光栅必不可少的条件之一。涂胶的方式主要分为两种: 旋转法和浸入法。

(1) 旋转法: 对于尺寸和重量较小的光栅基底可以采用高速离心机利用离心力的作用将光刻胶均匀地涂在光栅基底的表面上。涂胶前, 光刻胶必须经过稀释以保证涂层的均匀性和涂层厚度的可控性。离心机的角加速度必须足够大以保证在瞬间角速度达到 3000 转/m in。在 30s~ 60s 之后, 随着光刻胶溶液的部分蒸发涂层厚度已经足够薄, 这时涂层厚度几乎不再随着旋转时间而变化。涂层的最后厚度只与溶液的粘度和旋转速度有关, 见图 3。

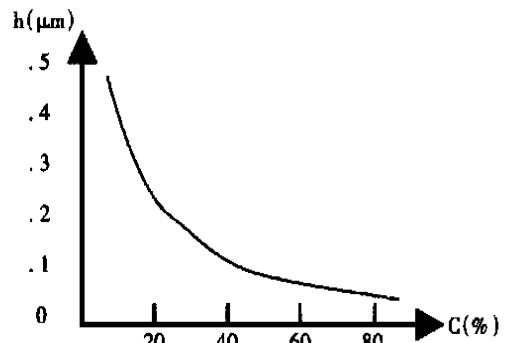


Fig 3 The dependence of the thickness on the viscosity and the rotating speed

光栅基底上的任何缺陷、污染及光刻胶溶液不均匀都会在光栅表面形成彗星状的缺陷, 该缺陷要比原缺陷大几个数量级。因此, 要求光栅基底的表面粗糙度应小于 $0.01\mu\text{m}$, 光刻胶溶液要仔细过滤并在无尘的环境中操作。同时, 也应对湿度进行控制, 它对光刻胶的性能有一定的影响(通常要高于 50%, 但太高的湿度会损害其它的仪器设备)。

(2) 浸入法: 当光栅基底的尺寸和重量较大时, 因受离心机结构的限制以及从安全方面的考虑, 不宜采用离心旋转的方式涂胶。浸入法是光栅基底浸入到盛满光刻胶溶液的容器中, 然后缓慢、匀速地将其拉出, 当光刻胶从光栅基底均匀地流下时, 在光栅基底的表面就形成了光刻胶涂层, 涂层的厚度取决于光刻胶的稀释度、拉出的速度和拉出时光栅基底的角度。同样的, 固定光栅基底, 而向下移动光刻胶容器也可以达到相同的效果。

第二步: 干涉条纹的记录

最常用的记录干涉条纹的光路是将涂覆光刻胶的光栅基底垂直与由两束平行单色所形成的干涉场的法线放置, 如图 4 所示。

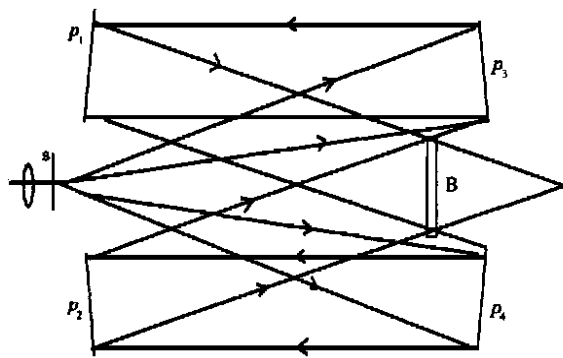


Fig 4 Interference optical system

图中 P_3 和 P_4 为准直镜, P_1 和 P_2 为平面反射镜, B 为光栅基底, S 为空间滤波器。

为了得到高质量的全息光栅, 光学系统中的各种光学元件的加工质量必须保证其波前象差低于 $1/10\lambda$ 。曝光系统中, 制造全息光栅的关键技术主要包括如下几个方面: 光栅空间周期的精确调整, 降低由于两束记录光波前的平面性误差(发散和会聚)而引起的光栅刻槽分布误差, 刻槽形状和深度的控制。全息光栅的制造与刻划光栅的制造相比, 它的缺点是全息光栅的空间周期不宜精确把握, 或者说它的刻槽密度没有机械刻划光栅那样准确。为了保证全息光栅的空间周期误差低于 5%, 可以在曝光之前将一块具有准确空间周期的机械刻划光栅摆放在干涉场中, 使它的刻槽

与干涉场中的干涉条纹叠加产生莫尔条纹, 通过计量莫尔条纹的数量精确调整两束记录光束的夹角, 从而确保干涉条纹的空间周期误差在允许的范围之内。记录光波前平面度的误差会影响光栅刻槽的直线性, 因而影响光栅的衍射波前的质量, 降低光栅的分辨率。两束会聚或发散的记录光产生的干涉条纹形状为回转双曲面, 而一束发散光和一束会聚光所产生的干涉条纹为一族回转椭球面形。如假设发散角和会聚角相等, 则双曲面形的误差要比椭球面形的误差小几个数量级。为了得到准确的平行记录光束, 较简单的方法是将转动光栅基底使其分别对准两束记录光, 并使记录光按照原路返回, 通过调整机构精确调整准直镜 P_3 和 P_4 的位置, 分别使针孔 S 经 P_3 和 P_4 所成的像 S 和 S'' 与 S 重合, 为了保证两束记录光同时发散或会聚, 应使 S 和 S'' 与 S 的重合精度误差符号相同, 即同时为正或为负, 以保证 S 和 S'' 在针孔 S 的同一侧, 这时入射到光栅基底的两束记录光就可以认为是较为理想的。刻槽形状主要与光栅基底法线与两记录光角分线的夹角有关; 刻槽深度主要与光致抗蚀剂涂层的厚度、曝光时间、显影时间有关。这也需要做大量的工艺性实验。

第三步: 闪耀全息光栅的制作

全息光栅的一个主要缺点是不能象刻划光栅那样可以较容易地控制光栅的刻槽形状。准正弦槽形的光栅不能将衍射光集中到某个衍射级次上, 因此须对光栅槽形进行必要的修正, 使之变为三角形或其它形状(如梯形、矩形、阶梯形等)。修正办法主要有以下几种: 利用非对称的两束记录光形成光强非对称分布的干涉条纹; 利用对称光记录并用非对称的离子束轰击; 傅立叶合成法。

(1) 利用非对称的两束记录光形成光强非对称分布的干涉条纹

最经典也是最直接制造全息光栅的方法就是将光栅基底相对于两束记录光的法线倾斜放置如图 5 所示。

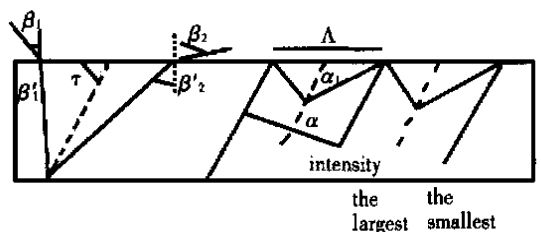


Fig 5 Direct way of making holographic grating

这时, 光栅的闪耀角为光制抗蚀剂内条纹倾斜角的一半。但因光制抗蚀剂的折射率大于 1, 所

以条纹的倾斜角总是小于光栅基底的倾斜角。受此约束,当两束记录光从空气中入射到光制抗蚀剂时,所得到的闪耀角很小。可以利用折射率与光制抗蚀剂折射率相当的棱镜增大光栅的衍射角。Sheridon 总结了两束光从不同角度入射的情况,如图 6 所示。

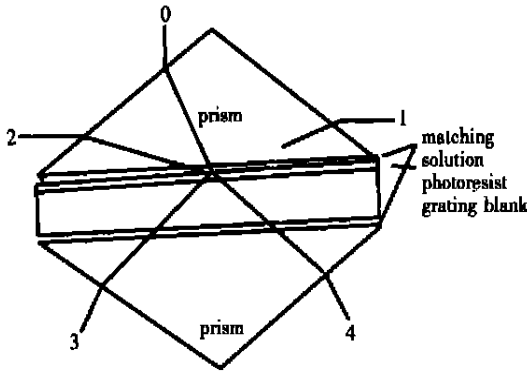


Fig 6 Sheridan method

第一束光从 0 方向入射,当第二束光分别从 2 和 3 方向入射时,可以得到较大的闪耀角。Michelson 提出了利用单束光记录干涉条纹的方法,如图 7 所示。

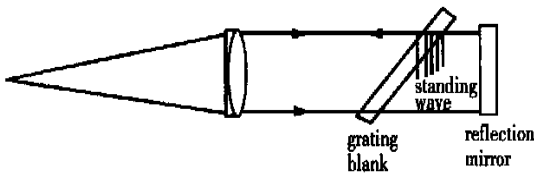


Fig 7 Method of standing wave

光栅基底倾斜于光学系统的光轴,入射光与反射光在光制抗蚀剂内形成的驻波使光制抗蚀剂曝光,使条纹在深度方向上与光栅基底形成夹角,形成不对称槽型的闪耀光栅。

全息光栅的衍射效率不仅取决于刻槽截面形状,而且还取决于波长与刻槽间距的比值 λ/d 。

当 $0.8 < \lambda/d < 1.7$,即光栅槽宽与使用波长可比时,很少有高级次存在,这时全息光栅可以得到与刻划光栅相同的衍射效率。

当 $0.2 < \lambda/d < 0.8$ 时,全息光栅的衍射效率要比刻划光栅低一半左右,但其效率曲线较为平缓,可以在更宽广的光谱范围上使用。

当 $\lambda/d < 0.2$ 时,在远紫外区,由于缺少良好的反射材料,光栅效率很低,但因全息光栅的刻槽密度可以做得很大,比刻划光栅有利。

(2) 通过离子刻蚀得到闪耀光栅

利用离子轰击,可以通过两种完全不同的方法得到闪耀光栅。

第一种方法主要是针对真空紫外闪耀的刻槽

很浅的闪耀光栅制作,如图 8。将具有正弦槽形的全息光栅用均匀的离子束轰击,直到将表面由抗蚀剂形成的光栅刻槽全部去除。这样就在光栅基底上形成了具有三角形刻槽的闪耀光栅,光栅的闪耀角与离子束轰击的角度和离子束去除刻蚀剂的速度与去除基底材料的速度之比有关。光栅基底通常采用熔石英。

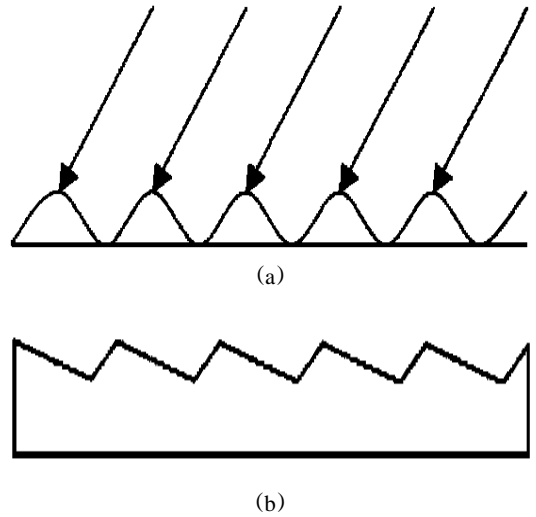


Fig 8 Blazing gratings

第二种方法是将光致抗蚀剂充分曝光,以便在显影之后形成一族很窄的条状光栅槽,如图 9 所示。然后再用离子束以垂直于光栅表面的方向轰击,从而在光栅基底上形成梯形刻槽的闪耀光栅。离子束去除基底材料的速度要远高于去除抗蚀剂的速度。光栅基底通常用 PMMA (聚甲基丙烯酸甲脂)和硫化镉。

(3) 傅立叶合成法

具有闪耀特性的平面光栅的刻槽轮廓可用周期为 d 的函数 $f(x)$ 来描述

$$f(x) = x \tan \theta \quad \left(-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} \right) \quad (3)$$

可将上式展开为傅立叶正弦级数:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin \frac{2n\pi x}{d} \quad (4)$$

$$b_n = \int_0^{\frac{d}{2}} (\tan \theta) \cdot x \cdot \left(\sin \frac{2n\pi x}{d} \right) dx$$

$$= (-1)^{n-1} \frac{d \tan \theta}{n\pi} \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{d \tan \theta}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi x}{d} - \frac{1}{2} \sin \frac{4\pi x}{d} + \frac{1}{3} \sin \frac{6\pi x}{d} - \frac{1}{4} \sin \frac{8\pi x}{d} + \dots \right) \quad (6)$$

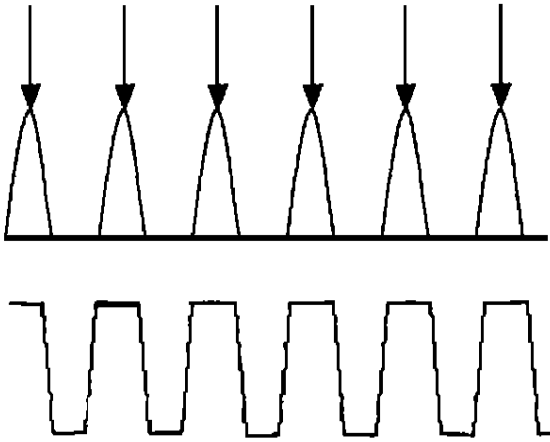


Fig 9 Rectangle gratings

如果我们取更多的级数项, 则合成的槽型

轮廓越接近理想曲线 $f(x)$, 亦即合成的精度越高。但从制造的角度来看, 难度就越大。一般可以取前 3~4 项。

5 结 论

高效率全息光栅的获得, 主要是利用当今光栅设计的权威理论——耦合波理论, 对全息光栅进行优化设计, 然后按照相应的条件来制取全息光栅, 最后采用离子束刻蚀等方法, 使全息光栅获得理论上设计出的槽型、槽深以及槽间距, 从而使全息光栅达到具备闪耀的功能, 这样就可以制备出高效率的全息衍射光栅来。

参考文献:

- [1] Mashev L, Tonchev S. Formation of holographic diffraction gratings in photoresist [J]. Appl Phys, 1981, A 26: 143- 149
- [2] Mashev L, Tonchev S. Formation of blazing holographic diffraction gratings [J]. Appl Phys, 1982, B 28: 349- 353
- [3] Loewen E G, Popov Evgeny. Diffraction Gratings and Applications [M]. New York: Marcel Dekker, 1997. 531- 553
- [4] 祝绍萸. 全息光栅制造技术及其改进 [J]. 高速摄影与光子学, 1990, 19(1): 79- 86
- [5] 樊叔维. 任意槽型光栅特性的矢量理论分析与计算 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 1- 5
- [6] Deason V A, Ward M B. A convenient system for the manufacture of holographic diffraction gratings [C]. Laser Interferometry: Quantitative Analysis of Interferograms, Proc SPIE, 1989, 1162: 54- 61
- [7] Melo Bernardo de A, Costa Ivan F da, Lima Carlos R A, Cescato Lucila. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings [J]. Appl Opt, 1995, 34(4): 597- 603
- [8] Perry M D, Boyd R D, Britten J A, Decker D, Shore B W. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. Opt Lett, 1995, 20(8): 1513- 1515
- [9] 王鹏, 徐毓光, 于勤跃. 对称面形光栅 TE 模的衍射特性 [J]. 光子学报, 1998, 27(11): 1013- 1018
- [10] Adjidi-Zolbanine H. Fabrication of reflection gratings by aluminum coating on holographic transmission gratings [C]. Proc SPIE, 1998, 3573: 451- 454
- [11] Cornelissen Th, Lion Y. XD-DC-PVA for holographic recording: measurement of spatial resolution and applications [C]. Proc SPIE, 1998, 3417: 180- 187
- [12] Neviere M, Popov E. Electromagnetic theory of gratings: review and potential application [C]. Proc SPIE, 1998, 3450: 2- 10
- [13] Sokolova Elena. Geometric theory of two-steps recorded holographic diffraction gratings [C]. Proc SPIE, 1998, 3450: 113- 124
- [14] Harada Tatsuo, Sakuma Hideo, Fuse Masaru. Fabrication of blazed gratings and grisms utilizing anisotropic etching of silicon [C]. Proc SPIE, 1998, 3450: 11- 16
- [15] Blough C Cary, Michaels R L, Ward S J. High-efficiency replicated diffractive optics [C]. Proc SPIE, 1995, 2600: 50- 55
- [16] Koike M, Harada Y. New blazed holographic grating fabricated by an aspherical recording with an ion-etching method [C]. Proc SPIE, 1987, 815: 96- 101
- [17] Leith E N, Swanson G, Leon S. Construction of diffractive optical elements in non-coherent light [C]. Proc SPIE, 1984, 503: 2- 8
- [18] Breidne M, Mattsson L. Fabrication and optimization of X-ray and VUV gratings [C]. Proc SPIE, 1984, 503: 92

- 97.

- [19] Romanenko P F, Sopinski M V, Indutnyi I Z. Blazed holographic diffraction grating fabrication using As_2Se_3 inorganic photoresist[C]. Proc SPIE, 1998, 3573: 457- 460
- [20] Deville Benoit, Bonnemason Francis, Touzet Bruno. Holographically recorded, ion etched variable line space gratings[C]. Proc SPIE, 1998, 3450: 24- 35
- [21] Michel N. Blazing of transmission gratings for astronomical use[C]. Proc SPIE, 1991, 1545: 11- 17.
- [22] Breidne M, Johnsson S, Ahlen H. Blazed holographic gratings[J]. Opt Acta, 1979, 26(11): 1427- 1441.
- [23] Popov E K, Tsonev L V, Sabeva M. Technological problems in holographic recording of plane gratings[J]. Opt Eng, 1992, 30(10): 2168- 2173.
- [24] Mashev L, Tonchev S. Diffraction efficiency of blazed holographic gratings[J]. Opt Commun, 1983, 47(1): 5- 7.
- [25] Indutnyi I Z, Stronki A V. Holographic diffraction gratings on the base of chalcogenide semiconductors[C]. Proc SPIE, 1991, 1555: 248- 257.
- [26] Indutnyi I Z, Stronki A V. Recording of holographic diffraction gratings on light sensitive semiconductor-metal system[J]. J. Inf Rec Mater, 1991, 19(3): 239- 248.
- [27] 朱建中, 李宁, 李圣怡. 同心圆光栅二自由度误差测量系统[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 91- 95.

Manufacturing of high efficient holographic diffraction gratings

ZHAO Bo¹, QI Xiang-dong²

- (1. *The Institute of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing, 100871;*
- 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

Abstract: In light of the manufacturing principles of holographic diffraction gratings, the paper presents a main method of manufacturing the holographic gratings. In comparison with ruling gratings, the holographic diffraction gratings have many advantages. Using the coupling wave theory and ion etching, the design and efficiency of the gratings have been optimized and improved, respectively. The paper also gives various key technologies in manufacturing high efficient holographic diffraction gratings in detail.

Key words: holographic gratings; ion-etching; diffraction efficiency

作者简介: 赵博(1967-), 男, 黑龙江五常市人。1995年获光学仪器专业硕士学位, 2000年9月通过机械制造及其自动化专业博士论文答辩, 一直从事光学仪器、光谱仪器、精密计量仪器以及衍射光栅理论方面的研究工作, 在国内科技期刊上发表有关论文8篇。