

北京同步辐射装置 4B7B 软 X 射线标定束线的性能研究及应用

易荣清¹ 赵屹东² 王秋平³ 郑雷² 杨家敏¹ 何小安¹ 李朝光¹ 江少恩¹ 丁永坤¹ 崔明启²

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900
² 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; ³ 中国科技大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要 描述了在北京同步辐射装置(BSRF)4B7B软 X 射线上,通过多种方法进行高次谐波抑制,采用复合滤片消除高能区低能 X 射线等性能改进方法使光源的高次谐波含量小于 1%、能量分辨优于 3000,无杂散光。在 4B7B 光束线上开展了 X 射线探测器(XRD)灵敏度、平面镜反射率和滤片透射率的标定方法研究,XRD 灵敏度标定不确定度优于 3%,平面镜反射率标定不确定度小于 3.5%,滤片透射率标定不确定度优于 1%。

关键词 X 射线光学;同步辐射;标定;不确定度

中图分类号 TN247; O536 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1034002

Characteristic Study and Application of the Soft X-Ray Beam Line 4B7B on BSRF

Yi Rongqing¹ Zhao Yidong² Wang Qiuping³ Zheng Lei² Yang Jiamin¹
He Xiaoran¹ Li Chaoguang¹ Jiang Shaoen¹ Ding Yongkun¹ Cui Mingqi²

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

² Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

Abstract This subject improves light source capability of the soft X-ray beam line 4B7B on the Beijing synchrotron radiation facility (BSRF) by restraining the low energy X-ray in high energy range and the higher-harmonics wave in every energy point. This light source has harmonics wave less than 1%, energy resolution of more than 3000. Some researches on calibration of X-ray detector (XRD) sensitivity, mirror reflectivity, filter transmittance on the soft X-ray beam line 4B7B are performed. The results show that the uncertainty of XRD sensitivity is less than 3%, the uncertainty of mirror reflectivity is less than 3.5%, and the uncertainty of filter transmittance is less than 1%.

Key words X-ray optics; synchronous radiation; calibration; uncertainty

OCIS codes 340.7480; 340.6720; 350.5400; 350.2770

1 引言

在惯性约束聚变(激光、Z-Pinch)和其他高密度物理实验研究中,X 射线辐射的精密测量是核心内容之一,目前的实验诊断约 60%与 X 射线测量相关^[1-5]。为了达到校验相关数值模拟程序的目的,需要不断地提高实验数据的精度。精密标定是实验精密化的重要基础,而同步辐射光源为 X 射线探测元件的精密标定提供了一种可能的条件。另外,由于每一发靶的制靶和打靶都需要高额费用,尤其是神光 III 主机实验,因而要求实验诊断设备每一发都能够给出

精确的实验数据,提高每一发打靶的利用率。自 20 世纪 80 年代末至今,美国、德国、俄罗斯及日本等国均在各自的同步辐射装置^[6]上,建造了专门用于软 X 射线探测器性能研究的光束线^[7-10],美国东、西部共建了 7 条专用束线,可见其重要性。

要实现 X 射线探测系统的精密标定需要满足三个条件:1)要有一台好的光源,即强度高,能区宽且连续可调,能量分辨高、高次谐波少,光斑均匀等;2)需要一个可以溯源的 X 射线强度测量标准;3)需要一台好的标定装置,标定方法是需要通过标定装

收稿日期: 2014-05-05; 收到修改稿日期: 2014-06-25

作者简介: 易荣清(1964—),男,研究员,主要从事激光等离子体诊断和 X 射线计量学等方面的研究。

E-mail: yrqing@sina.com

置来实现的。过去在这三个方面都存在一定的不足。在光源方面,受碳沾污、光栅效率和经费的影响,光源强度低(10^8 counts/s)、能量分辨差(100)、高次谐波严重(50%)。在测量标准方面,引进的是美国标准计量局的标准,不确定度为17%。在标定方法方面,采用束流归一,存在较大的不确定度。所以,测量精度一直不高。

本文在北京同步辐射装置(BSRF)上首次采用固定/可变包含角变间距光栅单色器结构,配套深刻槽光栅、高次谐波抑制镜等创新技术,建立了4B7B软X射线标定束线,有效地解决了X射线光源高能量分辨本领、高光谱纯度和宽能谱扫描范围的难题,满足了不同用户(探测器标定和光谱学研究)对光源的需求。

2 软 X 射线束线的结构

软 X 射线标定束线建设有两个物理目标:1)满

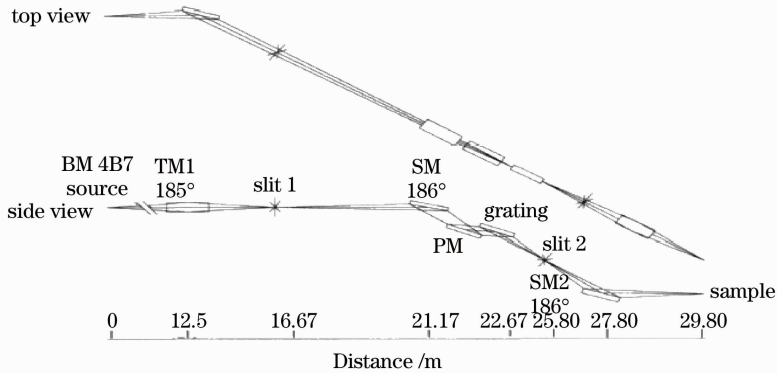


图 1 4B7B 软 X 射线束线光路原理图

Fig. 1 Optical diagram of soft X-ray beam line 4B7B

3 软 X 射线束线的性能研究

3.1 高次谐波的抑制

影响光源品质和标定精度的一个重要因素就是光源中含有高次谐波,而高次谐波是衍射元件的产

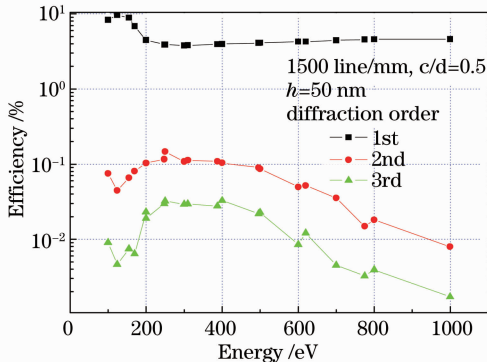


图 2 深刻槽光栅的衍射效率曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency curves of profundity slot grating

足惯性约束聚变(ICF)实验精密标定需要;2)满足光谱学研究的需要。精密标定要求能量范围大(50~1500 eV),光源强度大于 10^9 counts/s,能量分辨大于100,高次谐波小于1%,无杂散光。光谱学研究要求能量分辨高(大于3000),光斑小。所以需要解决能量分辨高与光谱范围宽之间的矛盾和高次谐波抑制的难题。为了解决高能量分辨与宽光谱范围之间的矛盾,采用了固定/可变包含角变间距光栅单色器扫描结构。光路结构如图1所示,整个光束线全长30 m,由前置聚焦镜(TM1)、入射狭缝(slit 1)、球面镜(SM)、平面镜(PM)、变间距平面光栅(VSPG)、出射狭缝(slit 2)和后聚焦镜(TM2)构成。这种结构的特点是可以运行在两种工作模式下:在高分辨模式下,采用固定包含角进行细扫;在宽谱模式下,采用变包含角扫描。

物之一,要抑制高次谐波是一件非常困难的系统性工作。采用了三个方法共同进行高次谐波的抑制。

3.1.1 采用深刻槽的反射光栅

光源采用深刻槽的Laminar反射光栅^[11-12],线空比为1:1,刻槽深为50 nm,中心线密度为1500 line/mm。通过PC Grate-4E(X射线与级紫外)通用光束线设计程序模拟计算,给出如图2所示的结果,从图中可以看出,光栅的二级衍射比一级衍射低2个量级。

3.1.2 采用变包含角的单色器结构

变包含角的单色器结构由平面镜和反射光栅组成,如图3所示,在某一能段,固定平面镜的角度,可以抑制一段能区的高次谐波,通过改变光栅的角度获得不同能量的单色光,这种方法对光栅的效率有一定影响,但是可以有效抑制高次谐波,通过理论计算得出对二次谐波的抑制能力为4倍,3次谐波的抑制能力超过8倍。

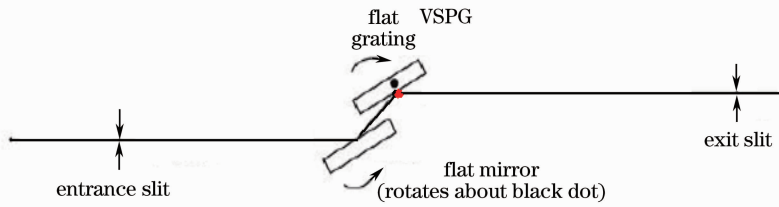


图 3 变包含角的单色器结构

Fig. 3 Homochromy system structure of varied contain angle

3.1.3 采用谐波抑制镜与滤片的组合

对于低于 150 eV 能段的高次谐波,采用上述两种方法是不能完全抑制高次谐波的,选择采用谐波抑制镜与滤片的组合,原理如图 4 所示,在不同的能区选择不同角度、不同材料的平面镜配相应材料和厚度的滤片来实现高次谐波的抑制。

3.2 高次谐波的测量

在北京同步辐射 4B7A 光束线上,利用透射光栅谱仪对不同情况下高次谐波的含量进行精密测量,实验设置如图 5 所示。

在没有使用外部高次谐波抑制的条件下,利用透射光栅谱仪对不同能量的光子进行测量,测量光谱结果如图 6 所示。从实验结果可以知道,采用深刻槽光栅,在大于 750 eV 的能区,高次谐波可以忽略不计,在低于 750 eV 的能区,高次谐波仍然对标

定精度影响很大。

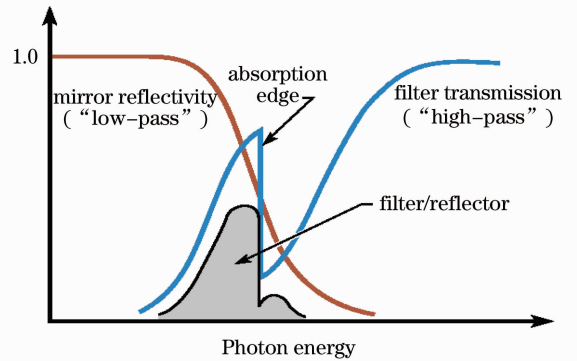


图 4 采用谐波抑制镜与滤片的组合抑制高次谐波的原理示意图

Fig. 4 Diagram of higher-harmonics wave suppressor and filter

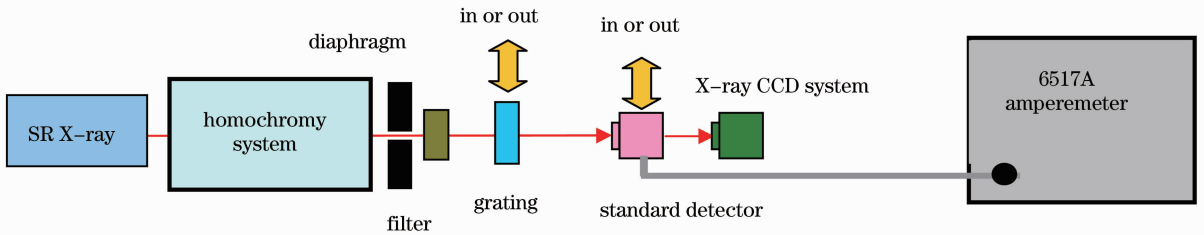


图 5 实验设置

Fig. 5 Experimental setup

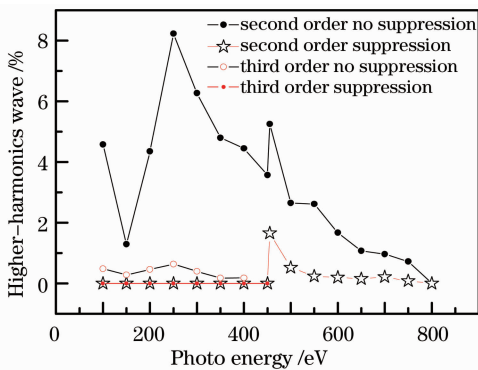


图 6 4B7B 光束线高次谐波测量结果

Fig. 6 Measurement result of beam line 4B7B higher-harmonics wave

为了进一步提高标定精度,在低于 750 eV 的能区需要采取高次谐波抑制镜和滤片等手段进行谐波抑制。图 7 给出了利用谐波镜在 100 eV 能区测量的透射光栅谱,通过比较,可以看出谐波的抑制是有效的。通过数据处理给出了采用三种方法共同进行谐波抑制的结果如图 6 所示,从图中可以看出,除 450 eV 能点外,其余能区的谐波均小于 1%。

3.3 高能区低能 X 射线抑制

在 Al 阴极 X 射线探测器(XRD)灵敏度的标定过程中,给出如图 8(a)所示的实验结果,从图中可以看出,在大于 850 eV 的能区标定结果不正确,说明光源中含有杂散光,在光路中设置了一个厚度为

0.2 μm 的 Al 滤片,结果有明显好转,通过滤片的透射率分析,说明光源中的杂散光是低能光。加一层滤片后标定结果仍然没有达到实验要求,说明杂散光是一个连续的低能 X 射线,所加的 Al 滤片在 L 边有较大的透射率的原因是在高能区平面镜和光栅都

是小角度入射,低能 X 射线全反射角小。为了解决这个问题,又增加一个 1 μm 的碳滤片组成复合滤片,利用复合滤片相互吸收的原理,达到消除低能连续 X 射线的目的。实验结果如图 8(b)所示,实验结果说明采用复合滤片有效消除了高能区低能 X 射线。

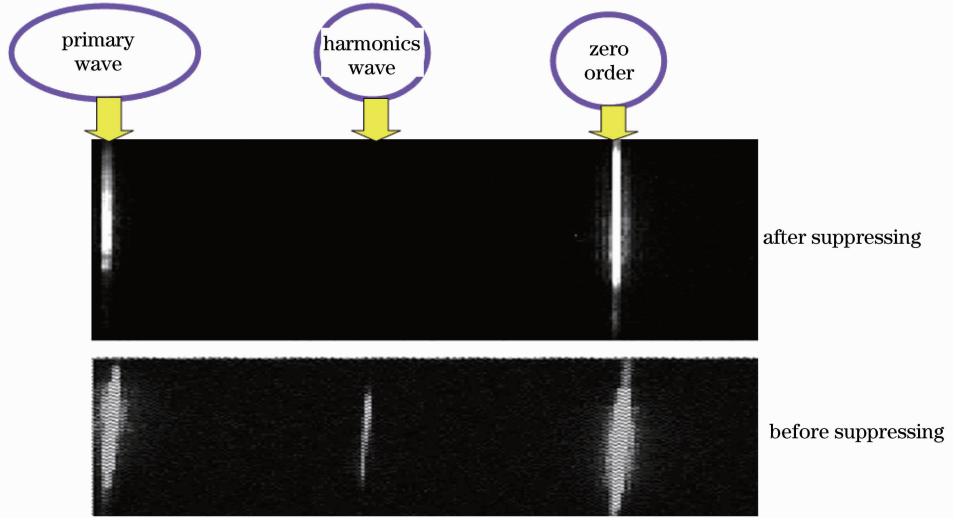


图 7 在 100 eV 能区的谐波抑制

Fig. 7 Harmonics wave suppression at 100 eV energy area

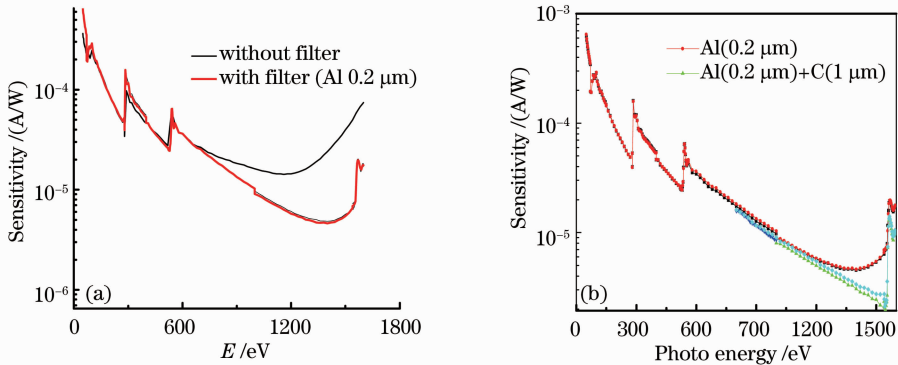


图 8 (a)无,(b)有复合滤片时 XRD 灵敏度标定结果

Fig. 8 Calibrated result of XRD sensitivity (a) without, (b) with complex filter

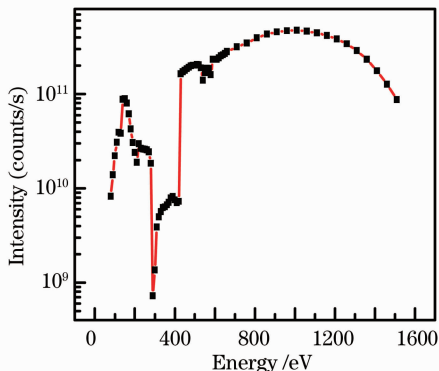


图 9 光源的强度谱

Fig. 9 Spectrum intensity of the light source

3.4 光源的强度改善和测量

影响光源强度的因素主要是储存环的束流和光路光学元件的碳沾污。通过臭氧氧化清除光路上的碳,光源强度有明显的改善。利用 AXUV-100G 标准探测器,测量出光源的谱强度,测量结果如图 9 所示,从测量结果可以看出,光源强度大于 10^9 counts/s,与清除之前相比提高了一个量级。

3.5 光源的能量分辨测量

光源的能量分辨是衡量光源好坏的重要指标之一,直接影响探测元件的标定精度。通过测量 Ar 气吸收边附近的精细结构,能够解读光源的能量分辨。测量结果如图 10 所示,给出了极限能量分辨率

的测量结果,结果为 Ar 的 L 边 $2p_{3/2} \rightarrow 3d_{5/2}$ 跃迁共振峰的实测结果,其本征宽度为 114 meV,拟合出仪器展宽约 37 meV,此处能量分辨率大于 6000,远远超出当初 3000 的设计水平。

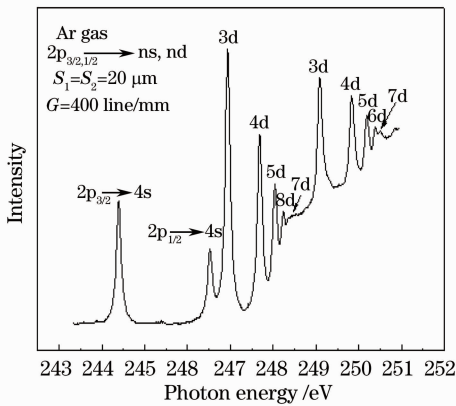


图 10 Ar 的 L 边跃迁系列共振峰的实测谱
Fig. 10 Measured spectrum of series formant at Ar-L side train

4 软 X 射线束线的应用

4.1 XRD 灵敏度标定

XRD 是辐射温度测量系统最重要的元件之一^[10],利用该元件将激光打靶产生的 X 射线信号转换成电信号,用示波器记录下来,然后通过测量到的电信号和探测器的灵敏度反映 X 射线的强度。所以探测器的灵敏度标定不确定度直接影响辐射温度的测量精度。

在 4B7B 软 X 射线标定束线上,利用德国联邦物理技术研究院(PTB)引进的 X 射线强度测量标准:探测器型号为 AXUV-100,不确定度小于 2%,开展了 Al 阴极 XRD 灵敏度的标定方法研究,灵敏度的标定结果如图 11 所示,可以看出,除了 Al 阴极材料的 k 边外,还存在 C 的 k 边和 O 的 k 边,说明

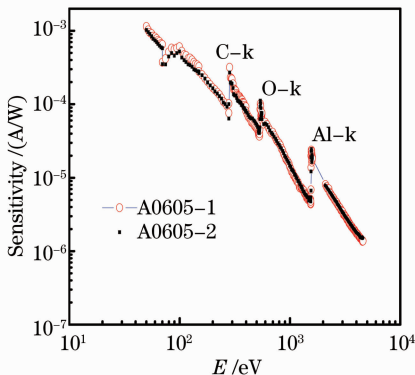


图 11 Al 阴极 XRD 灵敏度标定曲线
Fig. 11 Sensitivity curve of XRD(Al)

XRD 的光阴极可能存在沾污和氧化。从标定结果来看,两次标定结果完全重合,两段能区标定结果自洽,说明标定结果可靠。

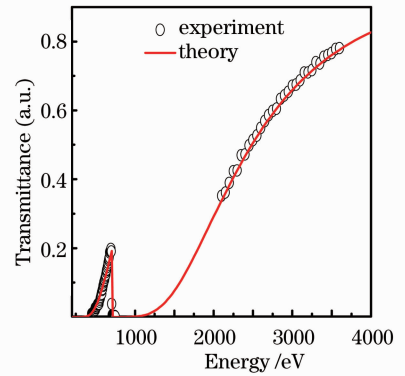


图 12 Fe 滤片透射率标定曲线

Fig. 12 Transmittance curve of Fe filter

影响 XRD 探测器灵敏度标定的主要因素有三个方面:光源、测量标准和标定方法。在光源方面主要有光源的稳定性、能量分辨、高次谐波和杂散光等,测量标准方面主要有标准的不确定度和光源强度的测量不确定度等,在标定方法方面主要有测量系统的不确定度和信噪比等,通过不确定度评估,XRD 灵敏度标定的不确定度优于 3%。

4.2 滤片透射率标定

滤片也是辐射温度测量系统的重要元件之一^[10],利用滤片的吸收和透过特性进行 X 射线谱选通,其透射率直接影响透过滤片的 X 射线的绝对量,从而影响辐射温度的测量精度。在 4B7B 软 X 射线标定束线上,利用 AXUV-100 硅光二极管和 6517A 弱电流计分别测量 X 射线的信号和通过滤片后的 X 射线信号,通过比较给出不同能点滤片的透射率。实验结果如图 12 所示,图中是 Fe 滤片实验测量结果与利用 Henke 吸收系数计算结果的比较。从图中看出两者一致性非常好,说明标定结果是可靠的。

滤片透射率标定是相对标定,影响滤片透射率标定结果的因素主要有滤片的均匀性和沙眼、光斑均匀性、光源单色性(能量分辨)、光源的高次谐波、杂散光、探测器的动态范围和信噪比等。通过抑制光源的高次谐波、消除杂散光、提高光源的单色性、减小光斑尺寸等措施,透射率的标定精度有明显提高。通过不确定度评估,透射率的标定不确定度好于 1%。

4.3 平面镜反射率标定

平面镜也是辐射温度测量系统的重要元件之

—^[10],利用平面镜的反射率随光子能量的增加而降低的原理抑制 X 射线谱中的高能成分,与滤片组合实现选通。因此,平面镜的反射率直接影响辐射温度的测量精度。在 4B7B 软 X 射线标定束线上,利用两个 AXUV-100 硅光二极管和 6517A 弱电流计,其中 1#探测器设置在平面镜的前端,2#探测器设置在平面镜的后端,固定平面镜的角度。利用 1#探测器测量光源的强度,利用 2#探测器测量经过平面镜反射后的光强,通过比较法给出不同能点平面镜的反射率。实验结果如图 13 所示,从图中可以看出,使用时间比较长的平面镜,反射率发生较大变化,主要原因是沾污,通过模拟计算说明,沾污杂质主要是碳,来源于实验环境中的油蒸气,采用射频辉光放电清洗非常有效,如图 13 所示。

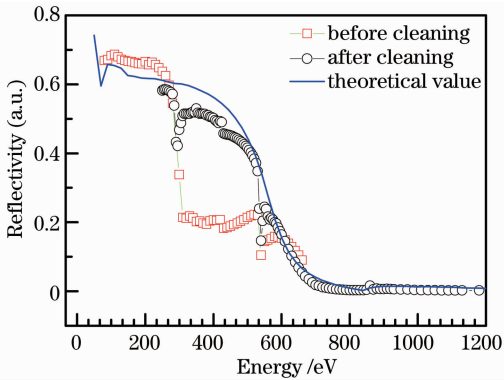


图 13 平面镜反射率标定结果

Fig. 13 Calibration result of mirror reflectivity

平面镜的反射率是相对标定,影响平面镜反射率标定结果的因素主要有平面镜的角度、光源单色性(能量分辨)、光源的高次谐波、杂散光、探测器的动态范围和信噪比等。采用固定平面镜的角度、抑制光源的高次谐波、消除杂散光、提高光源的单色性等措施后,反射率的标定精度有明显提高。通过不确定度评估,平面镜反射率的标定不确定度优于3.5%。

5 结 论

在北京同步辐射装置上,采用固定/可变包含角变间距光栅单色器结构,建立了 4B7B 光束线,开展了光束线的性能研究,采用三种方法进行高次谐波的抑制,利用复合滤片消除了杂散光,光源的技术指标达到国际同等先进水平。利用 4B7B 光束线,开展了 X 射线探测器件的精密标定技术研究,取得重要进展,XRD 探测器的灵敏度、滤片透射率和平面镜反射率标定精度分别达到 3%、1%和 3.5%,将这些结果应用到神光 III 原型物理实验中,辐射温度

的测量不确定度从原来的 8%降低到 3%。

参 考 文 献

- Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng Zhijian. The sub-keV X-ray spectrometer used in laser plasma interaction experiments [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1990, 2(1): 16-22. 孙可煦, 杨建国, 郑志坚. 用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪[J]. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 16-22.
- Yi Rongqing, Miao Wenyong, Sun Kexu, *et al.*. Experimental investigation of radiation temperature in hohlraum [J]. Acta Physica Sinica, 1996, 45(2): 443-448. 易荣清, 缪文勇, 孙可煦, 等. 腔内辐射温度的实验研究[J]. 物理学报, 1996, 45(2): 443-448.
- Yi Rongqing, Li Shanwei, Sun Kexu, *et al.*. M-shell X-ray emission from 0.35 μm laser produced gold plasma [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 1997, 14(1): 20-22. 易荣清, 李三伟, 孙可煦, 等. 0.35 μm 激光辐照金盘靶产生的 M 壳层 X 射线辐射研究[J]. 原子分子物理学报, 1997, 14(1): 20-22.
- Yi Rongqing, Yang Guohong, Cui Yanli, *et al.*. Study of X-ray detector system characteristics on the 3B3 medium energy beamline in BSRF [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6287-6291. 易荣清, 杨国洪, 崔延莉, 等. 北京同步辐射 3B3 中能束线 X 射线探测系统性能研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6287-6291.
- Yi Rongqing, Li Shanwei, Jiang Shaoen, *et al.*. Measurement technique of radiation temperature with high time-resolution [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 965-969. 易荣清, 李三伟, 江少恩, 等. 高时间分辨辐射温度测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 965-969.
- Lin Weihao, Luo Hongxin, Song Li, *et al.*. Absolute flatness measurement of optical elements in synchrotron radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0912005. 林维豪, 罗红心, 宋丽, 等. 同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0912005.
- K M Campbell, F A Weber, E L Dewald, *et al.*. Omega dante soft X-ray power diagnostic component calibration at the national synchrotron light source [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(10): 3768-3771.
- E L Dewald, K M Campbell, R E Turner, *et al.*. Dante soft X-ray power diagnostic for national ignition facility [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(10): 3759-3761.
- R H Day, P Lee, E B Saloman, *et al.*. Photoelectric quantum efficiencies and filter window absorption coefficients from 20 eV to 10 keV [J]. J Appl Phys, 1981, 52(11): 6965-6974.
- Li Sanwei, Song Tianming, Yi Rongqing, *et al.*. Quantitative study of radiation temperature for gold hohlraum on SG-II laser facility [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 055207. 李三伟, 宋天明, 易荣清, 等. 神光 II 激光装置黑腔辐射温度定量研究[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 055207.
- Wang Xiaojing. Retro diffraction properties of reflecting grating with right angle grooves [J]. Acta Optica Sinica, 1989, 9(8): 732-740. 王效敬. 直角刻槽反射光栅的后向衍射特性[J]. 光学学报, 1989, 9(8): 732-740.
- Chen Xiao, Yan Binbin, Song Feijun, *et al.*. Diffractive properties of DMD gratings and its new application in tunable fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705003. 陈笑, 颜彬彬, 宋菲君, 等. DMD 光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705003.