

同步辐射应用于软 X 射线探测器的标定*

孙可煦^{1;1)} 易荣清^{1;1)} 江少恩¹ 杨家敏¹ 黄天暄¹ 崔延莉¹ 杨国洪¹
丁永坤¹ 刘慎业¹ 张保汉¹ 王红斌¹ 温树槐¹ 郑志坚¹ 江文勉¹
赵永宽¹ 崔明启² 朱佩平² 赵屹东² 黎刚² 朱杰² 郑雷² 唐锴生²

1(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国家重点实验室 绵阳 621900)

2(中国科学院高能物理研究所同步辐射国家重点实验室 北京 1000339)

摘要 介绍同步辐射(SR)在惯性约束聚变(ICF)研究中的应用. 北京同步辐射光源(BSRF)在专用光运行模式下,束流强度 35—110mA,贮存环电子能量 2GeV. 标定前,首先采用 1000PL/mm 透射光栅作色散元件,对光源进行单色性研究,用面阵软 X 光 CCD 对光斑进行均匀性研究. 在 3W1B 束线上,可用能区 50—1550eV,通过不同材料前置滤片抑制高次谐波,获得单色性好于 95% 的单色光. 几年来,对十余种 ICF 实验诊断用软 X 光探测元器件及设备进行了能量响应绝对标定. 大量实验标定数据被用于 ICF 实验诊断,提高了 ICF 实验数据的精度.

关键词 同步辐射 软 X 射线 灵敏度 反射率 透过率

1 前言

在激光间接驱动 ICF 研究中,辐射场的重要性是众所周知的^[1,2]. 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,不论是快速成像装置(如软 X 光扫描相机(SXRSC)及多分幅成像相机(MFSC)等)配置时、空、谱诊断系统(如针孔(PH)及透射光栅(TG)等),还是独立的软 X 光探测器(如 XRD, TG、光电导探测器(PCD)以及软 X 光胶片等等),无不向着绝对测量方向发展. 这就需要对涉及软 X 光时、空、谱诊断的探测元、器件进行能量响应绝对标定. 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,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,即具有使用简便、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.

早期我们曾经建立了 Henke 源和质子荧光光源^[3], 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. 质子荧光光源虽然特征能量光子通量可达(10^{12} — 10^{13})光子数/s/4 π ,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/cm²,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,还是不能满足我们的需要.

SR 光源作为软 X 光探测器标定源,它具有其他标定源(如质子荧光源、Henke 源、同位素源等)无法比拟的优点,如高强度(10^{12} — 10^{13} photon/s·mm²·mrad²·1%),准直性,小发散角(水平方向 7.6×10^{-8} mrad),高稳定性(束流寿命 15—20 小时),还具有脉冲时间特性等等优点. 因此,SR 光源在我国问世后^[4,5],我们即时地参与了光源建设工作,1997年底

2003-03-17 收稿,2003-10-05 收修改稿

* 国家高技术研究发展计划(863-416-3)资助

1) E-mail: yrqing@sina.com

3W1B 新束线建成并投入使用. 几年来, 在这条新束线上进行了多轮实验, 对不同材料阴极的 X 射线二极管(XRD)灵敏度、不同材料平面镜和多层镜的反射率、不同材料滤光片的透过率、软 X 光透射光栅的衍射效率、不同感光度的软 X 光胶片能量响应、软 X 光 CCD 的量子效率等等进行了能量响应绝对标定, 以及对软 X 光高速扫描相机进行了静态响应性能研究和软 X 光透射光栅的结构参数研究. 大量实验标定数据被用于 ICF 实验诊断, 保证了 ICF 实验数据具有一定精度^[6,7].

2 实验装置及条件

实验在北京同步辐射装置(BSRF)上进行, 利用 BSRF-3W1B 束线及其反射率计靶室(主靶室)作滤光片、透射光栅、PCD 等等小型探测元器件标定实验. 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^[8], 输出信号用美国 Keithley 公司的 6517A 弱电流计记录. 实验装置如图 1.

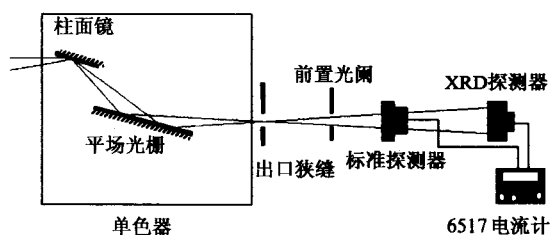


图 1 软 X 光探测元器件标定装置示意图

由于 XRD, CCD 及其他软 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, 以便标定时探测器的灵敏面对准光轴. 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 ~ 2GeV, 电子束流强度 35—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

到目前为止, 在软 X 光能区, 国内还没有正式

计量标准, 为了解决源强绝对监测问题, 积极推动并参与了源强监测研究. 除了研制自己的计量标准——软 X 光电离室和流气正比计数管外, 还采用美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 硅光二极管作次级标准探测器. 1998 年, 软 X 光电离室在美国标准和技术研究所(NIST)的 BNC 实验室做了量子效率比对, 同时, AXUV-100 也做了能量响应绝对标定^[5], 用这种绝对标定过的 AXUV-100 作源强监测的次级标准.

3W1B 束线是采取变间距光栅分光, 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. 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%.

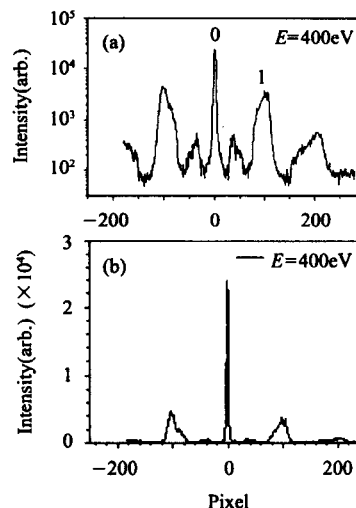


图 2 光源单色性研究结果

- (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.

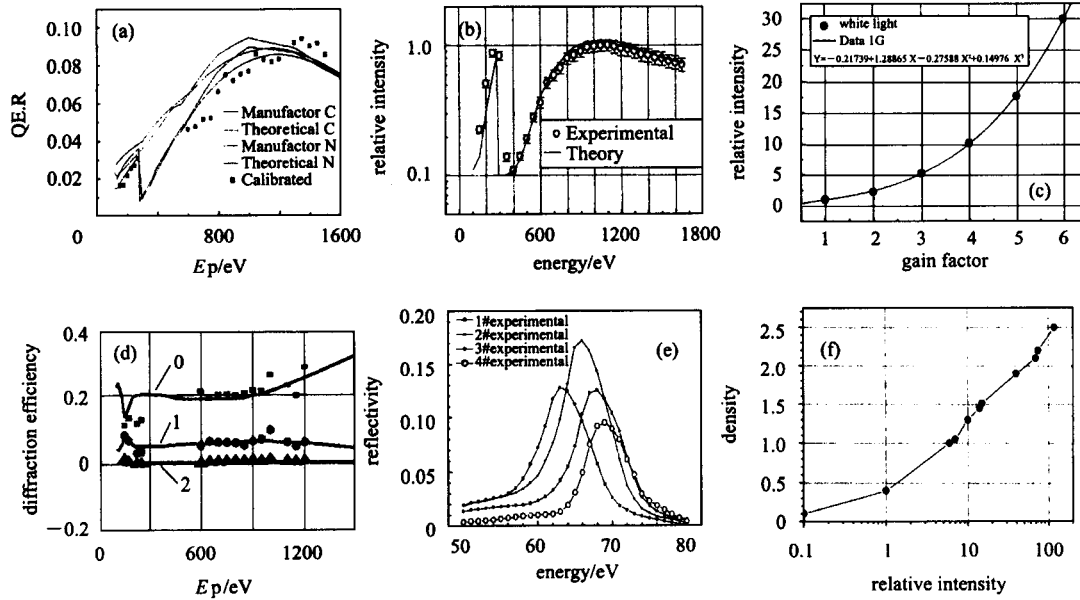


图 3 (a),(b),(c)分别为软 X 光面阵 CCD 量子效率、软 X 光条纹相机的静态响应和增益曲线；
(d),(e),(f)分别为透射光栅衍射效率、多层镜反射率和软 X 光胶片黑密度标定曲线

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 基本工作原理,光阴极吸收 X 光产生光电子及部分俄歇电子与荧光,除少部分光电子及荧光能逃出阴极表面外,大部分能量以光电子动能形成沉积于阴极表层吸收区内,这部分光电子与其他原子相互作用,使更多原子受

激,产生更多低能自由电子,称此为次级电子,次级电子的数目比初级电子的数目大得多,逸出光阴极表面的电子(主要为次级电子)被阳极收集形成 XRD 信号电流^[9,10]. XRD 灵敏度值与阴极新鲜程度密切相关^[11],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

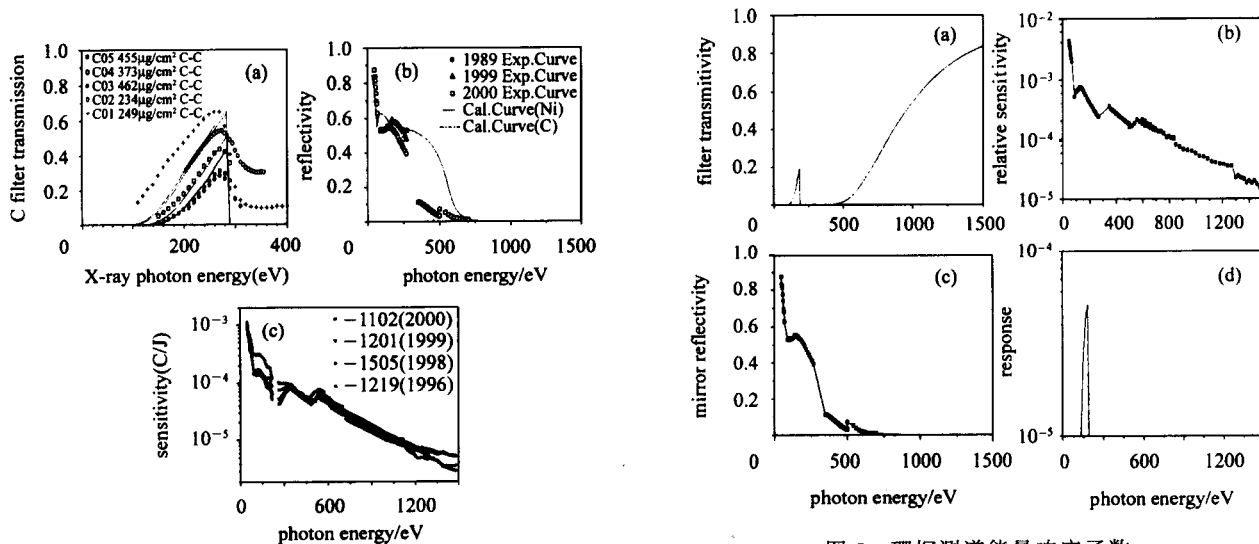


图 4 (a),(b),(c)分别为 5 块 C 滤片透过率、5°Ni 平面镜反射率和 4 个阴极不同制备年限 XRD 灵敏度标定曲线

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

极,纯铝与氧化铝光阴极具有完全不同的量子效率曲线^[11].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(c).

从 5°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°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,也被我们否决了,这究竟是什么原因造成的呢?当把 5°Ni 镜的标定值与 5°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°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,当采取酒精类常规清洗方法时,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,已形成厚厚的一层油汽沾污膜,更难清洗.图 4(a)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,参见图 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 误差分析

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.

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 $\pm 1\%$,主要误差来源于相对几何位置的偏差,当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 $\pm 5\%$.

表 1 铝阴极 XRD 灵敏度标定误差因素

能量/eV 误差	≤100	150	250	600	800	1000	1200	1400
	误差因素 (%)							
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

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

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 $\leq \pm 10\%$.

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

我们在 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. Look into the Inertial Confinement Fusion, China Academe of Engineering Physics, CAEP-001, HL-0001, 1988
- 2 CHANG Tie-Qiang et al. High Power Laser and Particle Beams, 1989, 1(3):193-209 (in Chinese)
(常铁强等. 强激光与粒子束, 1989, 1(3):193-209)
- 3 QI Lan-Ying et al. High Power Laser and Particle Beams, 1991, 3(4):503-511 (in Chinese)
(祁兰英等. 强激光与粒子束, 1991, 3(4):503-511)
- 4 CUI Min-Qi et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1992, 16(8):673-678 (in Chinese)
(崔明启等. 高能物理与核物理, 1992, 16(8):673-678)
- 5 CUI Min-Qi et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1995, 19(1):82-86 (in Chinese)
(崔明启等. 高能物理与核物理, 1995, 19(1):82-86)
- 6 SUN Ke-Xu et al. ACTA PHYSICA, 1997, 46(4):650-655 (in Chinese)
(孙可煦等. 物理学报, 1997, 46(4):650-655)
- 7 SUN Ke-Xu et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(5):448-454 (in Chinese)
(孙可煦等. 高能物理与核物理, 2001, 25(5):448-454)
- 8 CUI Cong-Wu et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1998, 22(2):180-184 (in Chinese)
(崔聪悟等. 高能物理与核物理, 1998, 22(2):180-184)
- 9 Henke B L, Smith J A, Attwood D T. J. App. Phys., 1977, 48(5):1852
- 10 Henke B L, Knauer J P, remaratne K P. J. Appl. Phys., 1981, 52(3):1509
- 11 Saloman E B. Nuclear Instruments and Methods, 1980, 172:79-87

Calibration of Soft X-Ray Detection with Synchrotron Radiation*

SUN Ke-Xu^{1,1)} YI Rong-Qing^{1,1)} JIANG Shao-En¹ YANG Jia-Min¹ HUANG Tian-Xuan¹
 CUI Yan-Li¹ YANG Guo-Hong¹ DING Yong-Kun¹ LIU Shen-Ye¹ ZHANG Bao-Han¹
 WANG Hong-Bin¹ WEN Shu-Huai¹ ZHENG Zhi-Jian¹ JIANG Wen-Mian¹ ZHAO Yong-Kuan¹
 CUI Ming-Qi² ZHU Pei-Ping² ZHAO Yi-Dong² LI Gang² ZHU Jie² ZHENG Lei² TANG E-Sheng²

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

2(SR Laboratory of Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract In this paper the calibrations of different soft X-ray detector elements used in experiment diagnostics of Inertial Confinement Fusion (ICF) with Synchrotron Radiation is reported. Beijing Synchrotron Radiation Facility used special operation type with beam current 35—110mA, the storage ring electron energy 2GeV, photon energy region 50—1500eV. The performance of the light source is studied by transmission grating and face array CCD system. We divide 50—1500eV energy region in seven energy section through different material prefilter with monochromaticity than 95%. The energy response of different soft X-ray detector elements are calibrated. The calibration results are used in ICF data analysis, which secures the accuracy of data treatment.

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

Received 17 March 2003, Revised 5 October 2003

* Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863-416-3)

1) E-mail: yrqing@sina.com