

用透射光栅谱仪测量多层膜的反射特性*

王占山

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 软 X 射线多层膜是当前应用光学和工程光学的研究热点之一,反射率是其性能和膜层质量最直观的参数,它的测量对了解多层膜性能和改进多层膜制备工艺具有重要意义。本文介绍采用带有前置光学系统的大面积透射光栅光谱仪分光,让软 X 射线多层膜反射+1级或-1级软 X 射线,用国产的 SIOFM 型 X 射线胶片接受软 X 射线,通过测量可定性地判断多层膜制备质量,为改进多层膜制备工艺提供重要的参考依据。

关键词 软 X 射线 多层膜 反射率 透射光栅光谱仪

中图分类号 O484.41 **文献标识码** A

1 引言

多层膜是软 X 射线光学中的重要光学元件之一,在软 X 射线望远镜、显微镜、X 射线激光和各种光谱仪器中有重要应用,用于软 X 射线投影光刻,表现出十分诱人的前景。反射率是多层膜性能和膜层质量最直观的参数,可为改进多层膜的制作工艺提供重要的参考依据。测试多层膜的反射率一般是用同步辐射或激光等离子体作光源、高精度反射率测量机构组成反射率计。这样的仪器造价十分昂贵,并且调整困难。本文介绍在带有前置光学系统的大面积透射光栅光谱仪的基础上^[1],发展了一种多层膜反射率相对测试装置。它虽然缺乏足够的测试精度,但作为多层膜性能的相对测量还是可以的,它便于调节,应用灵活。本文介绍实验装置,并给出相应的实验结果和讨论。

* 国家自然科学基金资助项目(69637040, 69778026)

收稿日期: 1999-04-08

修稿日期: 1999-04-19

2 实验装置

反射率是反射光强和入射光强之比,只要能同时得到反射光强和入射光强就可以得到反射率。若能得到不同波长下多层膜的反射率,就可以得到多层膜反射率随波长变化曲线。

在软 X 射线波段,透射光栅是一种重要的分光元件,用它可以组成透射光栅谱仪。根据光栅的尺寸,透射光栅谱仪又分为针孔或狭缝谱仪和带前置光学系统的谱仪。针孔或狭缝光栅谱仪使用的光栅总刻线数很少,所以光谱分辨率不高,同时它的面积很小,故而集光效率很低,但它调整十分方便,使用比较灵活,在等离子体诊断中得到了广泛的应用。带有前置光学系统的大面积透射光栅谱仪既充分利用了光栅的刻线总数,又用前置光学系统极大地提高了谱仪的集光效率。随着透射光栅制作水平的不断提高,现已可制作出刻线密度为 5000 l/mm 、面积达几百平方毫米的大面积透射光栅,为发展高性能的透射光栅谱仪提供了条件。目前国内还不能制作这样的大面积透射光栅,我们实验中所用的光栅是德国生产的,其面积为 $2.8 \times 8.2 \text{ mm}^2$,刻线密度为 1000 l/mm ,它决定着整个系统的接受角,其全接受立体角为 1×10^{-5} 。这比放在第一块反射镜同样位置的针孔和狭缝光栅谱仪的接受角有很大的提高。

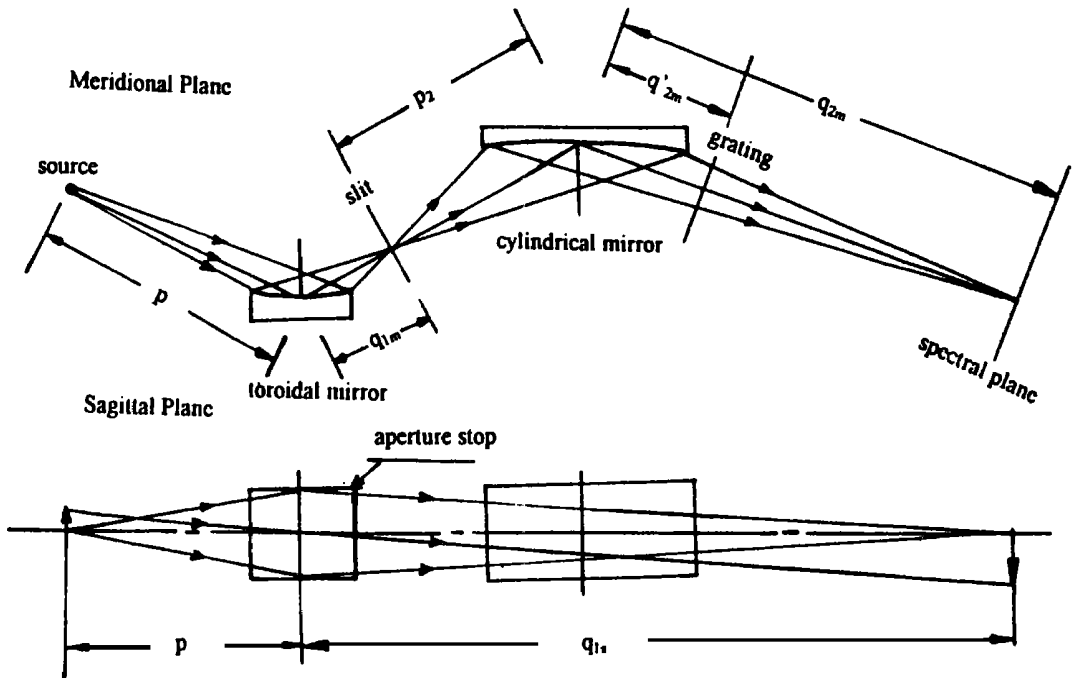


Fig. 1 Schematic diagram of the large area transmission grating spectrophotometer with a pre optics

已研制的带有掠入射前置光学系统的软 X 射线透射光栅谱仪是由超环面镜、狭缝、柱面镜、透射光栅和光谱接收元件(胶片)组成,如图 1 所示。图中上面部分代表子午平面内的光线,下面部分代表弧矢平面内的光线。在子午平面内,超环面镜将激光等离子体发出的软 X 射线会聚到狭缝上,在柱面镜后放置大面积透射光栅,调整狭缝的宽度可有效地消除光源展宽

对光谱分辨率的影响,再用柱面镜将狭缝会聚到胶片上。通过光栅的软 X 射线在子午方向上行射产生光谱。在弧矢平面内,超环面镜将激光等离子体发出的软 X 射线也会聚到胶片上,这样就可以在弧矢方向上获得空间分辨。因此,这台光谱仪可以获得具有一维空间分辨的光谱,从而研究不同波长处软 X 射线的空间发射特性。由于此系统弧矢方向的像是由超环面镜形成的,子午方向的像是由超环面镜和柱面镜形成的,所以这个系统的调整是比较容易。整个系统的参数如下:

大面积透射光栅光谱仪的系统参数

参数	数值
超环面镜	
子午方向曲率半径(mm)	$R_1 = 1667.2$
弧矢方向曲率半径(mm)	$R_1 = 26.85$
掠入射角(deg)	$\theta_1 = 3^\circ$
光源到镜子中心距离(mm)	$P = 349$
子午焦线到镜子中心距离(mm)	$q_{1m} = 50$
弧矢焦线到镜子中心距离(mm)	$q_{1s} = 1018$
孔径(mm)	$X_1 = 7$
	$Y_1 = 2$
柱面镜	
子午曲率半径(mm)	$R_2 = 8166$
掠入射角(deg)	$\theta_2 = 3^\circ$
镜子中心到狭缝距离(mm)	$P_2 = 339$
光栅到镜子中心距离(mm)	$q'_{2m} = 50$
光谱面到镜子中心距离(mm)	$q_{2m} = 629$
孔径	$X_2 = 50$
	$Y_2 = 1.5$
大面积透射光栅	
光栅常数(mm)	$d = 1/1000$
狭缝宽度(μm)	0~ 100
面积(mm^2)	2.8×8.2
胶片尺寸(mm^2)	30×60
测谱范围(nm)	3~ 50

光谱仪子午方向的缩小倍率为 $7\times$, 弧矢方向的放大倍率为 $2.7\times$ 。这样的设计使得此光谱仪不但具有光谱分辨,而且在一维方向上具有空间分辨。

基于材料的光学特性,反射镜的镀层材料选用 Ni。掠入射反射镜的表面粗糙度的大小对其反射性能影响很大,加工好的反射镜及镀膜后的基板都用 WYKO 表面轮廓仪进行了测量,结果表明光谱仪前置光学系统所用的掠入射反射镜的表面粗糙度均方根值小于 1.5nm 。对

100 μm 直径的光斑, 理论计算的光谱分辨率为 1.3nm。

为了同时记录原光谱和多层膜反射后的光谱, 在光栅谱仪光栅与焦平面之间加入被测多层膜, 反射 0 级和+ 1 级光谱, 而让- 1 级光谱自由通过。胶片 1 和胶片 2 同时分别记录了同一光谱的+ 1 级和- 1 级。根据胶片的黑度值, 经定标后可得到入射光强和反射光强相对值, 从而得到多层膜的反射率。

在这种测量中, 引入误差的因素较多, 定量测量精度较低, 但可作为很好的相对测量。只要有一块已知反射率的多层膜, 用其反射+ 1 级光谱, 而让待测反射率的多层膜反射- 1 级光谱, 这样就在一张胶片上得到两个多层膜的反射光谱强度, 比较两个光谱处的黑度值就可判断出待测多层膜的反射率。

3 实验结果及分析

实验中, 采用国产的 SIOFM 型 X 射线胶片接收, 为了在使用较小的激光器就可以实现测量, 光谱仪的狭缝取为 100 μm 。测试所用的激光等离子体靶材 Ta 比较好, 它在整个软 X 射线区发出较强的连续谱, 图 2 是测量得到的 Ta 激光等离子体发出的软 X 射线谱图。

实验时, 首先针对 X 射线激光实验的要求制作波长为 32.6nm, 入射角为 10 度, 层数为 31 的多层膜。我们

设计了 Mo/Si 多层膜, 其设计膜厚 Mo 为 4.1nm, Si 为 14.1nm。我们将制备好的多层膜放在预先作好的反射镜架上, 装好胶片, 在系统真空度为 2×10^{-2} Pa 时, 开启激光器进行实验, 所得

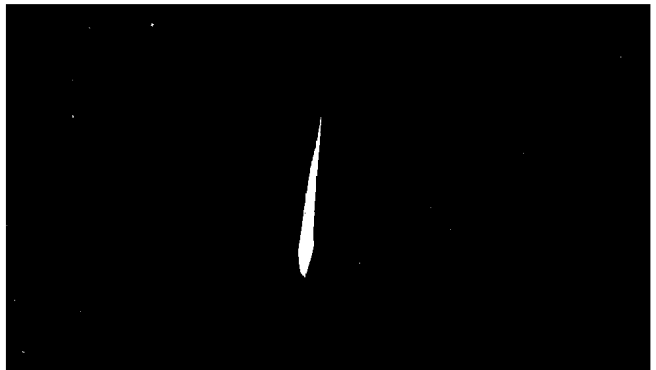


Fig. 2 Soft X-ray spectrum emitted from Ta laser produced plasma source

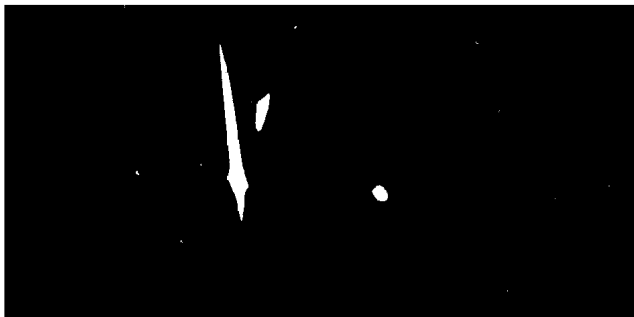


Fig. 3 The measurement result of a 32.6nm Mo/Si multilayer

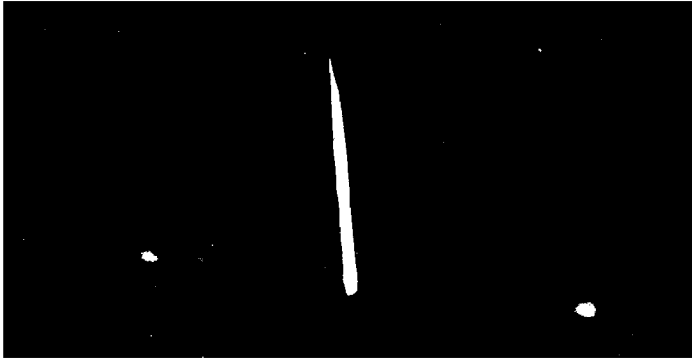


Fig. 4 The measurement result of Mo/Si nonperiodic(left) and periodic multilayers

结果如图 3 所示。由图可看出这个多层膜除在预先要求的 32.6nm 处有一定的反射外,还有更强的二级反射和较弱的三级反射,由此可见这种多层膜并不适合于用作 X 射线激光实验。

我们还用此测量装置完成了 Mo/Si 周期和非周期多层膜的相对测量,图 4 是得到的测量结果,由图可见非周期多层膜的峰值反射率没有周期多层膜高,而带宽却增加了,这与我们的设计符合得非常好。

本文进行的工作只是用软 X 射线透射光栅光谱仪进行多层膜反射特性测试的初步尝试,要想真正用它完成多层膜反射率的测试,必须开展胶片的定标工作。同时该系统本身还有一些问题需要考虑,其一是会聚于同一谱线上的光线入射角不同,由于多层膜反射率是入射角的函数,因此这些谱线强度是被反射的不同角度光线的平均强度;其二是同一谱线上沿光谱线长度方向上间隔一段距离的两点所对应的光线对多层膜的入射角也不完全一致,加之这个光谱仪还具有光谱线方向上的空间分辨率,光源空间方向上的强度变化也影响到最后的实验结果。但这也同时提供了一种减小测量误差的方法,只要进行多次胶片相应位置的黑度测量,可以避免一次测量带来的随机误差;另外黑度计的测量误差、胶片的标定、胶片灵敏度不均匀、谱仪狭缝不严格等宽及胶片处理过程中的误差也必将影响到测量结果。采用带有一块已知反射率多层膜的相对测量可以减小许多误差,可以提高测量精度。

4 结 论

带有前置光学系统的透射光栅谱仪具有+1级和-1级光谱的特点很容易进行多层膜反射特性的测试。初步的实验结果表明,本实验采用的长波长 Mo/Si 多层膜样品,测试显示它不适合作为波长为 32.6nm 激光实验;周期和非周期 Mo/Si 多层膜样品测试指出非周期多层膜的带宽增加但最高反射率降低,这些都与设计结果一致,但要进行定量测量还有许多工作要做。

作者衷心感谢马月英同志为实验制备了多层膜,感谢牛慧辉同志在实验过程中给予的大

力帮助。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhanshan, Wang Zhi, Chen Bin, Fan Pinzhong, Chen Xingdan. Large area transmission grating spectrograph with high collecting efficiency and good spatial resolution. Proc SPIE, 1998. 34433447

The Experimental Study of Reflective Performance for Soft X-ray Multilayers

WANG Zhan Shan

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Soft X-ray multilayer coating is the one of studied hot-points in applied and engineering optics. The reflectivity of multilayers is the most important parameter of multilayer coating performance and coating quality. The measurements of multilayer coatings is key to study the performance of coatings and improve the techniques of manufabrication. The relative reflectance measurements of some soft X-ray multilayers were completed successfully by splitting the spectrum of a laser-produced plasma source from a large area transmission grating spectrograph with a pre-optics, + 1 or - 1 order spectrum was reflected by a multilayer. Another arrangement was that + 1 order spectrum was reflected by one multilayer whose reflectance was known and - 1 order spectrum was reflected by one multilayer whose reflectance was unknown. The SIOFM X-ray film made in China was used. The results of measurements show whether the quality of multilayers was good and provide some important basis for improving the technique of fabricating multilayers.

Key words: Soft X-ray, Multilayer films, Reflectance, Transmission grating spectrograph

王占山 男, 研究员, 1985年毕业于南开大学物理系, 1988年在中科院长春光学精密机械研究所获硕士学位, 1996年在中科院上海光学精密机械研究所获博士学位。从参加科研工作以来, 主要从事短波光学技术研究。