第 44 卷 第 2 期　　物 理 学 报　　Vol. 44, No. 2
1995 年 2 月　　ACTA PHYSICA SINICA　　Feb., 1995

亚微米光栅周期的软 X 射线多层膜光栅的衍射效率研究*

袁利祥　范正修　殷功杰　邵建达　易　葵
（中国科学院上海光学精密机械研究所，上海　201800）

崔明启　刘丽冰　缪建伟　陈光辉
（中国科学院高能物理研究所，北京　100039）

沈　孝　良
（复旦大学分析测试中心，上海　200433）

（1994 年 3 月 1 日收到）

简要叙述软 X 射线多层膜位相光栅的理论设计、实验制备，详细给出了在北京同步辐射装置 3B1 束线上对多层膜位相光栅衍射效率的测试，以及对测试结果的分析，并与理论值进行了比较.

PACC: 0785; 4280F; 6110F; 7865

1 引　　言

正入射软 X 射线光学发展的迫切需要及超精细抛光与超薄多层膜制备技术的日趋完善，已使软 X 射线波段的光学薄膜获得飞速发展. 足够反射率的软 X 射线多层膜的制备以及成熟的微电子制作工艺的结合，又促使人们向能色散、聚焦或者其它能控制 X 射线、软 X 射线的光学元件迈进. 国外自 1986 年 Hawryluk[1] 起陆续有关于软 X 射线多层膜光栅的研制结果报道，其中较多的是振幅光栅，关于衍射效率最高的位相光栅的报道见之甚少. 我们从光栅的标量区近似理论和微分电磁理论出发设计并研制成功位相型软 X 射线多层膜矩形光栅，最近在北京同步辐射装置 3B1 束线的反射率计上实测了软 X 射线多层膜光栅的衍射效率.

测量软 X 射线多层膜光栅衍射效率的装置目前有常规实验室 X 射线源反射率计[2]、激光等离子体光源反射率计[3]和同步辐射光源反射率计[4,5]，其中最为优良的是同步辐射光源反射率计，因为它能提供高偏振态、稳定、高强度、波长连续的软 X 射线. 关于多层膜光栅的详细理论研究工作见文献[6,7]，本文简要叙述理论设计结果、多层膜位相光栅的

* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

实验制备，给出最近在北京同步辐射装置上实测软 X 射线多层膜位相光栅衍射效率的结果，对测试结果进行了分析，并将它与理论值进行了比较。

2 理论设计

光栅具有色散功能，但在软 X 射线波段由于所有材料折射率均接近于 1，故裸光栅或者单层膜光栅大角度入射时其绝对衍射效率（某级衍射光光强与入射光光强之比）是极低的（≪1%）。我们知道，在精抛光平基板上镀纳米数量级的周期性软 X 射线多层膜，当入射软 X 射线波长与多层膜厚度周期 d 满足著名的布拉格公式时，

$$2D[1-(2\bar{\delta}-\bar{\delta}^2)/\sin^2\theta]^{1/2}\sin\theta = n\lambda,$$

其中 $\bar{\delta} = (d_A/D)\delta_A + (d_B/D)\delta_B$；$D$ 为多层膜几何周期厚度；d_A，d_B 分别为膜系两种材料的几何厚度；δ_A，δ_B 为膜系两种材料复折射率实部与 1 之差；θ 为掠入射角；n 为布拉格衍射峰级数；λ 为入射软 X 射线波长，将产生布拉格衍射叠加，使反射光大为增强，提高反射率。把平基板上多层膜干涉增强原理应用到软 X 射线光栅上，使多层膜纵深方向厚度周期与光栅表面横向周期达到一定匹配，同样可以大大提高光栅色散光的绝对衍射效率。详细的多层膜光栅理论设计见文献[6,7]，这里不再重复，下面是用光栅的微分电磁理论设计的一组参数：如图 1，矩形光栅深度为 $h = 15.5$nm，线空比为 1:1，光栅周期为 $d = 0.88\,\mu$m，多层膜参数为 $D = d_{Mo} + d_{Si} = 12.76$nm，$d_{Mo}/D = 0.26$，共 21 层的 Mo/Si 多层膜光栅，当 λ 为 18.53 nm 的软 X 射线斜入射时，−1 级衍射光、零级光与+1 级衍射光的最大绝对衍射效率分别为 6.13，6.02 和 6.13%，±1 级光与零级光之间的衍射角应为 1.52°。

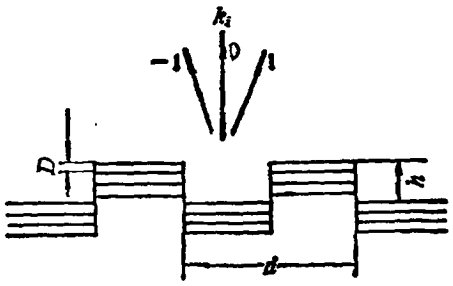


图 1　多层膜矩形位相光栅示意图　d，h 分别为光栅周期和深度；D 为软 X 射线多层膜厚度周期；k_i 为入射光波

3 实验制备

首先在光洁 Si 基板（111 面切割）上制作全息光栅掩膜，采用 Ar^+ 激光器曝光 4—5min，激光波长为 457.9nm，制备光栅周期为 $d = 0.88\mu$m，线空比 1:1 的全息光栅，离子束刻蚀采用 Kaufman 离子源，束流为 30mA，Ar^+ 束能量为 250eV，刻蚀深度与时间关系由台阶仪严格定标，刻蚀后光栅表面上用离子束溅射软 X 射线多层膜，厚度由石英晶振控厚仪控制，控厚仪与实际膜系之间的关系由 CuKα 线低角 X 射线衍射法精确定标。

4 衍射效率的测试

1. 测试装置　如图 2 所示，经柱面镜反射的同步辐射光已切去了硬 X 射线成份，再通

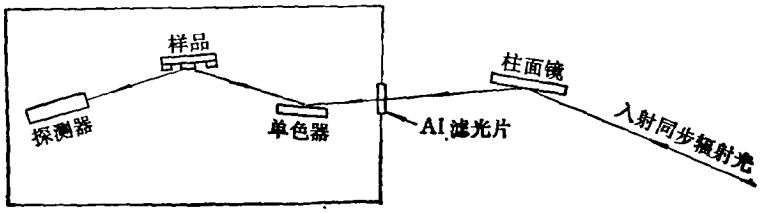
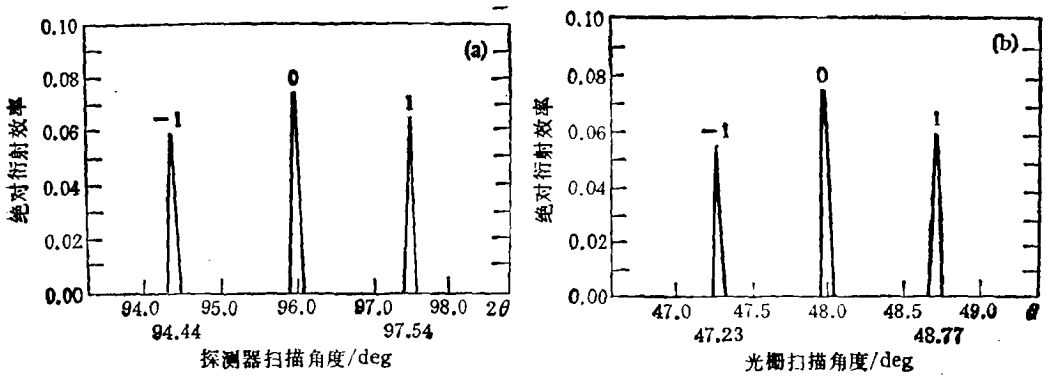


图 2 北京同步辐射装置 3B1 束线上软 X 射线多层膜反射率计示意图

过 Al 滤光片入射到反射率计内，Al 滤光片将可见光成份完全挡在外面，Al 滤光片可通过的波长范围为 17.0—19.9nm，透过率在 40%以上，单色器 M2 采用 Mo/Si 多层膜单色器，工作波段为 12.4—20.0nm，转动范围为 0—70°，角分辨率为 0.0075°/步，由测量装置的 Al 滤光片及单色器已决定了实际可用的测试波长为 17.0—19.9 nm. 样品为软X射线多层膜光栅，转动角分辨率为 0.01°/步，样品台转角范围 0—80°，接收器为 HAMAMATUS 的 G1127 肖特基型 GaAsP 光电二极管，转动角分辨率 0.02°/步，探测器转角范围 0—160°.

2. *测试方法* 将单色器固定在某一出射波长 λ，摇臂处于单色器固定角度 Θ 的 2Θ 位置. 采用角度扫描方法，样品和探测器从掠入射起始作 θ-2θ 扫描，测到该波长下对应多层膜反射率的高反射区. 这时可采取两种方法，第一种是将样品固定高反射区内的某一角度 θ，探测器在 2θ 角度附近单独作微区精细扫描；另一种方法是将探测器定位在 2θ 位置不动，样品在 θ 角附近作微区精细扫描. 这两种方式都能测出多层膜光栅的空间衍射场分布.

3. *测试结果* 固定单色器，使出射波长为 18.53nm，被测样品 MLG 13 的光栅参数：周期为 $d \approx 0.88\ \mu m$，线空比 1:1.2，深度为 15.5 nm，Mo/Si 多层膜周期为 $D \approx 12.76nm$，$\Gamma = d_{Mo}/D = 0.26$，共 21 层，采用样品固定探测器扫描形式，将样品定在多层膜高反射区域内的 48°（掠入射角）位置，探测器在 96° 角左右作精细扫描（0.02°/步），测得的衍射特性如图 3 (a) 所示，探测器离 $2\theta = 96°$ 两侧分别 1.54°，1.56° 处测到+1 级、−1 级衍射光，±1 级光与零级光之间的衍射角与理论设计 1.52° 基本一致. 采取另



(a) 多层膜光栅固定在 48°，探测器扫描 (b) 探测器固定在 96°，多层膜光栅扫描

图 3 北京同步辐射装置上对衍射效率的测量 测试波长为 $\lambda = 18.53nm$

一种形式，当探测器固定在 96° 处，样品在 48° 左右作精细扫描(角分辨率 0.01°/步)，同样测到了多层膜光栅的衍射特性，如图 3(b) 所示，样品在 47.23° 以及 48.77° 处分别得到−1 级及+1 级衍射光。由于样品转动角与探测器转动角之间相当于两倍角关系，故与理论预测也是一致的。

5 测试结果的分析讨论

由图 3(a,b) 直观可见，除零级光外，±1 级衍射光的反射率也很高，这说明，多层膜光栅的衍射特性是很明显的。将测量条件下的衍射效率理论计算值与实验测量值进行比较，如表 1 所示，可以发现实验测量值与理论值基本相符，零级、+1 级衍射峰测量值比理论计算值还略高一些。测量值高于理论值是完全可能的，理由是软X射线光波段区薄膜材料的光学常数不够完善，理论设计光学常数与实验实际光学常数之间有差别，这在其他人的研究工作中也常见。

表 1　衍射效率理论计算值与实验测量值的比较

衍射级/%			−1	0	1
理论值/%			6.13	6.02	6.13
测量值	MLG13/%	DS	6.0	7.67	6.88
		SS	5.84	7.38	6.38

DS 为探测器扫描；SS 为样品扫描。

对在实验测量中存在的误差因素加以分析，我们认为主要来自以下几个方面：1) 测量衍射效率时，随着时间的推移，入射同步辐射光是呈指数规律衰减的，因此测量值与入射光 I_0 的关系是要经过修正的，样品的测量时间很长，这种测量值近似修正与真实值之间仍然会有误差；2) 在理论计算上，由于目前国际上通用的一些光学常数还是有很大差别的，缺乏真正权威可信的数据，这就会导致理论计算多层膜光栅衍射效率时也有一定的偏差；3) 测量装置上，透过 Al 滤光片及单色器入射到样品上的光斑为 3mm × 20mm，对于多层膜光栅而言，横向尺寸 3mm 是较大的，可能会影响从样品中出射光束的角分辨率。同时探测器的接收狭缝如较大，而探测器到样品之间的距离又不是足够大的话，会造成零级光与±1 级衍射光，±1 级衍射光与零级、±2 级衍射光之间的小部分重叠，造成测量值与真实值之间存在一些偏差，这只有通过进一步改进测量装置，减小入射光束光斑，减小探测器狭缝，增大探测器与样品之间的距离等方法加以克服；4) 本实验测量中使用的单色器是 Mo/Si 多层膜单色器，这对于测量软X射线多层膜反射率是足够的，但对于象位相光栅这样对入射波长很灵敏的衍射色散元件而言，多层膜单色器的单色性还是不够，这势必也是会影响到测量精度，一般来说是使测量值偏小，将多层膜单色器改为多层膜光栅单色器可以提高出射光束单色性；5) 测量数据是将探测器扫描过程中获得的光信号转变成电信号读出的，在读取数据时人为误差因素也是不可避免的。

6 结 论

利用亚微米光栅制备技术，我们制作了 0.88 μm 光栅周期的软X射线多层膜位相型矩形光栅，并测量了它的光学衍射特性．多层膜位相光栅在高分辨率的软X射线光谱仪、同步辐射软X射线单色器、X-UV 干涉仪、软X射线激光输出镜等方面将首先得到应用．虽然我们用同步辐射光源反射率计测出了多层膜光栅的衍射效率，但该测量装置用来测量光栅效率还有不少尚需改进之处，缩小入射光斑尺寸与探测器接收狭缝，增大探测器与样品之间的距离，以及改多层膜单色器为多层膜光栅单色器都将大为提高测量精度．

感谢中国科学技术大学同步辐射国家重点实验室傅绍军高级工程师在全息光栅研制中给予的大力帮助．

[1] Andrew M. Hawryluk, *et al.*, *Proc. SPIE*, **688**(1986), 81.
[2] Keski-kuha *et al.*, *Appl. Opt.*, **23**(1984), 3534.
[3] S. Nakayama *et al.*, *Physica Scripta*, **41**(1990), 754.
[4] S. A. Gaponov *et al.*, *Opt. Commun.*, **38**(1981), 7.
[5] R. G. Cruddace *et al.*, *Physica Scripta*, **41**(1990), 396.
[6] 袁利祥、范正修，中国激光，**A20**(1993), 536.
[7] 袁利祥、范正修等，中国激光，**A21**(1994), 124.

DIFFRACTIVE EFFICIENCY STUDY OF SOFT X-RAY MULTILAYER GRATING WITH SUB-MICRON GRATING PERIOD

YUAN LI-XIANG FAN ZHENG-XIU YIN GONG-JIE SHAO JIAN-DA YI KUI
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechnics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

CUI MING-QI LIU LI-BING MIAO JIAN-WEI CHEN GUANG-HUI
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

SHEN XIAO-LIANG
(Centre for Measurement Analysis, Fudan University, Shanghai 200433)

(Received 1 March 1994)

ABSTRACT

The theor etical disign and experimental fabrication of soft X-ray multilayer laminar phase grating are described briefly in this article. The measurement process and results of diffractive efficiency of multilayer laminar phase grating at Beijing Synchrotron Radiation Facility 3B1 beamline are given in detail. The measurement results are analysed and discussed, and compared with the theoretical values.

PACC: 0785; 4280F; 6110F; 7865