

# 同步辐射标定平面镜反射率不确定度分析方法研究\*

陈伯伦<sup>†</sup> 杨正华 曹柱荣 董建军 侯立飞 崔延莉 江少恩 易荣清 李三伟 刘慎业 杨家敏

(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)

(2009 年 11 月 12 日收到; 2009 年 12 月 18 日收到修改稿)

为了提高多通道软 X 射线能谱仪的测量精度, 2009 年在北京同步辐射 (BSRF) 软 X 束线源上对多种材料的掠入射平面镜的反射率进行了标定. 在标定实验的基础上, 对光源的单色性、高次谐波以及源强稳定性、探测器响应一致性和数据采集统计误差等多项不确定因素进行了评估, 给出了反射率的修正方法和相应的不确定度分析结果.

**关键词:** 同步辐射, 平面镜反射率, 标定, 不确定度

**PACC:** 4272, 5270L, 0620D, 0760H

## 1. 引 言

在多通道软 X 射线能谱仪<sup>[1-3]</sup>中, 每个通道一般由 X 射线衍射仪 (XRD) 和选通滤片组成, 在低能通道通常会采用不同材料的平面镜作为低通滤波的色散元件使用, 抑制高能拖尾<sup>[4,5]</sup>. 该设备广泛应用于高能密度物理、惯性约束聚变 (ICF) 及 Z-Pinch 等激光等离子体发射软 X 射线的能谱测量<sup>[6]</sup>. 多通道软 X 射线能谱仪每个探测通道能量响应函数为

$$R(E) = \eta(E)R(E)S(E), \quad (1)$$

其中,  $R(E)$  是平面镜反射率,  $\eta(E)$  是滤片透过率,  $S(E)$  是 XRD 的能量响应函数. 为了获得软 X 射线能谱仪各通道的能量响应函数, 需要分别标定滤片透过率、XRD 响应函数以及平面镜反射率曲线<sup>[7-9]</sup>.

软 X 射线入射到平面镜上, 一部分被折射吸收, 另一部分被反射. 在理想平面反射情况下, 可以通过经典的 Fresnel 关系获得反射效率. 但实际上镜面都存在一定的粗糙度, 这会增加漫反射的效果, 减小镜面反射方向的反射强度<sup>[10,11]</sup>. 平面镜镜面的粗糙度为  $\sigma$  时, 平面镜反射率为

$$R_{\text{rough}}(q_z) = R_{\text{flat}}(q_z)e^{-q_z \cdot 0.9q_z \cdot 1\sigma^2}, \quad (2)$$

式中,  $q_{z,0}$  和  $q_{z,1}$  分别为空气和物质中的波矢变换,  $R_{\text{flat}}$  是理想平面的反射率<sup>[12-15]</sup>,

$$R_{\text{flat}} = \left| \frac{(q_z - \sqrt{q_z^2 - q_c^2 - 32i\pi^2\beta/\lambda^2})}{q_z + \sqrt{q_z^2 - q_c^2 - 32i\pi^2\beta/\lambda^2}} \right|^2, \quad (3)$$

其中,  $q_z = 4\pi\sin\theta/\lambda$ ,  $q_c = 4\pi\theta_c/\lambda$ ,  $\lambda$  是入射 X 射线波长,  $\theta$  是入射角,  $\theta_c$  是临界角.  $\beta = \lambda\mu/(4\pi)$ ,  $\mu$  是材料的吸收系数. 可以看到, 平面镜的反射率和镜面材料、X 射线入射角度、入射 X 射线波长以及镜面粗糙度有关. 实验使用的平面镜还会受到真空油污的污染, 对平面镜的反射率也会产生影响<sup>[16]</sup>. 因此, 平面镜真实的反射率与理论模拟计算结果存在很大偏差, 需要在每次实验前进行精密标定<sup>[16-19]</sup>. 本文在北京同步辐射软 X 束线源标定掠入射平面镜反射率实验的基础上, 分析标定中存在的各种不确定因素的影响, 并给出反射率修正方法和不确定度分析.

## 2. 实验原理

同步辐射软 X 束线源作为软 X 射线探测元器件的能量响应曲线标定光源, 有着其他光源无法比拟的优点, 如高强度、准直性、小发散角、高稳定性以及脉冲时间特性等<sup>[20-23]</sup>. 平面镜的反射率通常定义为在角度为  $\theta$  时, 平面镜反射后的光强与入射光强的比值为

$$T_\theta(E) = I_\theta(E)/I_0(E), \quad (4)$$

其中,  $I_\theta(E)$  是反射后光强,  $I_0$  是入射光束的强度. 在标定实验中, 将固定角度的掠入射平面镜安装在

\* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: blchen@mail.ustc.edu.cn

靶室上,通过两个硅光二极管分别测量每个能点入射 X 射线的强度  $I_0$  和经过平面镜反射后的强度  $I(E)$ . 在以前的标定实验中,通过两个硅光二极管电流读数的比值作为平面镜的标定反射率,即

$$T_{\text{exp}}(E) = i_1/i_0. \quad (5)$$

由于两个探测器的能量响应存在差异,标定光源存在能量分辨率、高次谐波影响以及强度衰减,这种处理方法得到的反射率标定曲线存在较大不确定度. 下面对各种影响因素进行评估,给出反射率的修正方法以及引入的不确定度.

### 3. 系统误差分析

#### 3.1. 光源单色性

光源的单色性是影响平面镜反射率标定结果的一个重要因素. 光源单色性差,即能量分辨率差,在标称能量值时,实际入射 X 射线能量在标称值附

近一定的带宽范围内,获得的标定值是能量带宽内的反射率加权平均值. 对于平面镜的标定,尤其在吸收边附近,反射率变化很快,光源差的能量分辨率会导致吸收边被延展,从而增加了反射率标定结果在吸收边附近的不确定度. 采用理论计算反射率曲线,模拟在 1 和 0.1 eV 能量分辨下,3°镍(Ni)和 3°钛(Ti)平面镜反射率的极大误差估计,如图 1 所示. 可以看出,在吸收边附近,相对不确定度比较大,在关心区域,光源 1 eV 能量分辨带来的误差小于 30%,而 0.1 eV 时小于 3%.

北京同步辐射新建的软 X 光束线 4W7B 在光源单色性上有很大改善,能量分辨率小于 0.1%. 图 2 给出 4°Ti 平面镜反射率的标定曲线,曲线存在明显的 C 吸收边和 O 吸收边,显示了镜子受到碳污染及氧化的状况. 往年光源单色性比较差的条件下,标定结果无法给出吸收边附近的细致结构. 在现在光源能量分辨下,引入的不确定度小于 0.1%,对平面镜反射率标定结果的影响非常小.

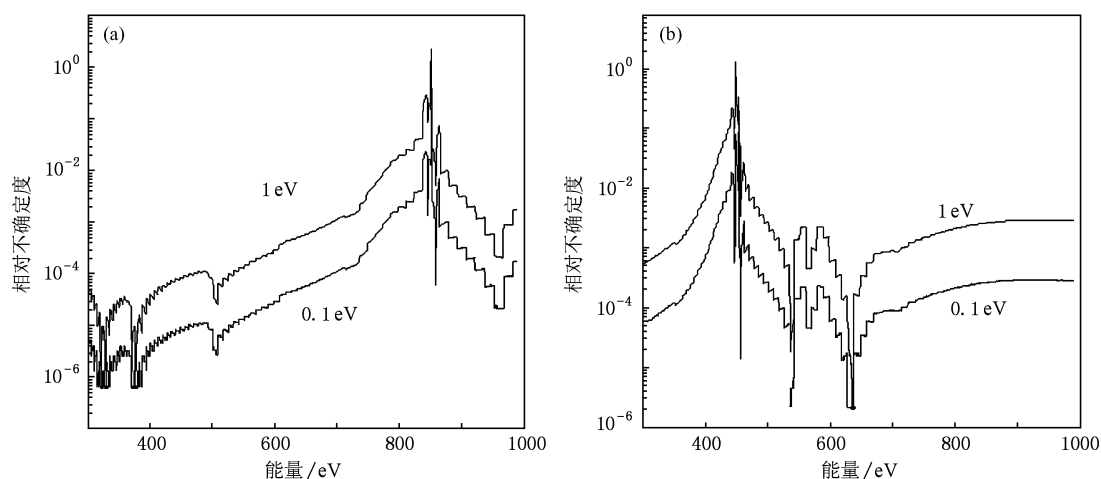


图 1 能量分辨率为 1 和 0.1 eV 时,标定反射率的不确定度 (a)3°Ni 平面镜, (b)3°Ti 平面镜

#### 3.2. 高次谐波

高次谐波是衍射元件的伴生产物. 由于平面镜的反射率随入射 X 射线能量的增高而降低,高次谐波的存在,会使反射率标定结果较真实值偏低. 假设在 100—800 eV 之间存在二次谐波,谐波份额占 10%,模拟存在谐波时标定的 3° Ni 平面镜的反射率曲线,并与无谐波时比较,如图 3 所示,在 300—800 eV 间,实验曲线明显比无谐波时低,最大偏差为 9%.

利用衍射光栅精确测量每个能点高次谐波所占的份额,可以对实验测量值进行修正. 高次谐波所占份额  $a = I_0(E')/I_0(E)$ ,  $I_0(E)$  为 X 射线强度. 平面镜反射率实验测量值为

$$T_{\text{exp}}(E) = i(E)/i_0(E) = (I(E) + I(E'))/(I_0(E) + I_0(E')) = (I(E)/I_0(E) + aI(E')/I_0(E'))/(1 + a), \quad (6)$$

其中  $I(E)$  为平面镜反射后 X 射线强度,  $I_0(E)$  为 X 射线源强. 将(4)式代入(6)式,则

$$T_{\text{exp}}(E) = (T(E) + aT(E'))/(1 + a). \quad (7)$$

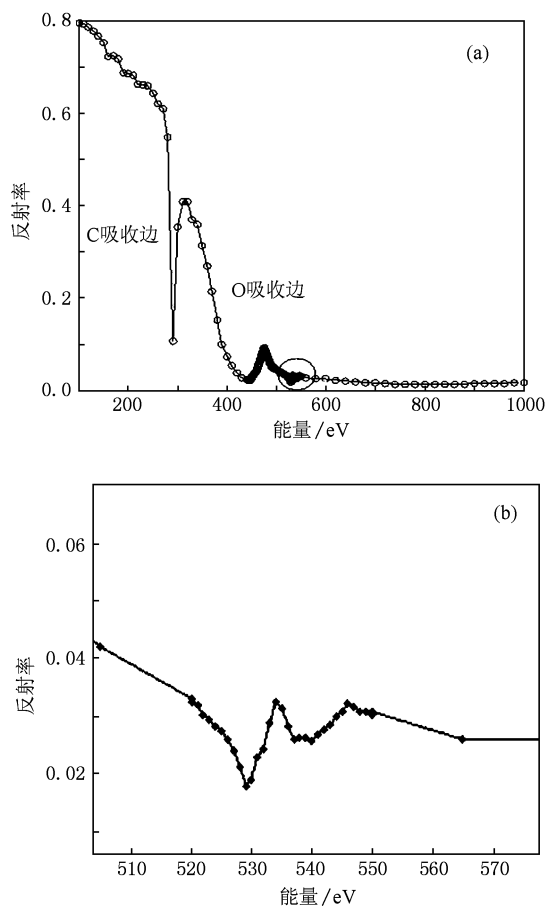


图2  $4^\circ\text{Ti}$  平面镜反射率标定曲线 (a) 标定曲线, (b) 为圆圈区域的放大图

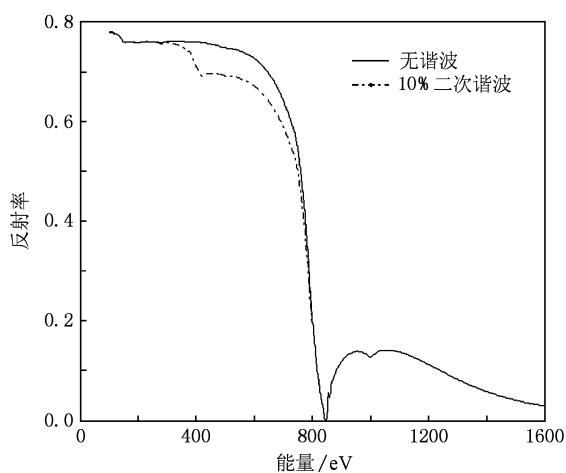


图3 100—800 eV 存在 10% 谐波时, 对反射率标定的影响

对高次谐波进行修正后获得平面镜的反射率为

$$T_{\text{th}}(E) = (1 + a)T_{\text{exp}} - aT(E'). \quad (8)$$

实验中, 需要采用各种方法, 对高次谐波进行抑制. 实际上, 高次谐波份额的精确测量存在很大

困难. 在高次谐波抑制较好的情况下, 可以通过给出每个能点高次谐波所占份额的最大估计值, 利用 (8) 式评估高次谐波对反射率实验测量值引入的不确定度

$$\Delta T(E) = a_{\text{max}}(T_{\text{exp}}(E) - T(E')). \quad (9)$$

在 2009 年北京同步辐射掠入射平面镜反射率标定实验中, 高次谐波在 350—400 eV 区间影响最大, 带入的不确定度小于 2.5%.

### 3.3. 源强稳定性

在平面镜反射率标定过程中, 同步辐射的光强随时间衰减, 因此需要对光源强度变化进行修正. 在北京同步辐射 4W7B 束线上, 束线前端放置有铜片入射光阑, 通过测量铜片上的电流强度可以实时监测源强. 但是电流强度非常微弱, 数据统计误差很大, 尤其在光强比较弱的能段, 电流强度读数低于探测器的灵敏度. 同时 X 射线空间分布的不均匀性, 也给源强监测带来误差. 因此实时源强监测系统需要进一步改进. 在同步辐射光源中, 完成电子注入后, 出射 X 射线光强和储存环内电子束流强度近似成正比关系, 因此可以通过电子束流强度变化近似得到 X 射线源强的变化. 图 4 为进行束流修正前后的反射率比较, 能段扫描所用时间越长, 修正越明显. 在每个分段能点, 无修正时存在明显跳变, 这主要是由于束流强度的衰减引起的. 进行束流强度修正以后, 跳变明显变小, 差异小于能点数据采集的误差.

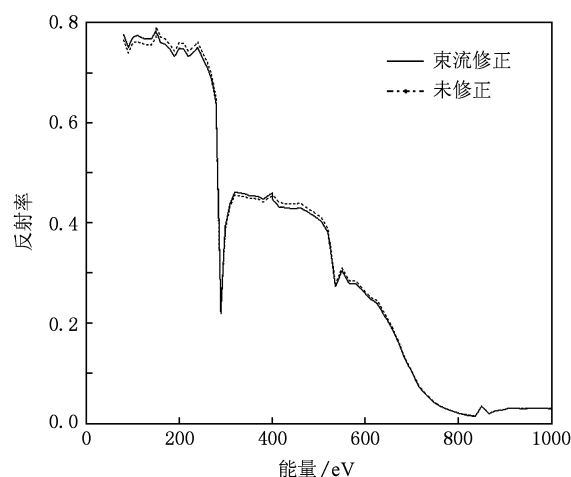


图4 电子束流强度修正

实验中采用分能段扫描, 减小探测器  $D_1$  和  $D_2$  测量的时间间隔. 在较短测量时间内, 束流强度变

化可以近似认为是线性衰减的. 对每个能点进行源强修正  $\chi(E) = \beta_1/\beta_0$ ,  $\beta$  为扫描能点对应的电子束流值, 修正后的反射率为

$$T_{s1}(E) = (i(E)/\beta_1)/(i_0(E)/\beta_0) = T_{exp}(E)/\chi(E). \quad (10)$$

采用极大误差估计, 取  $\Delta\beta = \beta_{begin} - \beta_{finish}$ , 束流强度修正引入的不确定度为

$$\Delta\chi^2 = (\Delta\beta/\beta_0)^2 + (\beta_1/\beta_0^2 \cdot \Delta\beta)^2. \quad (11)$$

图 5 给出  $4^\circ\text{Ni}$  平面镜进行束流强度修正以后的反射率曲线以及不确定度. 束流修正引入的不确定度小于 0.32%.

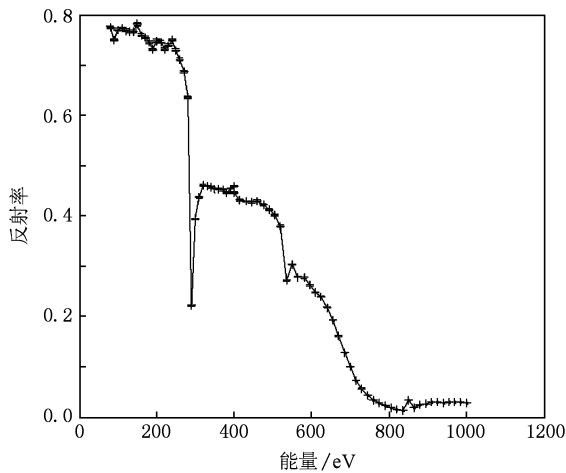


图 5  $4^\circ\text{Ni}$  平面镜束流修正后的反射率标定曲线

### 3.4. 探测器响应一致性

平面镜反射率标定实验中, 采用两个美国 IRD 公司生产的无死层硅光二极管 (AXUV-100 型) 分别测量入射和反射后 X 射线强度, 信号引出真空室后再利用美国 Keithley 公司的 6517A 型弱电流计记录. 电流计读数和光强的关系为  $i = SI$ ,  $S$  是硅光二极管的响应函数. 两个探测器的响应函数不一致, 会给标定结果引入误差. 图 6 给出考虑了响应一致性与没有修正结果的比较, 在中低能段, 差别可以达到 10%.

考虑两个探测器的能量响应一致性  $\eta(E) = S_1/S_0$ , 实验标定反射率为

$$T_{exp}(E) = i(E)/i_0(E) = (I(E) \cdot S_1)/(I_0(E) \cdot S_0) = \eta(E) \cdot I(E)/I_0(E). \quad (12)$$

因此进行探测器响应一致性修正后的平面镜的反射率为

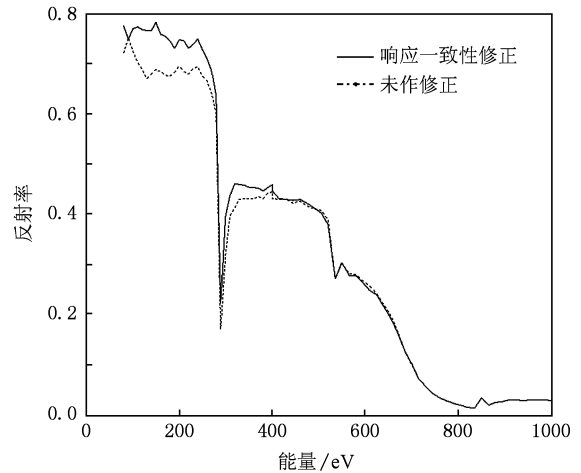


图 6 探测器响应一致性修正

$$T_{xy}(E) = T_{exp}(E)/\eta(E). \quad (13)$$

实验中采用两个探测器分别直接测量源强,  $\eta(E) = S_1/S_0 = i_1/i_0$ . 响应一致性的测量不确定度同样需要考虑源强变化的影响, 考虑数据采集统计误差和两个探测器  $D_1, D_2$  的 B 类不确定度

$$\Delta\eta^2 = ((\Delta i_1/i_2)^2 + (i_1/i_2^2 \cdot \Delta i_2)^2) + (\Delta D_1/3)^2 + (\Delta D_2/3)^2. \quad (14)$$

图 7 给出实验测量的两个探测器的响应一致性曲线. 在低能段, 两个探测器的响应差别较大, 高能段一致性较好, 响应一致性不确定度小于 7%. 响应一致性对反射率标定结果影响较大, 由于存在束流强度变化和统计误差的影响, 因此需要对两个探测器的一致性进行多次测量, 降低统计误差, 从而对反射率给出很好的修正.

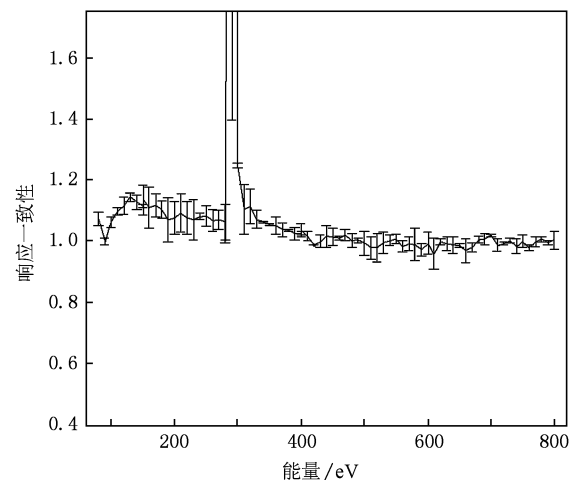


图 7 两个探测器的响应一致性

#### 4. 统计误差分析

由于弱电流计进行数据采集时,包含噪声影响、光源时间空间变化以及光斑位置变化等引起的数据采集误差,因此需要对同一平面镜进行多次测量,给出测量的统计误差.标定时,每个能点设置扫描采样取点次数为 10 次,给出平均值以及方差.由此引入的反射率的不确定度为

$$\Delta(i_2/i_1)^2 = (\Delta i_1/i_1)^2 + (i_1/i_2 \cdot \Delta i_2)^2. \quad (15)$$

$N$  次重复测量后,电流计读数引入数据采集的统计误差为

$$\Delta(i_2/i_1)^2 = \sum_n \Delta(i_2/i_1)_n^2 / N. \quad (16)$$

通过提高源强和增加测量次数,可以提高信噪比,降低数据采集的不确定度.在 2009 年标定实验中,

由于束线本身谐波抑制镜被 C 污染很严重,在 280—310 eV 区间,光源强度非常微弱,造成反射率实验测量结果在这个能段的统计误差非常大.而在其他能区,统计误差小于 3%.

#### 5. 反射率修正和标定结果

考虑以上分析的各种不确定因素的影响,对平面镜反射率进行修正.实验中测量到的反射率为

$$\begin{aligned} T_{\text{exp}}(E) &= i_2/i_1 \\ &= (I(E) + I(E')) / (I_0(E) \\ &\quad + I_0(E')) \cdot (1/(\eta \cdot \chi)). \quad (17) \end{aligned}$$

考虑探测器响应一致性  $\eta = S_1/S_2$ , 光源强度变化  $\chi = \beta_1/\beta_2$  以及高次谐波  $a = I_0(E')/I_0(E)$ , 修正后的平面镜反射率为

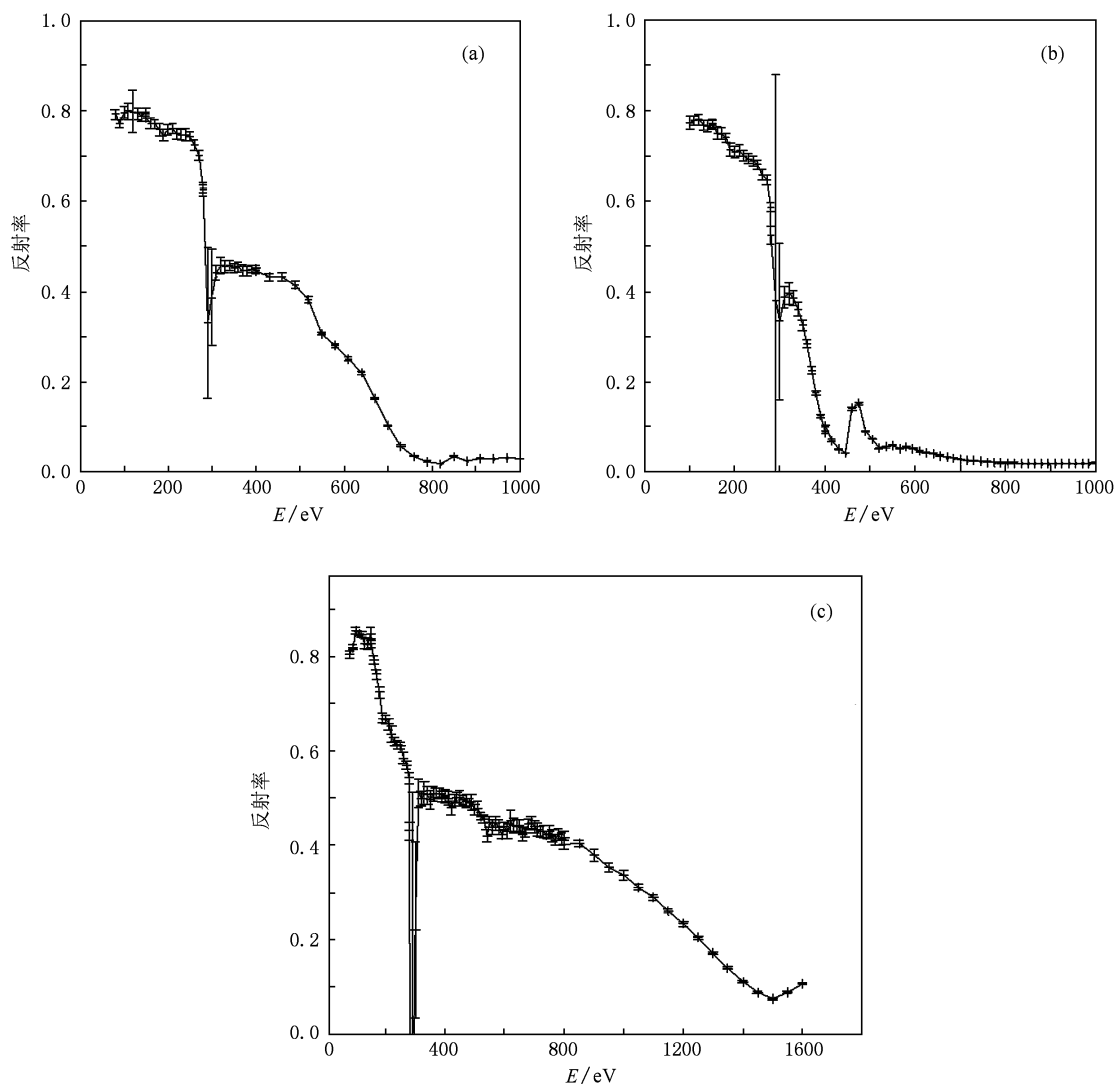


图 8 3 种材料平面镜的反射率标定曲线 (a)4°Ni, (b)4°Ti, (c)3°Au

$$T(E) = \eta\chi(1+a)i_2/i_1 - aT(E'), \quad (18)$$

相应的不确定度为

$$\begin{aligned} \Delta T(E)^2 &= (\chi(1+a)i_2/i_1)^2(\Delta\eta)^2 \\ &+ (\eta(1+a)i_2/i_1)^2(\Delta\chi)^2 \\ &+ (\eta\chi(1+a))^2(\Delta(i_2/i_1))^2 \\ &+ (\eta\chi i_2/i_1 - T(E'))^2(\Delta a)^2 \\ &+ a^2(\Delta T(E'))^2. \end{aligned}$$

图 8 给出 3 种材料 Ni, Ti 和 Au 平面镜的标定结果. 其中, 高次谐波引入的不确定度小于 2.5%, 响应一致性引入不确定度小于 7%, 束流强度修正引入不确定度小于 0.32%, 在 C 吸收边附近以外的能区数据统计误差小于 3%. 修正后平面镜反射率的不确定度小于 5%, 见表 1. 通过采取措施, 提高 C 吸收边附近的光强, 有可能在今后的标定实验中给出这个能区较高精度的平面镜反射率标定结果.

表 1 不同材料平面镜标定不确定度

	80—280 eV	320—540 eV	540—800 eV	800—1500 eV
3° Au	≤2.7%	≤4.1%	≤3.5%	≤2.5%
2° Au	≤2.3%	≤3.6%	≤4.1%	≤4.7%
4° Ni	≤2.4%	≤4.9%	≤4.6%	≤5.2%
3° Ni	≤2.3%	≤4.0%	≤3.5%	≤3.1%
4° Ti	≤1.5%	≤5.8%	≤3.4%	≤3.1%

## 6. 结 论

平面镜的精密标定对多通道软 X 光能谱议的测量精度有重要影响. 在 2009 北京同步辐射标定实验的基础上, 分析了各种因素对标定结果的影响. 通过光源条件的改善, 光源单色性和高次谐波的影响已经很小, 而探测器的响应一致性以及光源强度的变化对标定结果的影响较大. 分析以上因素, 得到修正后的平面镜反射率, 标定结果的不确定度小

于 5%. 通过提高源强, 降低信噪比, 可以进一步提高实验精度. 另外, 通过实验, 发现软 X 光束线本身、探测器以及平面镜都存在不同程度的真空油污的污染情况, 因此平面镜的使用、存放、清洁问题以及平面镜 C 污染状况评估需要进行深入的研究.

感谢中国科学院高能物理研究所在 BSRF-4B7B 束线上的平面镜反射率标定实验中的支持和帮助, 特别是束线站的赵屹东、郑雷、崔明启对标定工作给以热心的帮助和认真的指导.

- [1] Yang J M, Ding Y N, Yi R Q, Wang Y M, Zhang W H, Zheng Z J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1723 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、易荣清、王耀梅、张文海、郑志坚 2001 物理学报 **50** 1723]
- [2] Sun K X, Zheng Z J, Yang J G 1990 *High Power Laser Part. Beams* **2** 16 (in Chinese) [孙可煦、郑志坚、杨建国 1990 强激光与粒子束 **2** 16]
- [3] Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J, Wang Y M, Zhang W H, Zhang J Y, Liu J Y, San B, Gao S C, Ren Y L, Liu X Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1427 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、郑志坚、王耀梅、张文海、张继彦、刘进元、山冰、高盛琛、任有来、刘秀琴 2003 物理学报 **52** 1427]
- [4] Heinle R A, Tirsell K G 1979 *Laser Program Annual Report* Livermore, Calif. UCRL-50021-79 p5.5
- [5] Sun K X, Ma H L, Xu H P, Zhang Z J, Tang D Y, Cui Y L, Yi R Q, Hu J S, Zhang J H 1993 *Acta Opt. Sin.* **13** 934 (in Chinese) [孙可煦、马洪良、徐和平、郑志坚、唐道源、崔延莉、易容清、胡家升、张景和 1993 光学学报 **13** 934]
- [6] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y K, Liu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Pei W B, He X T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3255 (in Chinese) [李三伟、易荣涛、蒋小华、何小安、崔延莉、刘永刚、丁永坤、刘镇业、蓝可、李永升、吴畅书、古培俊、裴文兵、贺贤士 2009 物理学报 **58** 3255]
- [7] Sun K X, Yi R Q, Yang J M, Wang H B, Ma H L, Chen Z L, Huang T X, Cui Y L, Zheng Z J, Tang D Y, Ding Y K, Wen S H, Jiang W M, Zhao Y K, Cui M Q, Li G, Cui C W, Tang E S 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 650 (in Chinese) [孙可煦、易荣清、杨家敏、王红斌、马洪良、陈正林、黄天暄、崔延莉、郑志坚、唐道源、丁永坤、温树槐、江文勉、赵永宽、崔明启、黎刚、崔聪悟、唐鄂生 1997 物理学报 **46** 650]
- [8] Sun K X, Yi R Q, Huang T X, Cui Y L, Ding Y K, Yang J M, Zhang B H, Jiang S E, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Li G 2001 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **5** 448 (in Chinese) [孙可

- 煦、易荣清、黄天暉、崔延莉、丁永坤、杨家敏、张保汉、江少恩、崔明启、朱佩平、赵屹东、黎刚 2001 高能物理与核物理 **25** 448]
- [9] Sun K X, Yi R Q, Jiang S E, Yang J M, Huang T X, Cui Y L, Yang G H, Ding Y K, Liu S Y, Zhang B H, Wang H B, Wen S H, Zheng Z J, Jiang W M, Zhao Y K, Cui M Q 2004 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **28** 205 (in Chinese) [孙可煦、易荣清、江少恩、杨家敏、黄天暉、崔延莉、杨国洪、丁永坤、刘慎业、张保汉、王红斌、温树槐、郑志坚、江文勉、赵永宽、崔明启 2004 高能物理与核物理 **28** 205]
- [10] Sinha S K, Sinota E B, Garoff S, Stanley H B 1988 *Phys. Rev. B* **38** 2297
- [11] Parratt L G 1954 *Phys. Rev.* **95** 359
- [12] 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]
- [13] Hamley I W, Pedersen J S 1994 *J. Appl. Cryst.* **27** 29
- [14] Als-Nielsen J, McMorrow D 2001 *Elements of Modern X-Ray Physics* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd)
- [15] Gibaud A, Hazra S 2000 *Curr. Sci.* **78** 1467
- [16] Sun K X, Yi R Q, Huang T X, Yang J M, Jiang S E, Cui Y L, Ding Y K, Zhang B H, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Li G 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 379 (in Chinese) [孙可煦、易荣清、黄天暉、杨家敏、江少恩、崔延莉、丁永坤、张保汉、崔明启、朱佩平、赵屹东、黎刚 2002 光学学报 **22** 379]
- [17] Sun K X, Cui Y L, Yi R Q, Jiang S E, Huang T X, Yang J M, Ding Y K, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Li G, Zhang J H 2003 *Opt. Prec. Engng.* **11** 349 (in Chinese) [孙可煦、崔延莉、易荣清、江少恩、黄天暉、杨家敏、丁永坤、崔明启、朱佩平、赵屹东、黎刚、张景和 2003 光学精密工程 **11** 349]
- [18] Yi R Q, Sun K X, Yang G H, Liu S Y, Cui Y L, Zhu P P, Zhao Y D, Cui M Q 2004 *J. Atom. Mol. Phys.* **21** 149 (in Chinese) [易荣清、孙可煦、杨国洪、刘慎业、崔延莉、朱佩平、赵屹东、崔明启 2004 原子与分子物理学报 **21** 149]
- [19] Sun K X, Yi R Q, Yang G H, Jiang S E, Cui Y L, Liu S Y, Ding Y K, Cui M Q, Zhu P P, Zhao Y D, Zhu J, Zheng L, Zhang J H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1099 (in Chinese) [孙可煦、易荣清、杨国洪、江少恩、崔延莉、刘慎业、丁永坤、崔明启、朱佩平、赵屹东、朱杰、郑雷、张景和 2004 物理学报 **53** 1099]
- [20] Cui M Q, Liu L B, Xu W X, Wu J W, Wang P W, Yi F T, Gu Z M 1992 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **16** 673 (in Chinese) [崔明启、刘丽冰、徐文轩、吴坚武、王培玮、伊福廷、顾自明 1992 高能物理与核物理 **16** 673]
- [21] Cui M Q, Cui C W, Li G, Yi R Q, Sun K X, Yang J M, Wen S H 1997 *Nucl. Electron. Detec. Technol.* **4** 265 (in Chinese) [崔明启、崔聪悟、黎刚、易荣清、孙可煦、杨家敏、温树槐 1997 核电子学与探测技术 **4** 265]
- [22] Cui M Q, Cui C W, Zhao Y D, Zhu P P, Li G 1998 *Atom. Energy Sci. Technol.* **6** 492 (in Chinese) [崔明启、崔聪悟、赵屹东、朱佩平、黎刚 1998 原子能科学技术 **6** 492]
- [23] Cui M Q, Cui Y L, Dong J J, Du H B, Wei M X, Yang G H, Yi R Q, Zhao Y D, Zheng L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6287 (in Chinese) [崔明启、崔延莉、董建军、杜华冰、韦敏习、杨国洪、易荣清、赵屹东、郑雷 2006 物理学报 **55** 6287]

## Reflectivity uncertainty analysis of planar mirror calibration in BSRF\*

Chen Bo-Lun<sup>†</sup> Yang Zheng-Hua Cao Zhu-Rong Dong Jian-Jun Hou Li-Fei Cui Yan-Li

Jiang Shao-En Yi Rong-Qing Li San-Wei Liu Shen-Ye Yang Jia-Min

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

(Received 12 November 2009; revised manuscript received 18 December 2009)

### Abstract

A key diagnostic for absolute radiation flux and radiation temperature in hohlraum experiments is the Dante soft x-ray spectrometer in which grazing incidence x-ray mirrors are used to diminish the high energy response of the filters. The reflectivities of planar mirrors made of different materials were calibrated in BSRF in 2009. Considering both the influence of the source such as the spectra resolution, harmonic and the attenuation of the source intensity and the influence of the coherence of two detectors responses, we give the corrected mirror reflectivities and the uncertainty, including the statistical uncertainty of the experimental data.

**Keywords:** synchrotron radiation, reflectivity of planar mirror, calibration, uncertain analysis

**PACC:** 4272, 5270L, 0620D, 0760H

---

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China.

<sup>†</sup> E-mail: blchen@mail.ustc.edu.cn