

# 一种利用等离子体 X 射线激光输出对称性测量 X 射线多层膜镜反射率的方法\*

程涛<sup>1,2</sup>, 黄文忠<sup>3</sup>, 孟立民<sup>1,2</sup>, 李英骏<sup>1,†</sup>, 赵静<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>

(1 中国矿业大学, 北京 100083)

(2 中科院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

(3 中国工程物理研究院 激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**从理论上论证了利用平板靶 X 射线激光两个输出端光强对称的特性来测量 X 射线多层膜镜反射率的测量方法. 针对实验布局中等离子体对 X 射线激光吸收可能造成测量误差的情况, 以保证测量结果千分之一的精确度为基准, 从理论上计算获得该方法对不同波长 X 射线激光的实验布局要求. 并依此要求对制得的 Mo/Si、Mo/Mg 镜的反射率进行了实验测量.

**关键词:**等离子体; X 射线激光; 多层膜反射镜; 反射率测量; 吸收

**中图分类号:** O53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)11-2288-4

## 0 引言

随着 X 射线激光的研究与发展, X 射线多层膜反射镜的研究、制备技术日趋完善, 其应用领域也日益广泛<sup>[1-8]</sup>. 多层膜反射镜是通过交替沉积两种可以形成长期稳定界面、具有不同折射率的物质层而形成的, 其性能的好坏主要取决于它对 X 射线的反射率. 不同的应用途径对多层膜镜反射率的要求也不相同. 如在 X 射线光刻技术中使用的多层膜反射率不能低于 70~72%, 需要反射率较高的 Mo/Si 多层膜反射镜<sup>[9-10]</sup>, 这种 Mo/Si 反射镜在研究的早期就获得了对于 13.0 nm 波长的 X 射线激光高达 66% 的反射率<sup>[11]</sup>; 硬 X 射线望远镜中则需要用到分级多层膜镜<sup>[12]</sup>. 另外 W/C、Pt/C 等多层膜反射镜也是应用比较广泛的<sup>[6]</sup>.

对多层膜反射镜在不同状态下反射率大小的测量一直是检测其性能的必要环节. 实验中常用的方法是利用同步辐射作为入射光源进行测量, 由于同步辐射源有单色性好、方向性好、能量高的特点, 加上同步辐射源较好的稳定性, 利用同步辐射对多层膜进行反射率测量的方法被广泛采用<sup>[13-14]</sup>. 但是, 同步辐射作为测量光源由于其成本高, 无法普及到一般实验室, 相比之下以激光等离子体中所产生的 X 射线作为测量光源的方法成本低, 所需要的空间也少, 成为目前比较常用的测量方法<sup>[15-17]</sup>. 但等离子体中产生的 X 射线源的方向性, 以及强度上都不如同

步辐射源. 本文提出一种在实验<sup>[18]</sup>中尝试过的利用等离子体 X 射线激光对多层膜镜反射率进行测量的方案: 利用平板靶 X 射线激光(XRL)两端输出的对称性, 通过比较平场光栅谱仪接收到的 XRL 的相对强度, 直接获得反射率. 这种方法避免了对入射以及反射 XRL 绝对强度的测量, 减少了需要测算的物理量, 并且由于激光脉冲的时间短, 整个测量过程对 X 射线源的时间稳定性几乎没有要求, 因而误差也随之降低.

本文将从理论计算上来论证该方法可行性, 并给出该方案下实验布局参量针对于不同的波长应满足的条件.

## 1 实验布局与物理过程分析

实验布局如图 1. 图中 1 为多层膜反射镜, 2 为等离子体, 3 为平场谱仪摄像头, 4 为光栅, 5 为底片, 6 为固体平板靶, 7 为 X 射线激光, 8 为反射 X 射线激光光斑, 9 为出射 X 射线激光光谱. 将平板靶等离子体两端对称输出的两束 XRL 中的一束照射到需要测量的多层膜反射镜上, 调节多层膜反射镜的角度, 使得经反射镜反射的 XRL 入射到平场光栅谱仪上. 另一个方向则直接入射到光谱仪. 在光谱仪的底片上将得到两个 X 射线激光光斑, 经过反射后的 XRL 在底盘上形成一个比较集中的斑点, 这是由于测量的多层膜镜是凹面镜, 有聚焦效果. 而直接入射的 XRL 光束由于自身的散射角度, 形成一个空间分布较明显的黑斑, 如图 2. 使用黑度计测量出两个斑的黑度总值  $D_i$  以及  $D_r$ , 对应强度分别为  $I_i$  以及  $I_r$ , 比较黑度值就可以得到反射率  $R = D_r/D_i$ . 这种方法更为简洁、实用.

\* 国家自然科学基金(10474137)、国家 973(2007CB815105)和教育博士点基金(20070290008)资助项目

† Tel: 010-62331826 Email: lyj@aphy. iphy. ac. cn

收稿日期: 2007-10-08

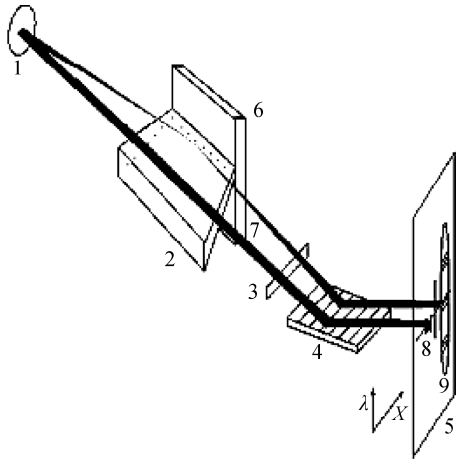


图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental setup

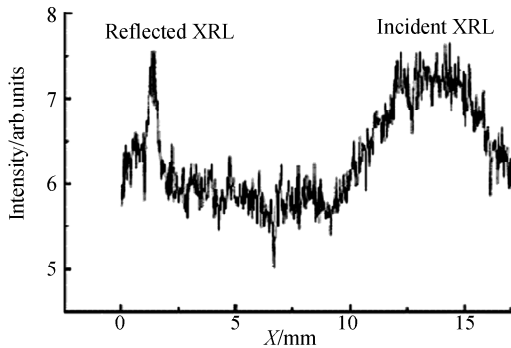


图 2 底片上反射与入射 XRL 光谱强度

Fig. 2 Intensity of XRL recorded on film

采用这种实验方案误差主要来自两方面,一是胶片记录上的噪音,二是等离子体对经多层膜镜反射的 XRL 光束的影响.对于前者,由于测量环境是在真空下,而且所用的是 XRL,单色性,方向性都非常好,散射本底造成的噪音可以不予考虑,所以胶片记录的误差主要来自黑密度噪音;测量所用的激光等离子体 XRL,其持续时间短,为百皮秒量级,因此可以选用透过率高的胶片记录,有效降低黑密度噪音;而且最终反射率的计算是通过两个光斑的总黑度值的比值所得,又进一步降低了噪音引起的绝对误差对反射率值的影响.

对于后者,一种是等离子体对 XRL 的吸收;另外一种反射的 XRL 可能再次穿过增益区而再次放大.考虑到实验中空间尺度和过程的时间尺度,再次增益问题可以忽略.吸收引起误差的情况将在本文中详细的计算.

## 2 决定吸收大小的实验参量

等离子体内传播的过程中,光强的变化关系为  $I = I_0 \exp(-\tau_{ib})$ . 实验中接收到的反射 XRL 是入射到光谱仪之前,再次受到等离子体吸收衰减后的  $I_r'$ ,其中  $I_r' = I_r \exp(-\tau_{ib})$ ,所以在计算反射率时,理论上需要将这部分反射损失计算在内.  $\tau_{ib}$  为通过

的光学厚度,由光程和吸收系数  $k_{ib}^{[11]}$  决定

$$\tau_{ib} = \int_{\text{始}}^{\text{末}} k_{ib} dx \quad (1)$$

式中

$$k_{ib} = \frac{4}{3} \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{Z n_e^2 e^6 (\lg \Lambda) \lambda^2}{c^3 (m_e T)^{\frac{3}{2}} \left( 1 - \frac{n_e}{n_c} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中,  $e$  为电子电量,  $m_e$  为电子质量,  $c$  为光速,  $\lg \Lambda$  为库仑对数,  $Z$  为等离子体的离化度,  $n_e$  为等离子体中的电子密度,  $n_c$  为临界密度,  $\lambda$  为入射光波长,  $T$  为电子温度. 从式(1)、(2)可以看出,波长与电子密度是决定吸收的主要因素. 取文献[18]实验条件(预脉冲激光能量为 1.8 J 主脉冲激光能量为 180 J,靶室半径 50 cm,采用块状铬靶),由自相似方程<sup>[19-20]</sup>以及 Medusa 程序计算模拟得到的  $T$  以及等离子体标长  $L$  等物理量的值,计算得到吸收与电子密度、波长的关系如图 3.

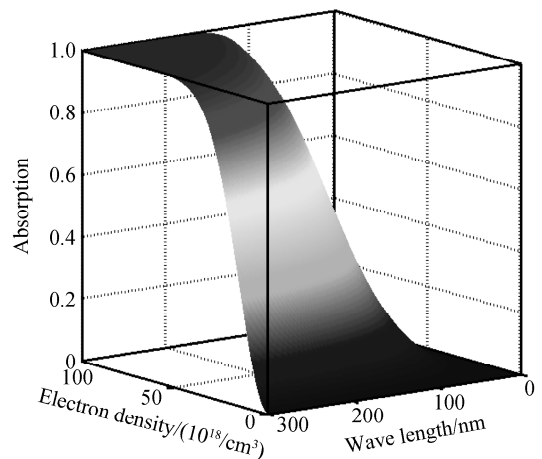


图 3 等离子体对 X 射线激光的吸收

Fig. 3 Absorption of X-ray laser in plasma

由图 3 可以看出,当短波长的 X 射线激光穿过较低电子密度的等离子体时,吸收很小.

激光与平面靶相互作用的自相似计算<sup>[20]</sup>给出电子密度空间分布为

$$n_e(x) = n_0 \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

结合实验布局图 1,反射光穿过等离子体时的入射点坐标  $x$  将直接对应不同电子密度,决定吸收的大小.假设反射镜离靶端的距离为  $l$ ,靶室半径为  $r$ ,底片上接收到的两个光斑间距为  $d$ ,一般为 1 cm,取靶长为 2 cm,光线接收端到谱面的距离为  $m$ ,考虑到 X 射线激光出射角度大约有 3 mrad 的偏转,由光路图计算得

$$x = l \cdot \left[ \frac{1 \text{ cm} - 3 \text{ mrad} \cdot (l - r - m)}{l + m + r + 2 \text{ cm}} + 3 \text{ mrad} \right] \quad (4)$$

在靶室半径  $r$  一定的情况下,入射点位置  $x$  取决于反射镜离靶端的距离  $l$ . 因此,  $l$  的大小将直接决

定吸收的多少. 实验设计中选择合适的  $\epsilon$ , 就可以使 XRL 入射到电子密度较低的位置, 减少吸收, 从而获得不需修正的直接测量结果.

### 3 准确度标准以及方案的可行性

对于测量获取的反射率值, 一般要求保持千分之一数值准确度. 如果吸收影响到测量结果的千分之一, 就必须修正; 反之可以忽略. 在此准确度要求下, 对于一定的反射率  $R$ , 所允许的最大吸收如图 4.

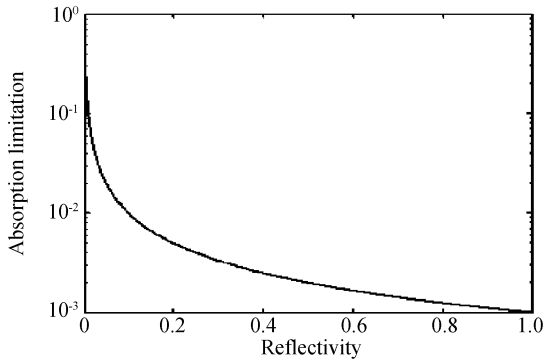


图 4 反射率—吸收临界值关系

Fig. 4 Allowed value of absorption versus reflectivity of multilayers

图 4 横轴为反射率, 纵轴标定了该反射率下, 测量中允许的最大吸收值. 超过该吸收值, 就必须考虑吸收影响, 对结果进行修正. 可以看出, 反射率越高, 对吸收的要求就越苛刻. 因为高反射率意味着反射镜对 X 射线激光的低吸收率, 相比之下, 等离子体对激光的吸收就会很大程度上影响测量值的精确性. 为保证实验方案的通用性, 取多层膜反射镜的反射率为 100%, 按照图 4, 为保证千分之一的准确度, 吸收需低于  $1 \times 10^{-3}$ . 依此要求, 图 5 给出了在实验<sup>[18]</sup>中, 不同的反射镜到靶端距离情况下, 所允许测量的激光波长的最大值. 可以看出, 若反射镜到靶端的距离  $\epsilon$  大于 30 cm, 该实验布局对于波长短于 19 nm 的 X 射线激光的反射率的测量都是满足千分之一准确度要求的. 通常反射镜的反射率要低于或远低于

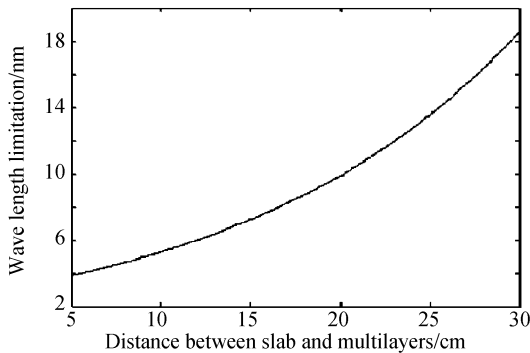


图 5 反射镜到靶端距离与波长之间的临界关系图  
Fig. 5 Allowance of wave length of laser versus the distance between slab and multilayers

100%, 对应的临界值大于或远大于  $1 \times 10^{-3}$ , 因此实验方案的可行性是非常强的.

### 4 多层膜镜反射率的实验测量

依据获得的临界曲线, 考虑到所测反射镜的反射率较低, 本次实验中仍采用文献[18]中的布局: 500 mm 多层膜镜距 XRL 源 310.6 mm, 距离光栅谱仪谱面 1281 mm, 对源放大 4.12 倍. 谱仪狭缝长为 10 mm, 宽度为 2 mm. 谱仪采用变栅距光栅, 光栅标称值为 1 200 line/mm, 入射角为  $87^\circ$ , 采用 Q 感光干板记录. 在光谱仪谱面位置, 感光干板可记录 2 mm 长度.

测量中两种 X 射线激光多层膜反射镜的反射率见表 1.

表 1 X 射线激光多层膜反射镜反射率

发次	反射镜材料	反射率
61 303	Mo/Si	0.053
61 701	Mo/Mg	0.122

### 5 结论

从本文的计算论证中可以肯定这种利用平板靶 X 射线激光输出光强的对称性来进行反射率测量的方法具有很强的可行性. 在千分之一的准确度要求下, 实验布局只需保证吸收低于  $1 \times 10^{-3}$ . 这个布局在钨玻璃激光器, 如“星光”、“神光”装置所产生的长脉冲 X 射线激光的条件下, 测量波长在几十纳米的 X 射线激光反射镜反射率的实验中都是容易满足的. 在文献[18]中的测量也说明了这种方法具有直接、简洁、实验上易于实现的优势. 另外, 通过计算等离子体电子密度, 温度等对不同波长 XRL 吸收率的影响也可以看出, 该方案下, 波长是影响吸收的主要因素, 是影响该实验方案精确度的关键物理量. 随着 XRL 继续向高能量、短波长的方向发展, 多层膜反射镜的反射中心波长也将随之变短, 衰减吸收对于此实验测量方案精确度的影响会越来越小, 该实验测量方法在将来的测量中会越来越实用.

#### 参考文献

- [1] GHOSE S K, DEV B N. X-ray standing wave and reflectometric characterization of multilayer structures [J]. *Physical Review B*, 2001, **63**:245409-245419.
- [2] KINGETSU T, TAMAMOTO M. Growth of short-period epitaxial superlattices for X-ray multilayer mirrors [J]. *Surface Science Reports*, 2002, **45**(3):79-116.
- [3] GAPONOV S V, GUSEV S A, LUSKIN B M, et al. Long-wave X-ray radiation mirrors [J]. *Opt Commun*, 1981, **38**(1):7-9.
- [4] WINDT D L, WASKIEWICZ W K. Multilayer facilities required for extreme ultraviolet lithography [J]. *J Vac Sci Technol B*, 1994, **12**(6):3826-3832.
- [5] FALCO C M, SLAUGHTER J M. Characterization of metallic

- multilayers for X-ray optics[J]. *J Magn and Magn Materials*, 1993, **126**(1-3):3-7.
- [6] ZHANG Zhong, WANG Zhan-shan, QIN Shu-ji, *et al.* The design of X-ray supermirror with broad angle range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):881-885.  
张众,王占山,秦树基,等.宽角度 X 射线超反射镜的设计[J]. *光子学报*, 2003, **35**(6):881-885.
- [7] GU Chun-shi, WANG Zhan-shan, MU Bao-zhong, *et al.* Imaging research with non-periodic multilayers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):881-885.  
顾春时,王占山,穆宝忠,等.基于非周期多层膜的 X 射线成像研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6):881-885.
- [8] ZHU Guo-long, FENG Shi-meng, SHAO Jian-da, *et al.* The effect of the deposition gas pressure of multilayers on the ability of X-ray reflectance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):572-575.  
祝国龙,冯仕猛,邵建达,等.溅射气压对 X 射线多层膜反射率的影响[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5):572-575.
- [9] ANDDREEV S S, GAPONOV S V, GUSEY S A, *et al.* The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers[J]. *Thin Solid Films*, 2002, **415**(1-2):123-132.
- [10] SWEENEY D W, HUDYMA R M, CHAPMAN H N, *et al.* EUV optical design for a 100 nm CD imaging system[C]. *SPIE*, 1998, **3331**:2-10.
- [11] STEARNS D G, ROSEN R S, VERNON S P. Fabrication of high-reflectance Mo-Si multilayer mirrors by planar-magnetron sputtering[J]. *J Vac Sci Technol A*, 1991, **9**(5):2662-2669.
- [12] CHRISTENSEN F E, CRAIG W W, WINDT D L, *et al.* Measured reflectance of graded multilayer mirrors designed for astronomical hard X-ray telescopes [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, **451**(3):572-581.
- [13] XU Zheng-liang, SUN Jian-hui. Measuring and control system for sychrotron radiation soft X-ray multilayer reflectometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(1):45-49.
- 徐正良,孙剑辉.同步辐射软 X 射线多层膜反射率计测量控制系统[J]. *光学精密工程*, 1995, **3**(1):45-49.
- [14] CUI Ming-qi, WANG Jun, MIU Jian-wei, *et al.* New soft X-ray reflectometer on beijing synchrotron radiation facility and some basic results of physics work[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1995, **19**(1):82-86.  
崔明启,王俊,缪建伟,等.北京同步辐射软 X 光反射率计装置及其物理工作[J]. *高能物理与核物理*, 1995, **19**(1):82-86.
- [15] CHEN Bo, NI Qi-liang, CAO Ji-hong. Soft X-ray reflectometer with laser produced plasma source [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(3):453-455.  
陈波,尼启良,曹继红.激光等离子体光源软 X 射线反射率计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(3):453-455.
- [16] NI Qi-liang, QI Li-hong, CHEN Bo. Soft X-ray reflectometer based on laser-produced plasma source with a gas-jet target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(6):576-580.  
尼启良,齐立红,陈波.使用气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(6):576-580.
- [17] WANG Wei, NI Yuan-long, WAN Bing-gen, *et al.* Single-shot measurement of soft X-ray Mo/Si multi-layer mirror reflectance [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2001, **13**(5):525-528.  
王伟,倪元龙,万炳根,等.单发实验测量软 X 射线多层膜反射镜反射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(5):525-528.
- [18] HUANG Wen-zhong, LI Ying-jun, GU Yu-qiu, *et al.* The reflectivity measurement of the 28.5 nm multilayer mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(4):809-812.  
黄文忠,李英骏,谷渝秋,等.中心波长为 28.5nm 多层膜镜反射率测量[J]. *物理学报*, 2003, **52**(4):809-812.
- [19] LI Ying-jun, ZHANG Jie. Hydrodynamic characteristics of transient Ni-like X-ray lasers [J]. *Phys Rev E*, 2001, **63**:036410-036415.
- [20] LI Ying-jun, ZHANG Jie, TENG Ai-ping. An analytic model for transient collisional X-ray lasers[J]. *Chin Phys*, 2001, **10**(6):516-522.

## A Novel Way of Measuring the Multilayer Reflectivity Utilizing the Symmetrical Output of XRL in Plasma

CHENG Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-zhong<sup>3</sup>, MENG Li-min<sup>1,2</sup>, LI Ying-jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>

(1 China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

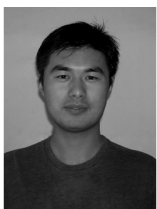
(2 Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

(3 Laser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Received date: 2007-10-08

**Abstract:** A novel way of measuring the reflectivity of multilayer was proposed. Utilizing the symmetrical output of the X-ray laser in slab laser-plasma, the reflectivity could be conveniently obtained in this way. It was also given the setup parameters by calculation according to the demand of precise considering the absorption of X-ray laser by plasma. Under which an experiment of measuring the reflectivity of Mo/Si and Mo/Mg was carried out.

**Key words:** Plasma; X-ray laser; Multilayers; Reflectivity; Absorption



**CHENG Tao** was born in 1980. He is now pursuing his Ph. D. degree at China University of Mining and Technology. His research interests focus on hydrodynamic physics and he also studies on X-ray laser in laser-plasma interaction at Institute of Physics in Beijing.