

中心波长为 28.5nm 多层膜镜反射率测量*

黄文忠¹⁾ 李英骏^{2)B)} 谷渝秋¹⁾ 张 杰²⁾ 尤永禄¹⁾ 淳于书泰¹⁾ 何颖玲¹⁾
雷安乐¹⁾ 陈正林^{1)B)} 马月英⁴⁾ 金春水⁴⁾

¹⁾ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

²⁾ 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

³⁾ 中国矿业大学物理系(北京校区), 北京 100083)

⁴⁾ 中国科学院长春光学精密机械和物理研究所, 长春 130022)

(2001 年 12 月 18 日收到, 2002 年 9 月 12 日收到修改稿)

在“星光- II”装置上以类 Ne 铬 x 射线激光作为标定源, 以平场光栅谱仪为分光元件进行了 28.5nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜效率测量. 介绍了实验方法, 给出了实验结果. 本次研制的两块多层膜镜反射率分别为 3.1% 和 9.6%.

关键词: x 射线多层膜反射镜, 反射率测量, x 射线激光

PACC: 0785, 0760H, 4255V

1. 引 言

x 射线多层膜反射镜是研究和应用低能 x 射线的关键元件之一^[1-3], 随着低能 x 射线尤其是 x 射线激光(XRL)研究的发展^[4], x 射线多层膜反射镜的应用日益广泛^[5]. 28.5nm 多层膜反射镜是低驱动功率 XRL 应用研究必需的光学元件, 其性能直接关系到应用实验的成败. 要获得这种波长的高效率多层膜镜却相当困难, 有关单位曾研制过多种材料和结构的中心波长为 28.5nm 的多层膜反射镜, 均因其效率太低而导致相关 XRL 应用实验未能进行. 通过 x 射线小角衍射可以对多层膜反射镜的周期结构进行分析, 从而间接判断多层膜反射镜的理论反射特性. 然而由于制作工艺的复杂性, 实际反射率和理论反射率可以有很大不同, 即使同一批次加工的反射镜其个体特性也可能差异很大, 因此, 其性能标定非常重要. 由于缺少合适的单色源, 中心波长为 28.5nm 多层膜镜的实验标定非常困难. 为了建立多层膜反射镜效率的实验标定方法并确定反射率, 本文以类 Ne 铬 x 射线激光作为标定源, 以平场光栅谱仪为分

光元件在“星光- II”激光器上进行了多层膜镜反射率的实验测量.

2. 原 理

多层膜反射镜是由两种原子序数不同的材料在超精密抛光的基片上交叠沉积膜层而成. 为了确保反射率, 要求反射镜材料对 x 射线吸收系数小, 而两种材料间的费涅耳系数差大. 材料选定之后, 膜层对数和厚度就是决定反射率和带通的关键因素. 通常, 膜层对数多反射率高, 但反射镜带通反比于膜层对数. 膜层对数太多会导致带通过窄. 因此, 两者必须兼顾. 反射率由下式描述:

$$R = R_i \exp[-(4\pi\sigma \sin\theta/\lambda)^2], \quad (1)$$

式中 R_i 为双膜体系的理想光滑界面的反射率; σ 为层膜界面的均方粗糙度; θ 为 x 射线入射角; λ 为入射 x 射线波长. 如果用 Bragg 公式 $n\lambda = 2d\sin\theta$ 代入 (1) 式有

$$R = R_i \exp[-(2\pi n\sigma/d)^2]. \quad (2)$$

由 (1) 和 (2) 式可见, 当多层膜体系材料和入射 x 射线参数确定后, 影响反射率的主要因素就是表面粗

* 国家自然科学基金(批准号: 19974074 和 6018007) 国家高技术研究发展计划资助的课题.

糙度 σ 和膜层周期厚度 d . σ 和 d 的精度主要由加工决定, 当已知 σ 和 d 值后可以直接利用(2)式计算出反射率, 但因为 σ 和 d 值通常小于 1nm , 很难测准. 同时, 实验环境, 例如: 温度场、辐射场等均要影响已加工好的反射镜的 σ 和 d . 这样, 就更需要直接进行反射率的实验标定.

x 射线多层膜镜反射率的定义为

$$\eta = I_r/I_i, \quad (3)$$

式中 I_i 表示波长为 λ 、带宽为 $\Delta\lambda$ 的 x 射线入射在反射镜上的强度; I_r 表示经该反射镜后的反射强度. 由上式可知, 实验标定反射率必须测定 I_r 和 I_i 数值.

3. 实验方法及布局

实验在“星光- II”激光器上进行. 实验中首先进行类 Ne 铬 XRL 实验, 获得较强 XRL 后以其为标定源进行多层膜镜效率测量. XRL 通过采用预-主脉冲驱动块状铬靶获得. 铬靶长为 20mm , 靶面抛光. 驱动激光波长为 $1.05\mu\text{m}$, 脉宽约为 650ps , 主脉冲能量约为 180J , 预脉冲能量为主脉冲能量的 1% , 两脉冲时间间隔为 5ns . 线聚焦系统采用 4 单元列阵柱面透镜和非球面点聚焦透镜组成, 打靶焦线尺度为 $22\text{mm} \times 100\mu\text{m}$. XRL 属于放大的自发辐射, 其光轴两端出射的 XRL 强度相等. 效率测量时, 在 XRL 靶面轴线一端放置待测多层膜反射镜, 一台平场光栅谱仪安置在轴线另一端测量入射和反射 XRL 强度. 为了提高效率测量灵敏度, 多层膜反射镜成 XRL 源像于光栅谱仪谱面. 实验标定布局见图 1. 实验采用的多层膜反射镜为同一批次加工, 曲率半径分别为 500 和 600mm . 多层膜镜中心波长为 28.5nm , 入射角为 2.5° . 500mm 多层膜镜距 XRL 源 310.6mm , 距光栅谱仪谱面 1281mm , 对源放大倍数 4.12 倍. 为了不阻挡谱仪接收 XRL, 谱仪狭缝长为 10mm , 宽度为 2mm . 谱仪采用日本日立公司生产的变栅距光栅, 光栅标称值为 1200 line/mm , 入射角为 87° , 采用 Q 感光干板记录. 在谱仪谱面位置, Q 感光干板可记录 2mm 谱线长度.

4. 实验结果

4.1. XRL 源强分布

图 2 为平场谱仪测得的铬 XRL 光谱, 从图 2 可

见 XRL 强度远大于自发辐射谱线. 铬 XRL 斑见图 3, 由于 XRL 垂直发散度大于水平发散度, 故其光斑近似成椭球状, 长轴在垂直方向. 长轴与短轴长度比为 $1.5:1$.

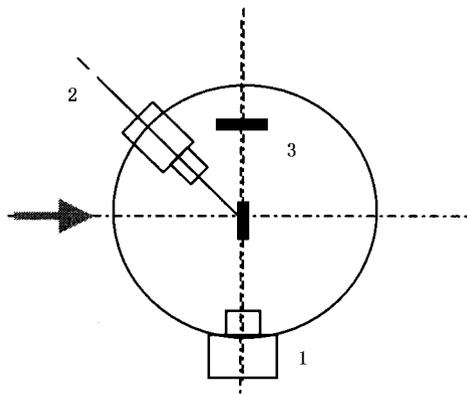


图 1 实验布局 1 为平场谱仪; 2 为狭缝相机; 3 为多层膜反射镜

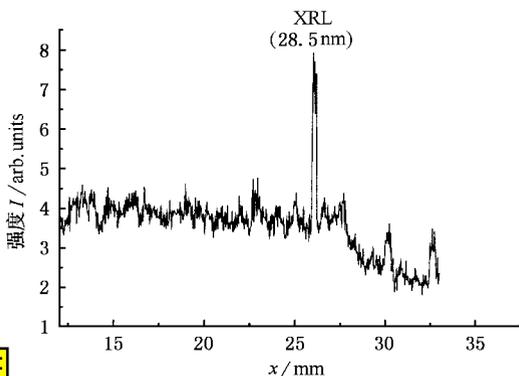


图 2 铬 XRL 光谱



图 3 铬 XRL 源斑

由于激光线发散角小, 照射光栅刻线区域的面积小, 引起的像散也小, 其谱线强度分布反映了光束在与色散方向垂直的一维角分布. 图 4 为 XRL 线强度分布曲线. 由谱线强度峰值二分之一处的全宽度

(FWHM) Δx 和谱面至 XRL 源距离 z 确定 XRL 束水平发散角

$$\theta_{\text{反射}} = \Delta x / z. \quad (4)$$

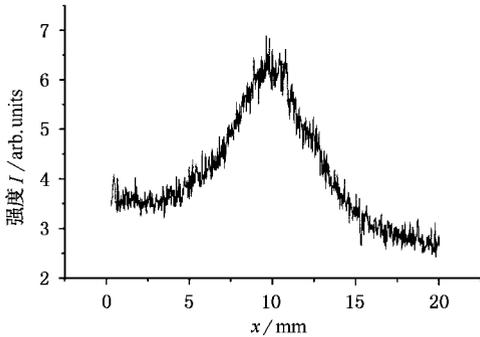


图 4 XRL 线强度分布

由图 4 测得铬 XRL 束 Δx 为 4.9mm, 而 Z 为 970mm. 由 (4) 式求得铬 XRL 束水平发散角 5mrad, 再由长、短轴长度比推得其垂直发散角 7.5mrad.

4.2. 多层膜镜反射率

谱仪测得的入射和反射 XRL 谱线见图 5, 波长为 28.5nm. 谱线对应位置上部是 XRL 源直接发射的 XRL, 下部是经多层膜镜反射的 XRL. 图 6 是沿入射和反射 XRL 线长方向扫描的强度曲线, 为了完整记录沿色散方向分布的 XRL 强度, 扫描狭缝宽度为 200 μm .

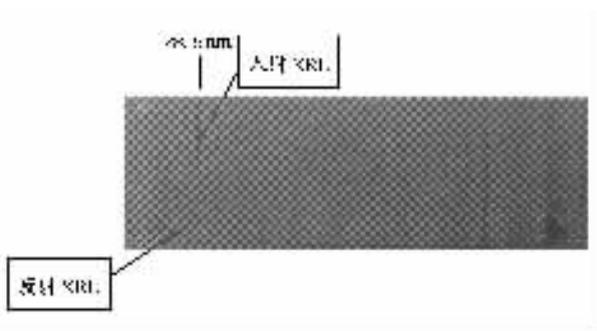


图 5 有入射和反射 XRL 的谱图

以 I' 表示谱仪测得的 XRL 积分强度, I'_i 和 I'_r 分别表示入射和反射 XRL 强度. h 表示光栅垂直高度. 由于谱仪入射角为 87° 、长度为 46mm, 则有 $h = 46 \times \cos 87^\circ = 2.4\text{mm}$. 光栅在狭缝处的等效高度为 $h_1 = 1.64\text{mm}$, 小于狭缝使用宽度; 在谱面处等效高度为 $h_2 = 3.16\text{mm}$, 小于入射 XRL 的垂直长度、大于反射 XRL 尺度. 光栅水平尺度为 26mm, 谱仪狭缝长度为 10mm 均大于相应位置的 XRL 束尺度, 因而只有

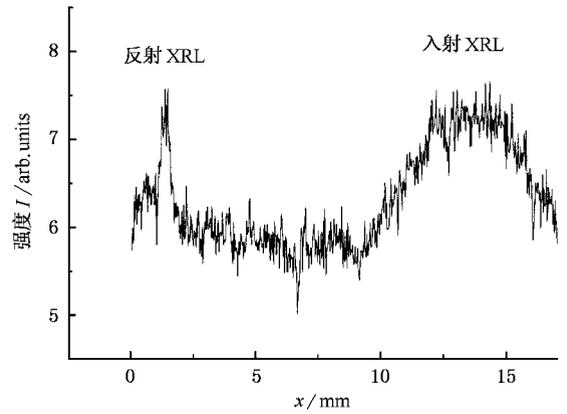


图 6 入射和反射 XRL 线强度分布曲线

光栅对入射 XRL 有部分阻挡作用. 以 Q 表示损失因子, 则有 $I'_i = I_i Q$, $I'_r = I_r$. 由于 XRL 强度呈高斯分布, 因此除考虑谱仪接收面积外, 还要考虑强度分布影响. 以 g 表示几何因子, c 表示强度因子.

$$Q = gc, \quad (5)$$

几何因子

$$g = s' / s. \quad (6)$$

式中 $s = 1.5\pi L^2 / 4$ 为 XRL 在谱面的应有面积, L 为 XRL 线长度, $s' = h_2 L$ 为光栅实际接收面积. 实验测得 XRL 水平方向强度分布, XRL 垂直方向强度分布形状应与之相同, 在计算强度因子 c 时有

$$c = (I'' / I') (s'' / s'), \quad (7)$$

式中 I'' 为峰值区 s'' XRL 积分强度, $s'' = (h_2)^2 / 1.5$. I' 为 s' 积分强度. 由第 61304[#] 发次结果计算的 c 及相关参量见表 1.

表 1 强度因子及相关参量

L/mm	S'/mm^2	S''/mm^2	$I'/\text{r. u.}$	$I''/\text{r. u.}$	c
10.35	32.7	6.66	13.76	5.42	1.93

整理 (5)–(7) 式并代入相关参量得到

$$\eta = 5.17 I'' / (I'_i L). \quad (8)$$

多层膜镜反射率 η 和有关参量见表 2. 表 2 中 R_1 表示曲率半径为 500mm 多层膜镜, R_2 表示曲率半径为 600mm 多层膜镜.

表 2 反射率 η 和有关参量

No.	L/mm	$I'_i/\text{r. u.}$	$I'_r/\text{r. u.}$	η
R_1	8.72	8.99	0.475	0.031
R_2	8.25	8.13	1.25	0.096

5. 结 论

x 射线激光由于单色性好、亮度高, 是标定软 x

射线多层膜反射镜效率的一种很好的单色源. 用 Mo/Si 材料制作的 28.5nm 多层膜镜效率达到 9.6% ,可以应用于低驱动功率的类 Ne 铬 XRL 应用

实验研究. 同一批次加工的多层膜镜效率也有较大差异. 本次实验测量的两块多层膜镜效率分别为 3.1% 和 9.6% .

[1] Sterns D G *et al* 1993 *Appl. Opt* **32** 6952

[2] Roberts J R *et al* 1990 *Phys. Scripta* **41** 9

[3] Li Y and He D R 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2171(in Chinese) 李

岩、何大韧 2000 物理学报 **49** 2171]

[4] Zhang J *et al* 1997 *Science* , **276** 1097

[5] Nakayama S *et al* 1990 *Phys. Scripta* **41** 754

The reflectivity measurement of the 28.5nm multilayer mirror^{*}

Huang Wen-Zhong¹⁾ Li Yin-Jun²⁾ Gu Yu-Qiu¹⁾ Zhang Jie²⁾ You Yong-Lu¹⁾ CunYu Shutai¹⁾ He Ying-Ling¹⁾
Lei An-Le¹⁾ Chen Cheng-Lin¹⁾ Ma Yue-Yin⁴⁾ Jin Chun-Sui⁴⁾

¹⁾ Laser Fusion Research Center , Chinese Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 ,China)

²⁾ Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China)

³⁾ Department of Physics , China University of Mining and Technology , Beijing 100083 ,China)

⁴⁾ Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022 ,China)

(Received 18 December 2001 ; revised manuscript received 12 September 2002)

Abstract

The reflectivity of the 28.5nm Mo/Si multilayer mirrors are measured at Xingguang-II laser facility using a flat-field grating spectrograph with the Ne-like Cr x-ray laser as a soft x-ray source. The reflectivities obtained for two samples are 0.031 and 0.096.

Keywords : x-ray multilayer mirror , Reflectivity measure , x-ray laser

PACC : 0785 , 0760H , 4255V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 19974074 and 6018007) and by the National High Technology Development Program of China.