

全息离子束刻蚀衍射光栅*

徐向东^{1,2,†} 洪义麟² 傅绍军² 王占山¹

(1 同济大学物理系 上海 200092)

(2 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 全息离子束刻蚀衍射光栅集中了机械刻划光栅的高效率和全息光栅的无鬼线、低杂散光、高信噪比的优点。全息离子束刻蚀已作为常规工艺手段应用于真空紫外及软 X 射线衍射光栅的制作。文章对全息离子束刻蚀衍射光栅的制作方法、主要类型、研究现状和应用进行了综述。

关键词 衍射光栅, 全息光刻, 离子束刻蚀

Holographic ion beam etched diffraction gratings

XU Xiang-Dong^{1,2,†} HONG Yi-Lin² FU Shao-Jun² WANG Zhan-Shan¹

(1 Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract A holographic ion beam etched diffraction grating collects has as high a diffraction efficiency as classical ruled gratings yet with no ghosts, lower stray light and higher signal-to-noise ratio, as with holographic gratings. Holographic ion beam etching has become a routine technique for fabricating vacuum ultraviolet and soft X-ray diffraction gratings. The fabrication process, main types and applications of these gratings in X-ray space physics, synchrotron radiation and inertial confinement fusion are discussed briefly.

Key words diffraction grating, holographic lithography, ion beam etching

1 引言

广义地说,凡是能使入射光的振幅、相位,或两者同时产生周期性空间调制的衍射屏,统称光栅。通常所说的衍射光栅是指其上有规则地配置着缝、槽等波状起伏结构的一类光学元件,其工作原理是基于夫琅禾费多缝衍射效应。衍射光栅是一种应用非常广泛而重要的一种高分辨率的色散光学元件,在现代光学仪器中占有相当重要的地位。

传统的衍射光栅制作方法有机械刻划、全息光刻和压模复制三种,它们制作的光栅分别称为刻划光栅、全息光栅和复制光栅。上述三种光栅制作工艺各有其优缺点。例如,全息光栅的刻槽是利用干涉现象同时产生的,刻划光栅的刻槽是先后刻划产生的,后者存在周期性和随机性位移误差,导致“鬼线”

(伪谱线)产生;由于刻刀刀刃微观豁口的存在,其杂散光较全息光栅强;刻划光栅刻槽的轮廓为三角形或梯形,而全息光栅刻槽的轮廓为正弦形或近似正弦形。刻划光栅提供了更大范围的线密度,几十线/mm—6000线/mm,而全息光栅记录对于100线/mm以下的光学系统变得不方便,其线密度的上限对用可见光记录的线密度为3600线/mm,全息光栅的制作周期较刻划光栅短得多。压模复制的最大优点是使用同一块母光栅可以大批量生产出光栅参数相同的复制光栅,所以复制光栅的成本低。

离子束刻蚀技术是20世纪70年代发展起来的一种干法刻蚀工艺技术,已广泛用于微电子器件制

* 国家高技术研究发展计划(批准号804-9-2),中国科学院二期创新资助项目

2003-05-19收到初稿,2003-08-25修回

† 通讯联系人, E-mail: xxd@ustc.edu.cn

作中的超精细、高保真度图形转移. 全息离子束刻蚀衍射光栅就是先用全息光刻制作出光栅掩模, 然后通过离子束刻蚀将其转移到光栅基片材料中, 它集中了机械刻划光栅的高效率和全息光栅的无鬼线、低杂散光、高信噪比的优点. 本文拟对全息离子束刻蚀衍射光栅的制作方法、主要类型、研究现状和应用进行综述.

2 制作方法

全息离子束刻蚀衍射光栅制作涉及多步工艺, 如图 1 所示. 图中基片处理、光刻胶前烘时间和温度、两相干光强的平衡性和曝光量、显影液浓度和温度、显影时间和搅动程度、后烘时间和温度、离子束刻蚀条件、镀膜条件等的变化, 都有可能影响到光栅的重复性和衍射效率, 这些就是全息离子束刻蚀衍射光栅制作的难度所在. 全息曝光、显影是用于产生光刻胶光栅浮雕图形(掩模), 离子束刻蚀是将光刻胶光栅掩模转移到光栅基底材料中, 所以全息曝光、显影和离子束刻蚀是全息离子束刻蚀衍射光栅制作中的两大关键工艺步骤.

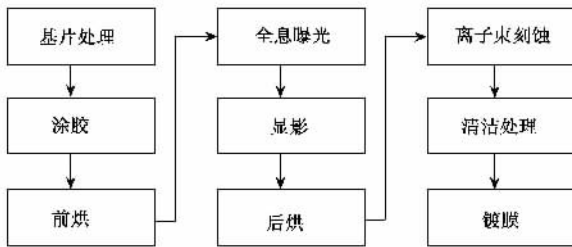


图 1 全息离子束刻蚀衍射光栅制作工艺流程图

2.1 采用全息光刻制作光栅掩模

全息光刻又称干涉光刻, 其原理简单, 即两相干光束相交时会产生一系列明暗交替的条纹, 它们可用光敏材料(光刻胶)记录并用于形成光栅刻槽, 条纹间距由两光束的夹角和波长确定. 全息光刻的工艺流程如下: 首先将处理好的光学玻璃或熔石英等基片涂上一定厚度的光刻胶膜, 接着放入烘箱进行前烘, 然后将准备好的带有光刻胶膜的基片放入干涉光学系统中曝光, 记录干涉条纹, 曝光后的基片放入显影液中显影, 即获得光刻胶浮雕光栅图形. 与普通全息光栅不同的是, 作为离子束刻蚀光栅的掩模图形, 其光栅刻槽间需要完全露出基底材料即无残余光刻胶, 如图 2 所示.

2.2 采用离子束刻蚀转移光栅掩模图形

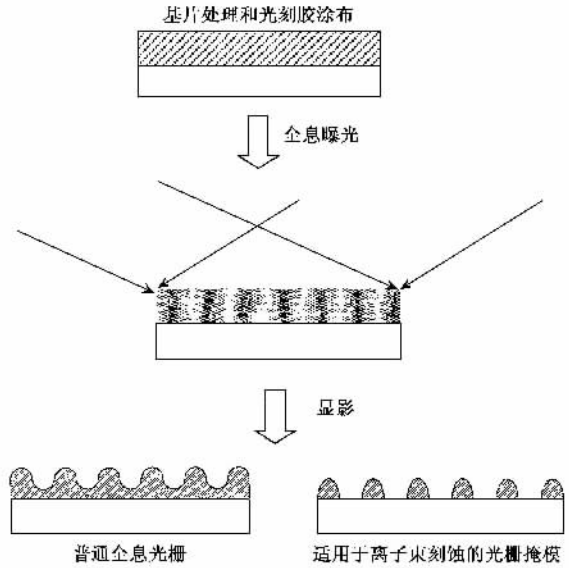


图 2 全息光栅掩模制作示意图

符合要求的光栅掩模制作完成后, 即可利用离子束刻蚀将其转移到光栅基底材料中. 常规的离子束刻蚀是指使用惰性气体(Ar^+)离子束的离子铣(ion milling), 是以离子与材料表面原子进行级联碰撞的纯物理溅射过程. 离子的定向运动和物理溅射效应使刻蚀图形具有最高的分辨率和各向异性. 离子铣的纯物理特点使其适用任何材料的刻蚀. 如果材料表面预先制好掩模, 对离子束构成局部开区和闭区, 则掩模图形可转移到衬底材料表面, 完成多层和多维图形的刻蚀. 当离子束与光栅基片垂直时, 刻蚀出的光栅截面为矩形或梯形; 离子束与光栅基片斜交时, 刻蚀出的光栅截面为锯齿槽形, 如图 3 所示.

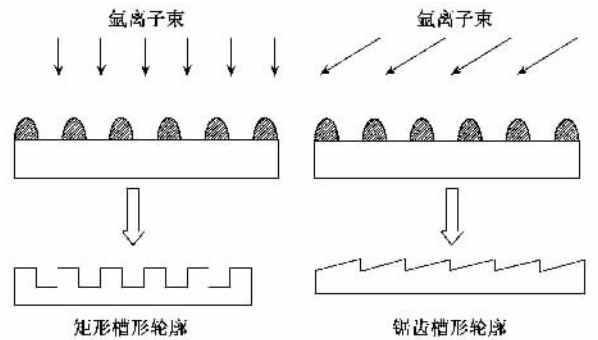


图 3 离子束刻蚀示意图

3 主要类型

全息离子束刻蚀衍射光栅集中了机械刻划光栅

的高效率和全息光栅的无鬼线、低杂散光、高信噪比的优点,因而成为真空紫外及软 X 射线波段常用的光谱光栅.其主要类型如下:

闪耀光栅 闪耀光栅也称强度定向光栅,是指把入射到光栅上的光尽可能地集中到某一非零级上的一类光栅.其基本特点是截面为锯齿槽形轮廓,闪耀波长与闪耀角(光栅刻槽的斜面与光栅平均表面相交的角度)、入射角、光栅常数和光谱级次有关.一般来说,机械刻划的光栅就是闪耀光栅,利用具有不同角度的金刚石刻刀,能改变光栅的闪耀角和闪耀波长.闪耀光栅的全息离子束刻蚀制作是先用全息干涉产生正弦槽形的光刻胶光栅,然后将光栅放入离子束刻蚀机中,并保持光栅槽与离子束(投影)垂直.根据闪耀角的大小调整基片与离子束间的夹角,就可将正弦槽形的光刻胶光栅转移到基片上,成为锯齿槽形的闪耀光栅.

Laminar 光栅 Laminar(或 lamellar)光栅是一种位相光栅.其基本特点是截面为浅槽矩形轮廓,栅线和槽对衍射强度(效率)都有贡献.通过选择合适的槽深、入射角,能引起栅线和槽的衍射在零级发生相消干涉,以致更多的能量分布在其他能级.其制作方法是先用全息干涉产生光刻胶光栅掩模,通过调整曝光量、显影时间,使之达到所要求的线空比,然后用离子束刻蚀转移到基片中即可.

多层膜光栅 多层膜光栅是把光栅的高分辨率和多层膜的高反射率结合起来的一种新型光学元件,它将横向结构上的光栅衍射和深度结构上的多层膜的布拉格衍射结合起来,具有新的衍射特点.这一思想最早是由 Spiller E 在 20 世纪 80 年代初提出的.随后,Barbee 等对 W/Si, W/Be, Mo/Si 和 Mo/C 等多层膜光栅的软 X 射线衍射特性进行了探讨,证明这种光学结构可以获得高的分辨本领和高的反射本领.近来,一些学者相继对多层膜光栅的实验结果进行了理论模拟.多层膜光栅的制备方式主要有先镀膜后刻蚀和先刻蚀后镀膜两种,前者适用于 Laminar 光栅,后者适用于闪耀光栅.

变间距光栅 变间距光栅是指刻槽间距沿光栅表面逐步变化的一类光栅,其刻槽在切平面上的投影是一套相互平行的直线,而间距是变化的,该概念的历史可以追溯到 1875 年.近年来,因变间距光栅具有聚焦和消像差的能力,引起了光栅单色器和光谱仪设计者的广泛兴趣.对于变间距光栅单色器,通过光栅的转动就可进行光子能量扫描,因而机构简单和分辨力高,对于变间距光栅谱仪,通过变间距光

栅分光,在一定的入射角下依靠栅距的变化来调整衍射角的变化,使得不同波长的衍射光均落在一个平直的焦面上(所以又称平场光栅谱仪,可直接与接收面平直的探测器耦合).数控技术的发展使得人们能用刻划机械来刻制变间距光栅,为了发挥全息离子束刻蚀光栅的优点,Jobin - Yvon 和 Carl Zeiss 等已用全息离子束刻蚀方法制作出变间距光栅.

透射光栅 透射光栅是指由一系列平行等宽而又等间隔的狭缝组成的一类光栅.金透射光栅是极紫外和软 X 射线波段重要的色散元件之一,它进一步分为带衬底的透射光栅和不带衬底的自支撑透射光栅.自支撑透射光栅的特点是无衬底即光栅线条间是镂空的,避免对软 X 射线的吸收;光栅线条由足够强度的较大周期的网格结构支撑,避免细的光栅线条扭曲、并拢等破坏光栅原有周期结构的现象.金自支撑透射光栅的制作相当复杂,其基本工艺过程是:首先在玻璃等基片上溅射金膜、涂光刻胶、全息光刻、离子束刻蚀制作出金光栅,然后在刻蚀的光栅上镀导电层、涂光刻胶、紫外光刻支撑结构图形和电镀金,最后是将光栅粘在支撑环上,待固化后腐蚀掉玻璃基片即成为自支撑金透射光栅.

4 研究现状

商品化的全息离子束刻蚀衍射光栅基本由国外光制造商所垄断,如法国的 Jobin - Yvon 公司、德国的 Carl Zeiss 公司、美国的 Richardson Grating Laboratory 和 Spectrogon 公司、日本的 Hitachi 和 Shimadzu 公司等.法国的 Jobin - Yvon 公司已为世界上很多的同步辐射光束线提供了全息离子束刻蚀衍射光栅,国家同步辐射实验室二期工程新建光束线所用的进口光栅也大多由 Jobin - Yvon 公司制作.高线密度金透射光栅的制作工艺难度很大,使用数量有限,光栅公司基本不制作,只有美、德、俄、日等国家极少数的几个实验室制作.而 5000 线/mm 的自支撑金透射光栅只有美国麻省理工学院(MIT)空间研究中心的空间微结构实验室最为成熟^[1].Hutley 在其 1975 年发表的综述报告^[2]的基础上,于 1982 年出版了第一本光栅专著 *Diffraction Gratings*^[3];1993 年,国际光学工程学会将 1882—1990 年间发表的具有里程碑性的有关衍射光栅论文汇编成文集 *Selected Papers on Diffraction Gratings*^[4];1997 年,Loewen 等出版了 *Diffraction Gratings and Applications*^[5]—

书.

国内从事光栅制作的单位较少,目前基本没有商品化的全息离子束刻蚀衍射光栅.1985年,国家同步辐射实验室建立光学元件组,在国内较早地开展了全息-离子束刻蚀制作软X射线和真空紫外衍射光栅工作,重点是同步辐射软X射线和真空紫外波段的聚焦、色散元件的研制.国内唯一的光栅参考书就是祝绍箕等编著的《衍射光栅》^[6],徐向东在对全息离子束刻蚀衍射光栅制作工艺进行系统的研究基础上,于2001年完成了《全息离子束刻蚀真空紫外及软X射线衍射光栅研究》的博士学位论文^[7].

5 应用简介

光栅的作用是对入射波前进行适当的修正,并在一系列确定的方向产生新的波前,它是光谱仪器的心脏,对光谱仪的成像质量有着举足轻重的作用.对于衍射光栅在生产、科研中的作用,正如 Harrison^[8]所说,我们很难找出另一种像衍射光栅这样的给众多科学领域带来更为重要信息的简单器件.衍射光栅的应用领域在近几年已大大扩展,这里限于篇幅,仅介绍其在X射线天体物理学、同步辐射、惯性约束核聚变中的应用.

5.1 X射线天体物理学

X射线观测新发现如X射线密近双星、X射线脉冲星、超新星遗迹的X射线、有关天体物质的高分辨X射线光谱、星体爆炸残留体中氧和氦的环状结构的高清晰图像等,使得X射线天体物理学成为近代天文学中最为活跃、最令人瞩目的生力军.美国科学家里卡尔多·贾科尼因领导研制了世界第一个宇宙X射线探测器——爱因斯坦X射线天文望远镜,首次发现太阳系外的X射线源,证实宇宙存在着X射线背景辐射,探测到了可能来自黑洞的X射线以及倡议研制更为强大的AXAF(后改称Chandra,1999年7月19日升空)X射线望远镜等,获得了2002年诺贝尔物理学奖.

Chandra光栅谱仪由340片中高能透射光栅(2000线/mm,5000线/mm)和540片低能透射光栅(1000线/mm)组成.高能透射光栅谱仪要求提供高分辨、高通量的天体X射线光谱,这对光栅制作提出了极大挑战.因大面积(5.7cm²)、细线条(0.1μm)、大高宽比(7:1)等,排除了机械刻划、商业化的光学光刻、电子束光刻等工艺制作的可能性.美国麻省理工学院空间研究中心的空间微结构实验

室承担了其中的高能透射光栅(HETG)制作.围绕着完成HETG制作这一任务,近20年来空间微结构实验室的科研人员在工艺上不断改进,使得亚微米、甚至几十纳米周期透射光栅制作及相关技术日趋成熟.他们的技术及其产品代表了当前最高水平,是国外唯一长期、系统开展全息光刻制作亚微米周期透射光栅及其他周期性结构的实验室.

近年来,高线密度自支撑金透射光栅(约5000线/mm)又因具有抑制极紫外辐射($\lambda < 150\text{nm}$)的特性而被用作空间中性质原子成像探测器的滤波元件.空间中性质原子探测的最大困难就是极低的中性原子通量和高的EUV/UV辐射背景,透射光栅滤波元件的应用可望显著地改进行星磁气圈和日光层中性原子成像探测器的性能.空间中性质原子探测将为科学家提供全球磁流体动力学环境的实时图像,这对保护空间轨道运行的卫星安全以及通信、电力网、军事侦察等国家安全都具有十分重要的价值,美国的国家航空和宇宙航行局、空军、国家海洋和大气局目前正在开展这方面的工作,以建立空间气象服务.

5.2 同步辐射

同步辐射是一种新型光源,具有常规光源所不具备的诸如频谱宽且连续可调(远红外到硬X射线)、高亮度、高度准直、偏振性、时间结构和光谱纯洁等一系列优异的特性.由于同步辐射的这些优点,它在原子分子物理、凝聚态物理、材料科学、光化学、表面物理、医学、分子生物学等许多科学技术领域中都有广泛的应用,并取得了很多重要的研究成果.目前,世界上已建成的同步辐射装置有70多个,正在建设或计划建设的有20多个.同步辐射光谱覆盖X射线到远红外,为我们提供了一个非常广阔的波长选择范围.根据不同的实验要求,可以选取不同的波段,而波段的选择就是由光束线中的单色器实现,衍射光栅是其核心光学元件之一.

目前,全息-离子束刻蚀是同步辐射光栅制作的主导制作方法.同步辐射光栅基底本身要求为超光滑表面,面形(球面、柱面、超环面等)要求很高,检测难度大,所以造价十分昂贵.一块原刻同步辐射光栅的进口价格在一万美元以上,对于制作难度更大的变间距光栅则要3—4万美元.法国的Jobin-Yvon公司和德国Carl Zeiss公司是同步辐射光栅的主要生产商.近几年,我们在国内率先开展了同步辐射光栅的研制工作.图4是我们采用全息-离子束刻蚀技术在熔石英基板上刻蚀出锯齿槽形的闪耀光栅的扫描探针显微图片.同步辐射光波长扫描检测

结果表明其已达实用水平,2000年开始在国家同步辐射光化学光束线上使用,替代了进口产品^[9]。

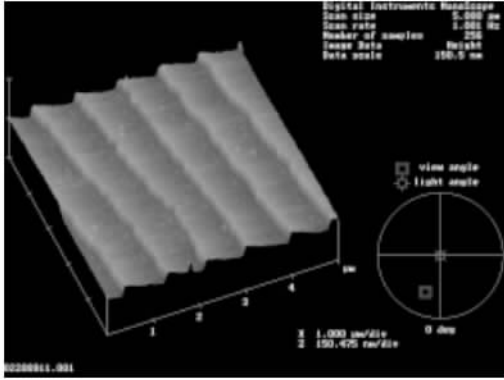


图4 1200线/mm全息离子束刻蚀闪耀光栅

5.3 惯性约束核聚变

惯性约束核聚变(ICF)是不同于磁约束途径的可控热核聚变,是当今世界非常活跃且发展迅速的研究领域,研究的最终目标是实现理想的聚变能源的利用。在间接驱动ICF研究中,为了获得强的辐射驱动场,人们正在通过不同途径,采取不同方法提高激光吸收效率和X射线转换效率,寻求最佳的辐射驱动条件和辐射驱动环境。所有这些都离不开X射线能谱的诊断和研究。透射光栅不仅具有结构简单,集光立体角大,光谱范围宽,能量响应平滑,谱面平直等优点,而且能够方便地同时间、空间分辨仪器相结合,构成能同时诊断等离子体软X射线时间能谱特性和空间能谱特性的测量系统。此外,利用透射光栅谱仪,结合光谱还原技术,还可对辐射温度进行测量。辐射温度是间接驱动ICF实验中的重要参量,由辐射温度可推知腔靶中辐射加热的时间特性、X射

线转换效率、腔壁的再发射系数和反射率等重要信息,了解辐射运输的细致过程,因而广泛地用于激光惯性约束核聚变等离子体诊断和X射线激光研究。

透射光栅谱仪的分辨率与光栅的线密度密切相关,线密度愈高,光谱分辨也就愈高。国外用于ICF等离子体诊断的自支撑透射光栅已达5000线/mm,而国内目前只达到2000线/mm^[10]。

参 考 文 献

- [1] <http://space.mit.edu>
- [2] Palmer EW, Hutley M C, Franks A *et al.* Rep. Prog. Phys., 1975, 38 : 975
- [3] Hutley M C. Diffraction Gratings. New York : Academic Press, 1982
- [4] Ed. Maystre D. Selected papers on diffraction gratings. Washington : SPIE Press, 1993
- [5] Loewen E G, Popov E. Diffraction Gratings and Applications. Marcel Dekker, Inc., 1997
- [6] 祝绍箕, 邹海兴, 包学诚等. 衍射光栅. 北京 : 机械工业出版社, 1986[Zhu S J, Zou H X, Bao X C *et al.* Diffraction Gratings. Beijing : Machine Industry Press, 1986(in Chinese)]
- [7] 徐向东. 全息离子束刻蚀真空紫外及软X射线衍射光栅研究. 中国科学技术大学博士论文, 2001[Xu X D. Fabrication of VUV and soft X-ray diffraction gratings by holographic ion beam etching technique. Ph. D. Thesis : USTC, 2001(in Chinese)]
- [8] Strong J. J. Opt. Soc. Am., 1960, 50 (12) : 1148
- [9] 徐向东, 洪义麟, 霍同林等. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(2) 248[Xu X D, Hong Y L, Huo T L *et al.* Journal of University of Science and Technology of China, 2000, 30(2) 248 (in Chinese)]
- [10] 杨家敏, 丁耀南, 郑志坚等. 强激光与粒子束, 2003, 15(1) : 69[Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J *et al.* High Power Laser and Particle Beam, 2003, 15(1) : 69(in Chinese)]



· 物理新闻和动态 ·

包含超巨磁电阻材料的 p - n 结

最近,来自美国北卡罗莱纳州立大学的 Tiwari A 等制成了一种由 p 型锰氧化物 La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (LSMO) 和 n 型 ZnO 层构成的 p - n 结。这种异质结构在 20—300K 的宽温区内具有整流功能。高质量异质结构的研制是自旋电子学中的一个重要领域。Tiwari 等的工作为各具独特性能的两材料的集成应用提供了可能。LSMO 是典型的超巨磁电阻材料,而 ZnO 已经在光学和光电子学器件中广泛应用。超巨磁电阻锰氧化物的载流子浓度是组分、温度和外场的敏感函数。这意味着,器件的特性可以根据应用的需要进行微调。在上述 LSMO/ZnO 结中,过渡层的厚度随外加偏压的变化而改变,因此结的电输运、磁以及光性能可以被精确地控制。

研究者分两步制备 LSMO/ZnO 结。首先,通过脉冲激光将 200nm 的 ZnO 层沉积于蓝宝石衬底,然后,再沉积 100nm 厚的 LSMO 膜。X 射线衍射和透射电镜观察确认 ZnO 层从抛光衬底上外延生长,而 LSMO 膜则呈多晶结构,二者之间的界面清晰(在原子尺度上)。Tiwari 等在不同的偏压下测量了 LSMO/ZnO 结电阻随温度的变化。结果表明,该器件的电输运性能与预期相符。

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Appl. Phys. Lett. 2003 83 :1773)