

文章编号: 1001—4322(2000)01—065—04

用于软 X 光能谱测量的 Ross 滤片对的设计*

黄天暄, 郑志坚, 孙可煦, 江少恩

(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,
四川省绵阳市 919-216 信箱, 621900)

摘 要: 描述了一种测量激光等离子体发射的软 X 光能谱强度的宽带 Ross 滤片谱仪。该谱仪具有多个能道, 每道由一对 Ross 滤片及 X 光探测器组成。这些能道的灵敏带没有间隔地覆盖了整个感兴趣的能区。给出了使用 Al 阴极 X 光二极管作为探测器的最佳 9 能道谱仪 (0.1~1.5keV), 并且计算了 X 光截面数据和滤片厚度不准确、以及滤片中光子散射等因素对探测精度的影响。

关键词: 激光等离子体; 软 X 光谱; Ross 滤片

中图分类号: TN 247 **文献标识码:** A

在激光惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 特别是激光与高 Z 元素靶相互作用的实验里, 软 X 光 (0.1~1.5keV) 能谱是大家十分关心的重要物理信息^[1]。在此能段, 滤片分光方法^[2,3]是一种传统的宽带定量分析方法。而且, 在低能道配置掠入射软 X 光平面反射镜^[3], 即可基本消除滤片高能尾部的影响。但是, 较高能道的高能尾部很难通过平面镜抑制。考虑到激光等离子体产生软 X 光能谱的非平衡特性, 如果没有关于谱形的先验信息, 解谱过程必然带来较大误差。

Ross 滤片技术^[4], 不同于上述方法, 不需要任何关于谱形的先验信息, 因此更加精确可靠。Ross 滤片系统是由两组滤片分别放置在两个同样的 X 光探测器前组成。调整滤片厚度比, 使得它们的透过率在能道上下两个 K 边 (或 L 边) 之外匹配。因而, 两个探测器的读数差与两吸收边之间能段的 X 光通量直接相关。

我们选用容易找到的滤片材料来设计 Ross 滤片, 共构成具有 9 个带宽在 0.077~0.541keV 的能道。最佳 Ross 对的判据是, (两个匹配探测器相减的) 残余响应曲线在灵敏区内尽量平直, 而在灵敏区外最小。这些要求对于给定探测器而言, 毫无疑问地决定了 Ross 对的滤片厚度。我们为惯性约束聚变装置上常用的由 X 光二极管阵列组成的软 X 光能谱仪计算了最佳 Ross 滤片厚度。对宽带 Ross 系统而言, 即使滤片厚度比最佳, 在灵敏区外的残余响应也约等于灵敏区内的 10%。为减小这种影响, 我们在 Ross 对的第二组滤片上进行补偿, 如增加一定厚度的第一种元素滤片 (参见表 1)。对多种误差影响因素进行了分析, 如 X 光截面数据不准确、散射光和测量误差等。

1 计算方法

所有计算都以窄束近似的假设为基础

$$R_i(E) = S_i(E) \exp(-\sum_j \mu_{ij}(E)x_{ij}) \quad (1)$$

其中下标 i 指 Ross 对的第 i 组滤片, $i=1, 2$; ij 指第 i 组第 j 个滤片; x_{ij} 分别是滤片厚度; $\mu(E) = \mu_{\text{pho}}(E) + \mu_{\text{coh}}(E) + \mu_{\text{inc}}(E)$ 是滤片的衰减系数^[6], $\mu_{\text{pho}}(E)$ 是光电吸收系数, $\mu_{\text{coh}}(E)$ 是相干散射系数, $\mu_{\text{inc}}(E)$ 是非相干散射系数; $S_i(E)$ 和 $R_i(E)$ 分别是二极管阴极灵敏度和探测器总响应。对于软 X 光能区和均匀非衍射滤片, 透射光束方向外的相干散射可以忽略不计, 截面数据表^[6]里已经合并计算了光电吸收和相

* 国家自然科学基金 (19875045) 和国家 863 激光技术领域资助课题

1999 年 6 月 11 日收到原稿, 1999 年 10 月 14 日收到修改稿。

黄天暄, 男, 1969 年 2 月出生, 博士生, 助研

干散射截面。非相干散射影响很小,也可以忽略(见节 4)。

为得到最佳滤片厚度,我们利用自制的交互式计算程序尝试了多种材料,X 光参数取自文献[6]。对于最佳滤片对,谱仪一个能道灵敏区内的 X 光通量 Q 为

$$Q = (I_1 - I_2) (E_L - E_K) / (\sigma P) \tag{2}$$

其中

$$P = \int_{E_K}^{E_L} R(E) dE \tag{3}$$

式中 I_1 和 I_2 是探测器读数; $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ 是探测器灵敏面积; $R(E) = R_1(E) - R_2(E)$; E_K 和 E_L 是滤片 K 边或 L 边能量。

能道尾部值(灵敏区外残余响应)以 δ 表征

$$\delta = \left[\int_{E_{min}}^{E_K} |R(E)| dE + \int_{E_L}^{E_{max}} |R(E)| dE \right] / P \tag{4}$$

假定 (E_{min}, E_{max}) 能区外,没有光子到达谱仪,并取 $E_{min} = 0.03\text{keV}$, $E_{max} = 2.0\text{keV}$ 。

2 计算结果

图 1 举例说明了 Ross 滤片对的确定方法。1 和 2 分别表示第一组和第二组滤片对应探测器吸收的 X 光辐射份额, residual 表示有效残余响应曲线。

对应我们正在使用的由 Al 阴极 X 光二极管探测器(XRD)阵列构成的宽带软 X 光能谱仪,表 1 给出 9 个能道 Ross 对的最佳滤片厚度、 δ 值和 k 值(见(5))。在图 2 中,描绘了这 9 个能道的残余响应曲线。

表 1 9 道 Ross 滤片对相关参数

Table 1 Related parameters of 9-channel Ross pairs

(filter thickness: μm ; channel width: keV; residual response: 10^{-5}A/W)

No.	1st group	2nd group	channel width	residual	δ	k
1	0.69B	0.5B + 0.5Be	0.108~0.185	3.0	4.9	14.4
2	1.63C	1.0C + 1.0B	0.185~0.284	3.0	4.5	6.4
3	0.68Ti	0.5Ti + 1.0C	0.284~0.451	2.0	6.6	3.2
4	0.74Cr	0.5Cr + 0.5Ti	0.451~0.569	1.0	1.7	2.6
5	0.86Fe	0.5Fe + 0.5Cr	0.569~0.705	1.0	1.6	1.8
6	0.84Ni	0.5Ni + 0.5Fe	0.705~0.839	1.0	2	1.9
7	0.92Cu	0.5Cu + 0.5Ni	0.839~0.924	0.78	7.9	3.5
8	1.11Zn	0.5Zn + 0.5Cu	0.924~1.017	0.83	3.9	4.5
9	6.4AL	4.8Al + 0.5Zn	1.017~1.558	0.51	0.9	1.5

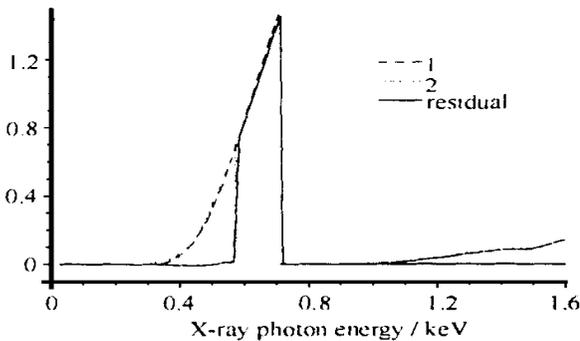


Fig 1 Response of a Ross pair
图 1 Ross 滤片对的响应曲线

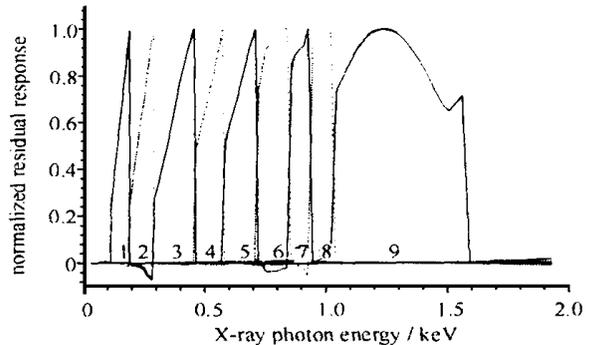


Fig 2 Normalized residual response of 9-channel Ross pairs
图 2 9 能道 Ross 对的归一化残余响应曲线

3 一致性标定和实验测量

Ross 滤片法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 Ross 对组合,以免由于探测器能响灵敏度的不一致性造成误差。实验时,要对所有探测器作灵敏度标定是不现实的^[5],为此,我们采取一种简易办法,即利用激光打靶对探测器作能响一致性标定,标定装置如图 3。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辐射的 X 光, 测量结果作立体角修正后即可给出 10 个 XRD 的相对灵敏度, 再选出两两一致的 XRD 组成 Ross 对。

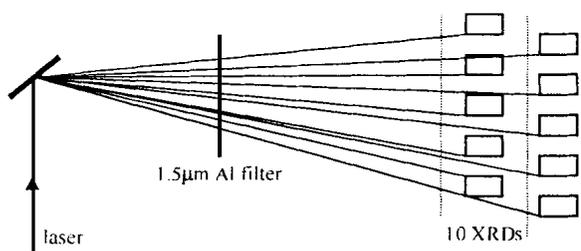


Fig 3 Calibration of XRD relative sensitivity
图 3 XRD 相对灵敏度标定

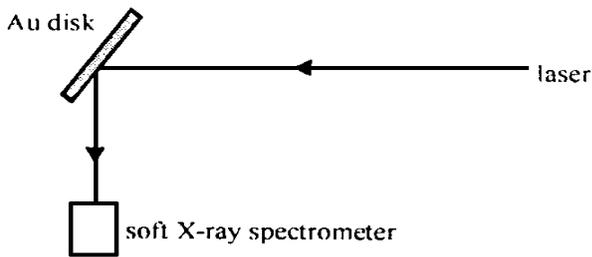


Fig 4 Illustration of experimental arrangement
图 4 实验排布示意图

Ross 滤片谱仪的测谱实验在星光 II 上进行, 利用三倍频激光脉冲(脉冲能量 10~ 100J, 脉冲宽度 0.7~ 0.8ns)打金盘靶。激光以 45 度角入射, 软 X 光能谱仪放置在与激光入射方向成 90 度角探测激光等离子体辐射的软 X 光谱。实验排布图见图 4。

探测信号用 100M 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。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, 再用于数据处理。由公式(2)计算出各能道谱的绝对强度见图 5, 图中给出两发用 Ross 法测量金盘靶发射软 X 光能谱绝对强度的结果。由于谱仪现仅有 10 个通道, 目前只能给出 5 个 Ross 对的测量值。

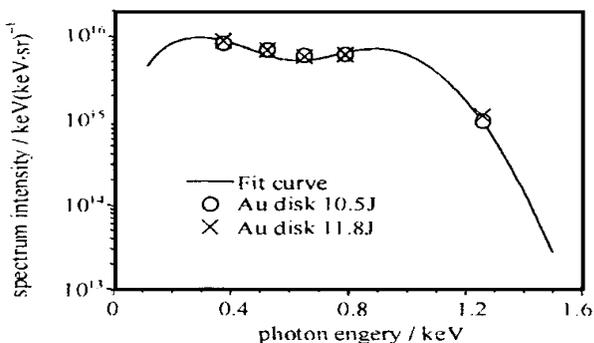


Fig 5 Measuring soft X-ray spectra with the Ross system
图 5 Ross 法测量金盘靶发射软 X 光能谱强度

4 能谱恢复精度

软 X 光能谱恢复的主要误差来源是:

(1) $R(E)$ 尾部的影响, $R(E)$ 尾部的影响很好估计, 引起能道灵敏区内的 X 光通光量 Q 的相对误差等于 δ (公式(4))。

(2) 探测器灵敏度误差。探测器灵敏度误差可分成两部分: 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]; 另一部分为探测器灵敏度的相对偏差, 会使 Ross 滤片对失配, 造成测量误差。探测器相对偏差可通过第 3 节中描述的 XRD 一致性标定方法加以限制, 使其小于 $\pm 5\%$ 。

(3) X 光截面数据和滤片厚度不精确。滤片厚度 x 和吸收系数 μ 在计算中总以乘积 μx 形式出现, 设计过程用到的各种光学系数取自 B. L. Henke 等人的原子参数与核参数手册^[6], 精度好于 2%, 滤片厚度的误差可以降低到 0.2%。 μx 不精确对谱恢复精度影响的检测, 可以通过改变最佳滤片 μx 参数 $\pm 2\%$ 来进行, δ 值上升约 3%。考虑 Ross 对两个

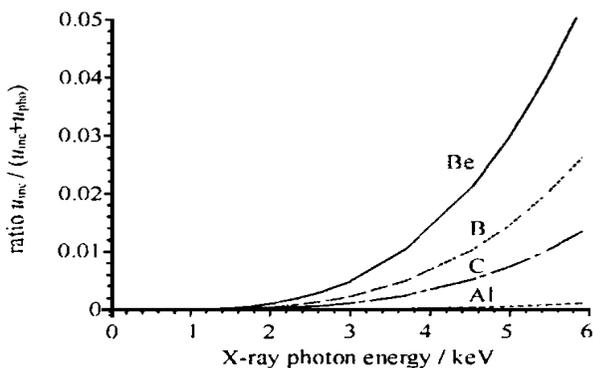


Fig 6 Effect of incoherent scattering
图 6 非相干散射的影响

滤片的总效果,对 δ 的贡献约 5%。Henke 的 X 光截面数据没有包括非相干散射截面,但是它的影响很小,在软 X 光能区(0.1~1.5keV),非相干散射对角度积分的截面与总截面比 < 1% (见图 6)。

(4) 测量不精确(探测器读数)。测量不精确 $\Delta I/I$ 对谱恢复误差 $\Delta Q/Q$ 的贡献为 $(\Delta Q/Q)_{\text{means}} = k\Delta I/I$, 其中

$$k = \frac{1}{P} \left[\left[\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_1 dE \right]^2 + \left[\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_2 dE \right]^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

误差放大因子 k 值相当大(见表 1),尤其是对较低能道,所以使测量精度尽量提高是非常重要的。如果利用平面镜抑制高能尾部的影响,低能道 k 值会大幅降低(< 5)。测量中我们采用 100M 数字化示波器作记录,示波器精度好于 $\pm 1\%$ 。

(5) 使用的物理假设不精确。Ross 对的设计是以最简单的谱形为例,即在 (E_{\min}, E_{\max}) 能区内软 X 光能谱强度为常数,在能区外为零。由于低能 X 光无法穿透滤片,高能 X 光强度弱,阴极灵敏度低,所以该假设引起的误差可以忽略。

综合考虑软 X 光谱强度测量的各种误差因素,各能道测量总误差小于 $\pm 30\%$ 。

致谢 课题研究过程中,得到制靶组、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 孙可煦等. 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 Khutoretsky IV. Design of an optimal Ross filter system for X-ray spectra measurements in the range of 8.98~ 88 keV. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1): 773~ 775
- 5 孙可煦, 易荣清, 杨家敏等. 同步辐射软 X 射线源用于软 X 射线探测元件定标. 物理学报, 1997, 46(4): 650~ 655
- 6 Henke B L, et al. Low-energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection, Atomic Data and Nuclear Data Table, 1982, 27(1): 1~ 144

AN OPTIMAL ROSS FILTER SYSTEM FOR SOFT X-RAY SPECTRA MEASUREMENT

HUANG Tian-xuan, ZHENG Zhi-jian, SUN Ke-xu, JIANG Shao-en

Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP,

P. O. Box 919-216, Mianyang 621900

ABSTRACT: A broadband Ross filter spectrometer is described for measuring soft X-ray radiation (0.1~1.5keV) emitted from laser plasma. It consists of a number of channels, each representing a Ross filter pair in conjunction with Al cathode X-ray diodes. An optimal channel has flat response within the sensitivity band, and minimal response outside it. The effect of some uncertainties on the accuracy of measurements is calculated.

KEY WORDS: laser plasma; soft X-ray spectrum; Ross filter