

均匀线状激光等离子体 X 光单色源 和软 X 光胶片响应特性的标定

王晓方 陈时胜 钱爱娣 李跃林 范品忠 徐至展
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市 800-211 信箱, 201800)

龚美霞 刘秀琴 雷志远
(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安市 80 信箱, 710068)

提 要

利用均匀线聚焦激光产生的等离子体和软 X 射线透射光栅谱仪获得了均匀的线状软 X 光单色光源。在这一光源基础上, 利用加阶梯膜的新方法首次标定了国产无保护层 5F 软 X 光胶片在软 X 光波段的响应特性。

关键词: 线聚焦激光等离子体, 软 X 光单色光源, 阶梯膜, 软 X 光胶片标定。

一、引 言

X 光胶片被广泛用作激光等离子体 X 光诊断的记录介质。其优点是它具有高灵敏度和空间分辨能力, 宽动态范围, 且光电记录仪简单实用。在利用 X 光胶片作为记录介质诊断等离子体参数的实验数据处理中, 胶片的响应特性直接影响实验数据处理。如光谱的线型, 谱线的峰值强度, 积分强度, 连续谱的分布等, 这些信息都可通过经过标定的胶片的黑度和入射光强的定量关系获得。因此胶片的标定工作十分重要。

以激光等离子体作为 X 光源进行胶片标定的工作已有一些报道^[1, 2]。具有代表性的是 Kishimoto 等人的工作^[2], 他们利用透射式光栅谱仪标定了 Kodak 101-01 型 X 光胶片在软 X 光及极紫外区域的响应特性。但是在他们的工作中用到了两台透射光栅谱仪并配合以软 X 光辐射卡计进行测量。这不仅造成实验调整上的困难, 而且两个透射光栅要保持同样衍射特性也很难满足。此外, 卡计窗口的有限大小也会影响到光谱分辨。

基于上述考虑, 本文在以前对激光等离子体软 X 光辐射特性和线状激光等离子体研究的基础上提出了一新方法, 即在波长准确测量和适当光谱分辨的条件下利用均匀线状激光等离子体光谱结合阶梯滤膜标定 X 光胶片。作者利用均匀线状激光等离子体和针孔透射光栅谱仪获得了空间均匀的线状单色 X 光光源。利用这种光源结合阶梯滤膜, 首次标定了国产无保护层 5F 软 X 光胶片在软 X 光区域的响应特性。

二、基本原理

线聚焦激光辐照在靶上产生线状激光等离子体, 如图 1 所示。以前的研究表明, 均匀的

线状激光辐照可产生均匀的线状等离子体^[3]。为了获得空间均匀的软 X 光单色源, 采用具有

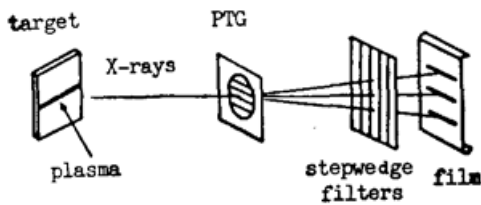


Fig. 1 Schematic of the set-up for X-ray film calibration. PTG: pinhole transmission grating

光谱和空间分辨能力的软 X 光针孔透射光栅谱仪分光。针孔透射光栅谱仪^[4]的色散元件—针孔透射光栅放置方式如下: 光栅的光谱色散方向与焦线(或线状等离子体)方向垂直; 而沿平行于光栅的细丝方向, 由于针孔的几何成像作用, 线状激光等离子体在透射光栅谱仪成像面(放置胶片)上形成相应波长的一维空间强度分布像。因此在成像面上不同位置可获得不同波长的线状单色

源。在 X 光胶片前面感兴趣的波长位置放置已知厚度和透过率的阶梯滤膜(阶梯方向平行于空间成像方向), 这样对应该波长, 在沿空间方向上就形成了不同曝光强度的黑度台阶。

按照 Henke 等人的理论^[5], 胶片的黑度*和曝光强度间可用下列公式表示

$$\left. \begin{aligned} AD &= \ln(1 + BI), \\ I &= \varepsilon T(n), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 D 为黑度, I 为曝光强度。 A , B 皆是与胶片结构、入射光子能量(波长)有关的常数。此外, A , B 也与胶片的冲洗条件有关, ε 为无滤膜情况下的光强, $T(n)$ 为阶梯膜中第 n 阶的透过率。令 $\varepsilon=1$, 即采用相对光强。对某一波长, 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。换用不同的滤膜, 可用同样方法获得胶片在其它波长的响应特性。

三、实验条件

有关实验在中国科学院上海光学精密机械研究所 LF12 激光装置上完成的。实验装置如图 1 所示。采用柱面镜列阵和非球面镜组合得到均匀线聚焦激光照明系统^[6]。靶面线状焦线尺度为 $25\text{ mm} \times 120\ \mu\text{m}$, 沿焦线长度方向激光强度不均匀性小于 5%。入射激光波长 $1.05\ \mu\text{m}$, 脉宽 $0.9\ \text{ns}$ 。激光能量在 $120 \sim 180\ \text{J}$ 范围变化, 靶面上相应平均功率密度 $4 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。实验中采用 Cu 或 Mo 平板靶。在我们的实验条件下, 针孔透射光栅谱仪的光谱分辨能力优于 $0.2\ \text{nm}$, 空间分辨能力优于 $70\ \mu\text{m}$ 。针对不同波长, 采用了由有机材料或金属材料制成的 10 阶阶梯滤膜, 各阶滤膜的层数分别从 0 到 9 变化。每种阶梯滤膜的厚度都经过准确测量, 相对误差小于 5%。相应波长的透过率经测量或计算获得。表 1 给出了各种滤膜(单层)在不同波长的透过率。由于针孔透射光栅具有高的衍射效率, 在

Table 1 Transmissivity of the filter foils at different wavelengths

Filter Foils	Transmissivity at Different Wavelengths (nm)			
	1.1	2.0	4.7	7.1
$\text{C}_3\text{H}_6 (0.8\ \mu\text{m})$	—	0.62	—	0.60
$\text{C}_3\text{H}_6 (0.8\ \mu\text{m})$ + Al (150.0 nm)	0.87	—	0.36	—

* 本文所指的黑度是指扣除胶片本底的净黑度, 下同。

胶片前加膜的情况下,每发激光打靶便可获得足够高黑度的光谱。

胶片在 20°C 常温下冲洗,温度起伏不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。胶片预先在蒸馏水中浸泡 1 min,然后在 D76 显影液(1:1)中显影 15 min,定影 15 min。之后在蒸馏水中冲洗 60 min。阴干。采用物镜数值孔径为 0.25 的 MP-3 型微密度计完成扫描。

四、结果及讨论

图 2 给出了在未加膜情况下 Mo 的光谱。由此可见,Mo 激光等离子体在波长大于 7.0 nm 区域仍有较强的发射。事实上,选用不同的靶材和适当的激光强度,可在不同波长位置上获得高强度发射^[7]。图 3 是加膜与未加膜两种情况下 Mo 的 M-带峰(2.0 nm)沿空间分辨方向(即线状激光等离子体焦线长度方向)的扫描结果。由图 3(a)的分析表明,沿焦线方向的强度不均匀性起伏小于 15%,这其中包括胶片自身不均匀造成的不均匀性起伏*。这说明这种聚焦激光系统产生的线状激光等离子体是相当均匀的。也说明利用这种方式可产生均匀的线状单色软 X 光光源。

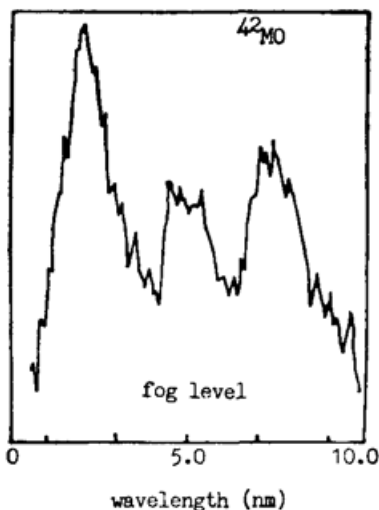


Fig. 2 Microdensitometer traces of Mo spectra

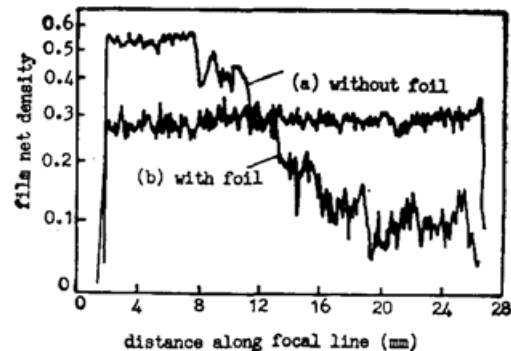


Fig. 3 Spatial distribution of the peak of Mo M-band emission (20 nm) along the focal line
(a) without stepwedge filter foil; (b) with stepwedge filter foil

图 4 给出了国产无保护层 5F 型 X 光胶片标定结果。图中各种连线是按照公式(1)通过最小二乘法拟合而成。根据胶片的响应特点,我们给出了低黑度区曝光强度随黑度线性变化的范围(见表 2),即在胶片黑度小于黑度阈值 D_{th} 的条件下可认为曝光强度与胶片黑度成正比。这里光强随黑度线性变化的范围定义为:由线性关系定出的强度与按照图 4 的标定曲线定出的强度的最大相对误差小于 20% 的区域。表 2 的结果说明,对于不同波长,胶片响应特性的线性范围不同。这也正反应了胶片响应特性随波长和胶片自身结构的依赖性。

我们也给出了 Henke 等人对 SB-392 胶片的标定结果^[8],并同本文对无保护层 5F 胶片的标定结果作了比较,因为这两种胶片具有相似的结构参数(见表 3)。按照 Henke 的理论及实验结果,相同或相似结构胶片的 A 参数应相同或相似。表 4 给出了这两种胶片的 A

* 有关线状激光等离子体 X 光发射均匀性的详细研究可参阅文献[3]。

参数的比较。结果表明,这两种胶片在软 X 光波段短波区域具有非常相似的响应特性,但是在长波区域二者的响应特性差别很大。其可能原因:

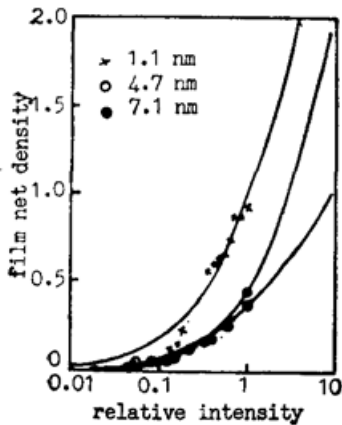


Fig. 4 Specular density of 5 F film as a function of relative exposure intensity. The numerical aperture of the microdensitometer used is 0.25

即是说, A , B 两参数除了在与胶片结构有关的吸收边附近随波长有明显变化外, 在其它区域随波长只是缓慢变化。我们根据胶片结构参数的计算表明, 在分辨率为 0.2 nm 情况下, A , B 参数的变化引起的强度相对误差小于 25%。因此在目前的分辨率下, 对胶片的标定结果是可以用于实验数据处理的。

影响标定结果准确度的因素还有: 胶片黑度测量、相对强度确定, 以及有限实验数据点。胶片黑度测量误差来源于焦线不均匀、阶梯滤片不均匀, 以及胶片自身由于划痕而造成的黑度涨落。确定相对强度的误差产生于焦线的大尺度不均匀, 即不同膜层间因焦线不均匀造成 X 光发射强度不等, 阶梯滤膜各层的透过率测量误差或者膜的厚度测量误差。分析表明, 这些因素造成的强度测量相对误差低于 30%。误差主要来自于黑度测量和有限实验数据点。

Table 2 Threshold density D_{th} of the linear response range of the 5 F film at different wavelengths

Wavelength (nm)	1.1	2.0	4.7	7.1
D_{th}	0.46	0.27	0.63	0.15

Table 3 Comparisons of the A parameters of 5 F film with that of SB-392 film at different wavelengths

Film Type	Film Structure Parameters			
	Emulsion Thickness (μm)	Supercoat Thickness (μm)	AgBr Grain Size (μm)	AgBr Volume Fraction
SB-392	10	1	1	0.2
5 F (no supercoat)	8	0	0.8	0.27

* 最近研究结果表明, 采用连续和短脉冲 X 光源标定相同胶片所得到的响应特性也有差别, 见文献[9]。

(1) 胶片本身结构的差异; (2) 两种胶片的冲洗条件不同; (3) 曝光条件不同。Henke 的结果是在低强度连续曝光的条件下获得的; 而本文的结果是在短脉冲强光辐照下取得的。此外由于本文在长波区因实验数据点较少会对 A 参数的拟合带来误差, 也是造成这一差异现象的部分原因。但作者认为胶片结构不同是造成两种胶片响应特性差异的主要原因*。

在目前的工作中, 光谱分辨率较低, 尚不能标定胶片对单一波长谱线的响应特性。但这不是影响胶片标定结果准确度的决定因素。根据 Henke 的胶片理论^[5, 8], 除了吸收边(取决于胶片材料)附近胶片的响应特性随波长出现明显的跳跃外, 在其它波长区域只是缓慢变化。也

Table 4 Comparisons of the A parameters of 5 F film with that of SB-392 film at different wavelengths

Film Type	A Factors at Different Wavelengths (nm)			
	1.1	2.0	4.7	7.1
SB-392	1.04	1.63	1.26	1.72
5 F (no supercoat)	0.96	1.65	0.7	2.86

综上误差分析,利用这一标定结果决定的曝光强度总相对误差小于 40%。进一步提高焦线的均匀性和增多数据点可提高标定结果的准确度。

五、结 论

利用线状激光等离子体和针孔透射光栅谱仪获得了均匀线状 X 光单色光源。提出了一种标定 X 光胶片的新方法。在这种单色源上,结合阶梯滤膜首次标定了国产无保护层 5 F 胶片在软 X 光波段的响应特性。这一标定结果可用于用这种胶片做为激光等离子体软 X 光诊断记录介质的数据处理。提高焦线的均匀性和采用分辨率更高的光谱仪(如采用线周期更小的透射光栅或采用反射光栅)可获得均匀性更好、单色性更高的均匀线状 X 光光源,从而可进一步提高胶片标定的精度。

作者对 LF 12 激光装置运行组全体人员在实验上给予的大力协助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 毛楚生等;《核聚变与等离子体物理》,1983, 3, No. 2 (Jun), 102.
- [2] K. Eidmann *et al.*; *Laser & Particle Beams*, 1986, 4, No. 3/4, 521.
- [3] Shisheng Chen *et al.*; in *Proc. 2nd International Colloquium on X-ray lasers*, (York University, 1990), to be published.
- [4] 王晓方等;《中国激光》,1990, 17, No. 7 (Jul), 407.
- [5] B. L. Henke *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1984, 1, No. 6 (Dec), 818.
- [6] Wannian Chen *et al.*; in *1990 Conference on Laser and Electro-optics 1990 Technical Digest Series (Optical Society of America, Wash. D. C. 20036, 1990)*, Vol. 7, Paper-GWF 42.
陈万年等;《光学学报》,1991, 11, No. 9 (Sep), 829~833.
- [7] 王晓方等;《物理学报》,1990, 39, No. 6 (Jun), 922.
- [8] B. L. Hene *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1984, 1, No. 6 (Dec), 828.
- [9] H. Nishimura *et al.*; *J. X-Ray Science Technology*, 1991 3, 14.

Uniform linear monochromatic soft X-ray source of laser plasma and its application for photographic film calibration

WANG XIAOFANG, CHEN SHISHENG, QIAN AIDI, LI YUELING,

FAN PINZHONG AND XU ZHIZHAN

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

GONG MEIXIA, LIU XIUQIN AND LEI ZHIYUAN

(*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068*)

(Received 6 May 1991; revised 8 July 1991)

Abstract

A uniform linear monochromatic soft X-ray source is created by combining a X-ray pinhole transmission grating spectrometer with a uniform line-focused laser produced plasma. As an application of such X-ray source, a new method is described for calibration of X-ray photographic film that the response of film density versus relative exposure is provided by a step wedge filter foil of known thickness and transmissivity at a given wavelength. Based on this method, the 5F X-ray film is calibrated for the first time in the soft X-ray region.

Key words: monochromatic X-ray source, uniform linear laser plasma, step wedge filter, X-ray film calibration