

CNIC-01453

CAEP-0052

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

滤波差分法测量软 X 光谱

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

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01453, CAEP-0052: 滤波差分
法测量软 X 光谱/江少恩等著. —北京: 原子能出版社,
2000. 3

ISBN 7-5022-2153-0

I. 中... II. 江... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 14052 号

©原子能出版社, 2000

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 1 字数 12 千字

2000 年 3 月北京第一版 2000 年 3 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



江少恩：1986年毕业于电子科技大学，现为中国工程物理研究院副研究员、等离子体物理博士。

JIANG Shaoen: Graduated from University of Electronic Science and Technology in 1986. Associate professor and plasma Ph. Doctor of China Academy of Engineering Physics.

滤波差分法测量软 X 光谱

江少恩 孙可煦

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

研究了一种测量激光等离子体发射软 X 光谱强度的新方法——滤波差分法。文中介绍了滤波差分法基本原理, 给出了滤波差分对的理论计算结果及实验测量结果, 并用此方法获得软 X 光谱的绝对强度, 最后对测量光谱强度的误差进行分析和估算。滤波差分法建立在以往滤波法测量软 X 光能谱的基础上, 利用软 X 光能谱仪(Dante 谱仪)的十个探测道, 采取滤波差分法构成两两配对的五个差分对。设计匹配差分对, 使其上下 K 边或 L 边之外的能响互相抵消, 从而使差分对切割能谱, 能基本消除高能尾部对所测能区的贡献, 提高能谱测试系统的单色性, 提高能谱的反演精度, 从而建立滤波差分法测量软 X 光谱的系统。

Measurement of Soft X-Ray Spectrum by Method of Filter Difference

(In Chinese)

JIANG Shaoen SUN Kexu

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The method of filter difference, which is used to measure X-ray spectrum radiated from laser produced plasma, are studied. The basic principle of the method of filter difference is introduced and the calculated theoretically and measured results of filter difference pair are given. The absolute soft X-ray spectra from laser plasma have been measured. Finally, the measured errors of spectrum intensity are analyzed and estimated. The method is based on filtered X-ray diode system. Using 10 channels of soft X-ray spectrometer (Dante), the filter difference (FD) spectrometer consists of 5 channels, each representing a different pair. Each pair have been adjusted so that their transmission coefficients match well above and below their absorptive edge. Thus the FD spectrometer can basically eliminate effects of high X-ray photon, then increase the monochromaticity of spectra measurements and unfolded spectra accuracy.

引 言

在激光间接驱动惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 软 X 光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驱动绝对测量, 人们一直在努力寻求一种既简单, 又能如实反映光谱精细结构的探测方法。

在以往的实验测量中, 我们最常用的软 X 光谱强度诊断方法是滤波法^[2], 即采用滤片 X 光二极管阵列 (F-XRD) 测量软 X 光谱。这种诊断方法简单。探测系统相对易于作能响曲线绝对定标, 可作软 X 光谱强度绝对测量。过去基频光打靶时, 由于吸收与转换均较低, 常用靶金材料发射光主要集中在 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 光平面反射镜, 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 等离子体吸收与转换增加, Au 等离子体发射软 X 光谱的“M 带”份额也不断增加, 在高能道采用滤波法时, 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 光谱的探测精度, 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 光平面反射镜以外, 还有透射光栅 (TG) 衍射法, 晶体衍射法和多层镜反射镜分光法等, 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。

1 滤波差分法测量软 X 光谱

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 边滤波限, 若两种材料的原子序数为 Z 和 $Z+1$, 它们的吸收限为 $E_{LK}(Z)$ 和 $E_{LK}(Z+1)$, 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, 选择相匹配的厚度, 使两个滤波探测道在低于 $E_{LK}(Z)$ 能区和高于 $E_{LK}(Z+1)$ 能区具有基本相同的响应结果, 即:

$$\int_0^{E_{LK}(Z)} R_Z(E) dE = \int_0^{E_{LK}(Z)} R_{Z+1}(E) dE \quad (1)$$

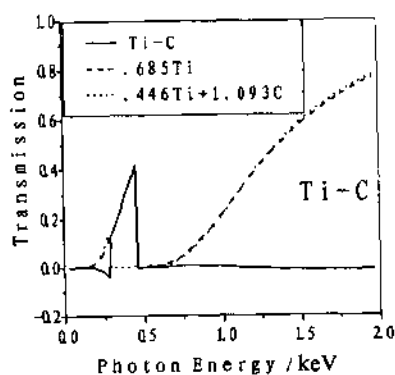
$$\int_{E_{LK}(Z+1)}^{\infty} R_Z(E) dE = \int_{E_{LK}(Z+1)}^{\infty} R_{Z+1}(E) dE \quad (2)$$

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 $E_{LK}(Z) \sim E_{LK}(Z+1)$ 能区的单一能量的探测信号, 由能谱反演公式计算出各能点的绝对强度谱, 所得到的反演公式如下:

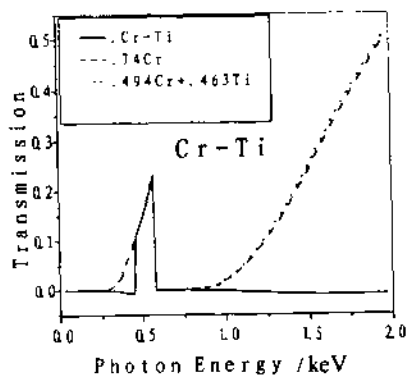
$$I_i(\bar{E}) = \frac{\Delta Y_i}{\Delta R_i S(\bar{E}) \Delta \Omega_i \Delta E_i} \quad i=1, \dots, 5 \quad (3)$$

其中 $I_i(\bar{E})$ 为第 i 差分对所测的绝对谱强度, $\bar{E}$ 为平均能点, ΔR_i 为第 i 差分对在 i 能区 ΔE_i 透过率的差分平均, $S(\bar{E})$ 为 XRD 的能量响应灵敏度, $\Delta \Omega_i$ 为 XRD 探测器所占的立体角。

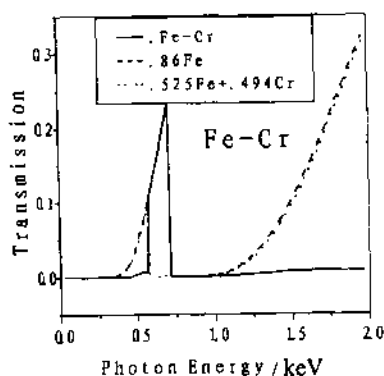
在差分滤片对设计中, 我们发现单一材料滤片对无论如何调节滤片厚度, 很难做到相匹配, 特别是在高于 $E_{LK}(Z+1)$ 能区, Z 材料滤片的响应结果往往高于 $Z+1$ 材料滤片响应



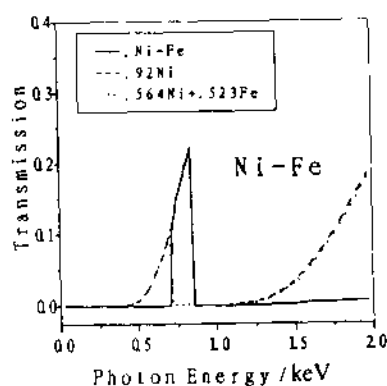
(A) Channel 1, Ti-C



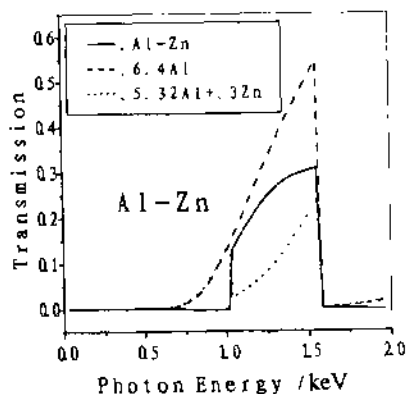
(B) Channel 2, Cr-Ti



(C) Channel 3, Fe-Cr



(D) Channel 4, Ni-Fe



(E) Channel 5, Al-Zn

图 1 五道滤波差分对理论计算透过率曲线

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,参见图 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微米。五道滤波差分对分别是:①道, Ti-C; ②道, Cr-

Ti; ③道, Fe—Cr; ④道, Ni—Fe; ⑤道, Al—Zn。谱响应范围分别为: ①道, 284~453 eV; ②道, 453~574 eV; ③道, 574~707 eV; ④道, 707~853 eV; ⑤道, 1045~1559 eV。谱分辨 ($E/\Delta E$) 大小分别为: ①道, 2.18; ②道, 4.24; ③道, 4.81; ④道, 5.34; ⑤道, 2.53。

2 一致性标定及实际差分对的选取

滤波差分法的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, 以免由于探测器能响灵敏度的不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响一致性标定, 标定装置如图 2。利用 10 通道软 X 光能谱仪布置 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的辐射的 X 光 (参看图 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。

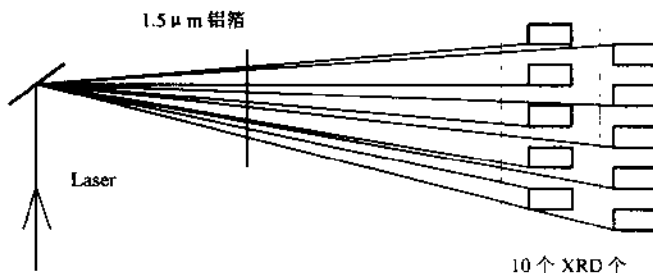
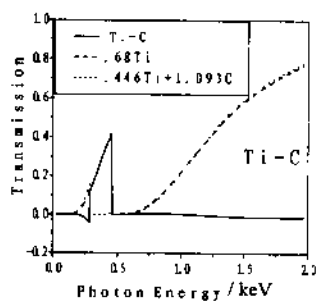


图 2 XRD 相对灵敏度标定

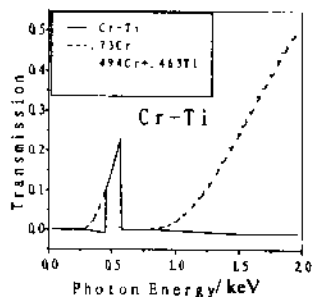
实际制作差分滤片对, 不可能如理论计算给出的滤片厚度完全一样。我们采取先制做复合滤片, 根据已制成的复合滤片, 计算所需单材料滤片厚度, 再根据这个厚度, 从大批不同厚度同类滤片中寻求最接近计算厚度的滤片做成差分滤片对, 至此, 滤波差分法的准备工作才算最后完成。图 3 给出实际使用滤波差分对的透过率曲线。图中标注的数字的单位为微米。

3 实验测量及结果

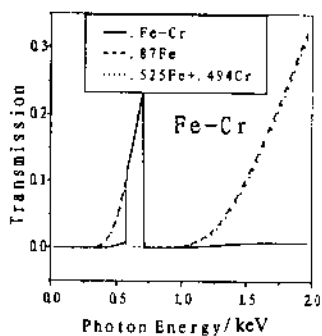
实验在星光 II 上进行, 利用三倍频激光脉冲 (脉冲能量 10~11J, 脉冲宽度约 0.7 ns), 打金盘靶。激光以 45 度角入射, 滤波差分软 X 光谱仪放置与激光入射方向成 90 度角探测激光等离子体辐射的软 X 光谱。实验排布见示意图 4。



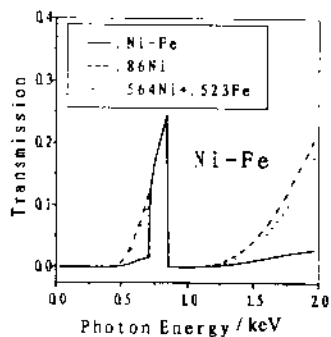
(A) Channel 1, Ti-C



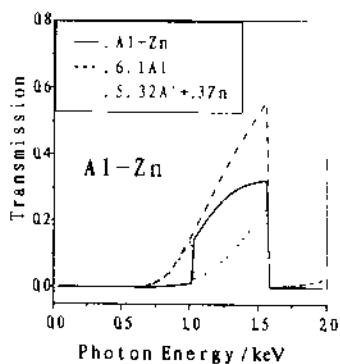
(B) Channel 2, Cr-Ti



(C) Channel 3, Fe-Cr



(D) Channel 4, Ni-Fe



(E) Channel 5, Al-Zn

图3 实际使用滤波差分对的透过率曲线

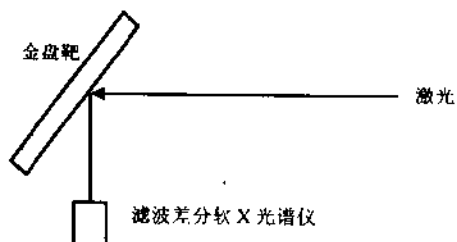


图4 实验排布示意图

探测信号用 TDS-684A 数字化示波器记录,可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。使用数据处理过程中,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,再用到使用数据处理。由能谱反演公式(3)计算出各能点的绝对强度谱见图 5,图中给出两发用滤波差分法测量金盘靶发射(280~1500 eV)能区软 X 光绝对强度谱。图中曲线为拟合曲线,计算得到的 X 光总能量为 5.1 J。

4 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,首先让我们看一看误差来源。滤波差分法主要误差来源估算如下:

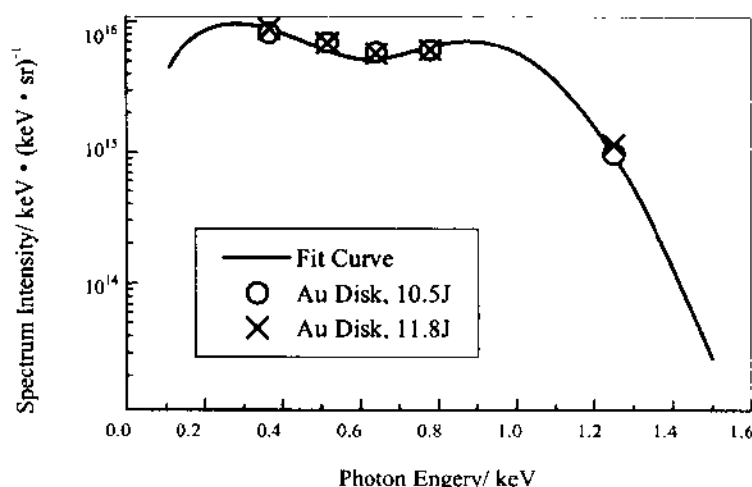


图 5 滤波差分法测量金盘靶发射软 X 光强度谱

(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,见表 1。

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相

对偏差,探测器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克服。

(4) 软 X 光吸收系数精度,滤片差分对设计过程用到各种光学系数取自 B.L.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 光谱假设造成误差,由于滤片差分对设计过程有赖于谱形假设,好在待测谱我们已有一定认识,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 ±1%。软 X 光谱强度测量误差,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 ±22%,Ni-Fe 由于滤片对厚度误差较大(6.52%),造成差分对响应误差约 18%,此能点测量总误差约 28%。

与传统的滤波法相比,滤波差分法通过差分方法消除高能尾部的贡献,而滤波法对高能尾部的处理则是将主能区响应占整个能区响应的百分比作为权重因子乘以信号,得到等效于主能区测得的信号,由如下的反演公式(4)得到 i 能道的谱强度 $I_i(\bar{E})$ 。

$$I_i(\bar{E}) = \frac{\eta_i Y_i}{R_i S(\bar{E}) \Delta \Omega_i \Delta E_i} \quad (4)$$

式中的 η_i 为权重因子,其它量所表示的意义与式(3)相同。需要说明的是 η_i 十分依赖于谱形,而谱正是所要求解的。一般情况下都假定是平衡谱,从而得到权重因子 η_i 。实际上激光打靶产生的软 X 光谱为非平衡谱,因此这就可能带来较大的误差。定量分析这部分误差比较困难。但是,对滤波差分法来说,其单色性很好,不存在这样的问题,因为高能尾部得到抑制,所以对滤波差分法没有这部分误差的影响,测量谱的精度应有所提高。

本课题研究过程中,受到 209 室制膜组及星光 II 装置运行组大力协作,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 常铁强等. 高增益间接驱动惯性约束聚变过程, 强激光与粒子束, 1989, 1(3): 193~209
- 2 Tirsell K G, et al. Time Resolved Sub-KeV X-Ray Measurements using Filtered X-Ray Diodes. UCRL-81478 (1979)
- 3 孙可照, 马洪良, 徐和平等. X 光掠入射平面镜反射率标定及应用. 光学学报, 1993, 13 (10): 934~939
- 4 Vkhutoretsky I. Rev. Sci. Instrum, 1995, 66 (1): 773~775
- 5 孙可照, 易荣清, 杨家敏等. 物理学报, 1997, 46 (4): 650~655
- 6 Henke B L, Lee P, Tanaka Y J, et al. Atomic Data and Nuclear Table 27, 1982, New York (Dr. Angela Li-Scholz)

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.