

软 X 光能谱仪探测元件响应曲线标定*

孙可煦 易荣清 黄天晖 崔延莉 丁永坤
杨家敏 张保汉 江少恩

(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防科技重点实验室 绵阳 621900)

崔明启 朱佩平 赵屹东 黎刚

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 报道了软 X 光能谱仪探测元件的能量响应曲线标定工作。实验利用北京同步辐射装置-3W1B束线及反射率计靶室,在束流40—80mA、贮存环电子能量2.2GeV专用光运行模式下,在150—1500eV能区的四个能段,做了铝阴极 X 射线二极管、滤光片及掠入射平面反射镜能量响应标定实验。通过实验数据对比及分析,最终给出 X 射线二极管在不同能量段最大可能的测量误差范围。

关键词 同步辐射 X 射线二极管 滤光片 平面镜

1 前言

间接驱动惯性约束聚变(ICF)研究,辐射场的重要性是不言而喻的^[1]。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(SXR-SC)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 光探测阵列(如 X 射线二极管(XRD)及光电导探测器(PCD)等),无不向着绝对测量方向发展。在众多时、空、谱诊断技术中,作为谱绝对强度测量,由滤片-XRD阵列组成的软 X 光能谱仪,仍不失占有独特优势^[2],其中关键因素,就是这种谱仪的软 X 光探测元件的能量响应曲线易于绝对标定,且标定结果,相对其他探测技术而言,具有相对高的精度。本文主要描述滤片-XRD阵列谱仪的单个软 X 光探测元、器件能量响应曲线的绝对标定。

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束线及其反射率计真

2000-02-02 收稿

* 国家高技术研究发展计划资助(863-416)

空室^[3](主真空室)作滤光片透过率标定. 主真空室内有样品台, 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, 当来自单色器的单色光透过滤片, 利用样品台后面的源强监测器(AXUV-100)监测信号, 信号引出真空室再用美国 Keithley 公司的 6517A 弱电流计记录. 实验装置如图 1.

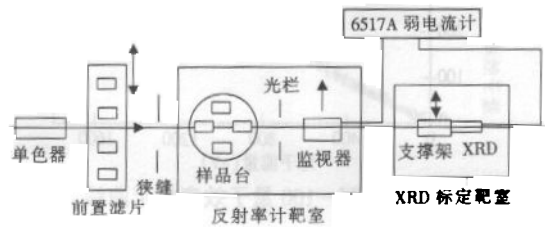


图 1 滤光片及 XRD 能量响应曲线标定装置示意图

由于 XRD 体积大, 份量重, 且主真空室空间有限, XRD 不宜放在主真空室中标定, 因此主真空室光轴后面附加副真空室, 作 XRD 灵敏度标定, 副真空室内探测器支架可作两维移动, 以便 XRD 标定时对准光轴. XRD 标定信号同样引出真空室, 用 6517A 弱电流计记录. 实验装置参见图 1.

BSRF 采用专用光运行模式, 贮存环电子能量 2.2 GeV, 贮存环电子束流强度 40~80 mA, 主真空室真空度 10^{-4} — 10^{-5} Pa, 副真空室真空度 10^{-3} — 10^{-4} Pa, 分别自带真空系统, 便于标定探测器更换.

3 源强绝对测量

软 X 光能谱仪探测元件能量响应曲线绝对标定的目的是提高谱仪探测精度, 这是我们最关心, 也是最困难的问题. 利用 BSRF-3W1B 束线, 首先涉及光源的监测, 需从两方面考虑, 一是光源的单色性, 二是源强的绝对测量. 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 1000 l/mm 透射光栅分析, 高次衍射光约占光束总能量的 20%—30%, 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. 3W1B 束线受几何结构限制, 仅可设置 4 种材料前置滤光片, 得到 4 个单色性好于 97% 的能量段, 表 1 给出这 4 个能量段的参数.

表 1 前置滤光片参数

滤光片材料	厚度(μm)	有效能区(eV)	光子通量(phs/s·mA)
C	0.53	150~280	10^9 — 10^{10}
Ni	0.70	600~750	10^8 — 10^9
Mg	2.20	800~1200	$\sim 10^9$
Be	10.0	1300~1500	$\sim 10^9$

在这段软 X 光能区, 国家计量局还没有正式标准, 为了作源强绝对监测, 我们采用美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 硅光二极管作标准探测器. AXUV-100G 在美国标准

技术研究所(NIST)和BNL实验室做了能量响应绝对标定^[4],标定结果见图2,我们用这种绝对标定过的AXUV-100作源强监测的次级标准

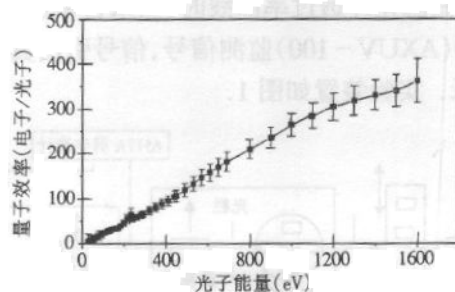


图2 AXUV-100量子效率标定曲线

4 实验结果

我们利用上述四个能段,对软X光能谱仪的XRD、滤光片及Ni材料平面反射镜做了能量响应曲线标定实验.

4.1 XRD灵敏度标定

作为软X光能谱仪的关键探测元件——XRD,我们主要关心它的响应时间,光阴极的量子效率、理化稳定性等.这里我们共对31只铝阴极及18只金阴极XRD做了量子效率标定,以铝阴极XRD为例,XRD量子效率(也即灵敏度)与阴极表面加工精度及新鲜程度密切相关.根据阴极加工条件及制备、或安装时限,大致把XRD分为三批,图3给出这三批不同制备年限XRD的灵敏度值.

4.2 滤光片透过率标定

作为软X光能谱仪的色散元件,主要利用不同材料的K边或L边突变实现分光.谱仪的不同能道选择适当厚度的不同材料薄膜作滤光片.这里共对8种材料滤光片做了透过率标定曲线,标定结果表明,滤光片标定对光束质量要求较严,以C滤片标定为例,图4给出5块C滤片透过率标定结果,图中前4块C滤光片透过率曲线是在光束单色性好于97%的条件获得的,标定值与标称(百万分之一克天平称重)计算值符合较好,偏差小于 $\pm 5\%$.第5块C滤片透过率曲线是在光束单色性较差条件下获得的,标定值与标称值偏差较大.

4.3 镍平面镜反射率标定

软X光能谱仪的另一重要分光元件——掠入射平面反射镜,镜面材料根据能道要求截止能量选择,原子序数低则截止能量低.但还必须考虑表面加工精度(表面粗糙度要求 $\leq 1\text{nm}$)及理化稳定性.我们选择的是镍材料.图5给出 5°Ni 平面镜反射率标定结果,由于光源限制,我们只能选择150—280eV能段做反射率标定,标定曲线1是在镜面朝上条件下获得的,曲线2是在镜面转 180° 条件下获得,图5中实线是根据镜面表面粗糙度给出

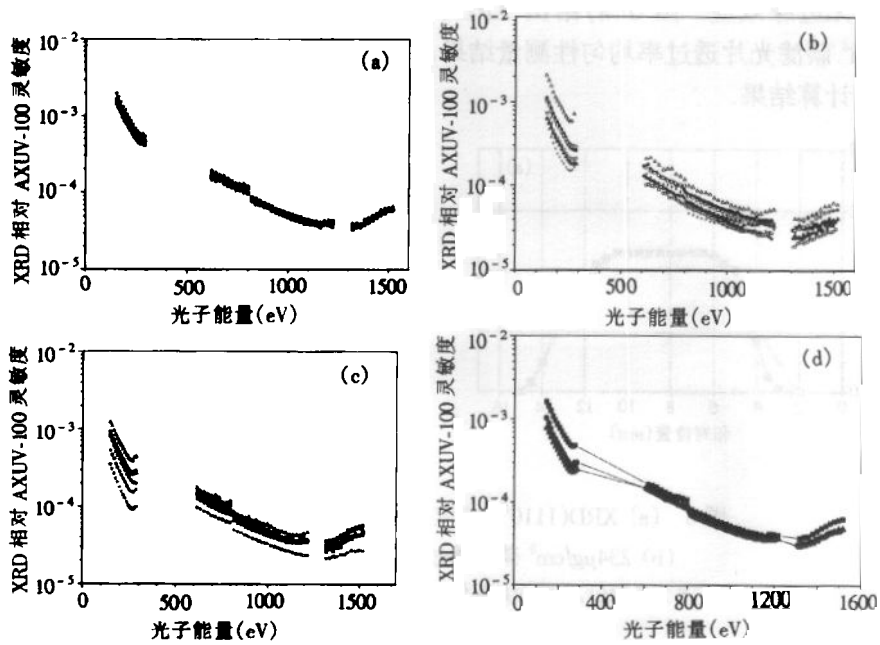


图 3 XRD 灵敏度标定值

(a) 1999 年制备 XRD 灵敏度; (b) 1998 年制备 XRD 灵敏度;

(c) 1997 年以前制备 XRD 灵敏度;

(d) ■、●和▲分别为 1999, 1998 和 1997 年以前制备 XRD 标定灵敏度平均值的计算值。由此可见, 标定值与计算值基本吻合

由此可见, 标定值与计算值基本吻合

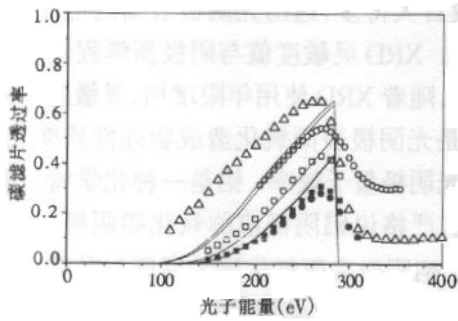


图 4

■、●、●和○分别为 455, 373, 462 和 234 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 碳膜在光束单色性好于 97% 条件下透过率标定曲线, 实线为计算值; Δ 为 249 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 碳膜在光束单色性较差条件下的标定曲线。

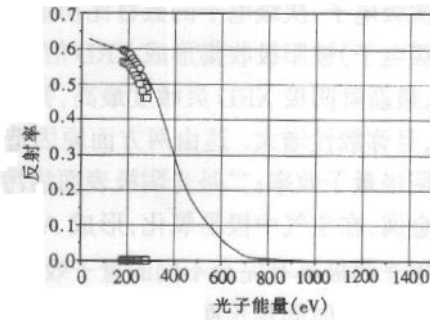


图 5

○和□为两组 5°Ni 平面镜反射率标定值, 实线为计算值。

4.4 XRD 及滤光片灵敏面均匀性

XRD 及滤光片灵敏面均匀性研究的目的是; 一看灵敏面加工均匀性, 二看正常使用

条件下有无边缘效应. 图 6(a) 给出 XRD(1110[#]) 响应均匀性测量结果, 图 6(b) 给出 234 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 碳滤光片透过率均匀性测量结果. 图中实线是根据光束辐照面与灵敏面重叠几何关系计算结果.

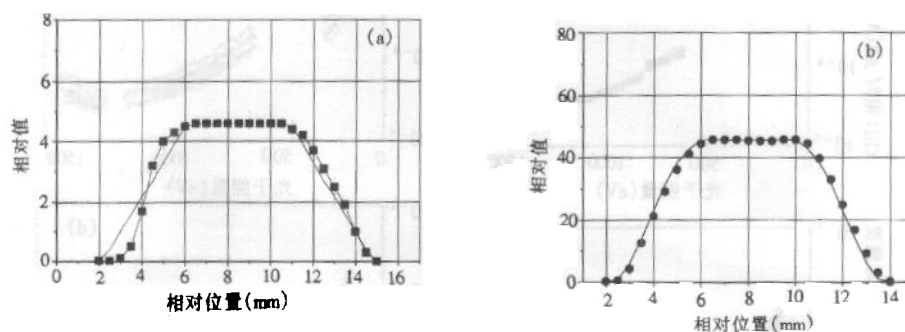


图 6 (a) XRD(1110[#]) 响应随阴极面辐照位置变化曲线;

(b) 234 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 碳膜透过率随辐照位置变化曲线

■ 为实验值, 实线为计算值; ● 为实验值, 实线为计算值.

5 讨论

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, 我们称此为次级电子, 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^[5,6]. XRD 灵敏度值与阴极新鲜程度密切相关^[7], 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^[5]. 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, 图 3(c) 中即为一批纯铝阴极存放一年以上 XRD 的量子效率曲线(相对 AXUV-100), 弥散性小. XRD 灵敏度值对沾污特别敏感, 图 3(a) 与 (b) 中的 XRD 光阴极属同一批加工, 不同处在于 3(b) 中 XRD 一年前安装后使用过一个月, 且在真空中使用, 氧化程度不会有太大变化, 量子效率却有明显变化, 尤其在 150—250eV 能区, 这主要是光阴极表面沾污的影响, 次级电子本身能量很低, 逃逸深度很浅, 较薄的表面沾污即严重影响光阴极的量子效率. 真空中的沾污源主要是泵油汽, 泵油的主要成分是碳与氢. 当 XRD 使用时间长(见图 3(c)), 光阴极表面油沾污严重, XRD 实际量子效率相当于碳、氢光阴极量子效率, 显然碳、氢材料的量子效率比氧化铝的低得多, 因此, 严重沾污的 XRD 灵敏度将下降 1—3 倍因子.

滤光片透过率标定误差远小于 XRD 标定误差, XRD 灵敏度标定误差主要来源在源强绝对监测, 监测器本身存在 10%—20% 的测量误差, 由此带来的 XRD 灵敏度误差是不可限制的. 而滤光片透过率标定是采取相对测量, 系统偏差可以消除. 以碳滤光片透过率标定结果为例(见图 4), 对光束的单色性要求更高, 尤其是对我们所用标准探测器为硅光二极管而言, 它的量子效率与光子能量成线性关系, 光束中的高次谐波将造成监测信号成倍地增长, 严重影响滤光片透过率的标定结果.

平面镜反射率标定与滤光片透过率标定类似, 都是作相对测量, 源强监测偏差可作为系统偏差消除. 平面镜反射率标定同样对光束单色性要求较高, 不同的是滤光片是测量透射光而平面镜是测量反射光, 若光束中存在高次谐波, 当高次谐波落在反射率曲线内时, 则增加反射光信号, 当高次谐波落在反射率曲线外时, 则减弱反射光信号, 都不能如实反映平面镜的反射率曲线. 平面镜反射率标定时, 还必须严格控制光轴的准直性, 由于光束具有一定的发散度, 光束焦点与光斑又有一定距离(约 2.5m), 光束稍微偏离光轴, 发散的光斑即可能跑出探测器灵敏面外, 造成信号丢失.

XRD 与滤光片灵敏面均匀性研究结果表明, 在它们的灵敏面范围内, 具有均匀的能量响应曲线, 不均匀性 $< \pm 1\%$. 图 6 中的实线都是根据光斑与灵敏面重叠的几何关系计算结果, 实验值与计算值符合较好, 说明这两种探测元件不存在边缘效应.

6 误差分析

在软 X 光能区(50—2000eV)软 X 光探测元件能量响应曲线标定, 由于国内还没有正式的绝对计量标准, 这对我们的工作是十分不利的. 目前, 我们只能借助美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 作次级标准探测器, 它的能量响应曲线(见图 2)是由美国 NIST 和 BNL 实验室给出, 尚存在较大测量误差, 因此, 我们的软 X 光探测元件响应曲线标定误差主要受制于这种探测器的源强监测. 其次是光源自身的误差因素, 如单色器的高次谐波, 能量偏移, 能量分辨, 杂散光, 光束发散度等, 以及测量记录系统与本底等, 以 XRD 为例现将其标定误差列于表 2.

表 2 铝阴极 XRD 灵敏度标定误差因素

能量 (eV)	150	250	600	800	1000	1200	1400
误差因素	误差 (%)						
源强	11	12	12	10	10	10	10
能量偏移	2	10	5	2	7	10	15
单色性	1	3	3	2	1	1	1
发散度	3	3	3	3	3	3	3
本底	5	5	5	5	5	5	5
记录系统	2	2	2	2	2	2	2
总均方根	12.8	17.1	14.7	12.1	13.7	15.5	19.1

参考文献 (References)

- 1 CHANG Tie-Qiang et al. High Power Laser and Particle Beams, 1989, 1(3):195(in Chinese)
(常铁强等. 强激光与粒子束, 1989, 1(3):195)
- 2 Kilkenny J D et al. Diagnostic Systems for the National Ignition Facility. Rev. Sci. Instrum. 1995, 66(1):288
- 3 CUI Min-Qi et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. ,1996, 20(9):847(in Chinese)
(崔明启等. 高能物理与核物理, 1996, 20(9):847)
- 4 CUI Cong-Wu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. ,1998, 22(2):180(in Chinese)
(崔聪悟等. 高能物理与核物理, 1998, 22(2):180)
- 5 Henke B L, Smith J A, Attwood D T. J. Appl. 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

**Calibration of Energy Response of Detection Elements
for Soft X-Ray Spectrometer**

SUN Ke-Xu YI Rong-Qing HUANG Tian-Xuan CUI Yan-Li DING Yong-Kun,
YANG Jia-Min ZHANG Bao-Han JIANG Shao-En

(Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

CUI Ming-Qi ZHU Pei-Ping ZHAO Yi-Dong LI Gang

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

Abstract The calibration of the energy response of the detection elements for soft X-ray spectrometer is reported. The calibration is carried out Beamline 3W1B of Beijing Synchrotron Radiation Facility with beam intensity 40—80mA at electron energy 2.2GeV, using vacuum chamber of reflectometer on An AXUV-100 silicon photodiode is used as the source intensity absolute monitor in the photo energy rang 150—1500eV. The energy response curves for X-ray diode (XRD) quantum efficiency, filter transmittance and grazing planar mirror reflection efficiency have been measured. Finally, the possible maximum errors of the XRD at different energies are given based on these experimental data.

Key words synchrotron radiation, X-ray diode, filter, mirror

Received 2 February 2000

* Supported by National Hi-Tech(863 - 416)