

滤波差分法测量软 X 射线谱*

孙可煦 江少恩 黄天暄 易荣清 崔延莉 王红斌
陈久森 于瑞珍 丁耀南 丁永坤 唐道源 温树槐

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所高温、高密度等离子体物理重点实验室 成都 610003)
(1999 年 1 月 25 日收到;1999 年 5 月 10 日收到修改稿)

研究一种测量激光等离子体发射软 X 射线谱强度的新方法——滤波差分法.介绍了滤波差分法基本原理,给出了滤波差分法的理论计算结果及实验测量结果,并用此方法获得软 X 射线谱的绝对强度,最后对测量光谱强度的误差进行分析和估算.

PACC: 5250J; 5225P; 5270; 2970

1 引 言

在激光惯性约束聚变(ICF)研究中,特别是激光与高 Z 靶的耦合,软 X 射线谱是大家十分关心的重要物理量^[1].随着实验条件的不断变化,光谱呈现形式也随之发生相应变化,为了获得具有一定测量精度的光谱绝对强度,人们一直在努力寻求一种既简单,又能如实反映光谱结构的探测方法.

在以往的实验测量中,最常用的软 X 射线谱强度诊断方法是滤波法^[2],即采用滤片 X 射线二极管阵列(F-XRD)测量软 X 射线谱.这种诊断方法比较简单.探测系统相对易于作能量响应曲线绝对定标,可作软 X 射线谱强度绝对测量.基频光打靶时,由于激光吸收与 X 射线转换均较低,Au 靶发射 X 射线主要集中在 O 带与 N 带能区,滤波探测道高能尾部贡献较大的主要集中在低能道,因此,低能道配置掠入射软 X 射线平面反射镜^[3],即可基本消除高能尾部贡献的影响.随着三倍频激光打靶强度逐步提高,Au 等离子体吸收与 X 射线转换增加,Au 等离子体发射软 X 射线谱的“M 带”份额也不断增加.采用滤波法测量软 X 射线谱时,即使较高能道的高能尾部贡献也变得不可忽略,加之谱形的非平衡特性,解谱过程必然带来较大误差.

为了提高软 X 射线谱的探测精度,首先必须提高探测系统能量响应的单色性.除了已用的掠入射软 X 射线平面反射镜以外,还有透射光栅(TG)衍射法,晶体衍射法和多层膜反射镜分光法等,这些方法都有各自的优点和缺点,它们的应用范围都有各

自的局限性,此处不一一介绍.本文讨论一种既古老又新颖的分光法——滤波差分法^[4].

2 滤波差分法的基本原理

滤波差分法的基本原理是建立在滤波法基础上,利用两个原子序数相邻的材料 K 边或 L 边滤波波限,若两种材料的原子序数为 Z 和 Z+1,它们的吸收限为 $E_{L/K}(Z)$ 和 $E_{L/K}(Z+1)$,分别与 X 射线二极管(XRD)探测器组成两个滤波探测道,它们的响应函数为 $R_Z(E)$ 和 $R_{Z+1}(E)$,通过理论计算,选择相匹配的滤片厚度,使两个滤波探测道在低于 $E_{L/K}(Z)$ 能区和高于 $E_{L/K}(Z+1)$ 能区具有基本相同的响应结果,即

$$\int_0^{E_{L/K}(Z)} R_Z(E) S(E) dE = \int_0^{E_{L/K}(Z)} R_{Z+1}(E) S(E) dE, \quad (1)$$

$$\int_{E_{L/K}(Z+1)}^{\infty} R_Z(E) S(E) dE = \int_{E_{L/K}(Z+1)}^{\infty} R_{Z+1}(E) S(E) dE, \quad (2)$$

式中 $S(E)$ 为 XRD 的能量响应灵敏度曲线,若两个滤波探测道的测量信号分别为 Y_Z 和 Y_{Z+1} ,则 $\Delta Y = Y_{(Z+1)} - Y_{(Z)}$ (即为 $E_{L/K}(Z) - E_{L/K}(Z+1)$ 能区的探测信号),由能谱反演公式计算出各能点的绝对强度,所得到的反演公式为

$$I_i(\bar{E}_i) = \frac{\Delta Y_i}{\Delta \eta_i S(\bar{E}_i) \Delta \Omega_i \Delta E_i} \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad (3)$$

* 国家高技术研究发展计划(批准号:863-416-3-46)资助的课题.

其中 $I_i(\bar{E}_i)$ 为第 i 差分对所测谱的绝对强度, \bar{E}_i 为平均能点, $\Delta\eta_i$ 为第 i 差分对在 i 能区透过率的差分平均值, $S(\bar{E}_i)$ 为 XRD 的能量响应灵敏度, $\Delta\Omega_i$ 为 XRD 探测器所占的立体角.

在差分滤片对设计中,我们发现单一材料滤片对无论如何调节滤片厚度,很难做到相匹配,特别是

在高于 $E_{L/K}(Z+1)$ 能区, Z 材料滤片的响应结果往往高于 $Z+1$ 材料滤片响应结果,为此,我们在 Z 材料滤片中附加适当厚度 $Z+1$ 材料,组成复合滤片使之与 $Z+1$ 材料滤片相匹配,才能组成比较理想的滤波差分对,见图 1 五道滤波差分对理论计算结果.图中标注的数字的单位为 μm .

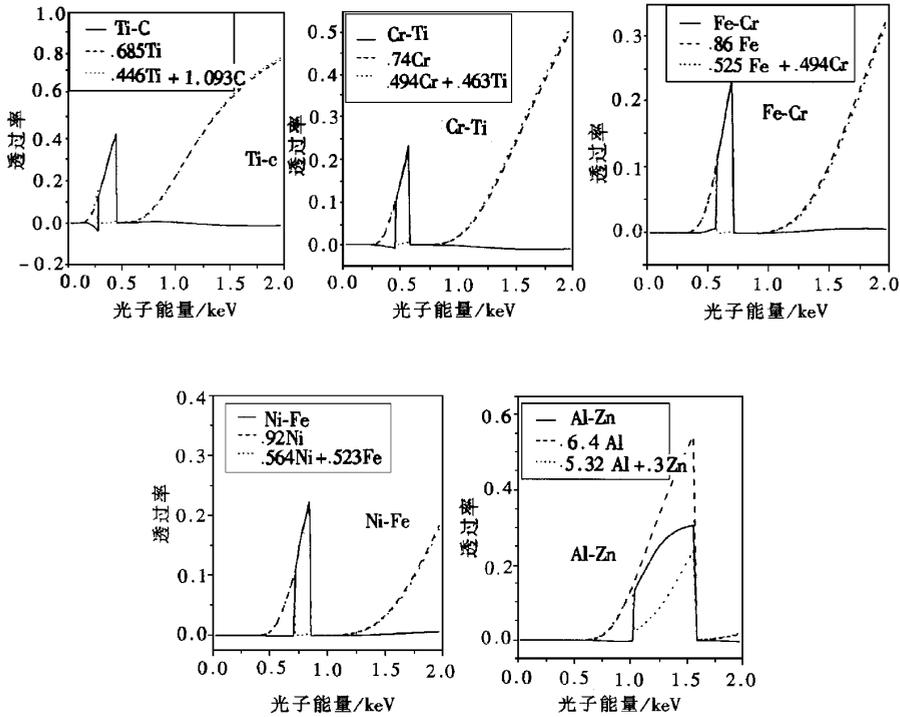


图 1 五道滤波差分对理论计算透过率曲线

3 一致性标定及实际差分对的选取

滤波差分法还有一个关键技术难点是选择具有同样能量响应曲线的探测器作差分对组合,以免由于探测器能量响应灵敏度的一致性造成差分信号的误差.临场实验时,要对所有探测器作灵敏度标定是不现实的,为此,我们采取一种简易办法,即临场利用激光打靶对探测器作能量响应一致性标定,标定装置如图 2.利用 10 通道软 X 射线能谱仪布置 10 个 XRD, XRD 前面不再分别配置滤片,而是在谱仪前端与激光靶之间安置一块大面积滤光片,使 10 个 XRD 都能同时通过这块滤光片观测到激光靶辐射的 X 射线(见图 2),测量结果作立体角修正后即可给出 10 个 XRD 的相对灵敏度,再选出两两近似一致的 XRD 对组成滤波差分对.

实际制作差分滤片对时,不可能如理论计算给出的滤片厚度完全一样.我们采取先制做复合滤片,根据已制成的复合滤片,计算所需单材料滤片厚度,

再根据这个厚度,从大批不同厚度同类滤片中寻求最接近计算厚度的滤片做成差分滤片对,至此,滤波差分法的准备工作才算最后完成.图 3 给出实际使用滤波差分对的透过率曲线.图中标注的数字的单位为 μm .

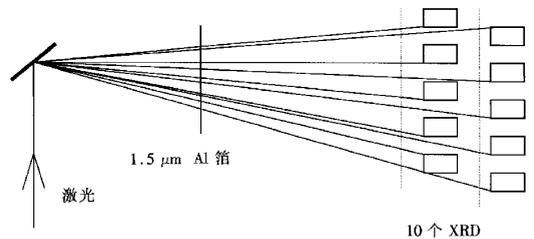


图 2 XRD 相对灵敏度标定

4 实验测量及结果

实验在星光 II 上进行,利用三倍频激光脉冲(脉冲能量 10—11 J,脉冲宽度 $\sim 0.7 \text{ ns}$),打金盘靶.激

光以 45 度角入射,滤波差分软 X 射线谱仪放置与激光入射方向成 90 度角探测激光等离子体辐射的

软 X 射线谱. 实验排布图见图 4.

探测信号用 TDS-684 A 数字化示波器记录,可

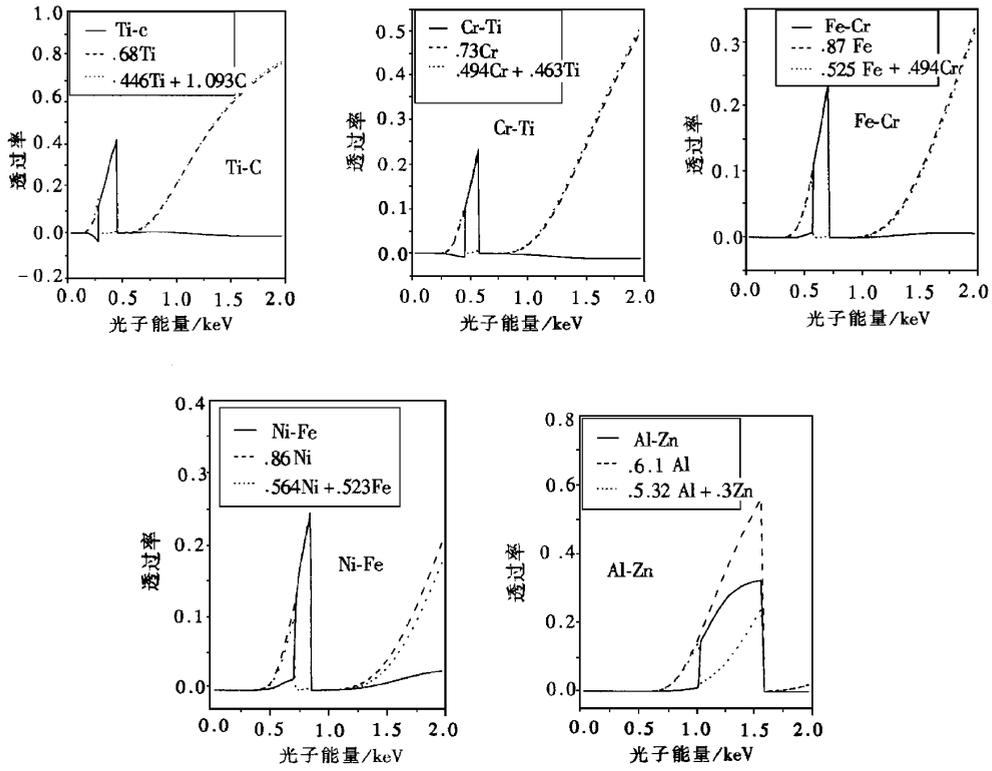


图 3 实际使用滤波差分对的透过率曲线

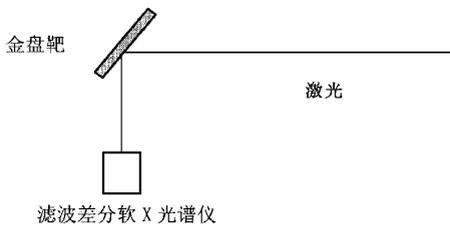


图 4 实验排布示意图

直接读出脉冲信号的时间过程,峰值强度,脉冲半宽度和积分面积等. 数据处理过程中,所用 XRD 灵敏度取已标定过的 XRD 灵敏度值的平均值,根据 XRD 相对灵敏度标定结果,对每一个 XRD 灵敏度进行修正,再用到的数据处理. 由能谱反演公式(3)式计算出各能点谱的绝对强度(见图 5),图 5 给出用滤波差分法测量金盘靶发射(280—1500) eV 能区软 X 射线绝对强度谱.

5 误差分析与讨论

作为一种探测方法研究,我们最关心的是它的探测精度,首先看一看误差来源. 滤波差分法主要误

差来源估算如下:

(1) 滤片差分对设计带来误差,由于在差分能区外不可能完全补偿,因此理论设计滤波差分法存在固有误差,低能端稍大些,约小于 5%,高能端稍小些,约 1%.

(2) 滤片制做厚度差将带来测量误差,且各差分对对滤片厚度敏感程度不一样,参见图 1,图 3 及表 1. 如 Ni-Fe 差分对匹配厚度差仅比 Al-Zn 对大 1.5%,而它带来的测量误差却远远大于 Al-Zn 对的测量误差.

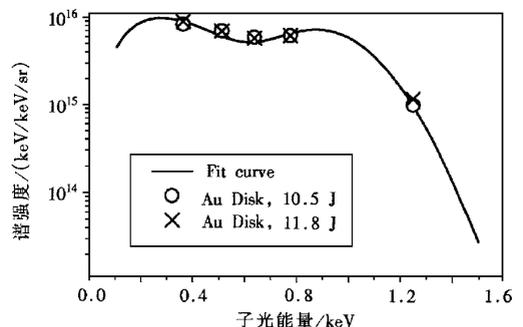


图 5 滤波差分法测量金盘靶发射软 X 射线强度谱

表 1 滤片对厚度差将造成谱测量误差

滤片对	Ti-C	Cr-Ti	Fe-Cr	Ni-Fe	Al-Zn
匹配厚度差/%	0.71	1.35	0.81	6.25	4.84
测量误差/%	4.0	3.0	2.0	18	2.0

(3) 探测器灵敏度误差, 这种误差可分成两部分, 一部分为探测器绝对能量响应灵敏度标定误差, 目前我们受标定源监测影响, 误差在 $\pm 20\%$ 左右^[5], 另一部分为探测器对灵敏度相对偏差, 探测器对灵敏度相对偏差使滤波差分对失配, 造成测量结果误差. 探测器相对偏差可通过第二节中描述的 XRD 一致性标定方法加以限制, 使其 $< \pm 5\%$.

(4) 软 X 射线吸收系数精度, 滤片差分对设计过程用到各种光学系数取自 Henke 等人的原子参数与核参数手册^[6] 精度好于 2% , 它造成的误差类似于滤片厚度造成的偏差.

(5) 软 X 射线谱假设造成误差, 由于滤片差分对设计过程有赖于谱形假设, 在滤片对匹配条件下, 不会带来较大误差.

(6) 测量误差, 测量中我们采用 TDS-684A 数字化示波器作记录, 示波器精度好于 $\pm 1\%$. 软 X 射

线谱强度测量误差, 考虑各种误差因素, 取均方根误差. 多数能道测量总误差小于 $\pm 22\%$, Ni-Fe 由于滤片对厚度误差较大 (6.25%), 造成差分对失配响应误差 $\sim 18\%$, 此能点测量总误差 $\sim 28\%$.

对制靶组、制膜组及星光 II 装置运行组的大力支持表示衷心感谢.

- [1] 常铁强、贺贤士、于敏, 强激光与粒子束, 1(3)(1989), 193 [Tie-qiang Chang, Xian-tu He, Min Yu, *High Power Laser and Particle Beams*, 1(3)(1989), 193 (in Chinese)].
- [2] Laser Program Annual Report-1978, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., UCRL-50021-78(1979) 6.
- [3] 孙可煦、马洪良、徐和平等, 光学学报, 13(10)(1993), 934 [Ke-xu Sun, Hong-liang Ma, He-ping Xu *et al.*, *Acta Optica Sinica*, 13(10)(1993), 934 (in Chinese)].
- [4] I. Vkhutoretsky, *Rev. Sci. Instrum.* 66(1)(1995), 773.
- [5] 孙可煦、易荣清、杨家敏等, 物理学报, 46(1997), 650 [Ke-xu Sun, Rong-qing Yi, Jia-min Yang *et al.*, *Acta Physica Sinica*, 46(4)(1997), 650 (in Chinese)].
- [6] B. L. Henke, P. Lee, Y. J. Tanaka *et al.*, *Atomic Data and Nuclear Table* 27 (New York) (Dr. Angela Li-Scholz, 1982).

MEASUREMENT OF SOFT X-RAY SPECTRUM BY FILTER DIFFERENCE METHOD*

SUN KE-XU JIANG SHAO-EN HUANG TIAN-XUAN YI RONG-QING CUI YAN-LI WANG HONG-BIN
CHEN JIU-SEN YU RUI-ZHEN DING YAO-NAN DING YONG-KUN TANG DAO-YUAN WEN SHU-HUI
(Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Chengdu 610003)

(Received 25 January 1999; revised manuscript received 10 May 1999)

ABSTRACT

The method of filter difference, which is used to measure X-ray spectrum radiated from laser-produced plasma, has been studied in this paper. The basic principle of the method of filter difference is introduced and the calculated and measured results of filter difference pair are given. The absolute soft X-ray spectra from laser plasma have been measured. Finally, the errors of measured spectrum intensity are analysed and estimated.

PACC: 5250J; 5225P; 5270; 2970

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-416-3-46).