

# 同步辐射在 ICF 研究中的应用\*

孙可煦 易荣清 黄天暄 崔延莉 杨家敏 江少恩

丁永坤 张保汉 王红斌 温树槐 郑志坚

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

崔明启 朱佩平 赵屹东 黎刚 唐鄂生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 介绍同步辐射在 ICF 研究中的应用, 对多种 ICF 实验诊断用软 X 光探测元器件及设备利用北京同步辐射装置(BSRF)-3W1B 作能量响应绝对标定. 首先采取透射光栅分光和软 X 光面阵 CCD 观测记录, 对光源进行性能研究. 在 50—1500eV 能区分 7 个能段, 通过不同材料的前置滤片抑制高次谐波, 获得单色性好于 95% 的单色光. 采用美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 硅光二极管作次级标准探测器. 利用 BSRL 的反射率计靶室及其相关联调束系统, 获得连续可调的单色光标定束. 在该束线上进行了多轮实验, 获得大量探测器标定数据用于 ICF 实验研究, 提高了实验精度.

**关键词** 同步辐射 软 X 射线 灵敏度 反射率 透过率

## 1 引言

在激光驱动惯性约束聚变(ICF)研究中, 特别是间接驱动 ICF 研究, 辐射场的重要性是众所周知的<sup>[1,2]</sup>. 随着激光器逐步升级, 诊断设备逐步完善, 对时、空、谱诊断技术的多样化、相关性及精密化的认识也在逐步提高. 对于众多时、空、谱诊断技术, 无不向着绝对测量方向发展. 要做好软 X 光探测元器件能量响应绝对标定工作, 必须具备 3 个条件: a) 一个好的标定用光源, 具有单色性好, 强度高, 能区宽, 能点连续可调等特点, 可对更多软 X 光探测元器件进行能响标定; b) 一套精度较高的光强监测系统, 即灵敏度高, 动态范围宽, 系统误差小的监测系统; c) 一套完善的标定装置, 即使用简便灵活, 通用性好, 更换标定元件方便, 可节省用光时间, 提高标定效率, 还可以提高标定精度.

\* 国家高技术(863-416-3)资助

早期我们曾经建立了Henke源和质子荧光源<sup>[3]</sup>, Henke源具有特征能量强度低, 单色性差, 能点少, 光源稳定性差等缺点, 远不能满足我们的需要. 质子荧光源虽然特征能量光子通量可达 $10^{12}—10^{13}$ 光子数/s/ $4\pi$ , 但实际到达标定探测器的光子通量也仅 $10^6—10^7$ 光子数/s/cm<sup>2</sup>, 以XRD标定为例, 其输出信号电流仅 $10^{-14}$ A量级, 信噪比差, 且能点少, 误差大, 还是不能满足需要.

同步辐射光源作为软X光探测器标定源, 具有其它标定源无法比拟的优点, 如高强度( $10^{13—14}$ Phs/s mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> 1%), 准直性好, 小发散角(水平方向  $7.6 \times 10^{-8}$  mrad), 高稳定性(束流寿命 15—20h), 还具有脉冲时间特性等等优点. 因此, SR光源在我国问世后<sup>[4]</sup>, 我们即时地开展了SR光源的调研工作, 极积参与光源建设, 1997年底3W1B新束线建成并投入使用. 几年来, 我们在这条新束线上, 做了大量软X光探测元器件标定工作.

## 2 实验装置及条件

实验装置如图1, 主靶室内有样品台, 样品台可作水平移动, 还可作360°转动, 样品台上可同时放置4块滤光片, 在不破坏真空的情况下, 一次可做4块滤光片透过率标定曲线. 做滤光片透过率曲线时, 当来自束线的单色光透过滤片时, 利用样品台后面的源强监测器(AXUV-100)监测信号<sup>[5]</sup>, 输出信号用美国Keithley公司的6517A弱电流计记录.

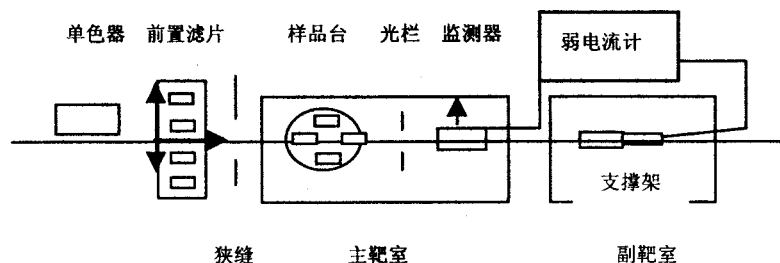


图1 软X光探测元器件标定装置示意图

由于XRD, CCD及其它软X光探测设备体积大, 份量重, 且主靶室空间有限, 不能直接放在主靶室中标定, 因此主靶室光轴后面附加副靶室, 作这些大型探测设备标定, 副靶室内探测器支架可作二维移动, 以便探测器标定时对准光轴. 标定探测器可放副靶室内, 也可连接在副靶室外.

BSRF采用专用光运行模式, 贮存环内加速电子能量2.2GeV, 电子束流强度40—110mA, 主靶室真空度 $10^{-4}—10^{-5}$ Pa, 副靶室真空度 $10^{-3}—10^{-4}$ Pa, 分别自带真空系统, 便于标定探测器更换.

## 3 标定实验

3W1B束线是采用变间距光栅分光, 色散光中必然存在高次衍射, 通过1000pl/mm透射光栅分析, 高次衍射光约占光束总能量的20%—30%, 也就是说, 从单色器过来的

光束单色性较差, 这将严重影响探测器的响应曲线标定精度. 我们采取滤波法消除高次衍射, 即在不同能量段设置适当厚度、相应材料的前置滤光片, 以满足光束单色性要求. 图 2 给出有代表性的 400eV 能点处光源单色性研究结果, 单色性好于 95%. 对于源强监测, 鉴于目前国内无软 X 光能区计量标准, 采用美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 硅光二极管作次级标准探测器.

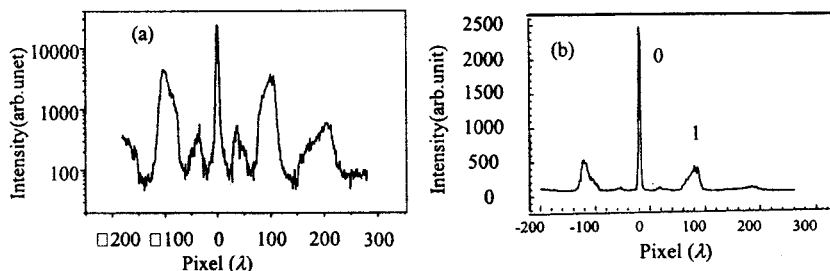


图 2 光源单色性研究结果

(a)光子能量 400eV 处未加前置滤片的光栅透射谱; (b)加 Ti 滤片后的光栅透射谱.

## 4 实验结果

3W1B 束线建成后, 共进行了 4 轮标定实验, 主要工作有 XRD(Au,Al)灵敏度、平面镜与多层镜的反射率、滤光片的透过率、透射光栅的衍射效率及其结构参数的测量、软 X 光胶片的能谱响应、X 光 CCD 与 X 光条纹相机的静态性能研究等等. 图 3 给出部分软 X 光探测元器件能量响应标定结果.

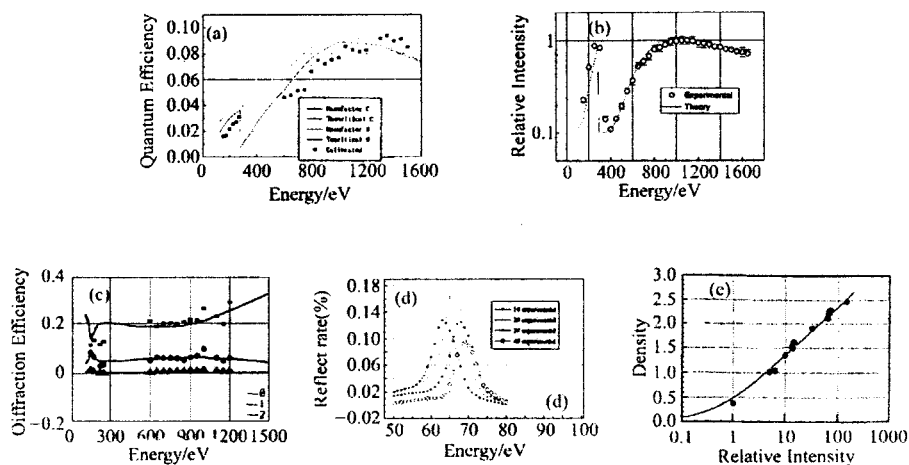


图 3

上排从左至右分别为软 X 光面阵 CCD 量子效率、软 X 光条纹相机的静态响应和增益曲线;

下排从左至右分别为透射光栅衍射效率、多层镜反射率和软 X 光胶片黑密度标定曲线.

## 5 标定结果分析与应用

由于篇幅有限, 这些标定探测元器件在 ICF 中的应用仅以软 X 光能谱测量为例, 软 X 光能谱测量以 XRD 阵列谱仪为主, 它涉及的探测元器件有滤光片、平面镜和 XRD, XRD 灵敏度值与阴极新鲜程度密切相关<sup>[9]</sup>, 最新鲜阴极 XRD 灵敏度最高, 弥散性最小, 随着 XRD 使用年限增加, 灵敏度值逐渐下降, 且弥散性增大. 这由两方面原因造成, 一是光阴极表面氧化造成物理性质变化, 影响光阴极量子效率; 二是光阴极表面沾污, 影响光阴极量子效率. 铝是一种化学特性较活泼的金属, 在空气中极易氧化, 形成  $Al_2O_3$ , 因此, 严格说铝阴极应称氧化铝阴极, 纯铝与氧化铝光阴极具有完全不同的量子效率曲线<sup>[9]</sup>. 铝阴极表面氧化层的厚度与其存放时间有关, 随存放时间延长而加厚, 当存放时间足够长, 氧化层足够厚, 以致超过其次级电子逃逸深度时, 其光阴极量子效率不再发生重大变化. 参见图 4(a).

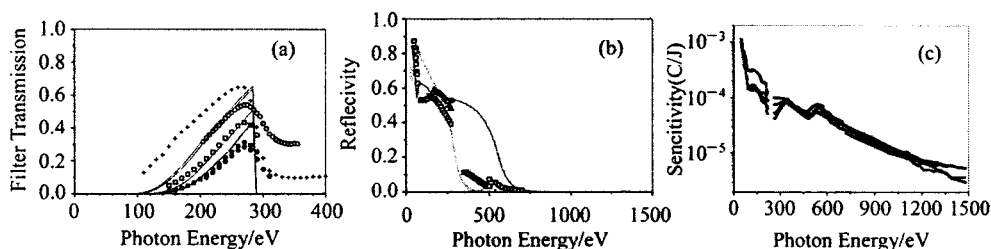


图 4

从左至右分别为 5 块 C 滤片透过率、5 个 Ni 平面镜反射率和 4 个阴极不同制备年限 XRD 灵敏度标定曲线。

(a) ■ C05 455 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{C-C}$ , □ C04 373 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{C-C}$ , ● C03 462 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{C-C}$ , ○ C02 234 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{C-C}$ , + C01 249 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ;

(b) ● 1989 Exp.Curve, △ 1999 Exp.Curve, □ 2000 Exp.Curve, — Cal.Curve(Ni), — Cal.Curve(C);

(c) ● 1102(2000), ▼ 1201(1999), ■ 1505(1998), ▲ 1219(1996).

从 5 个 Ni 平面镜反射率标定结果看, 其截止能量并不像理论计算值那么高, 截止能量计算值约在 550eV 附近, 而实验值是在 300eV 附近, 参见图 4(b). 过去 5 个 Ni 平面镜用于 400—450eV 能区分光时, 发现平面镜的反射率总是偏低, 起初以为是掠射角偏差问题, 仔细调整角度后, 仍然如此, 又以为是平面镜质量问题, 反复更换镜子, 还是如此, 甚至怀疑过通光孔道问题, 也被否决了, 这究竟是什么造成的呢? 当我们把 5 个 Ni 镜的标定值与 5 个 C 镜的理论计算值(见图 4(b)虚线)作比较时, 发现它们惊人地相似, 尤其在 200—400eV 能区. 这说明 5 个 Ni 镜表面附有 C 层, 镜面在 C 边能量附近大量吸收 X 光, 造成反射光严重下降. C 层来源于真空油汽的蒸发, 油汽附在 Ni 镜表面, 当采取酒

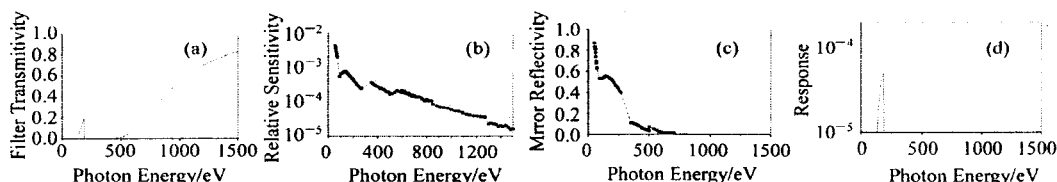


图 5 硼探测道能量响应函数

(a) B 滤光片透过率; (b) XRD 灵敏度; (c) 5° 镍平面镜反射率; (d) 能量响应函数。

精类常规清洗方法时, 很难将附着在镜面上的油污完全去除, 特别是平面镜长期在真空中使用, 已形成厚厚的一层油污沾污膜, 更难清洗. 图 4(c)为 5 块 C 滤光片透过率标定曲线.

2000 年 XRD 与平面镜均取得比较完整的标定曲线, 并用于神光 II 实验数据处理.

软 X 光能谱仪有 10 个探测道, 以 B 道为例(见图 5), 由于滤片、平面镜与 XRD 能量响应曲线均为实际标定值, 从而响应函数置信度大大提高.

## 6 不确定度分析

误差分析仍以软 X 光能谱测量为例, 谱仪涉及探测元件有滤光片、平面镜和 XRD 等, 主要误差来源于 XRD 灵敏度标定误差, 而 XRD 灵敏度标定误差又主要来自源强绝对监测, 监测器本身存在 10%—20% 的测量误差(参见图 2), 由此带来的 XRD 灵敏度误差是不可制约的, XRD 标定误差列于表 1.

表 1 铝阴极 XRD 灵敏度标定误差因素

能量/eV	≤100	150	250	600	800	1000	1200	1400
源 强	22	11	12	12	10	10	10	10
能量偏移	5	2	10	5	2	7	10	15
单 色 性	5	1	3	3	2	1	1	1
发 散 度	3	3	3	3	3	3	3	3
本 底	2	5	5	10	5	5	10	10
记录系统	2	2	2	2	2	2	2	2
总均方根(%)	23.5	12.8	16.3	17.1	12.0	13.3	17.7	21.0

滤光片透过率及平面镜反射率标定时, 入射光、透射光和反射光均采用同一探测器记录, 数据采集与处理基本相同, 均为记录信号电流的相对比值, 光源强度绝对监测对标定结果影响很小, 加之束流寿命长和稳定性好, 相对比值对束流强度变化的修正往往小于±1%, 主要误差来源于相对几何位置的偏差, 适当控制光栏尺寸及探测器几何位置, 可使滤光片透过率及平面镜反射率标定误差小于±5%.

堵口效应对辐射谱的影响, 是一个复杂的物理问题, 通过多针孔时空分辨成像初步观测堵口现象及数据分析处理, 给出了堵口效应修正因子, 根据现有实验结果分析估算, 堵口效应修正因子误差≤±10%.

表2给出软X光总量测量误差, 总的均方根误差≤±28%, 根据斯提芬-玻尔兹曼定律, 等效辐射温度测量误差≤±7%. 美国人腔靶辐射温度测量误差已达到±5%, 也就是说辐射X光总量测量误差必须≤±20%.

表2 软X光总量测量误差

误差因素	误差(%)
XRD灵敏度	±17
角分布	±15
数据处理	±10
堵口修正	±10
滤片透过率	±5
平面镜反射率	±5
几何因素	±2
记录系统	±2
总均方根误差	±27.8

在 BSRF 上软 X 光探测元件的能量响应标定实验中, 受到中国科学院高能所的各级领导及加速器运行人员的关心、支持和帮助, 在此一并表示衷心感谢。

### 参考文献(References)

- 1 YU Min. Prospects for Inertial Confinement Fusion, CAEP-0001,HL-0001,1988(in Chinese)  
(于敏. 惯性约束聚变展望, CAEP-0001,HL-0001,1988)
- 2 CHANG Tie-Qiang, HE Xian-Tu, YU Min. High Power Laser and Particle Beams, 1989,1(3):193—209(in Chinese)  
(常铁强, 贺贤土, 于敏. 强激光与粒子束, 1989, 1(3):193—209)
- 3 QI Lan-Ying, ZHANG Wen-Hai, LI San-Wei et al. High Power Laser and Particle Beams, 1991,3(4):503—511(in Chinese)  
(祁兰英, 张文海, 李三伟等. 强激光与粒子束, 1991, 3(4):503—511)
- 4 CUI Min-Qi, LIU Li-Bing, XU Wen-Xu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1992, 16(8):673—678(in Chinese)  
(崔明启, 刘丽冰, 徐文轩等. 高能物理与核物理, 1992, 16(8):673—678)
- 5 CUI Cong-Wu, CUI Min-Qi, YI RONG-Qing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22(2):180—184(in Chinese)  
(崔聪悟, 崔明启, 易荣清等. 高能物理与核物理, 1998, 22(2):180—184)
- 5 Henke B L, Smith J A, Attwood D T. J. App. Phys., 1977, 48(5):1852
- 6 Henke B L, Knauer J P, Premaratne K. J. Appl. Phys., 1981, 52(3):1509
- 7 Saloman E B. Nuclear Instruments and Methods, 1980, 172:79—87

## Applications for Synchrotron Radiation in Inertial Confinement Fusion Research\*

SUN Ke-Xu YI Rong-Qing HUANG Tian-Xuan CUI Yan-Li  
YANG Jia-Min JIANG Shao-En DING Yong-Kun ZHANG Bao-Han  
WANG Hong-Bin WEN Shu-Huai ZHENG Zhi-Jian

(National Key Laboratory for Laser Fusion, Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

CUI Ming-Qi ZHU Pei-Ping ZHAO Yi-Dong LI Gang TANG E-Sheng  
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** In this paper the calibrations of different soft X-ray detector elements used experiment diagnostics of ICF in Beijing Synchrotron Radiation Facility-3W1B beam is reported. SR used special operation type with beam current 35—110mA, the storage ring electron energy 2GeV, photon energy region 50—1500eV. First, property of light source was studied by transmission grating-face array CCD system. We have divided 50—1500eV energy region in seven energy section through different material prefilter with monochromaticity better 95%. The AXUV-100 photodiode produced by IRD of America as secondary standard monitored light source intensity. The successive adjust monochromatic light was contained through reflectometer target chamber and relative adjust facility. The sensitivity of XRD(Au,Al), the reflectivity of planar mirror and multi-layer mirror, the transmissivity of different material filter, the diffraction efficiency of transmission grating, the energy response curve of soft X-ray film, the quantum efficiency of face array CCD and the still property of soft X-ray streak camera et al. were calibrated. Finally, the experiment data treatment in Shenguang-II were used by many calibration result, which secure data treatment accuracy.

**Key words** synchrotron radiation, soft X-ray, sensitivity, reflectivity, transmissivity