

# 软 x 射线平面镜不同掠射角下的反射率标定\*

孙可煦 易荣清 杨国洪 江少恩 崔延莉 刘慎业 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

崔明启 朱佩平 赵屹东 朱杰 郑雷

(中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室, 北京 100039)

张景和

(哈尔滨工业大学精密工程研究所, 哈尔滨 150001)

(2003 年 2 月 17 日收到, 2003 年 8 月 7 日收到修改稿)

报道了平面反射镜在不同掠射角下的反射率标定实验. 实验利用北京同步辐射装置(BSRF)-3W1B 束线及反射率计靶室, 在束流强度 40—120 mA、贮存环电子能量 2 GeV 专用光运行模式下, 在 50—1500 eV 能区, 做了四种材料平面镜在不同掠射角下的反射率标定. 标定过程用高灵敏度无死层的硅光二极管代替 x 射线二极管作探测器, 使输出信号提高 2—3 个数量级. 最终给出 C、Si、Ni 和 Au 四种材料平面镜在 1°—7° 掠射角下的反射率标定曲线, 并把实验数据与理论计算值进行了比对和分析.

关键词: 同步辐射, 平面镜, 反射率, 标定

PACC: 4272, 4278, 0760H, 0620H

## 1. 引言

激光惯性约束聚变(ICF)实验研究中, 激光等离子体发射软 x 射线时, 空、谱测量极其重要, 特别是能谱绝对强度测量. 滤光片-x 射线二极管(XRD)阵列谱仪(SXES)<sup>[1]</sup>至今仍然为首选诊断设备, 具有不可替代的作用. SXES 的基本原理是滤光片滤波分光, XRD 探测软 x 射线信号. 该谱仪具有中等能量分辨和时间分辨, 已被许多相关的大型实验室采用. 单纯的滤波法软 x 射线能谱仪, 其响应函数为

$$F(E) = \tau(E)S(E), \quad (1)$$

其中  $\tau(E)$  为滤光片的透过率曲线,  $S(E)$  为 XRD 灵敏度曲线,  $F(E)$  为滤波法软 x 射线能谱仪总的能量响应函数. 滤波法软 x 射线能谱仪有一个严重缺点, 即各探测道存在不同程度的尾部影响.

ICF 实验用靶材料主要是 Au, 基频光实验时, 靶辐射 x 射线的能量主要集中在亚千 x 射线能区 (50—1500 eV 能区约占 95% 以上)<sup>[2]</sup>, 辐射 M 带份额极少. 因此, 只是低能道的高能尾部贡献比较突出, 需进行适当修正或采取措施. 三倍频打靶后, 随

着激光能量增加、打靶强度增大, Au 材料发射谱的 M 带成分 (2—4 keV) 随之急剧增长, SXES 几乎所有探测道的高能尾部响应份额都有大幅度增加. 图 1 给出 Cu 滤片-XRD 探测道的能量响应函数. 由此可见, 它的高能尾部包含整个 M 带. 为了提高探测道测量能区的单色性, 原则上, 所有探测道都必须采取措施, 抑制高能尾部影响. 为了适应不同能区色散需要, 研制了不同材料平面镜, 得到了在不同掠射角下的反射率标定曲线.

## 2. 工作原理

在软 x 射线波段, 任何物质对软 x 射线的折射率都小于且接近于 1. 当软 x 射线从光密介质射向光疏介质时, 一部分 x 射线进入光疏介质产生折射, 且折射角大于入射角, 另一部分 x 射线则被界面反射. 当入射角增大接近 90° 时, 出现折射角等于 90°, 此时称入射角为临界入射角. 进一步增大入射角, 即入射角大于临界入射角时, x 射线不再产生折射而全部反射. 软 x 射线掠入射平面反射镜就是利用这个原理工作的<sup>[3]</sup>. 根据经典理论计算, 临界掠入射角  $\theta_c$  可表示为

\* 国家高技术研究发展计划 批准号 863-804-3 资助的课题.

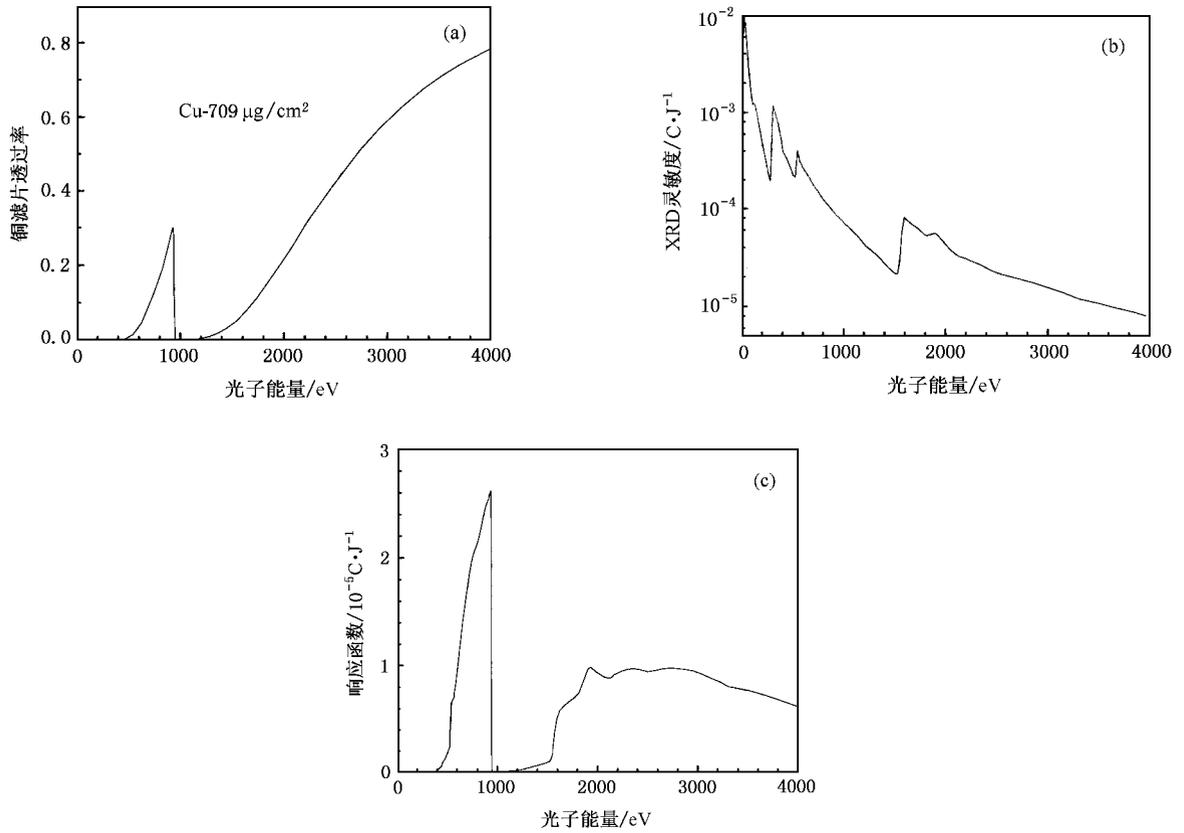


图1 铜探测道未加平面镜的能量响应曲线 (a)铜滤片透过率曲线 (b)铝阳极 XRD 灵敏度曲线 (c)铜探测道系统响应函数

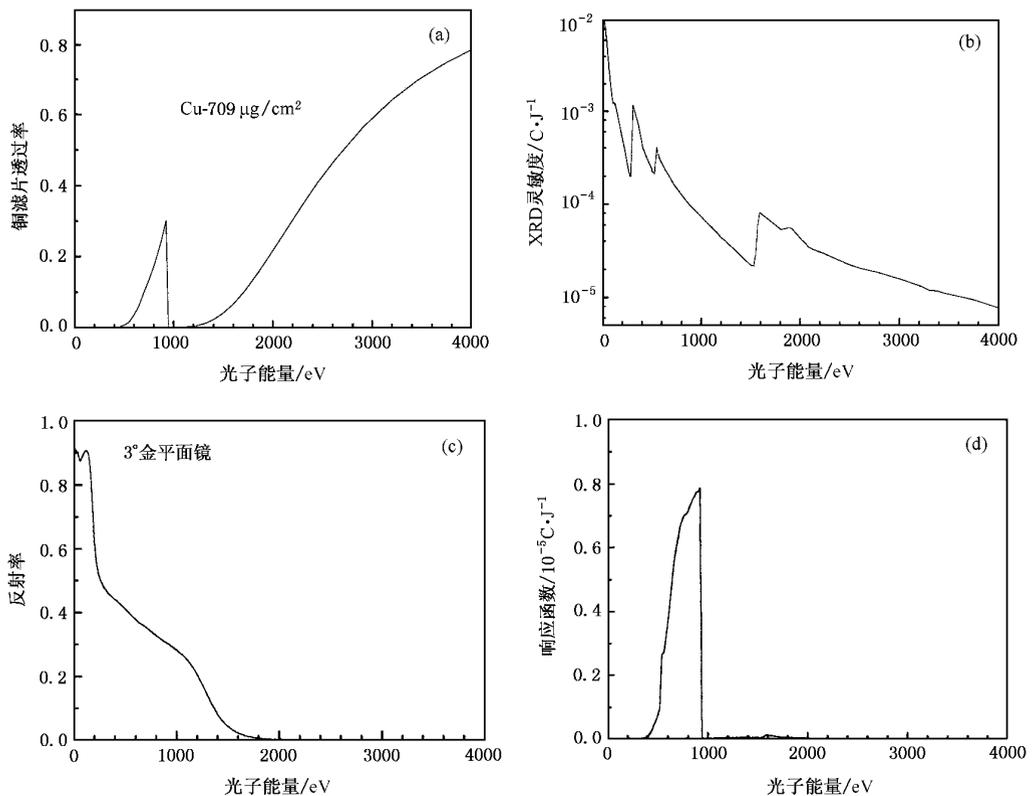


图2 铜探测道加 $3^\circ\text{Au}$ 平面镜后的能量响应曲线 (a)铜滤片透过率曲线 (b)铝阳极 XRD 灵敏度曲线 (c) $3^\circ\text{Au}$ 平面镜反射率曲线 (d)铜探测道系统总响应函数

$$\theta_c = \sqrt{\frac{n_e e^2 \lambda^2}{\pi m_e c^2}}, \quad (2)$$

式中  $n_e$  为介质电子密度,  $e$  为电子电荷,  $\lambda$  为 x 射线波长,  $m_e$  为电子质量,  $c$  为光子速度. 由 (2) 式可知, 当反射镜材料确定后, 对于特定波长的入射光, 必定存在一个相应的临界角. 当入射光波长大于这个特定波长时, 入射光被界面反射; 当入射光波长小于这个特定波长时, 只有极少部分产生反射, 大部分光产生折射. 对于确定材料的平面镜, 当入射光的入射角确定后, 特定波长  $\lambda$  可表示为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta_c^2 \pi m_e c^2}{n_e e^2}}. \quad (3)$$

此时, 这个特定波长  $\lambda$  也可称为平面镜的截止波长. 利用掠入射平面反射镜对软 x 射线的这种反射和截止现象, 作为软 x 射线的色散元件, 与滤波法结合构成软 x 射线能谱仪新的响应函数

$$F(E) = \tau(E)R(E)S(E), \quad (4)$$

式中  $R(E)$  为平面镜的反射率曲线. 谱仪新的响应函数见图 2. 图 2 为 Cu-XRD 探测道加  $3^\circ\text{Au}$  平面反射镜后的能量响应曲线. 由此可见, 新谱仪采用不同材料、取不同掠射角平面镜作色散元件<sup>[4]</sup>, 可消除不同探测道高能尾部贡献, 从而提高了软 x 射线能谱测量精度.

### 3. 实验条件

同步辐射 (SR) 软 x 射线源具有其他光源无法比拟的优点, 如高强度、准直性、小发散角、高稳定性和脉冲时间特性等等<sup>[5,6]</sup>. 因此 SR 软 x 射线源已成为软 x 射线探测元器件能量响应曲线标定不可替代的光源之一. 实验利用北京同步辐射装置 (BSRF) 3W1B 束线及其反射率计靶室, 在专用光运行模式下, 束流强度为 40—120 mA, 贮存环电子能量 2 GeV, 单色光可用能区为 50—1500 eV. 标定过程用高灵敏度无死层的硅光二极管代替 x 射线二极管作探测器, 使输出信号提高 2—3 个数量级, 使可标定能区从 150—270 eV 拓展为 50—1500 eV. 对 C, Si, Ni 和 Au 等材料平面镜在不同掠射角下做了完整的反射率标定曲线. 标定装置见图 3.

### 4. 标定结果

平面镜装置配置的探测器是 XRD, 这是一种灵

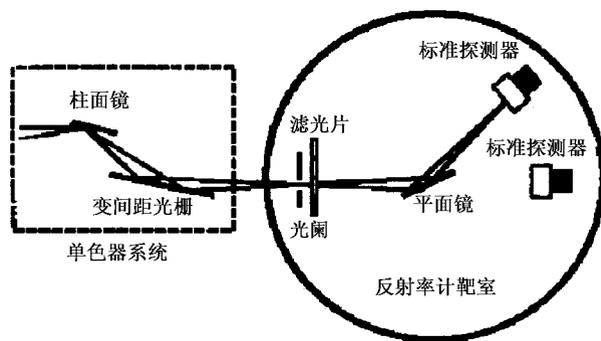


图 3 平面镜标定装置示意图

敏度偏低的软 x 射线探测器, 用它作平面镜反射率标定探测器, 在较大能区无法获得具有一定信噪比的信号. 为了获得平面镜反射率完整的标定曲线, 我们对平面镜装置标定进行了改进. 平面镜脱离装置直接置于反射率计靶室, 用一个架子连接到样品台上, 用无死层硅光二极管 (AXUV-100)<sup>[7]</sup> 代替 XRD 作平面镜的探测器, 它的量子效率比 XRD 高 2—3 个数量级, 从而使标定能区从 150—270 eV 拓展为 50—1500 eV, 获得较好的平面镜标定数据. 图 4 给出四种材料平面镜在不同掠射角下的反射率标定曲线.

### 5. 讨 论

由图 4 可见, 软 x 射线平面镜的反射率与掠射角关系密切. 不管那种材料平面镜, 其反射率均随掠射角增大而减小, 在固定能量的条件下, 平面镜的反射率是掠射角的单调函数 (图 5). 由于标定方法改进, 平面镜反射率标定时, 信噪比大大提高. 这不仅拓展了标定能区, 获得了较好的平面镜反射率标定数据, 也极大地提高了平面镜反射率标定值的可信度. 以新的  $5^\circ$  碳平面镜反射率标定曲线为例 (见图 6), 与  $5^\circ$  碳平面镜计算值比较, 基本相符.

新的  $3^\circ$  金平面镜反射率标定结果略低于计算值. 分析其原因, 可能是表面加工精度还不够高. 金平面镜加工精度标称粗糙度为 1 nm, 不同粗糙度下的计算值比较 (图 7) 可见, 金平面镜表面粗糙度约在 2—3 nm 之间.

平面镜使用一段时间后, 表面玷污会严重影响平面镜的反射率, 以  $5^\circ$  镍镜反射率标定结果为例, 其截止能量并不像理论计算那么高.  $5^\circ$  镍镜的计算结果, 其截止能量约在 550 eV 左右. 由多块旧的镍

镜反射率标定结果看<sup>[8]</sup>, 标定值约在 250—350 eV 之间. 若把 5°镍镜的标定值与 5°碳镜的计算值比较(图 8), 发现它们极其相似. 这表明镍镜表面附有碳层, 镜面在碳的 K 吸收边能量附近大量吸收 x 射线, 造成反射光严重下降. 碳层来源于真空油汽的蒸发, 油

汽附在镍镜表面, 采取酒精类常规清洗方法很难将附着在镜面上的油汽完全去除. 特别是平面镜长期在真空中使用, 已形成厚厚的油汽玷污膜, 更难清洗.

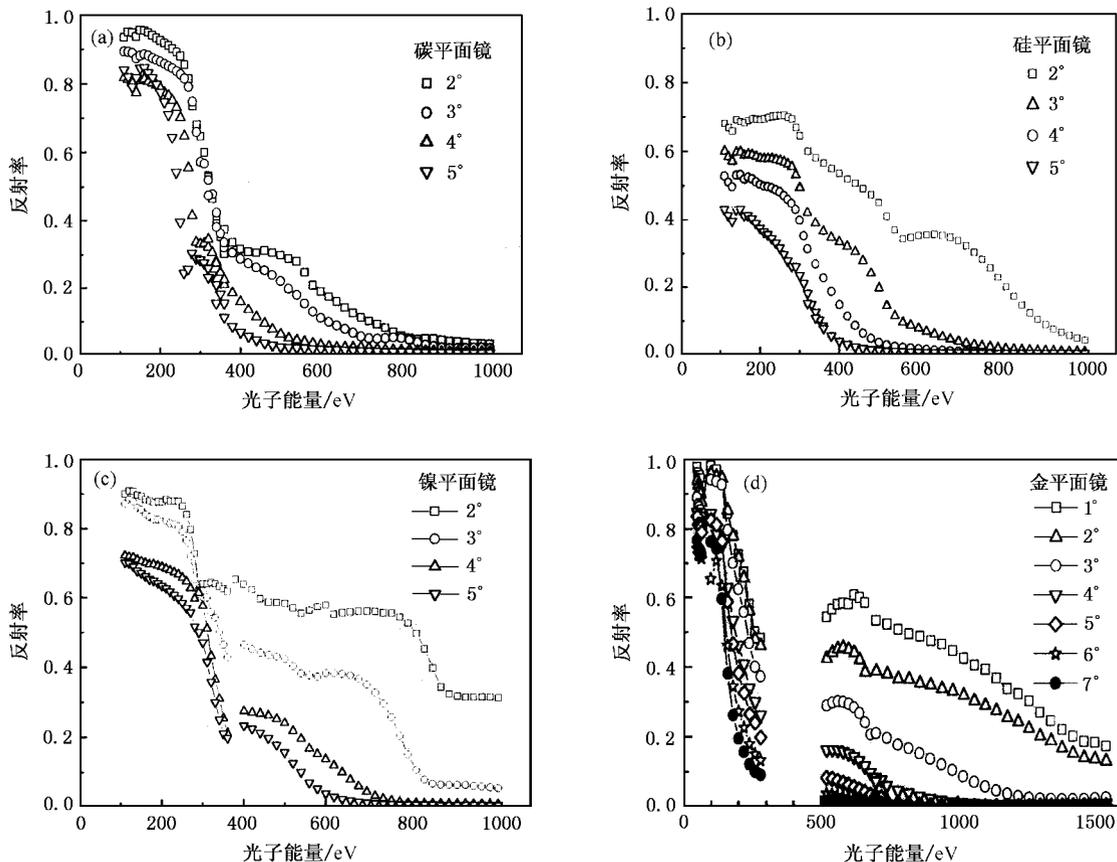


图 4 四种材料平面镜在不同掠射角下的反射率标定曲线 (a) 2°—5°碳平面镜 (b) 2°—5°硅平面镜 (c) 2°—5°镍平面镜, (d) 1°—7°金平面镜

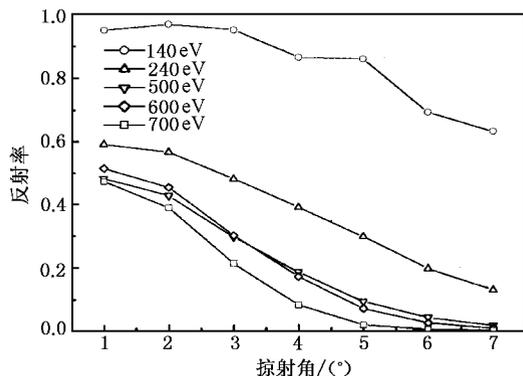


图 5 金平面镜反射率随角度的变化曲线

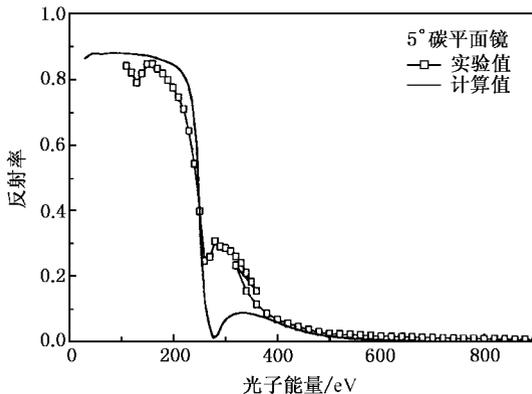


图 6 5°碳镜反射率标定值与理论计算值比较

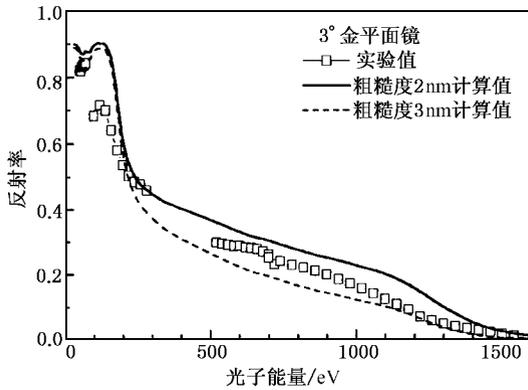


图7 3°金平面镜反射率标定值与不同粗糙度下的计算值比较

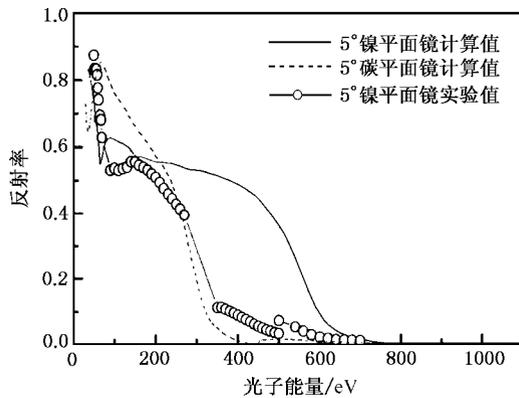


图8 5°镍平面镜反射率标定值、计算值与5°碳镜计算值比较

## 6. 结 论

平面镜反射率与掠射角关系密切,不管那种材料平面镜,其反射率均为掠射角的单调函数,随掠射角增大而减小.由于标定方法改进,平面镜标定时信噪比大大提高,不仅拓展了标定能区,获得了较好的平面镜反射率标定数据,也极大地提高了平面镜反射率标定值的可信度.以新的平面镜反射率标定曲线为例,与计算值基本相符.新的3°金平面镜反射率标定结果略低于计算值.原因可能是镜表面加工精度不够,金平面镜镜面加工精度标称粗糙度为1 nm,通过与不同粗糙度下的计算值比较(见图7)可知,金平面镜表面粗糙度约在2—3nm之间.

平面镜长期在真空中使用,真空油气玷污是不可避免的.油气玷污镜面,将严重影响平面镜的反射率.因此,为了保证平面镜在测量中的置信度,需定期对平面镜进行表明清洗和反射率标定.

在BSRF-3W1B束线上的平面镜反射率标定实验中,受到中国科学院高能物理研究所的各级领导及加速器运行人员的关心、支持和帮助,在此表示感谢.

- [ 1 ] Sun K X ,Yang J G ,Zheng Z J 1990 *High Power Laser and Particle Beams* **2** 16( in Chinese ) 孙可煦、杨建国、郑志坚 1990 强激光与粒子束 **2** 16 ]
- [ 2 ] Kornblum H N ,Slivinsky V W 1978 *Rev. Sci. Instrum.* **49** 1204
- [ 3 ] Xu S S 1964 *X-ray for Metals* ( Shanghai :Shanghai Science and Technology Press )p13( in Chinese ) 许顺生 1964 金属 X 射线学 ( 上海 :上海科技出版社 )第 13 页 ]
- [ 4 ] Sun K X ,Ma H L ,Xu H P *et al* 1993 *Acta Optica Sinica* **13** 934( in Chinese ) 孙可煦、马洪良、徐和平等 1993 光学学报 **13** 934 ]
- [ 5 ] Cui M Q ,Liu L B ,Xu W X *et al* 1992 *High Energy Physics and Nu-*

*clear Physics* **16** 673( in Chinese ) 崔明启、刘丽冰、徐文轩等 1992 高能物理与核物理 **16** 673 ]

- [ 6 ] Sun K X ,Yi R Q ,Yang J M *et al* 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 650( in Chinese ) 孙可煦、易荣清、杨家敏等 1997 物理学报 **46** 650 ]
- [ 7 ] Cui C W ,Cui M Q ,Zhu P P *et al* 1998 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **22** 180( in Chinese ) 崔聪悟、崔明启、朱佩平等 1998 高能物理与核物理 **22** 180 ]
- [ 8 ] Sun K X ,Yi R Q ,Huang T X *et al* 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 379 ( in Chinese ) 孙可煦、易荣清、黄天 等 2002 光学学报 **22** 379 ]

# The reflectance calibration of soft x-ray planar mirror with different grazing angle<sup>\*</sup>

Sun Ke-Xu Yi Rong-Qing Yang Guo-Hong Jiang Shao-En Cui Yan-Li Liu Shen-Ye Ding Yong-Kun

( State Key Laboratory of Laser Fusion ,Laser Fusion Research Center ,China Academy of Engineering Physics ,Mianyang 621900 ,China )

Cui Ming-Qi Zhu Pei-Ping Zhao Yi-Dong Zhu Jie Zheng Lei

( Synchrotron Radiation Laboratory ,Institute of High Energy Physics ,Chinese Academy Sciences ,Beijing 100039 ,China )

Zhang Jing-He

( Department of Fine Mechanical Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001 ,China )

( Received 17 February 2003 ; revised manuscript received 7 August 2003 )

## Abstract

The reflectivity of grazing soft x-ray planar mirror is studied. The Beijing Synchrotron Radiation Facility-3W1B beam line with beam current 40—120 mA ,the storage ring electron energy 2 GeV ,photon energy 50—1500 eV are used. We have improved the calibration method. The x-ray diode detectors of planar mirror facility are replaced by AXUV-100. Therefore 2 to 3 orders of magnitude for the ratio of signal to noise can be increased and the calibration region from ( 150—270 eV )to ( 50—1500 eV )is expanded. The reflectivity calibration curves for C ,Si ,Ni and Au planar mirror in different grazing angles are given. Finally ,the values obtained in experiment and calculation are compared and analyzed.

**Keywords** : synchrotron radiation , planar mirror , reflectivity , calibration

**PACC** : 4272 , 4278 , 0760H , 0620H

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China( Grant No. 863-804-3 ).