

文章编号:1007-1180(2011)07-0016-05

多层膜沉积对光栅衬底槽形影响研究

张立超

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 衍射效率的高低是衡量极紫外多层膜光栅的最重要指标。为实现高衍射效率, 必须发展合适的多层膜沉积方法, 以确保在镀膜过程中光栅衬底的槽形不发生变化。针对极紫外波段所采用的矩形光栅衬底, 对其镀膜过程中的槽形变化进行了考察。结果表明, 多层膜周期数对保持光栅槽形至关重要。对于槽深在 2~5 nm 的极浅槽深矩形光栅, 为确保光栅槽形不发生变化, 必须选择合适的多层膜周期数。按照这一原则制备的多层膜矩形光栅, 在 14.65 nm 处-1 级衍射效率实测结果为 22.1%, 超过了国内外同类实验结果的最高报道值。

关键词: 极紫外; 多层膜光栅; 光栅槽形

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112807.0016

Effect of Multilayer Coatings on Groove Shapes of Grating Substrates

ZHANG Li-chao

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Applied Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Diffraction efficiency is critical for EUV multilayer gratings. To realize high diffraction efficiency, appropriate multilayer deposition method should be developed for grating substrates to ensure their groove shapes. The evolvement of groove shapes for laminar gratings during the deposition process was investigated. The results showed that the period number of the coating was a critical factor. To conserve groove shapes, period number should be selected appropriately for ultra shallow laminar gratings with depth of 2~5 nm. In the guideline of this principle, multilayer laminar grating with a diffraction efficiency of 22.1% at 14.65 nm on the -1 order was achieved, which exceeded all other results reported to date.

Keywords: EUV; multilayer gratings; groove shapes.

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.60678034), 国家科技重大专项项目

1 引言

极紫外多层膜光栅是一种人造二维周期性结构,它将横向结构上的光栅衍射与深度结构上的多层膜布拉格衍射相结合,使得在极紫外波段采用非掠入射、高衍射效率、高光谱分辨率的分光元件成为可能,在天文学、物理学、材料科学等领域具有广阔的应用前景^[1]。

衍射效率的高低是衡量多层膜光栅性能的最重要指标。根据标量理论,在近正入射条件下,多层膜光栅的衍射效率近似等于光栅沟槽衍射效率与多层膜反射率的乘积^[2]。以往的研究工作大多围绕两方面展开:一方面提高光栅衬底质量,以期获得高衍射效率;另一方面,优化薄膜沉积工艺,实现高反射率的多层膜。然而,另一个很重要的问题经常被忽略:多层膜光栅是一种复合结构,在镀膜过程中,光栅槽形很可能被改变,从而影响衍射效率。因此,对多层膜沉积过程中光栅槽形的改变情况进行考察,探索合适的镀膜方法,是使多层膜光栅获得高衍射效率的一个重要前提。

2 实验方法

以矩形光栅为例,当在具有浮雕形状的光栅衬底上镀膜时,沉积粒子会产生横向迁移,因而会使槽顶和槽底具有不同的沉积速率,另外在台阶位置会产生一定程度的遮挡效应。这些因素的共同影响,会使光栅的槽形在镀膜过程中产生变化。Voronov等^[3]曾对多层膜沉积导致的槽形变化产生的原因进行了猜测。他们认为,由于在他们的实验中多层膜沉积采用的是磁控溅射方法,在这种方法中沉积粒子入射到光栅衬底上时入射方向无规则,这样,由于沉积粒子的横向迁移和浮雕图形的遮挡效应,会导致光栅的槽形发生变化。因此,他们提出采用高度准直的沉积方法,也许会减小光栅槽形的变化。然而,在林慧的实验^[4]中,多层膜沉积采用的是高度准直的离子束溅射方法,但镀膜前后槽形的变化程

度较文献 [3]中仍未减轻。这说明沉积粒子的准直程度与光栅槽形的变化程度并无太大的联系。在进一步的实验中, Voronov等^[5]对所沉积的多层膜光栅采用透射电子显微镜进行了断面观察,发现槽形的变化是在多层膜周期数增加的过程中逐渐发生的。据此可以想象:当多层膜周期数积累到一定程度时,光栅槽形将产生较大的变化,从而使衍射效率损失较大。

由上述分析可知,考察镀膜过程对光栅槽形的影响,需要针对镀膜过程的不同时刻,考察镀有不同周期数的多层膜时光栅槽形的演变情况。虽然透射电子显微镜的结果说明这一问题较为直观,但其样品制备困难,而且更重要的是,无法从透射电子显微镜测试结果中精确定量地提取光栅的槽形参数。因此,本文采用原子力显微镜进行光栅槽形的测量。为考察镀膜过程中槽形的变化,每块光栅在镀膜前,以及每镀制5个或10个周期的多层膜后采用DI3100原子力显微镜对表面形貌进行测试。原子力测试采用 $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 的视场,扫描线数为512线。光栅的制备采用全息干涉曝光定义掩模+ Ar^+ 离子束正入射刻蚀的方法制备。光栅线密度为2400 l/mm。多层膜采用Oxford Ionfab600离子束溅射镀膜机。

在近正入射情形下工作的矩形光栅,其槽深应近似满足如下关系^[6]:

$$P\lambda=4h \quad (1)$$

其中, λ 为应用波长, h 为槽深, P 为整数。该式的物理意义是当矩形光栅槽顶与槽底对入射光产生的光程差为 $\lambda/4$ 的整数倍时,能够取得衍射极大。当 P 为奇数时,奇数级衍射取得极大值,偶数级衍射取得极小值; P 为偶数时情况相反。 P 的取值还决定了可用光谱带宽的大小, P 取值越大,光栅的沟槽衍射效率带宽就越窄。为使光栅的沟槽衍射效率在较大的波长范围内具有较高值, P 值一般取为1。因此,可以近似认为 $\lambda=4h$ 。为考察不同厚度的光栅在多层膜沉积过程中的槽形变化,实验中采用了槽深分别为 $\sim 2\text{ nm}$ 、 $\sim 3\text{ nm}$ 和 $\sim 5\text{ nm}$ 的矩形光栅衬底。

原子力测试结果可以直观地显示槽形的情况, 如图 1 所示。

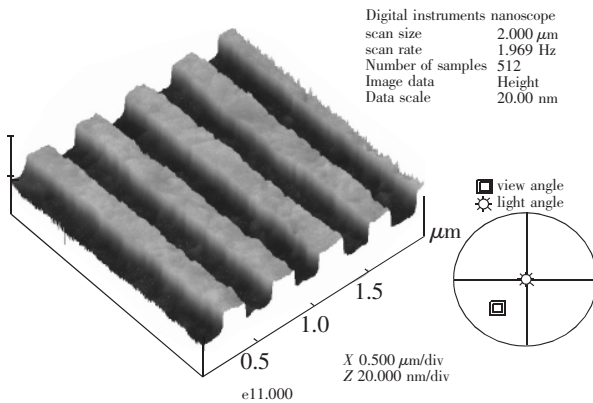


图 1 光栅槽形原子力测试结果

进一步通过对原子力测试结果的数据文件进行统计处理, 可以得到槽深的精确信息, 如图 2。

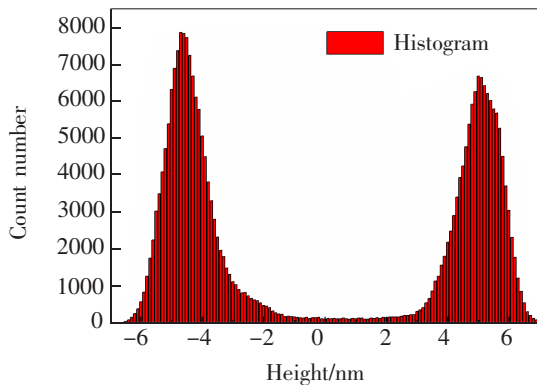


图 2 光栅槽形数据直方图

对于理想的矩形光栅, 其直方图应该是两个 δ 函数, 分别代表光栅槽的顶部和底部。由于存在包括粗糙度在内的槽形不完美因素, δ 函数通常扩展为高斯分布甚至其它不规则的分布。但即使如此, 将两个峰值的垂直高度相减, 仍可获得精确的槽深, 通过这样的数据处理方法提取光栅槽深可实现 0.1 nm 的精度。

3 实验结果

通过对 AFM 数据进行直方统计, 3 种光栅衬底镀膜前厚度分别为 1.8 nm, 3.6 nm 和 5.2 nm。镀膜前后光栅槽形参数分别见表 1, 表 2 和表 3。

表 1 1#光栅镀膜前后槽形参数

槽深	槽深	槽顶占	槽底占	侧壁
1.8 nm	(nm)	百分比	百分比	倾角
未镀时	1.8	30%	60%	7°~8°
10ML后	1.8	30%	50%	3°~4°
20ML后	1.8	30%	50%	3°~4°
30ML后	--	30%	45%	3°~4°

表 2 2#光栅镀膜前后槽形参数

槽深	槽深	槽顶占	槽底占	侧壁
3.6 nm	(nm)	百分比	百分比	倾角
未镀时	3.8	60%	30%	5°~6°
10ML后	3.7	50%	30%	4°~5°
20ML后	3.7	50%	40%	4°~5°
40ML后	3.8	50%	40%	4°~5°

表 3 3#光栅镀膜前后槽形参数

槽深	槽深	槽顶占	槽底占	侧壁
5.2 nm	(nm)	百分比	百分比	倾角
未镀时	5.2	30%	50%	5°~6°
10ML后	5	30%	50%	2°~3°
20ML后	5.1	30%	50%	2°~3°
40ML后	5.1	30%	50%	2°~3°

3 块光栅镀膜前后的 AFM 测试原始结果见图 3~图 9。

从表 1~表 3 和图 3~图 9 可以看出:

(1) 光栅在镀膜过程中, 槽形产生了可观察的变化, 其中槽深、槽顶或槽底在整个光栅面积中所占的比值、光栅侧壁倾角都发生了变化。

(2) 对于 3 块光栅, 槽形在镀膜过程中显示了类似的变化趋势, 当多层膜周期超过一定数量时,

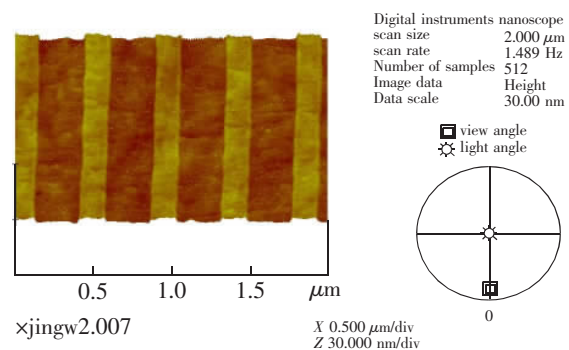


图 3 1#光栅镀膜前槽形

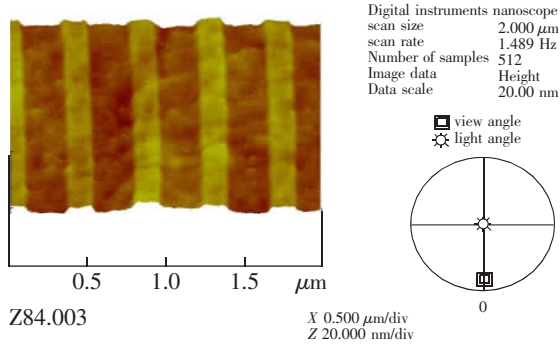


图4 1#光栅镀膜20周期Mo/Si多层膜后槽形

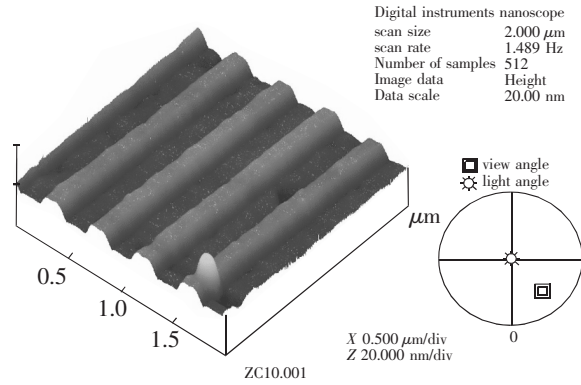


图8 3#光栅镀膜前槽形

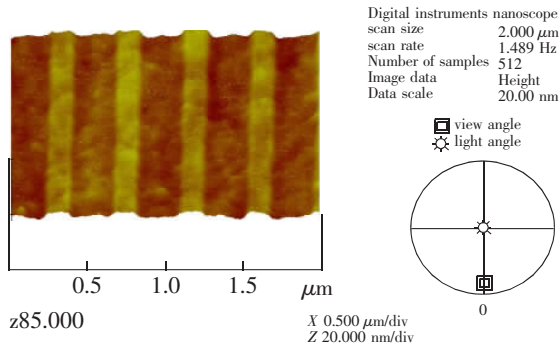


图5 1#光栅镀膜30周期Mo/Si多层膜后槽形

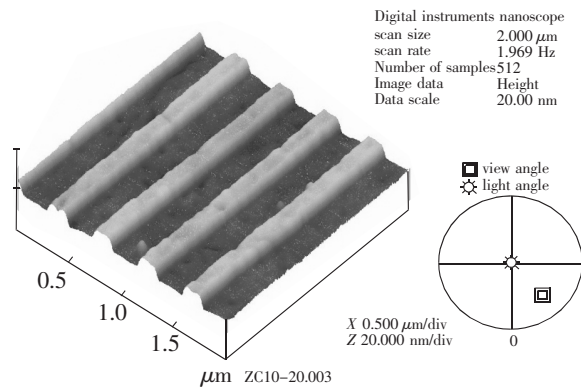


图9 3#光栅镀膜40周期Mo/Si多层膜后槽形

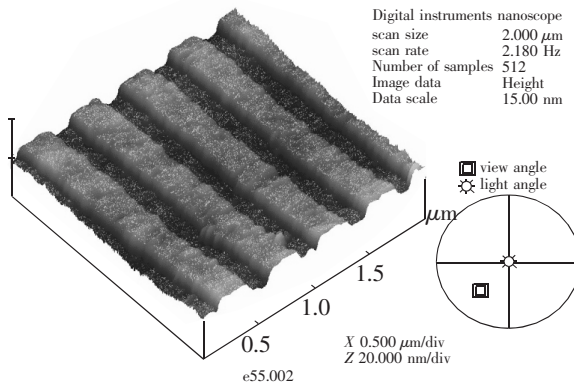


图6 2#光栅镀膜前槽形

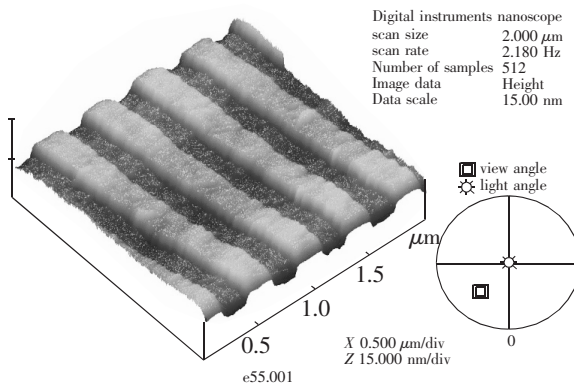


图7 2#光栅镀膜40周期Mo/Si多层膜后槽形

槽形或槽底在整个光栅面积中所占的比值、光栅侧壁倾角将趋于稳定。

(3) 从最关键的槽深来看, 3块光栅略有区别, 其中1#光栅在镀20周期的Mo/Si多层膜后, 槽深仍保持不变, 但当继续镀10个周期后(此时总周期数达到30周期), 则无法从AFM直方图中提取出槽深, 而与此对应的是2#、3#光栅在镀40周期多层膜后仍能保持镀膜前的槽深数值。这说明浅槽深的光栅对镀膜周期数容忍程度较为有限, 在相同的膜厚情况下, 浅槽深光栅的光栅槽更容易在镀膜过程中被淹没。

综上所述, 多层膜周期数是在镀膜过程中对槽形影响最大的因素, 这对于浅槽深光栅尤为重要。在对光栅衬底镀膜前, 需要预先对备用光栅进行预镀, 确定合适的多层膜周期数。对于13 nm附近的多层膜矩形光栅来说, 其槽深更接近2#光栅。从前面结果可以看出, 对此类槽深~3 nm的光栅, 沉积

40 周期的 Mo/Si 多层膜仍能够保持其槽形。为验证这一结论, 选取了另一块槽深为 3.6 nm, 槽顶和槽底各占光栅面积 50% 的光栅衬底, 在其上镀制了周期厚度为 7.6 nm 的 Mo/Si 多层膜, 在 14.65 nm 处-1 级衍射效率实测结果为 22.1%^[7], 这一结果已远高于国内外同类实验结果的最高报道值 16.3%^[8]。根据推测, 这块多层膜光栅在 14.65 nm 的峰值点处的沟槽衍射效率达到了 35.6%, 已经极为接近矩形光栅 40.5% 的理论极限, 说明光栅槽形在镀膜过程中得到了良好的保证。

4 结 论

本文针对极紫外波段所采用的矩形光栅基底,

对其镀膜过程中的槽形变化进行了考察。结果表明, 多层膜周期数对保持光栅槽形至关重要。对于槽深为 2~5 nm 的极浅槽深矩形光栅, 为确保光栅槽形不发生变化, 必须选择合适的多层膜周期数。按照这一原则制备的多层膜矩形光栅, 在 14.65 nm 处-1 级衍射效率实测结果为 22.1%, 超过了国内外同类实验结果的最高值。

致谢: 本文中所采用的光栅衬底由清华大学林慧同学制作, 原子力显微镜测试由中科院长春光机所应用光学国家重点实验室裴舒老师完成, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 金春水, 张立超. 极紫外/软 X 射线多层膜衍射光栅[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 27-32.
- [2] Vidal B, Vincent P, Dhez P, *et al.* Thin films and gratings: theories used to optimize the high reflectivity of mirrors and gratings for x-ray optics[J]. *SPIE*, 1985, 1563: 142-149.
- [3] Voronov D L, Ahn M, Anderson E H, *et al.* High-efficiency 5000 lines/mm multilayer-coated blazed grating for extreme ultraviolet wavelengths[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(15): 2615-2617.
- [4] Lin Hui, Zhang Lichao, Li Lifeng, *et al.* High-efficiency multilayer-coated ion-beam-etched blazed grating in the extreme-ultraviolet wavelength region[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 339(5): 485-487.
- [5] Voronov D L, Anderson E H, Cambie R, *et al.* A 10000 groove/mm multilayer coated grating for EUV spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(7): 6320-6325.
- [6] Kowalski M P, Barbee T W, Hunter W R. Replication of a holographic ion-etched spherical blazed grating for use at extreme-ultraviolet wavelengths: efficiency[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(2): 322-334.
- [7] Lin Hui, Zhang Lichao, Jin Chunshui, *et al.* Fabrication and efficiency measurement of a multilayer-coated ion-beam-etched laminar grating for extreme ultraviolet region[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, 7(3): 180-182.
- [8] Kowalski M P, Cruddace R G, Heidemann K F, *et al.* Record high extreme-ultraviolet efficiency at near-normal incidence from a multilayer-coated polymer-overcoated blazed ion-etched holographic grating[J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(24): 2914-2916.

作者简介: 张立超 (1979-), 男, 吉林省吉林市人, 博士, 副研究员, 2007年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事短波光学薄膜技术研究。E-mail: lichao@yahoo.com.cn