

X 射线胶片的脉冲光源响应标定*

何绍堂 黄文忠 孙永良 易荣清 周裕清
何 安 杜凤英 洪 伟

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 用 LF-11 激光装置的 $1.06 \mu\text{m}$ 脉冲激光加热 Cu 靶产生的 L-壳层线辐射作脉冲 X 射线源, 在曝光量为 $(0.01 \sim 10)^{-7} \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内, 标定了 KODAK AA-5, KODAK SWR 和 UFSH-O 软 X 射线胶片的响应曲线, 并与用连续光源标定的进行了对比. 结果表明, 这三种 X 射线胶片, 在强脉冲光源曝光条件下, 都存在着胶片响应互易律失效问题, 过去用连续光源标定的响应曲线, 在激光等离子体诊断实验中, 已经不能采用.

关键词 胶片的响应, X 射线胶片响应的标定, 胶片响应的互易律.

1 引 言

目前, 用于惯性约束聚变和 X 射线激光实验诊断的 X 射线胶片种类很多, 有 X 射线针孔照相和晶体谱仪用的 KODAK AA-5, KODAK 2495, 光栅谱仪用的 KODAK SWR, KODAK 101, UFSH-0 和一些国产胶片. 在处理实验数据时, 基本上都是采用连续的 X 射线源(Henke 源或同步辐射源)标定的响应曲线. 国外普遍用 Henke 等人^[1]标定的响应曲线. 本文作者曾对 KODAK SWR 胶片作过连续光源响应曲线的标定^[2], 对 KODAK AA-5 胶片作过脉冲光源相对响应曲线的标定^[3]. 随着 X 射线胶片在强脉冲光源(如: 激光等离子体)条件下作绝对测量的广泛使用, 近年来, 有的作者发表了用脉冲光源标定 KODAK 101 胶片响应曲线的文章^[4]. 标定的结果与用连续光源标定的有差异. 这表明在强脉冲光源曝光条件下要考虑响应的互易律失效问题. 胶片响应的互易律是指胶片曝光后的黑密度与曝光量及光源强度(照度)之间的关系. 若胶片的黑密度只依赖于曝光总量, 而与源的强度无关, 则胶片响应服从于互易律; 反之, 则胶片响应的互易律失效. 一般, 对于中等强度光源的曝光, 胶片响应的互易律是成立的; 对于高强度光源的曝光, 胶片响应的互易律会失效^[5, 6].

本文报道了用激光等离子体脉冲 X 射线光源标定软 X 射线胶片响应曲线的方法和实验结果, 证实了在高强度光源曝光条件下, 胶片响应的互易律失效, 并对失效的原因作了定性分析.

* 中国工程物理研究院科学基金资助项目.

收稿日期: 1993年10月20日; 收到修改稿日期: 1993年12月7日

2 实验方法

实验在 LF-11 激光装置上进行. 激光波长 $1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 600 ps , 能量在 $1 \sim 20 \text{ J}$ 之间可调, 焦斑直径控制在 $300 \mu\text{m}$ 左右. 用 0.2 mm 厚的纯铜(Cu)作靶, 激光辐照功率密度在 $5 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内可调. Cu 靶在强激光辐照下, 发射强的 L -壳层($0.8 \sim 1.5 \text{ keV}$)线谱, 并伴随较弱的连续谱和复合辐射谱. 用 $4.7 \mu\text{m}$ 厚 Al 膜作吸收滤片, 获得了平均能量约为 1.2 keV 的脉冲 X 射线源. 其强度用热释电量热计测量. 量热计用 $80 \mu\text{m}$ 厚的石墨(C)作吸收体, 对于能量低于 1.5 keV 的 X 射线, 几乎是全吸收. 为了使进入量热计的 X 射线的能量近似为 1.2 keV , 量热计前面加了 $4.7 \mu\text{m}$ 厚的 Al 吸收滤片. 量热计安装在与靶面法线成 45° 的位置上. 待标定的 X 射线胶片置在与量热计相对应的法线另一侧与靶面法线也成 45° 的位置. 以便在处理胶片被曝光剂量的数据时, 不必作 X 射线源的各向异性发射的修正. 在距靶中心 60 cm 至 2.4 m 的不同位置上, 每次打靶可以放置 8 块胶片. 每块胶片前也采用了 $4.7 \mu\text{m}$ 厚的 Al 膜作吸收滤片.

在激光辐照功率密度为 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下, Cu 等离子体发射 X 射线经 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 厚 Al 膜吸收后, 主要谱线在 1.2 keV 附近, 这已经被很多实验所证实^[4,7,8], 也被本文作者所验证^[9].

3 实验结果与分析

实验采用 Cu 等离子体 1.2 KeV 强脉冲 X 射线源, 其谱图如图 1 所示. 曝光后的胶片用 D-19 显影液、停影液和定影液进行处理. 其中 KODAK AA-5 和 KODAK SWR 胶片按文献[6]附录中规定的操作程序处理. UFSH-0 胶片的处理过程也基本类似, 只是将显影时间延长到 6 min . 胶片的黑密度扫描是在 3 cs (Joyce Loebel) 微密度计上进行的, 读出的密度值为扩散密度. 个别的胶片在 MD-100(德国生产)进行过试读, 经验证, 同一张胶片在 MD-100 上读出的数值比在 3 cs 上读出的高出 30% 左右. MD-100 读出的为镜反射密度. 此两者之间的差异与文献[1]给出的数值基本一致. 最后的数据均采用扩散密度值.

为了研究胶片响应的互易律失效, 用加速器质子源引发的荧光 X 射线, 对上述三种 X 射线胶片进行标定, 标定方法见文献[10]. 质子荧光 X 射线源是连续光源, 比激光等离子体源弱得多. 采用上述两种光源标定, 使用的胶片型号相同批号也相同.

由于 X 射线产生机制的差异, 很难找到两种标定方法完全相同能量的 X 射线. 采用质子荧光源标定时, 质子束轰击 Cu 或 Al 靶产生的 Cu- L_α (0.933 keV)或 Al- K_α (1.487 keV)特征线. 图 2~4 分别标明了用连续光源和 Cu 等离子体脉冲光源标定的曲线. 图 5 是三种胶片对脉冲光源响应的比较.

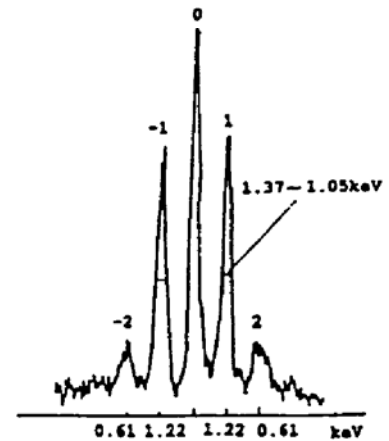


Fig. 1 Microdensitometer trace of XUV spectra obtained by transmission grating spectrograph from Cu plasma

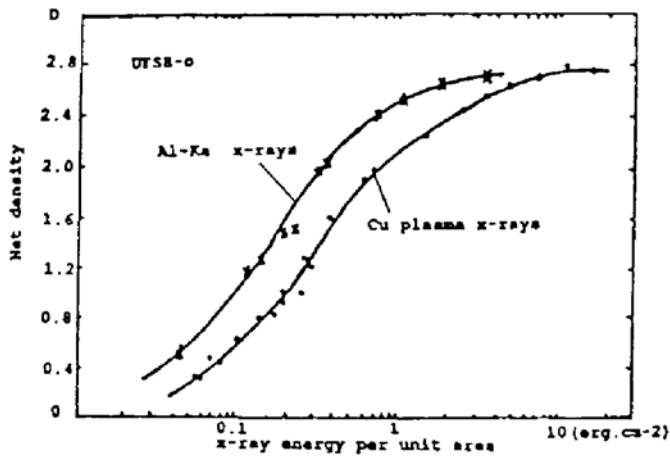


Fig. 2 Response curves for UFSH-O film from exposures of X-rays emitted from proton fluorescence source (x) and laser-induced pulse X-ray source (.)

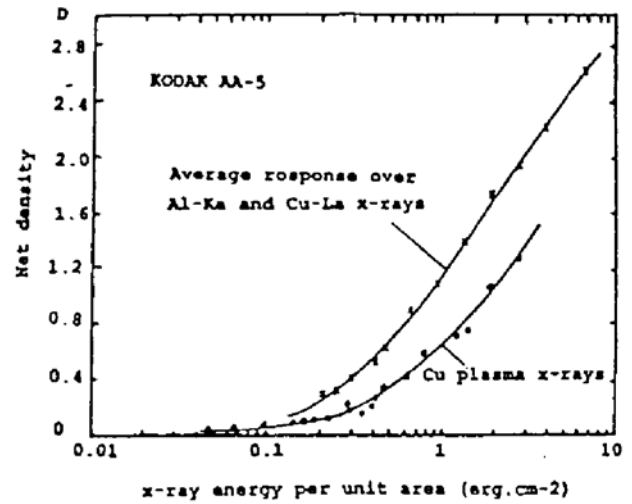


Fig. 3 Response curves for KODAK AA-5

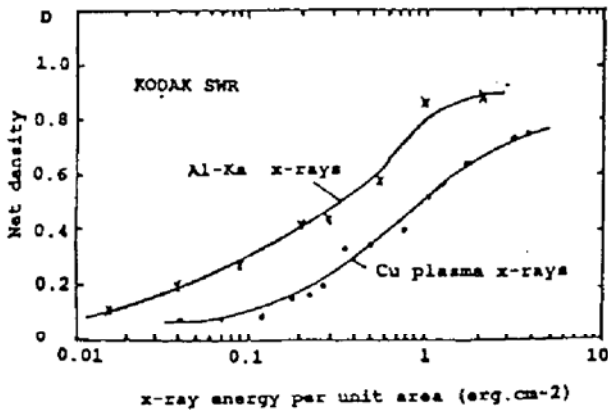


Fig. 4 Response curves for KODAK SWR

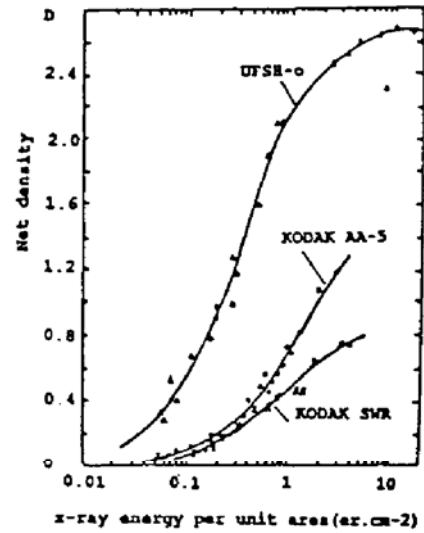


Fig. 5 Response curves for UFSH-O KODAK AA-5 and KODAK SWR from exposures of laser-induced pulse X-ray source

从图 2~4 看出, 脉冲光源与连续光源标定的响应曲线互不重叠, 脉冲光源的响应曲线在连续光源的下方. 即要求胶片的黑密度达到某一定值时, 脉冲光源有更多的曝光总量. 说明在激光等离子体实验条件下, 胶片响应的互易律已经失效. 按照 Gurney 和 Mott^[11] 关于高强度曝光引起胶片响应互易律失效的机理, 失效是由于填充空穴的银离子的迁移速度的迟缓引起的. 在高强度曝光时, 即在强脉冲光源曝光情况下, 两个光子到达胶片的时间差极短, 使被光子电离的银离子捕获电子的速度不能与光子的速度保持同步. 这样, 银离子形成可显影中心的中性银原子的数目就减少了. 即根据潜影形成理论, X 射线强度很高时, 在一个极短的时间内, 会出现一个溴化银 (AgBr) 颗粒同时被多个光子轰击的现象, 这段时间比形成一个中性银离子所需的时间短得多. 此时, 同时在一个 AgBr 颗粒中产生的光电子多数对银离子的中性化没有贡献. 这就是脉冲光源标定的胶片响应曲线处在连续光源的下方的原因.

从图 5 看出, 在 X 射线能量为 1.2 keV 区, UFSH-O 的灵敏度最高, KODAK AA-5 次之, KODAK SWR 最低. 本文未能对这三种胶片进行灵敏度随 X 射线能量(或波长)的变化情况进

行标定, 因为还没有建立具有各种波长的等离子体脉冲光源, 这一步工作留待以后进行.

结 论 实验证明, 在激光等离子体实验条件下, X 射线胶片曝光于强脉冲光源, 胶片响应的互易律已失效, 用连续光源(包括 Henke 源和同步辐射源等)标定的响应曲线已不能适用. 为此, 必须建立具有不同波长的单色脉冲 X 射线源, 重新标定各种胶片的响应曲线.

感谢 LF-11 激光装置运行人员的大力协助.

参 考 文 献

- [1] B. L. Henke *et al.*, Low-Wnergy X-ray response of Photographic film. I. Experimental characterization. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1984, 1(6): 828
- [2] 何 安等, 用 Henke X 光源标定 kodak SWR 底片的响应曲线. *强激光与粒子束*, 1991, 3(4): 493
- [3] 蔡玉琴, 杨上金, 张启仁, X 光底片在位相对标定. *强激光与粒子束*, 1991, 3(1): 121
- [4] H. Nishimura *et al.*, Influence of exposure time on the seneltivity of Kodak 101 X-Ray film. *J. X-Ray Sci and Tech.*, 1991, 3(1): 14
- [5] K. Mees, T. H. James, 照相过程理论(The Theory of the Photographic Process(1966)的中译本), 科学出版社, 陶宏等译, 1979: 168~185
- [6] H. Herz, *The photographic action of ionizing radiations in dosimetry and medical, industrial, neutron, auto-and microradlograph*, New York, London, Sydney, Toronto, Wiley-Interscience, a division of John Wiley & Sons Inc. (1969), 128~132
- [7] W. Lampart, E. Weber, J. E. Balmer, Comparnative X-ray spectroscopy of various z elements with wavelength calibration. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63(2): 273
- [8] M. Chaker, H. Pepin, V. Bareau *et al.*, Laser plasma X-ray sources for microlithography. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63(3): 892
- [9] 何绍堂等, 激光加热 Cu 和 NaF 靶产生的 1.2 KeV 区 X 射线转换效率的测量. *物理学报*, 1993, 42(8): 1252
- [10] 易荣清等, UFSH-O 胶片在质子荧光源上的标定. *强激光与粒子束*(被接受, 待发表).
- [11] W. Gurney, F. Mott, The theory of the photolysis of silver bromide and the photographic latent image. *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1938, 164(1): 151

Response Calibration of X-Ray Film to a Pulse X-Ray Source

He Shaotang Huang Wenzhong Sun Yongliang Yi Rongqing

Zhou Yuqing He An Du Fengying Hong Wei

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 20 October 1993; revised 7 December 1993)

Abstract By using the strong L-lines emitted from Cu plasma as pulse X-ray source produced by irradiating Cu target with a 1.06 μm pulse laser of the LF-11 laser facility, the reponses of X-ray film Kodak AA-5, Kodak SWR and UFSH-O were calibrated. Calibrated responses with the pulse X-ray source were compared with that with continuum X-ray source (fluoresent source excited by protons). These results showed the reciprocity failure. The response to continuum X-ray source is not suitable for the diagnostics in laser-induced plasma.

Key words response of film, response calibration of X-ray film, reciprocity failure.