

X 光多层膜反射镜反射特性实验研究*

熊岳南 倪元龙 吴 江 周关林

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要 采用在平焦场光栅谱仪后面分段记录光谱的办法成功地实现了软 X 光多层膜反射镜反射率的测量, 实验观察了反射镜反射特性随入射角变化情况, 同时对实验测量误差进行了分析。

关键词 软 X 光, 多层膜反射镜, 反射率。

1 引 言

在 X 光激光器研究方面, 已成功地运用多层膜反射镜实现了 X 光激光的双程放大、行波放大实验, 观察到了很明显的增益, 在不延长靶长的情况下实现了饱和峰值强度输出^[1]。在国际上, 美、苏、日、法等十多个国家众多实验室也已把多层膜光学元件用于 X 光激光实验研究中。美国劳伦斯-利弗莫尔实验室采用多层膜光学元件成功地研制出了用于高密度等离子诊断的马赫-陈德干涉仪, 它所使用的多层膜反射镜在 15.5 nm 处峰值反射率为 $60 \pm 5\%$, 分光镜反射率为 20%, 透过率为 15%^[2]。在我国, 上海光机所和长春光机所分别进行了相应的研究工作, 并成功地制备出大量实用的软 X 光光学元件, 有力地推动了国内 X 光光学的发展。但由于没有合适的光源, 这些光学元件的反射特性在国内却无法直接测出, 为了得到直接的反射率参数, 长春光机所曾经将样品送往日本, 采用他们的高精密激光等离子体反射率计对样品进行了测试, 该样品基底粗糙度 σ 值经 WYKO 轮廓仪测试在 0.5 nm 左右, 得到入射角为 10° 时在 13.0 nm 处峰值反射率在 48% 左右, 达到理论值的 60~70%。

反射率是反映薄膜质量最直观的参数, 可以为改进薄膜制造工艺提供重要的参考依据。本文介绍一种在文献[3]基础上经过改进的实测方法, 并对实验结果作了分析、讨论。

2 实验设计

根据反射率定义: $R = I_r/I_0$, I_r 为反射光强, I_0 为入射光强。只要同时记录下 I_r 、 I_0 就可以得到反射率。若能同时得到不同波长软 X 射线的反射率, 就可以得到反射镜反射率随波长变化特性曲线。在软 X 光波段, 光栅是最理想的色散分光元件。实验研制的平焦场光栅谱仪^[4], 采用变栅距凹面光栅, 其光栅常数 $d_0 = 1/1200$ mm, 凹面曲率半径 $R = 5649$ mm, 光

* 中国工程物理研究院青年科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 3 月 15 日; 收到修改稿日期: 1996 年 4 月 24 日

栅尺寸为 $30 \times 50 \times 10 \text{ (mm}^3\text{)}$ 。该光栅可将被光源照亮的谱仪狭缝成象在几乎平直的焦平面内形成光谱。当入射角 $\alpha = 87^\circ$ 时, 摄谱范围是 $5 \sim 30 \text{ nm}$, 用底片记录时谱分辨为 0.01 nm 。谱仪结构如图 1(a) 所示。由于象散, 掠入射光束在弧矢面内将自由发散。这样, 来自点光源的光束经色散后将在光栅谱仪后焦面上形成一条条谱线。谱线波长 λ 与相应的衍射角 β 满足

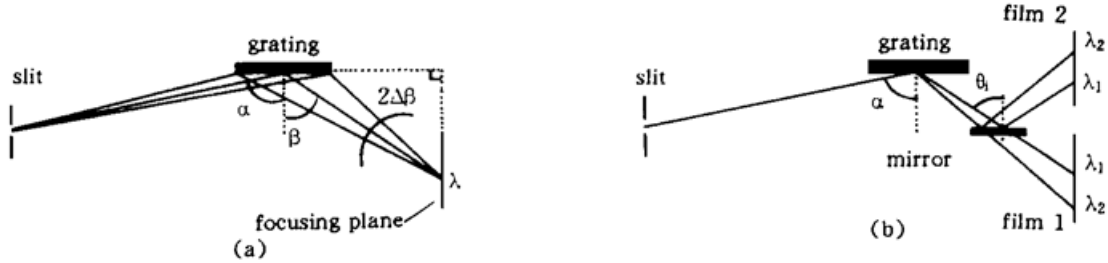


Fig. 1 Configuration of the flat field grating spectrometer (a) prior to (b) after reconstruction

$$\lambda = d_0(\sin \alpha - \sin \beta) \tag{1}$$

为了同时记录原光谱和经反射镜反射后光谱, 在原光栅谱仪光栅与焦平面之间加入被测的反射镜, 反射一段光谱, 让另一段自由通过。如图 1(b) 所示。底片 1 和底片 2 同时分别记录同一谱线的一段。按照黑密度值可以方便地得到入射光强和反射光强相对值从而得到反射率。反射镜和两底片之间相对位置应该这样放置, 即底片 1 平面和底片 2 平面相对于反射镜

平面相互处于镜象位置。只有这样才能使聚焦于底片 1 上的各光线同样聚焦于底片 2 上, 以保证准确地记录光强*。

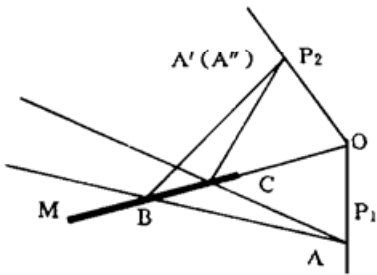


Fig. 2

图 2 中平面 P_1 就是图 1(a) 中的固定焦面。在机械设计中, 巧妙地利用相等的两臂将反射镜平面、记录平面 P_2 和固定平面 P_1 关联起来, 通过调节平面 P_2 的位置就可以在不改变镜像条件的前提下实现光束 BAC 以不同入射角反射, 从而得到多层膜反射镜对某一特定波长的反射率随入射角的变化特性曲线。

3 实验布局

实验在星光装置上进行。驱动激光脉宽 1 ns , 输出能量约 180 J 。经透镜列阵—主透镜组合聚焦辐照铝平面薄膜靶, 靶面焦斑尺寸约为 $\phi 420 \mu\text{m}$, 光强呈超高斯型分布, 中央平台尺寸约在 $\phi 380 \mu\text{m}$ 。结果靶面功率密度从边缘到中心呈连续变化分布, 使得多种波长软 X 射线同时激发。图 3 给出了实验布局, 底片 1 和底片 2 同时分别记录同一谱线的两段。驱动激光正面辐照铝靶, 改制后的光栅谱仪从 45° 角方向记录辐射谱, 狭缝到点源距离为 100 mm 。反射镜尺寸为 $22 \times 12 \times 2 \text{ (mm}^3\text{)}$, 基底粗糙度经 ZYGO 轮廓仪检测均方根值 σ 在 1.1 nm 左右。

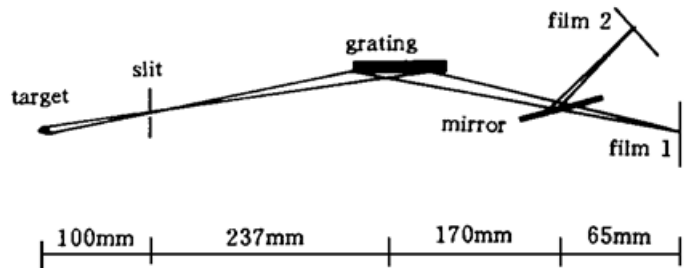


Fig. 3 Experimental arrangement

反射镜多层膜由上海光机所光学薄膜中心软 X 光薄膜课题组制备, 共由 20 对 Mo/Si 膜

* 关于这一点, 可以从几何光学得到证明。

系组成。设计工作波长为 13.0 nm, 45°角入射, 理论上峰值反射率为 37%。

4 实验结果与分析

实验中采用柯达-101 底片记录, 为了排除因底片饱和和底片灵敏度所引起的误差, 应适当选取谱仪狭缝宽度, 控制曝光量。为此, 狭缝宽度分别取 100 μm, 80 μm, 50 μm, 25 μm, 20 μm, 15 μm 进行实验, 结果发现狭缝宽度取 20 μm 时, 两底片上谱线均有较好的对比度。

维持狭缝宽度在 20 μm 不变, 改变反射镜角度进行了多次实验。

根据两底片上记录到的 13.0 nm、13.1 nm 双线位置很容易求出 13.1 nm 衍射光束与反射镜的夹角。从图 1 可以看出, 对应于同一谱线的光束内各光线不是以同一角度入射到反射镜的, 它将给反射率测量结果带来一定误差。这一点将在后面讨论。

图 4(a) 给出的是 13.1 nm 软 X 射线在 45°角入射时记录到的直接记录光谱和反射的光谱。从图中可以看到, 谱线强度沿光束发散方向(弧矢面)有良好的均匀性, 它是分光谱法测量反射率实验的基础。在 Al 的 L₂₃吸收边 17.038 nm 附近出现了强线, 对照 Al 辐射谱线波长表, 计算得知它是 8.55 nm 类氧铝离子辐射线经过光栅谱仪光栅后的二级衍射线。同理辨认出了 7.79 nm, 7.536 nm, 6.74 nm 软 X 射线的二级衍射谱线。这些强线的出现是因为靶面中心高的功率密度产生了大量的过电离离子, 使得短波长辐射占据了主要地位。在反射谱和直接记录谱中都出现了明显的 13.1 nm, 13.0 nm 双线, 给数据处理提供了重要的参考依据。令人不解的是, 两条短波长软 X 射线(7.79 nm, 7.536 nm)的二级衍射线也清楚地出现在反射谱中, 并没有完全消失。图 4(b) 是该两张光谱照片经处理得到的黑密度曲线, 曲线 1 是直接记录的光谱, 曲线 2 是反射光谱。柯达-101 底片的黑密度与曝光量定标关系式为^[5]:

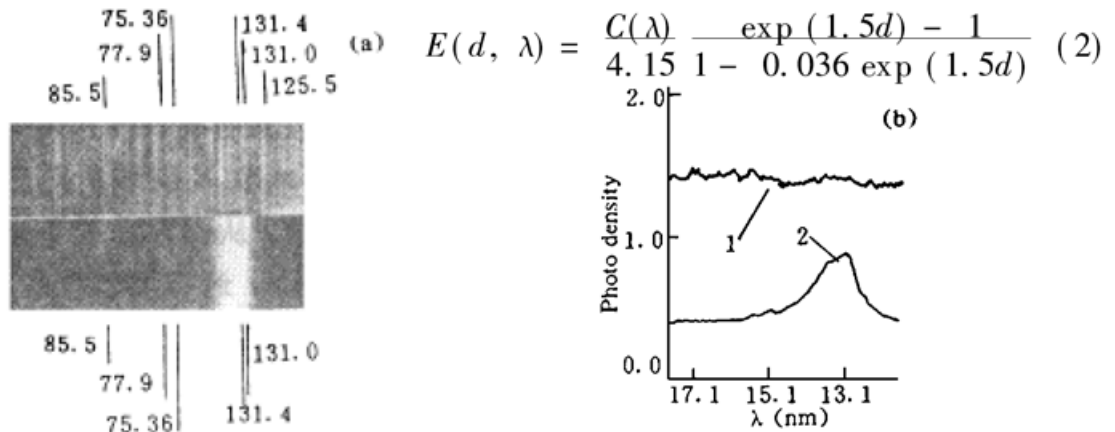


Fig. 4 Directly recorded spectrum (up side) and reflected spectrum (lower side) of X ray emission
(a) Photographs; (b) Photo density

式中 d 是扣除本底后的黑密度, $C(\lambda)$ 是与波长有关的常数, E 为曝光量 $\int I(\lambda) dt$ (对整个脉冲宽度 τ 积分)。当用两张底片在同一发次打靶中记录光谱时, 脉冲宽度 τ 相同。设镜子反射率为 $R(\lambda)$, 则有:

$$R(\lambda) = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_2(d, \lambda)}{E_1(d, \lambda)} = \frac{\exp(1.5d_2) - 1}{1 - 0.036 \exp(1.5d_2)} \frac{1 - 0.036 \exp(1.5d_1)}{\exp(1.5d_1) - 1} \quad (3)$$

式中 d_1 、 d_2 分别为底片 1 与底片 2 上波长谱线所对应的黑密度。按照此式, 计算得到上图中 13.1 nm, 7.536 nm, 7.79 nm 软 X 射线反射率分别为 25.86%, 3.5% 和 2.5%。

将图 4(b) 的两黑密度曲线按连续谱光滑化, 然后根据光栅方程(1)和谱仪结构参数计算出底片上位置坐标与波长的一一对应关系。将各波长的净黑密度值代入(3)式进行计算。就得到 45°角入射时反射镜反射率随波长变化特性曲线, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 被测反射镜的峰值反射波长在 13.1 nm 处, 峰值反射率为 26.2%。与前面采用谱线黑密度计算得到的结果基本一致。而 7.56 nm 与 7.79 nm 两谱线的反射率则没有明显反映出来, 这是因为按连续谱光滑后被过滤掉了。反射镜的反射率半高全宽(带宽)为 1.05 nm, 比理论值 1.25 nm 略小。再从光栅方程(1)出发, 当 13.1 nm 软 X 射线以 45°角入射时, 相邻波长将分别以略大于或小于 45°入射, 参见图 1(a)。经过简单的计算得到图 5 中对应于半峰值反射高度处 13.7 nm 和 12.5 nm 软 X 射线入射角分别为 44.78°和 45.23°。从图 6 不难发现, 这一角度变化正好都使峰值反射波长较 45°入射时向各自靠拢。使相应反射率提高。因此反射镜实际带宽应比 1.05 nm 更小。

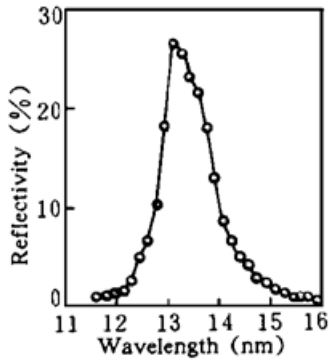


Fig. 5 Reflectivity vs wavelength for mirror at 45° incidence angle

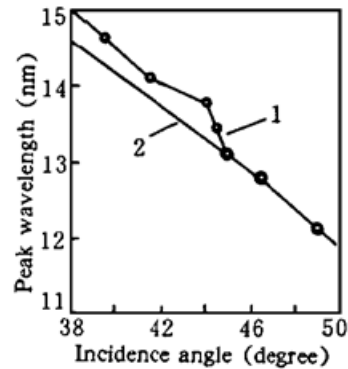


Fig. 6 Peak reflection wavelength vs incidence angle

将多层膜反射镜拟作晶格常数为 d (d 为多层膜周期) 的晶体, 由布拉格条件得反射波长 λ 与入射角 θ 满足 $k\lambda = 2d \cos \theta$, 式中 k 为干涉级次。当入射角为 θ_i 时, 峰值波长 λ_i 由下式给出

$$\lambda_i = \lambda \cos \theta_i / \cos \theta \tag{4}$$

图 6 给出实验结果, 其中曲线 1 是实验点给出的峰值反射波长随入射角变化曲线, 曲线 2 是根据式(4)计算得到的结果。图中入射角是指 13.1 nm 软 X 射线所对应的入射角, 利用(1)式可以计算与实验点对应波长软 X 射线的实际入射角, 从而对曲线 1 进行修正。实验发现实际的峰值波长与理论值不完全一致, 最大相差 0.4 nm, 这与反射镜所用基底有约 1 nm 的均方根粗糙度 σ 有关, 镀上多层膜后, 各层膜面均有一定的粗糙度。粗糙度实际值可用下式根据测得的峰值反射率估算。

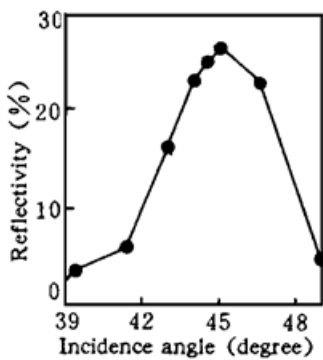


Fig. 7 Reflectivity vs incidence angle for 13.1 nm wavelength x-ray

$$R = R_0 \exp [- (4 \times 3.14 \times \sigma \sin \theta / \lambda)^2]$$

式中 R_0 为理想的反射率, R 为实际反射率, λ 为工作波长, θ 为入射角, σ 为均方根粗糙度。将前面测得的 45°入射角时 13.1 nm 软 X 射线反射率与理论反射率代入上式, 求得 σ 值在 0.86 nm 左右, 比基底粗糙度 1.1 nm 略小。

在实际工作中, 不仅关心入射角变化时反射镜峰值反射波长的漂移, 还要知道同一工作波长的反射率变化情况。图 7 给出 13.1 nm 软 X 射线的实验结果。从图可以看到, 当入射角变化 $\pm 3^\circ$ 时, 反射镜对 13.1 nm 软 X 射线反射率降到峰值反射率的一半以下, 变化 $\pm 5^\circ$ 时, 反射镜几乎没有反射作用。

5 误差分析

任何一种测量方法都存在测量误差, 本实验中误差来源主要有两方面。

首先, 会聚于同一谱线上的光线不是以同一角度被反射镜反射, 如图 1(a) 所示。由于反射镜反射率是入射角 θ 的函数 $R(\theta)$, 因此这些光线被反射后形成的谱线强度是平均强度。设聚焦于底片 1 上形成谱线的所有光线处在 $\theta - \Delta\beta \sim \theta + \Delta\beta$ 角度范围内, 光强在该角度范围内平均分布, 则底片 1 上谱线光强为:

$$I_1 = \int_{\theta - \Delta\beta}^{\theta + \Delta\beta} \frac{I_1}{2\Delta\beta} d\theta = I_1 \quad (5)$$

设反射特性函数为 $R(\theta)$, 底片 2 上谱线光强:

$$I_2 = \int_{\theta - \Delta\beta}^{\theta + \Delta\beta} \frac{I_1}{2\Delta\beta} R(\theta) d\theta = \frac{I_1}{2\Delta\beta} \int_{\theta - \Delta\beta}^{\theta + \Delta\beta} R(\theta) d\theta \quad (6)$$

于是测量到的反射率为:

$$R = \frac{I_2}{I_1} = \int_{\theta - \Delta\beta}^{\theta + \Delta\beta} \frac{R(\theta)}{2\Delta\beta} d\theta \quad (7)$$

可见测量到的是入射角为 $\theta - \Delta\beta \sim \theta + \Delta\beta$ 范围内的平均反射率, $\Delta\beta$ 越大, 与 θ 入射时反射率偏差也越大。下面结合实验测量到的反射率随入射角变化曲线对这一误差进行简单计算。

先看看会聚于谱线上一点的子午面内光束。对于 13.1 nm 谱线, 按光栅方程(1)式有 $\beta = 79.383^\circ$, 考虑到焦斑直径 $D = 0.38$ mm, 结合图 3 得到:

$$2\Delta\beta = \frac{0.38 \times 237 \tan 87^\circ}{100 \times 235 \tan 79.383^\circ} = 13.4 \text{ (mrad)} = 0.768^\circ \quad (8)$$

利用(7)式, 对图 7 中的实验曲线在 $\pm \Delta\beta$ 范围内求平均。可以得到, 对于 13.1 nm 谱线, 这一角度将引入约 2% 的修正量。

另一方面, 在同一谱线上沿谱线长度方向间隔一段距离的两点所对应的光线对反射镜的入射角也不完全一致, 如果处在子午面(与谱线垂直)内的光线入射角为 θ , 则可以证明, 谱线上与该光线成夹角 ϕ 的另一点对应的光线入射角 θ' 由下式给出:

$$\cos \theta' = \cos \theta \cos \phi \quad (9)$$

实际上, 到达 13.1 nm 谱线上相隔 4 mm 的两点的光线, 所对应的夹角 ϕ 从图 3 可以算出:

$$\phi = \frac{4}{100 + 237 + 235/\sin 79.383^\circ} = 6.94 \text{ (mrad)} = 0.398^\circ$$

代入(9)式计算可以看出 $\theta \approx \theta'$ 。所以反射镜对这两根光线的反射率几乎没有差别。

另一主要的误差是黑密度计测量误差和底片灵敏度不均匀以及谱仪狭缝不严格等宽引起的。所有这些误差因素作用的综合结果就是使得同一光强的谱线呈现出强度起伏。

图 8 给出的是在无反射镜情况下, 底片 1 直接记录到的光谱沿发散方向(即谱线长度方向)上的光强分布。从靶点出射的 X 射线以球面波的形式传播。在底片平面上沿谱线方向光强分布为:

$$I_1 \sim I_0 [1 - (l/r_0)^2] \quad (10)$$

式中 r_0 为靶点到记录平面的垂直距离, l 为谱线上点的相对坐标(取靶点到记录平面的垂足为参考原点), I_0 为原点处光强。以 $l = 10$ mm(底片宽度), $r_0 = 572$ mm 代入得到由球面发散引起的光强相对变化为 0.03%。可见谱线上光强有良好的均匀性, 也就是说图中光强的起伏

是由于实验误差引起的。下面利用(2)式进行误差计算。

图中净黑密度(扣除本底后的黑密度)最大值为 0.927, 最小为 0.837, 代入(2)式进行计算, 得到光强相对测量误差为 $\pm 5\%$ 。现假定两底片光强具有同样的相对测量误差, 根据反射率公式 $R = I_2/I_1$, 得到反射率相对测量误差为:

$$\Delta R/R = \pm (|\Delta I_1/I_1| + |\Delta I_2/I_2|) = \pm 10\% \quad (11)$$

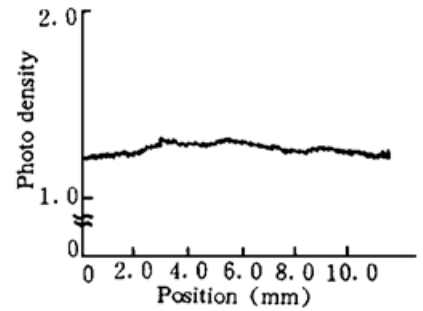


Fig. 8 Fluctuation of the measured photo density along the spectrum line

结 论 在保证两底片相对于被测反射镜镜面相互处于镜像位置的情况下, 来自平焦场光栅谱仪的光束若在底片 1 上聚焦, 经反射镜反射后将聚焦于底片 2 上形成清晰的焦线, 通过比较同一谱线的两部分的强度即可测出反射镜对该谱线光束的反射率。由于反射谱和直接记录谱是在同一发次中得到, 靶面功率密度与驱动激光脉宽都完全一致, 测量结果比较可靠。

在本次实验中测量的由上海光机所光学薄膜中心提供的 Mo/Si 多层膜反射镜基底粗糙度均方值在 1.1 nm 左右, 反射率测量值为 26.2%, 达到理论值的 70%, 测量误差为 $\pm 10\%$ 。根据这一结果求得膜层的最后均方根粗糙度约为 0.86 nm。该反射镜在 450 时峰值反射波长在 13.1 nm, 与设计工作波长相差 0.1 nm, 反射带宽在 1.05 nm 左右。

作者衷心感谢上海光学精密机械研究所光学薄膜中心范正修、邵建达为实验提供反射镜, 感谢室领导为实验安排提供方便以及星光全体运行组成员在实验过程中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] 王世绩, 顾 援, 周关林等, 反射镜多靶串接增益饱和软 X 光激光实验. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(4): 557~ 563
- [2] P. Celliers, F. Weber, L. B. Barbee Jr., *et al.*, X-ray laser interferometry experiments at LLNL, *X-ray Lasers 1994, Fourth International Colloquium*, Williamsburg, VA, AIP press, 1994: 549~ 552
- [3] Hirozumi Azuma, Yoshihide Watanabe, Yoshiaki Kato *et al.*, Single shot Measurement of spectral reflectance of a soft X-ray multilayer mirror using a laser plasma X-ray source. *Appl. Phys.*, 1992, **31**(2b: part 2): 203~ 205
- [4] 倪元龙, 毛楚生, 吴 江等, 平焦场光栅谱仪. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(2): 242~ 248
- [5] K. Eidmann, T. Kishimoto, P. Hermann, Absolute soft x-ray measurements with a transmission grating spectrometer. *Laser and Particle Beams*, 1986, **4**: 521~ 530

Reflective Characteristics of a Soft X-Ray Multilayer Mirror

Xiong Yuenan Ni Yuanlong Wu Jiang Zhou Guanlin

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800)

(Received 15 March 1996; revised 24 April 1996)

Abstract The reflectivity measurement of a soft X-ray multilayer mirror is carried out successfully by splitting the spectrum from a flat field grating spectrometer into two parts. The variation of the reflective characteristics vs incidence angle is observed. Some of the key techniques and experimental results are presented and discussed.

Key words soft X-ray, multilayer mirror, reflectivity.