

文章编号: 0258-7025(2010)09-2271-07

# 同步辐射软 X 射线光学实验平台的建立及其应用

崔明启<sup>1</sup> 赵屹东<sup>1</sup> 郑雷<sup>1</sup> 赵佳<sup>2</sup> 丁永坤<sup>3</sup> 易荣清<sup>3</sup> 杨家敏<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; <sup>2</sup> 中国工商大学机械工程学院, 北京 100048)  
<sup>3</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 在北京同步辐射装置(BSRF)上建立了国内唯一的软 X 射线光学实验平台,主要用于惯性约束聚变(ICF)激光等离子体诊断用探测元器件的精密标定技术研究。硬件方面主要包括两条不同能区的单色聚焦 X 射线光束线(能量范围 0.05~6 keV)、高精度软 X 射线综合测试分析装置、软 X 射线标准探测器电离室系统及若干探测器标定装置等,软 X 射线(0.05~1.5 keV)和中能 X 射线(1.2~6 keV)两条光束线各项性能指标均达到或优于原设计指标。一大批 ICF 实验用的探测器在实验平台上进行了标定,主要包括 X 射线探测器(XRD)、反射镜和多层膜、透射光栅、电荷耦合器件(CCD)等,还包括一些新的探测元器件,如:晶体、成像板等,这些探测元器件被用于 ICF 实验中,取得大量的成果。该平台在光学、天文、材料、计量和 Z 箍缩实验等领域也得到了广泛的应用。

**关键词** 同步辐射;软 X 射线;光束线;惯性约束聚变;探测元器件;标定

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2271

## Construction and Applications of Soft X-Ray Experimental Platform on Synchrotron Radiation

Cui Mingqi<sup>1</sup> Zhao Yidong<sup>1</sup> Zheng Lei<sup>1</sup> Zhao Jia<sup>2</sup> Ding Yongkun<sup>3</sup>  
Yi Rongqing<sup>3</sup> Yang Jiamin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

<sup>3</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** The soft X-ray experimental platform is constructed for accurate calibrating detector of inertial confinement fusion (ICF) on Beijing synchrotron radiation facility (BSRF). It is the only one in our country. The platform mainly consists of two synchrotron radiation beamlines (energy range: 0.05~6 keV), high precision reflectometer, X-ray standard detector of ion chamber, and some calibrating devices for the detector. The soft X-ray beamline (4B7B) and middle X-ray beamline(4B7A) are constructed successfully. Their targets and parameters are achieved and excel the original designs. A lot of detectors are calibrated with the platform. They are X-ray detector (XRD), mirror and multilayer, filter, transmission grating, charge coupled device (CCD), and other new type of detecting elements and devices, such as crystal and image plate, with which lots of achievements are obtained in ICF experiments. The platform also has many applications in other fields such as optics, material, astronomy, metrology, and Z-pinch's detector calibration, etc.

**Key words** synchrotron radiation; soft X-ray; beamline; inertial confinement fusion; detector; calibration

### 1 引言

20 世纪 80 年代初,美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)提出了精密物理的概念,精密物理要求探

测系统的精密化和实验物理的精密化,而探测系统的精密化是精密物理的第一步。因此,各种探测元器件的性能标定是提高测量精度和增加测量信息量

收稿日期: 2010-05-27; 收到修改稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家 863 计划和国家自然科学基金(10775150,10435050,10374088)资助课题。

作者简介: 崔明启(1949—),男,研究员,博士生导师,主要从事同步辐射和 X 射线光学等方面的研究。

E-mail: cuimq@ihep.ac.cn

的重要研究内容,该项研究在间接驱动惯性约束聚变(ICF)实验研究中具有非常重要的应用价值,而X射线探测器(XRD)标定实验平台的建立及发展则是其基础。自20世纪80年代末至今,美国、德国、俄罗斯及日本等国均在他们各自的同步辐射装置上,建造了专门用于软X射线探测器性能研究的光束线及测量装置构成的实验平台,美国东、西部共建了7条专用束线,可见其重要性。

自20世纪90年代起,国内软X射线光学方面的应用也在突飞猛进地发展,如:ICF软X射线探测器标定、软X光学元件及光学系统的研制、空间天文软X射线光学观察系统和软X射线的农作物辐照等,然而当时国内没有任何软X光学测量分析手段,与快速发展的软X光学相差甚远,因此要求在国内建造软X射线测量装置的呼声越来越高。为此,中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置(BSRF)于1992年建造了国内第一套软X射线多层膜反射率计装置<sup>[1]</sup>,能量范围为0.05~1 keV,广泛地开展了软X射线光学基础及其应用方面的研究<sup>[2]</sup>。装置的研制成功,解决了国内软X射线能谱、光强及材料的软X光学特性等重要参数的定量测量,促进了我国软X光学技术、激光等离子体诊断及同步辐射应用等多项技术的发展。研究项目涉及到国防、科研及农业等领域,均取得了有重要价值的科研成果。尤其在软X射线探测器灵敏度标定工作中,发挥了很大的作用,为ICF研究提供了一批性能可靠的探测器。同步辐射软X射线多层膜反射率计装置及其应用获得2000年度国家技术发明奖二等奖。

随着软X射线光学技术应用研究的不断发展,多层膜反射率计测量装置已无法满足国内各方面软X射线应用研究人员的迫切需要,尤其激光ICF与天文观测等国家重大科学研究项目在国内快速发展。从1996年至2005年,约10年时间,BSRF软X射线光学课题组与中国工程物理研究院激光聚变研究中心联合在BSRF上建立了国内公认的唯一开展软X射线光学技术基础及综合应用研究的实验平台。硬件方面主要包括两条不同能区的单色聚焦X射线光束线[能量范围为0.05~1.5 keV(软X射线光束线)<sup>[3]</sup>,1.2~6 keV(中能X射线光束线)<sup>[4]</sup>],高精度X射线综合测试分析装置和X射线绝对光强监测系统及若干探测器标定装置等,是集X射线光学技术、精密机械、超高真空技术、电子学及计算机控制、计量标准和探测器弱信号测量等专业技术为一体的大型工程技术研究项目。实验平台的优异

性能仅靠硬件的建立是远远不能满足需要的,需要先进技术和实验方法的支持,在光束线输出特性诊断、软X射线绝对光强测量、探测器精密标定技术与实验方法研究等方面开展了大量的研究工作<sup>[5~7]</sup>,应用领域涉及光学、材料、天文、计量标准、核技术、激光等离子体诊断及同步辐射应用等。尤其在国家“863”计划和载人航天神舟二号空间天文分系统等一些国家重大科学工程的实施中发挥了重要作用<sup>[8,9]</sup>。上述成果曾获得军队科技进步一等奖和北京市科学技术二等奖。

2005年至今,借北京正负电子对撞机二期(BEPCII)工程改造之机,软X射线实验平台得到了进一步的完善和提升。为满足同步辐射兼用光实验条件(同步辐射专用光每年仅2~3个月用光时间,而兼用光可常年使用。),中能X射线光束线从BSRF西厅(13<sup>#</sup>厅)搬迁到东厅(12<sup>#</sup>厅),并且在东厅又建造了一条性能优越的新的软X射线光束线,分别命名为4B7A和4B7B光束线。至此,BSRF软X射线光学实验平台已拥有覆盖软X射线全部能区的单色光光源和相应的测量分析装置,并可开展包括生物学和软X射线谱学在内的多领域的软X射线科学研究。

本文重点介绍同步辐射软X射线实验平台建设的最新进展及其在ICF激光等离子体诊断中的应用。

## 2 同步辐射软X射线光学能区(波长范围)的界定

同步辐射光源可以产生从红外至X射线能区的连续谱,包括红外(IR)、可见光(VIS)、紫外(UV)、真空紫外(VUV)、极紫外(EUV)、软X射线(soft X-ray)及硬X射线(hard X-ray)能区。在这段电磁辐射谱中,VUV到软X射线能区的辐射的相关研究是最晚的,主要是由于在该能区所有物质均有很强的吸收,必须在真空环境中完成各类实验,其光学系统设计及光学元件的制造因为真空技术水平等因素的制约而相对滞后。

EUV和软X射线能区的辐射研究还不足30年,关于这个能区名称及能区间的界限至今还没有普遍认同的定义,目前被同步辐射应用、天文学、激光等离子体物理及光刻等科学家基本认可的标准如图1所示<sup>[10]</sup>。图中 $a_0$ 为玻耳半径,其中波长和能量的关系符合

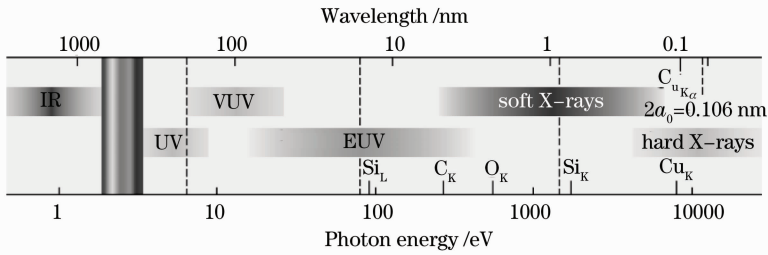


图 1 从红外到 X 射线的电磁辐射谱

Fig.1 Electromagnetic radiation spectrum from IR to X-ray region

$$\lambda(\text{nm}) = 1239.842 (\text{eV} \cdot \text{nm}) / E(\text{eV}). \quad (1)$$

图 1 中标出了常用元素吸收边(Cu, O, C, Si 等)所对应的能量和波长。如图 1 所示: EUV 和软 X 射线所对应的光子能量范围从 30~10000 eV, 相应波长为 0.1~40 nm。还可见, 对于 VUV 和 EUV 的边界, 以及软 X 射线和硬 X 射线的边界缺乏准确的界定。根据实际情况和国内同行的认可, 把能量范围简化为: 称 50~2000 eV 为软 X 射线范围, 2000~6000 eV 为中能 X 射线。也有人把 10 keV 以下能量统称为软 X 射线。

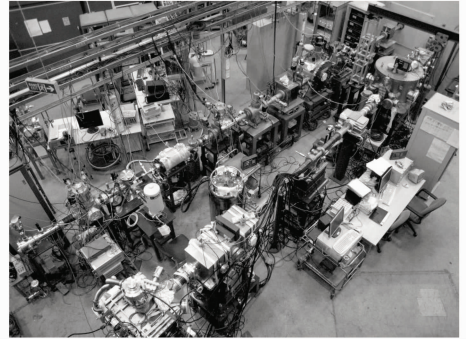


图 2 4B7A 和 4B7B 两条光束线的实物照片

Fig.2 Photo of the 4B7A and 4B7B beamlines

### 3 BSRF 软 X 射线实验平台硬件设施

由于 BEPCII 建成后 13# 厅外环为正电子环, 无法引出兼用光。为充分利用 BEPCII 兼用模式, 新建软 X 射线光束线与中能 X 射线光束线共用 12# 厅 4B7 前端区。中能光束线命名为 4B7A, 新软 X 射线光束线为 4B7B。图 2 给出 4B7A 和 4B7B 两条光束线的实物照片。

#### 3.1 中能 X 射线双晶单色器光束线

光束线最初由 BEPC 储存环第 III 区编号为 3B3 的弯转磁铁引出, 借 BEPCII 升级改造之际, 考虑到兼用光运行, 中能光束线没做任何更改, 搬迁至 BEPCII 储存环 IV 区 4B7 弯转磁铁, 现命名为 4B7A 光束线。图 3 给出中能光束线光路原理图; source 为同步辐射光源点; AP1 为入射光阑, 准直与阻挡杂散光; PM 为

前置镜(水冷, 平面镜, 500 mm×150 mm), 将其一分为二, 一为 Si 镜, 一为 Ni 镜, 分别与不同的单色器晶体组合, 其作用是切除 6 keV 以上 X 射线, 降低晶体热负载和抑制高次谐波; TM 为超环面聚焦镜[柱面镜压弯(850 mm×100 mm), 镀 Ni, 缩放比为 1:1], 实现光束在样品处的水平和垂直两个方向的聚焦; C filter 为碳滤光片, 滤除低能杂散光, 进一步减少晶体的热负荷; Ni mesh 为镍网, 入射光强监测器(目前已改为薄窗低压强稀有气体电离室, 作为入射光强监测器); DCM 为双晶单色器, 束线心脏, 由三种晶体[KTP(011), InSb(111) 和 Si(111)]用以提供单色 X 光; AP2 为出射光阑; 实验装置(样品)距光源点 28.5 m。

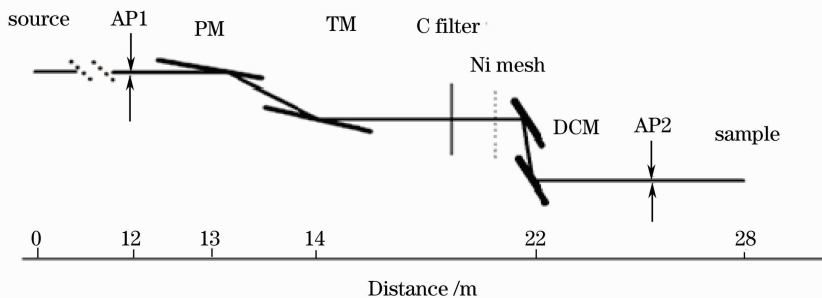


图 3 中能 X 射线光束线(4B7A)光路原理图

Fig.3 Layout of 4B7A beamline

表 1 4B7A 光束线设计指标与实测结果的比较  
Table 1 Comparison of design targets and measurement results

	Designed target	Measurement result
Energy range /keV	1.5~6.0	1.2~6.0
Resolution power ( $E/\Delta E$ )	1000~4000	1500~5000
Spot size /mm	2 (horizontal) $\times$ 1 (vertical)	1.7 (horizontal) $\times$ 0.7 (vertical)
Flux /( $10^{10}$ photons /s)	0.1~10	0.1~7
High-order harmonic	<5%	Si(111)< $1.5 \times 10^{-4}$ , KTP(011)<5%

该光束线采用了前置镜能量截取、压弯柱面镜双向聚焦、三对平面分光晶体覆盖全部能量范围、前置镜分区镀膜和 KTP 晶体分光及有效抑制高次谐波等新技术,使得光束线能量扫描范围、能量分辨率、聚焦光斑尺寸、光通量和高次谐波份额等主要技术指标均达到或超过设计指标。该装置不仅用于计量及探测器标定研究,还用于中能 X 射线吸收谱学研究。已作为我国大陆唯一一条中等能区 X 射线光束线在国家一些重大科学工程的实施中发挥重要作用,也将在众多领域的科学研究中发挥作用。表 1 给出了该光束线各项性能设计指标与实测结果的比较。

### 3.2 4B7B 软 X 射线光束线

4B7B 光束线的物理目标有两个方面:中国工程物理研究院是把它作为 ICF 诊断用软 X 射线光源,要求光谱纯度足够好。对光束线设计而言侧重于高次谐波抑制和对杂散光的处理。中国科学院高能物理研究所方面希望这条光束线能够用于轻元素吸收谱学,要求光束线的分辨率足够高,聚焦光斑尽量小一些以提高样品处的通量密度。设计时充分考虑到了上述两方面要求,提出了两种工作模式:1) 高次谐波抑制模式,用于探测器标定;2) 高分辨模式,用于吸收谱学实验。图 4 给出该光束线光路布局图。

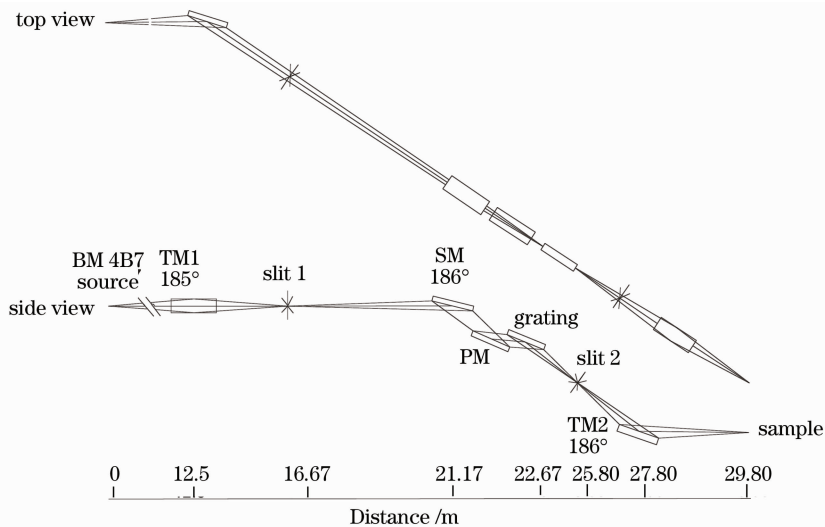


图 4 4B7B 软 X 射线光束线光路原理图

Fig. 4 Layout of 4B7B beamline

4B7B 软 X 射线光束线光路由前置聚焦镜(TM1)、入射狭缝(slit 1)、球面镜(SM)、平面镜(PM)、变线距平面光栅(VSPG)、出射狭缝(slit 2)和后聚焦镜(TM2)构成,样品距光源点约 30 m。由前置聚焦镜实现水平偏转及水平和垂直双向聚焦,垂直聚焦于入射狭缝。球面镜和光栅组成 Monk-Gillieson 型单色器的核心,平面镜使之可以工作在可变包含角模式。后聚焦镜的水平和垂直焦点均在样品处。此外,为满足计量工作高光谱纯度的要求,在出射狭缝和样品之间专门设置了高次谐波抑制单

元。分别对高次谐波抑制和高能量分辨两种模式进行了多项性能指标测量,测量结果如下:

高次谐波抑制模式:1) 能量范围:50~1550 eV; 2) 能量分辨率( $E/\Delta E$ ):820(氩气 Ar 的 L 边);3) 二次谐波成分比例:小于 2.5%;4) 光子通量:大于  $1 \times 10^9$  photons/s (250 mA, 2.5 GeV)。

高分辨模式:1) 能量范围:50~1500 eV;2) 能量分辨率( $E/\Delta E$ ):3600(Ar 的 L 边,三次测量平均值);3) 光子通量:大于  $8.7 \times 10^8$  photons/s ( $E/\Delta E$  大于 3600 的前提下,250 mA, 2.5 GeV, 三次测量

平均值)。

图5给出了极限能量分辨率的测量结果,结果

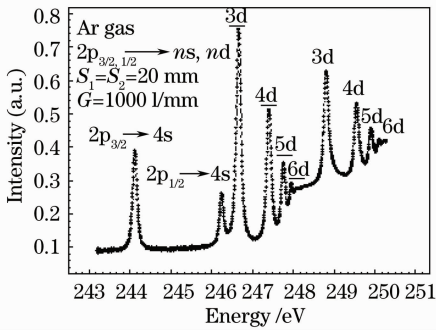


图5 Ar 的 L 边,  $2p_{3/2} \rightarrow nd, ns$  跃迁系列共振峰的实测谱

Fig. 5 Measurement pattern of Ar(L),  $2p_{3/2} \rightarrow nd, ns$

表2 BSRF 的两条光束线与美国 BNL-NLSL 的相对应两条光束线的比较

Table 2 Comparison of beamline 4B7A and 4B7B at BSRF with beamline X8A and U3C at BNL-NLSL

Beamline	BNL-NLSL X8A <sup>[11]</sup>	BSRF 4B7A	BNL-NLSL U3C <sup>[12]</sup>	BSRF 4B7B
Energy range /keV	0.8~5.9	1.2~6	0.05~1.6	0.05~1.5
Resolution power ( $E/\Delta E$ )	2060(3.1 keV)	5000(3.2 keV)	300(0.45 keV)	3600(0.25 keV)
Flux / (photons /s)	$1.7 \times 10^{10}$ [Si(111)]	$7 \times 10^{10}$ [Si(111)]	$5 \times 10^9$ (0.15 keV)	$8.7 \times 10^8$ (0.15 keV)
Spot size /mm	2(horizontal) × 3(vertical)	1.7(horizontal) × 0.7(vertical)	10(horizontal) × 1(vertical)	6(horizontal) × 2(vertical)

### 3.4 高精度软 X 射线综合测试分析装置

高精度软 X 射线综合测试分析装置是实验平台的主要测试设备,实际上是一套功能较多的反射率计装置,由入射狭缝、滤光片系统、样品台、探测器、步进电机控制系统及弱信号测量系统等组成。样品台和探测器具有高精度的旋转和平移功能,可开展反射(衍射)、透射和散射等物理工作,可进行软 X 射线光学特性、光学元件测量和探测元器件性能标定等工作。其特点是采用超高真空差分的高精度自动控制双馈入系统,该系统确保了高精度的测量和高水平的研究工作。该装置实现的主要功能与技术指标有:1) 样品和探测器均具有平移和旋转两种功能;2) 样品和探测器既可独立运动,又可  $\theta, 2\theta$  同步联动,其同轴精度优于  $8''$ ;3) 样品台转角分辨率  $0.0025^\circ$ , 探测器转角分辨率  $0.005^\circ$ , 定位精度优于  $0.0025^\circ$ ;4) 样品台一次可装载四块样品,可自动换样;5) 主真空室极限真空  $4.7 \times 10^{-6}$  Pa。

图6给出了高精度软 X 射线综合测试分析装置的实物照片。

## 4 在 ICF 激光等离子体诊断探测元器件标定中的应用

在 ICF 实验研究中,需要大量的诊断测试设

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。

### 3.3 光束线性能与国外的比较

美国布鲁克海文国家实验室(BNL)和国家同步辐射光源(NSLS)也有 2 条相似的光束线<sup>[11,12]</sup>,主要也是用于探测器标定。这两条光束线是由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室和桑迪亚国家实验室等四家大型实验室联合建造和使用的,应能代表当前的国际水平。表2给出了双方达到的性能指标,不难看出,BSRF 的 2 条光束线性能均优于他们。

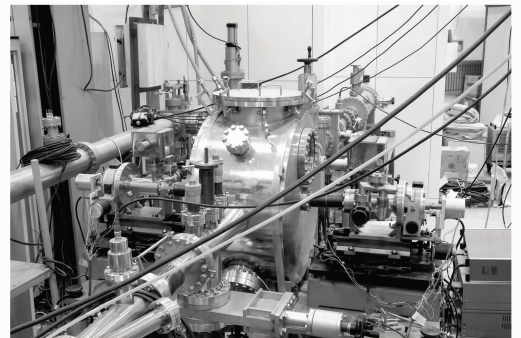


图6 软 X 射线综合测试分析装置照片

Fig. 6 Photo of soft X-ray reflectometer

备,实验数据的精度直接依赖于诊断设备的精度,诊断设备的精度取决于诊断设备的精确标定,诊断设备中各种探测元器件标定是该项研究发展的重要课题。主要包括:X 射线探测器(多种光阴极,如 Al, Au, Cr, C 等)、滤光片、平面镜、多层膜、X 光胶片、光电导探测器、软 X 射线电荷耦合器件(CCD)、透射光栅谱仪及软 X 射线条纹相机等。获得的大量实验数据大部分被用到 ICF 实验研究中,取得了大量的研究成果。

#### 4.1 透射光栅及 CCD 的标定方法研究

透射光栅在软 X 射线能谱测量中作为一种重要的色散元件得到了广泛的应用,但要用透射光栅

进行软 X 光谱的定量测量,必须准确知道各级绝对衍射效率。对光栅的衍射效率的确定有两种方法:1)通过每个能点的标定来实现,2)利用有限的能点确定光栅的结构参数、周期、线空比、栅线厚度和栅线的形状,用理论方法进行计算。本文采用第二种方法。在国外发展的矩形和梯形栅线截面模型的基础上,假设透射光栅栅线截面为准梯形,建立了透射光栅衍射效率的准梯形截面计算模型,进行了编程计算。

X 光 CCD 系统是一个光电转换系统,它可将 X 光信号变成电信号,由计算机记录,灵敏度高,动态范围宽,它常配合透射光栅用于测量 X 光能谱和针孔相机测量光斑的空间分布,它具有 X 光胶片的各种功能,但胶片只能半定量,而 CCD 可以定量,目前已在 ICF 实验中基本替代 X 光胶片。

图 7 给出了透射光栅和 CCD 标定的实验布局图,是 ICF 用探测元器件标定实验的一个较为典型的实验布局图。SX(soft X-ray)为同步辐射光束线出射的单体软 X 射线光源;S(shutter)为快门,用以控制 CCD 的曝光量;AP(aperture)为光阑,用以保证各探测元器件接收同样面积光斑;F(filter)为滤光片,用以阻挡杂散光及抑制高次谐波;G(grating)为光栅,待标定器件,可移入移出光路,便于与标准探测器比对;SD(standard detector)为标准探测器,选用硅光电二极管(AXUV-100 G, IRD, USA, 由德国 PTB 标定)传输标准探测器,输出为电流模式;EM(electrometer)为弱电流放大器(6517 A, Keithley, USA),用以获取标准探测器的输出信号;CCD 为软 X 射线 CCD 相机,作为光栅的记录介质,去除光栅,也可进行 CCD 相机能量响应的独立标定。另外,该布局还可以完成光束线输出光源能量分辨率和高次谐波状态的测量。除了反射元件外,绝大部分探测器件的标定均可由该布局改进得到。

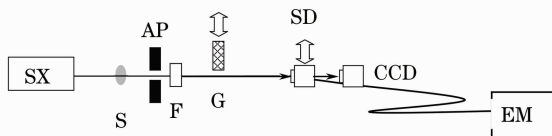


图 7 探测器标定布局图

Fig. 7 Layout of detector calibrations

#### 4.2 各种阴极 XRD 灵敏度标定

XRD 在 ICF 辐射场的研究中是最重要的探测器,也是在 ICF 研究中最先进行定量测量 X 光强度、辐射能谱、辐射温度和 X 光角分布的探测器,XRD 伴随着 ICF 的实施而出现。到目前为止,美国

的各大实验室也都一直在使用 XRD。由于 XRD 的灵敏度随光阴极加工精度、光阴极表面纯度的不同而有差异,并随时间的变化而变化,辐照对它也有损伤,所以每轮实验前都必须进行标定。图 8 给出的是 4B7A 和 4B7B 光束线测量得到的 Al 阴极 XRD 灵敏度的最新标定结果,结果指出,两段能区(中能 X 射线和软 X 射线)标定结果能够很好衔接,两次标定结果重复性很好。

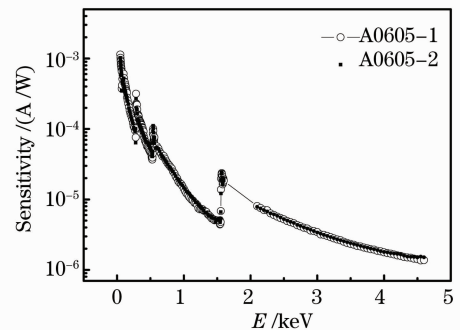


图 8 XRD 灵敏度的标定结果

Fig. 8 Sensitivity calibration of XRD with energy

#### 4.3 软 X 射线光学多层膜的反射率测量

软 X 射线光学多层膜在 ICF 实验研究中是一个很重要的分光元件,尤其是在 X 光激光研究中应用很广泛。利用同步辐射软 X 实验平台高精度综合测量分析装置进行了各种多层膜反射率的测量。典型的结果如图 9 所示。

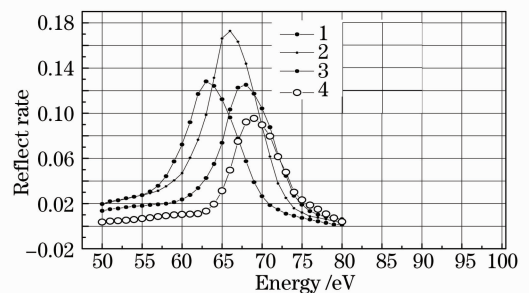


图 9 多层膜反射率的测量结果

Fig. 9 Measurement results of multilayer reflectivity

#### 4.4 中能 X 射线光束线的标定

在 ICF 实验研究中使用了多种中能 X 射线探测系统,主要包括:晶体谱仪,X 射线成像板系统,X 射线能谱仪,透射光栅谱仪和 X 射线 CCD 系统等,它们都要应用于 1.5~6.0 keV 能区的绝对测量,急需开展这些系统在此能区的能量响应灵敏度的精密标定,但由于当时国内没有中能 X 射线光束线,一直未能在该能区进行标定。自中能光束线建成后,曾在其上对多种探测元器件与设备进行了标定,主要包括:金属阴极 XRD 的灵敏度标定、晶体衍射效

率标定、成像板能量响应标定、滤光片膜厚标定、透射光栅谱仪衍射效率标定及 X 射线 CCD 能量响应标定,取得很好结果。由于篇幅限制,仅给出 PET 晶体衍射效率标定结果,如表 3 所示。

表 3 PET 晶体衍射效率标定结果

Table 3 Diffraction efficiency calibration results of

PET crystal

Energy/ eV	Halfwidth/ rad	Diffraction efficiency of peak value/%	Integral diffraction efficiency/ $10^{-4}$
2190	0.0033	10.34	4.9
3446	0.0026	10.55	5.0
4034	0.0028	11.69	5.4
4875	0.0027	14.25	6.3
5580	0.0023	15.75	6.6

## 5 结 论

根据国内大科学工程项目的需求和软 X 射线光学技术发展的需要,遵循“从无到有,从小到大,系统集成”的总体思路,经不断改进、完善,目前在 BSRF 上已建成国内公认的唯一开展软 X 射线光学技术综合应用研究的实验平台和研究基地,主要用于 ICF 激光等离子体诊断用探测元器件的精密标定技术研究。硬件方面主要包括两条不同能区的单色聚焦 X 射线光束线(能量范围为 0.05~6 keV)、高精度软 X 射线综合测试分析装置、软 X 射线标准探测器电离室系统及若干探测器标定装置等,软 X 射线(0.05~1.5 keV)和中能 X 射线(1.2~6 keV)两条光束线各项性能指标均达到或优于原设计指标。对探测器标定方法方面开展了广泛的研究,一大批 ICF 实验用的探测器在实验平台上进行了标定,这些探测元器件被用于 ICF 实验中取得了大量的成果。该平台在光学、天文、材料、计量、吸收光谱学及 Z 箍缩实验等领域也展开了广泛的应用,在国内同步辐射软 X 射线光学测量技术领域取得了显著的成绩。

**致谢** 在平台建造过程中曾得到中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和中国科学技术大学等单位支持,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 Cui Mingqi, Miao Jianwei, Wang Jun *et al.*. Synchrotron radiation soft X-ray reflectometer and its physics results [J]. *Nuclear Instruments and Methods Research A*, 1995, **359**(1-2): 151~154
- 2 Cui Mingqi, Miao Jianwei, Wang Jun *et al.*. Study of the multilayer monochromator energy resolution in soft X-ray region [J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**(5): 1015~1020  
崔明启, 缪建伟, 王 俊 等. 软 X 射线多层膜单色器能量分辨研究 [J]. *物理学报*, 1997, **46**(5): 1015~1020
- 3 Cui Mingqi, Cui Congwu, Zhao Yidong *et al.*. The soft X-ray devices of Beijing synchrotron radiation facility and calibration of soft X-ray detectors [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1998, **32**(6): 492~498  
崔明启, 崔聪悟, 赵屹东 等. 北京同步辐射软 X 射线装置与软 X 射线探测器标定 [J]. *原子能科学技术*, 1998, **32**(6): 492~498
- 4 Zhao Jia, Cui Mingqi, Zhao Yidong *et al.*. A 1.2 to 6 keV soft X-ray beamline at Beijing synchrotron radiation facility [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, **62**(11): 1257~1262
- 5 Yang Jiamin, Yi Rongqing, Ma Hongliang *et al.*. Experimental calibration and calculation of diffraction efficiency for transmission grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1631~1635  
杨家敏, 易荣清, 马洪良 等. 透射光栅衍射率的实验标定和数值计算 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1631~1635
- 6 Sun Kexu, Yi Rongqing, Huang Tianxuan *et al.*. Reflectivity calibration of soft X-ray planar mirror in the BSRF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 379~382  
孙可煦, 易荣清, 黄天璇 等. 软 X 光平面镜反射率标定实验 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 379~382
- 7 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Qin Shuji *et al.*. Analysis of the reflectivity of Mo/Si multilayer film for soft X-ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1362~1365  
王洪昌, 王占山, 秦树基 等. 软 X 射线 Mo/Si 多层膜反射率拟合分析 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1362~1365
- 8 Sun Kexu, Yi Rongqing, Jiang Shao'en *et al.*. Calibration of soft X-ray detection with synchrotron radiation [J]. *Chinese Physics C (High Energy Physics and Nuclear Physics)*, 2004, **28**(2): 206~209  
孙可煦, 易荣清, 江少恩 等. 同步辐射应用于软 X 射线探测器的标定 [J]. *中国物理 C(高能物理与核物理)*, 2004, **28**(2): 206~209
- 9 Zhao Yidong, Cui Mingqi, Zhu Peiping *et al.*. Calibration of soft X-ray detector for astronomic observation [J]. *Chinese Physics C (High Energy Physics and Nuclear Physics)*, 2001, **25**(12): 1245~1252  
赵屹东, 崔明启, 朱佩平等. 天文观察用超软 X 射线探测器的标定 [J]. *中国物理 C(高能物理与核物理)*, 2001, **25**(12): 1245~1252
- 10 D. Attwood. *Soft X-ray and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Application* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 1~7
- 11 National Synchrotron Light Source, Beamline X8A [OL]. <http://www.nsls.bnl.gov/beamlines/beamline.asp?blid=X8A>, (June 16, 2010)
- 12 National Synchrotron Light Source, Beamline U3C [OL]. <http://www.nsls.bnl.gov/beamlines/beamline.asp?blid=U3C>, (June 16, 2010)