

用平场光栅谱仪现场标定 5FW X 光底片

李儒新 陆培祥 范品忠 徐至展 王晓方 李跃林 陆海鹤 张正泉

(中国科学院上海光学机械研究所, 上海 201800)

提 要

采用像散模式的平场光栅谱仪作为分光元件, 点状镁激光等离子体 X 射线源为原始光源, 获得均匀线状单色软 X 射线再生源, 在此基础上, 用多阶梯衰减膜为相对曝光强度标尺, 现场标定了上海感光胶片厂生产的 5FW 无保护膜 X 光底片, 给出了 5.0 nm~8.0 nm 间的底片响应特性。

关键词 X 光底片, 现场标定, 平场光栅谱仪。

1 引 言

最近几年, 随着软 X 射线激光研究的崛起, 软 X 光胶片受到了更为广泛的重视. 特别是在 Kodak 101 胶片极为紧张及价格昂贵的今天, 开发应用国产软 X 光胶片已迫在眉睫, 然而胶片响应特性的标定是应用的前提, 它直接影响胶片的推广应用及物理测量的准确和可靠性。

定量测量要求给出胶片的响应特性曲线, 即黑度与曝光量的关系曲线. 它依赖于光波长及胶片的显定影步骤, 为了获得一致和重复的结果, 必须严格控制显定影液及显定影时间、温度的一致性. 另外, 在相同曝光量下, 胶片的黑度还与处理底片所用的显微光度计的型号及其设置有关; 不同批的胶片也会由于制造时化学组合略有不同而引起胶片灵敏度的变化. 而胶片的现场标定就可以避免上述因素, 大大减少物理测量误差。

胶片标定一般是采用标准辐射源独立进行的, 但是对于软 X 光波段, 寻找一合适的标准源是非常困难的. 本方法是在可见光区用多阶吸收滤片标定胶片法的推广^[1]. 在 X 射线波段, 利用这一原理已作过标定胶片的工作, 并获得了较好的结果^[2,3]. 其关键是获得均匀的线状或带状的单色光源及对应波长的合适滤片. 本文采用点状激光等离子体光源远距离接收, 以像散模式的平场光栅作色散元件, 获得了均匀的线状软 X 光单色再生源. 利用这一光源结合阶梯吸收膜, 标定了上海感光胶片厂生产的无保护层 5FW 软 X 光胶片在 5.0~8.0 nm 的响应特性。

2 标定原理

利用激光等离子体这一丰富的软 X 光源, 以像散模式的平场光栅作分光元件, 获得了 5.0~30.0 nm 波段的均匀线状软 X 射线单色再生源, 然后透过已知透过率的阶梯吸收膜记

录在软 X 光胶片上,这样就可以得到单一波长具有不同曝光强度的若干个黑度段,对于 N 个阶梯,就形成了 N 个具有不同曝光量的黑度台阶.根据 Henke 等人的理论^[4],对于厚乳胶型胶片,其胶片黑度*和曝光强度间可用下列公式表示:

$$AD = \ln(1 + BI)$$

式中 D 为黑度, I 为曝光强度. A, B 皆为与胶片结构、入射光子能量(波长)和胶片的冲洗剂有关的常数.此外, B 还与所取的相对光强单位有关.对于某一波长,根据实验获得的一系列胶片黑度和对应的相对强度数据,利用最小二乘法,可定出 A, B 参数,从而获得胶片在这一波长处的响应特性.

3 均匀线状单色软 X 射线源的获得和软 X 光胶片的现场相对强度标定

实验是在上海光机所 115 高功率激光装置^[6]上进行的.以激光等离子体作为原始光源,波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 脉宽(FWHM)为 $150 \sim 200 \text{ ps}$ 输出能量为 $10 \sim 20 \text{ J}$ 的驱动激光经 $f/2$ 非球面透镜聚焦在表面抛光的镁块状靶上.实验布置图如图 1 所示,整个系统均处于 $2.67 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 的真空系统中.

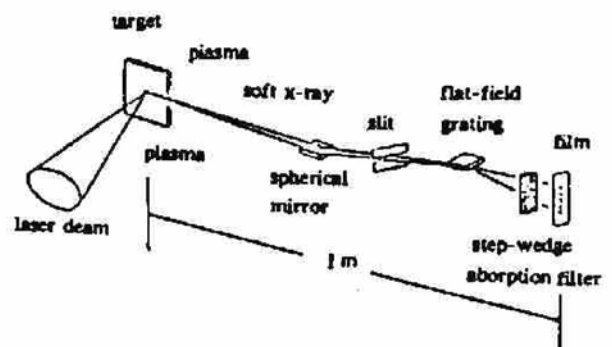


Fig. 1 Schematic set-up of the experiment for soft X-ray film calibration

实验中,用掠入射平场光栅(名义栅距为 $1/1200 \text{ mm}$,闪耀角为 3.2° ,光栅半径为 5649 mm ,尺寸为 $50 \times 30 \text{ mm}^2$)作色散分光元件.在像散模状态下,球面镜将点光源成像于狭缝处,由于光源距球面镜较远且球面镜半径很大,在弧矢面内球面镜对光源所成的像位于实际点源附近,光栅相当于被一较长线光源照明,在实验排布参数下,这一线光源比较均匀,大约相当于点光源 $10 \sim 20 \text{ mrad}$ 内发射的软 X 射线,对点状等离子体,这样小的区域内所发射的软 X 射线可以认为是比较一致的.被照亮的狭缝经光栅色散后所成的光谱像沿长度方向变得更加均匀,这是由于狭缝上每一点光源单元所成的像散像相互叠加的结果,这样就形成了一系列波长的均匀线状的单色软 X 光再生源.直接用凹面镜成像分析也可得出同样结论:底片在弧矢面内相当于被一远在 1 m 之外的虚光源照明,这样对于胶片上 10 mm 长的线状单色再生源来说,只对应于点光源 10 mrad 内发射的软 X 射线,这样远距离的接收时,其波面已接近于平面,所以采用点聚焦远距离接收方案,可以获得 $5.0 \sim 30.0 \text{ nm}$ 波段内(由平场光栅摄谱范围决定)均匀的线状软 X 光单色再生源,典型的光谱照片如图 2 所示.由于光谱分辨为 0.01 nm ^[6],所以其单色性是非常好的.图 3 是显示这种线状软 X 光单色再生源均匀性的扫描曲线.由图 3 可见,其均匀性是相当好的,根据下面给出的胶

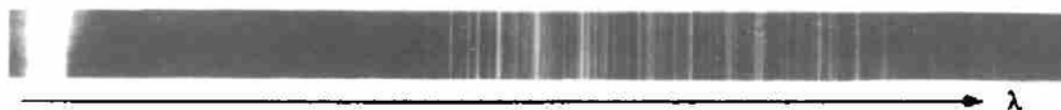


Fig. 2 The typical photograph of Magnesium plasma soft X-ray spectra

* 本文指的黑度为扣除胶片本底的净黑度.

片响应特性曲线,可以计算得到线状软 X 光单色源沿谱线方向的强度起伏约为 5%.

如图 1 所示,在记录胶片前平行地放上阶梯吸收膜板,就可以进行软 X 光胶片的现场相对强度标定.所用阶梯吸收膜板长度约为 10 mm,放置于线状软 X 光单色再生源的中间部分.吸收滤膜是由 0.8 μm 厚的 $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$ 上镀 60.0 nm 的 Al 组成,其厚度经过准确测量,相对误差小于 5%,相应波长的透过率经测量及计算获得^[7],表 1 给出了单层膜所对应不同波长的透过率.本阶梯吸收膜板有 6 个不同的透射区,各透射区的层数分别从 0 到 5 变化.实验中,为了使胶片达到一定的黑度,采用多发累积打靶;另外,为了减小定量测量误差,本文采用与物理实验时完全一样的显(D76)、定影液及其显、定影时间(15 min \pm 1 sec)、温度(20 $^\circ\text{C}$ \pm 0.1 $^\circ\text{C}$)和步骤.采用物镜数值孔径为 0.25 的 MP-3 型显微光密度计完成扫描,开启的扫描狭缝为 10 μm ;并取放上不透明黑纸时为 0% 透过率,胶片不曝光部分为 100% 透过率.

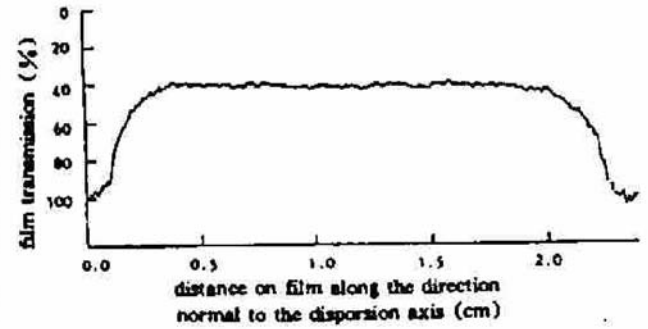


Fig. 3 Microdensitometer trace of the 6.47 nm spectral line along the direction perpendicular to the dispersion axis

Table 1. Transmission of the 60 nm Al coated 0.8 μm C_3H_6 foil at different wavelengths

| λ (nm) | 5.45 | 5.90 | 6.47 | 6.86 | 7.12 | 7.60 | 7.92 | 8.01 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Transmission of 0.8 μm C_3H_6 + 60 nm Al (%) | 37.1 | 31.7 | 26.1 | 22.8 | 20.5 | 17.2 | 15.0 | 14.5 |

图 4 给出了一典型的用作软 X 光胶片现场相对强度标定的激光产生的镁等离子体软 X 光光谱照片,从中可见每根谱线都有 6 个不同的强度段,分别对应于阶梯吸收膜板 6 个不同的透射区.图 5 是对应的光谱扫描曲线.由于物理实验的需要,文中只给出 5.0~8.0 nm 间的

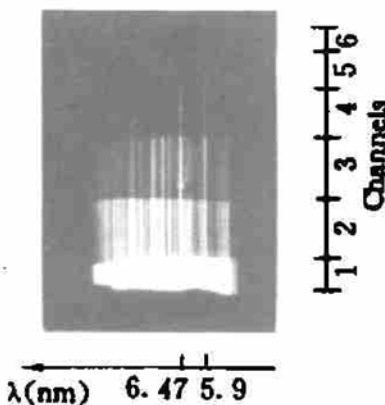


Fig. 4 The photograph of Magnesium plasma soft X-ray spectra transmitted through a six-channel step-wedge absorption filter

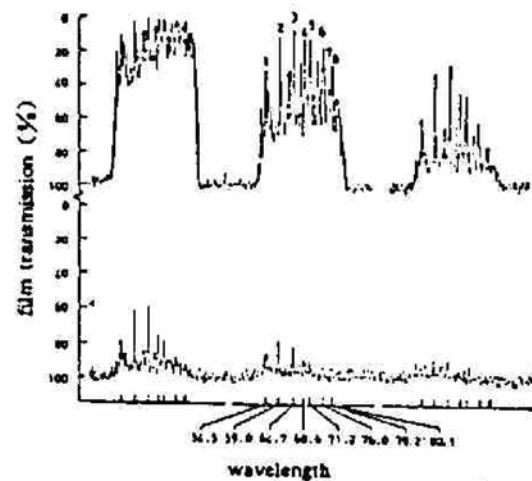


Fig. 5 Microdensitometer traces of Magnesium soft X-ray spectra transmitted through a six-channel step-wedge absorption filter

镁软 X 光光谱. 由图 5 可清楚地看到经阶梯吸收膜后形成的对应于不同曝光强度的 6 个光谱带. 图中已对用作无保护层上海 5 FW 软 X 光胶片标定的 8 根强谱线作了辨认, 它们分别是: (1) MgIX $2p^2 - 2p4d$ (5.45 nm), (2) MgVIII $2s^22p - 2s^24d$ (5.90 nm), (3) MgVIII $2s^22p - 2s2p(^1P^0)3p$ (6.47 nm), (4) MgVIII $2s2p^2 - 2p^2(^1D)3p$ (6.86 nm), (5) MgVIII $2s^22p - 2s2p(^3P^0)3p$ (7.12 nm), (6) MgVII $2s^22p^2 - 2s2p^2(^2D)3p$ (7.60 nm), (7) MgVII $2s^22p^2 - 2s2p^2(^4P)3p$ (7.92 nm) 和 (8) MgVI $2s^22p^3 - 2s^22p^2(^3P)4d$ (8.01 nm). 由图 5 还可得到各个谱线在不同透过区(对应于不同曝光强度)的胶片透过率, 即可以得到在不同光波长下胶片黑度随相对光强的变化, 也就是胶片在不同波长下的响应特性曲线. 图 6 给出了无保护层上海 5FW 软 X 光胶片对其中两个波长(5.90 nm 和 6.47 nm)的响应特性曲线, 图中实线是按照 Henke 等人的公式通过最小二乘法拟合而成. 上述结果表明 Henke 等人用于厚乳胶型胶片的半经验公式完全适用于无保护层上海 5 FW 软 X 光胶片. 为了描述无保护层上海 5 FW 软 X 光胶片随波长的响应特性, 图 7 给出了按照 Henke 等人的公式通过最小二乘法拟合所得的 A

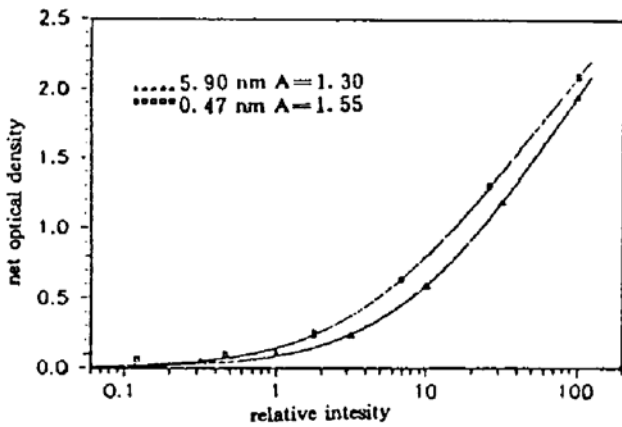


Fig. 6 Net optical density of 5 FW film as a function of relative exposure intensity at 5.90 and 6.47 nm

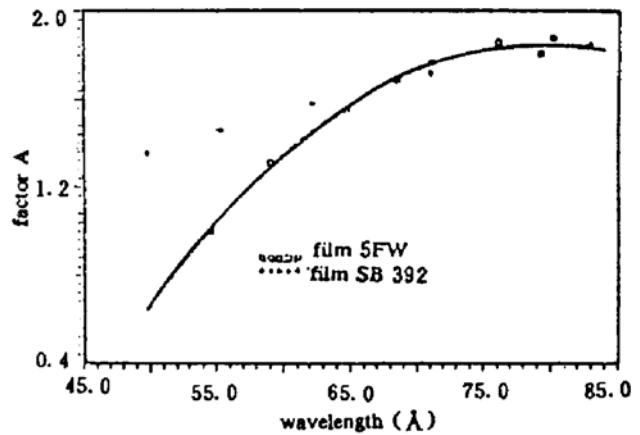


Fig. 7 The response of the 5 FW film to wavelength. Also presented are the Henke's data of SB-392 film

因子随光波长变化的关系曲线. 图中同时还给出了 Henke 等人得出的关于类似 5 FW 胶片的 SB-392 胶片的 A 因子^[8]. 表 2 给出了这两种 X 光胶片的结构参数. 由图 7 可见, 代表胶片反差的 A 因子随波长逐渐增大而趋向平缓, 表明无保护层上海 5 FW 软 X 光胶片在 5.0~8.0 nm 波段内响应的差别是缓变的, 这与其它软 X 光胶片在这一波段的响应特性是基本一致的. 同时可见, 在较长波段 5 FW 胶片与 SB-392 胶片的 A 因子基本相同, 但在较短波段 5 FW 胶片具有较大的反差.

Table 2. Comparison of the structure parameters of Shanghai 5 FW film with that of SB-392 film

| Film | Emulsion layer thickness (μm) | Surpercoat thickness (μm) | Average grain size (μm) | Average grain volume fraction |
|--------|--|--|--------------------------------------|-------------------------------|
| SH-5FW | 7 | 0 | 1~1.5 | 0.2 |
| SB-392 | 10 | 1 | 1.0 | 0.2 |

综上所述, 用本方法标定的胶片响应特性曲线直接依赖于线状软 X 光单色再生源的均匀性、阶梯膜板透射区的个数及其膜厚的测量精度和用显微光密度计测量胶片透过率的精度. 对于本文来说, 影响胶片标定准确度的主要因素是: 扫描及其读数引起的胶片黑度测量误差, 膜透过率误差导致的相对光强测量误差, 以及有限实验数据点所致的 A 因子拟合误差.

4 结 论

利用点状激光等离子体光源远距离接收技术,用掠入射平场光栅作色散分光元件,获得了均匀的线状软 X 光单色再生源. 在这一单色光源的基础上,结合阶梯吸收膜对无保护层上海 5 FW 软 X 光胶片在软 X 光波段的响应特性进行了现场标定. 这一标定结果适合于用这种胶片作为 X 射线激光及激光等离子体软 X 光诊断记录介质的数据处理. 采用合适的吸收滤膜,可以得到软 X 光胶片对在 5.0~30.0 nm 波段内任一波长的响应特性曲线.

参 考 文 献

- [1] E. B. Turner, *Plasma Diagnostic Techniques*. New York, Academic, 1965, 345
- [2] 毛楚生, 范品忠, 顾 援等 用于激光等离子体实验的 X 光底片的相对标定. *核聚变与等离子体物理*, 1983, 3(2): 102
- [3] D. Pasini, A. Ng, A. J. Barnard, In-situ calibration technique for X-ray films. *Appl. Opt.*, 1984, 23: 762
- [4] B. L. Henke, B. L. Kwork, J. Y. Uejio *et al.*, Low-energy X-ray response of photographic films I. Mathematical models. *J. O. S. A. (B)*, 1984, B1: 818
- [5] 徐至展, [陈时胜], 欧阳斌等, 输出 2.5 J/20 ps 的高功率钕玻璃激光系统. *光学学报*, 1991, 11: 961
- [6] 范品忠, 张正泉, 周锦智等, 消像散掠入射平场光栅谱仪及其在等离子体 XUV 光谱诊断中的应用. *光学学报*, 1992, 12(2): 118
- [7] M. Gong, X. Liu, Z. Lei, *Private Communication*, (Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica), 1992
- [8] B. L. Henke, F. G. Fujiwara, M. A. Tester *et al.*, Low-energy X-ray response of photographic films II. Experimental characterization. *J. O. S. A. (B)*, 1984, B1: 828

In-situ calibration for 5 FW X-ray film using flat-field spectrometer

LI Ruxin LU Peixiang FAN Pinzhong XU Zhizhan WANG Xiaofang
LI Yaolin LU Haihe ZHANG Zhengquan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 10 March 1993; revised 27 April 1993)

Abstract

The in-situ calibration has been completed for the Shanghai 5 FW X-ray film by using the astigmatic mode flat-field spectrometer as dispersion element, spot-focused magnesium laser-produced plasma as X-ray source and multi-channel attenuative foil as a ruler of relative exposure intensity.

Key words X-ray film, in-situ calibration, flat-field spectrometer.