

# 水窗波段附近激光等离子体 X 光 辐射产生的途径\*

王晓方 张正泉 范品忠 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 讨论了利用激光等离子体产生水窗波段 X 光辐射的可能途径。靶材、即原子序数的选取是决定产生这一波段辐射的基本因素。利用激光等离子体的平衡态和非平衡态特性都可在水窗波段产生高亮度 X 光辐射, 提出利用黑体辐射来实现水窗波段 X 光显微成像研究的方案。就目前的泵浦激光条件, 采用窄带辐射和黑体辐射可进行水窗波段 X 光显微成像的实验研究。利用超短脉冲与固体靶相互作用产生的黑体辐射除了可应用于水窗波段 X 光显微成像外, 还有助于时间分辨动力学过程研究。

**关键词** X 光源, 激光等离子体。

## 1 引 言

采用水窗波段(2.3 nm~4.4 nm)及附近的软 X 光可对活生物样品(置于水溶液环境)进行高衬比显微照相<sup>[1]</sup>。而利用闪光照相, 可对样品中的瞬态过程进行高分辨研究<sup>[2]</sup>。在目前的三种主要的 X 光源中, 同步辐射产生的 X 光能流较低, 获得一张足够曝光量的实验照片需较长时间(1 秒到几十分钟), 在此期间分子的热运动将使分辨力降低, 无法进行瞬态过程研究; 利用金属或气体放电产生的 X 光效率高, 但放电中等离子体源的漂移会直接影响分辨。虽可利用 X 光透镜克服源漂移这一障碍<sup>[3]</sup>, 但放电 X 光发射持续时间较长(几十纳秒到微秒)使得瞬态过程的研究又变得困难。强激光产生的等离子体具有独特的优点: 源位置稳定、X 光发射时间短、亮度高是目前进行闪光照相或瞬态过程分析的理想光源。本文首先讨论利用现有条件实现 X 光显微照相的条件, 接着讨论利用激光等离子体产生水窗波段 X 光辐射的可能途径, 并给出作者在这方面的研究结果。

## 2 显微成像对 X 光源的要求

为了对生物样品进行闪光照相, 即单次曝光成像, 要求足够亮的 X 光。对 X 光强度及泵浦激光装置的要求可做如下估算。根据文献[4]的实验结果, 设记录显微像的介质-光刻胶(如 PMMA)的感光灵敏度为  $s \approx 10 \text{ mJ/cm}^2$ 。如果采用近贴方式成像, 并设样品距光源  $r = 2 \text{ cm}$ ,

\* 国家 863 高新技术和上海市科委启明星计划资助项目。

收稿日期: 1995 年 8 月 15 日

这要求光源 X 光的能量为  $e \approx s \times 2\pi r^2 = 0.25 \text{ J}$ 。对激光等离子体 X 光转换效率的研究表明<sup>[5]</sup>，水窗波段的 X 光转换效率可达  $\eta = 2\%$  以上，这要求泵浦激光能量  $E_L = e/\eta = 12.5 \text{ J}$ 。考虑到水窗波段外的 X 光贡献，以及实验中对水窗波段 X 光发射效率的进一步优化（转换效率可高于  $\eta = 2\%$ ），这一激光能量是足够的。

### 3 水窗波段 X 光辐射源产生的途径

利用激光产生等离子体可有三种可能途径产生水窗波段 X 光辐射，1) 利用窄带 X 光；2) 利用激光等离子体产生的 X 光激光；3) 利用黑体产生的连续谱辐射。

一般情况下，激光聚焦到靶面产生的激光等离子体发射的 X 光由不同谱带构成。高分辨光谱表明，这些带发射由线谱和连续谱构成。作者详细研究了  $1.06 \mu\text{m}$ 、 $200 \sim 300 \text{ ps}$ ，靶面聚焦功率密度为  $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  的激光产生等离子体的 X 光发射随原子序数和激光功率密度的关系<sup>[6]</sup>。原子序数是影响 X 光辐射谱分布的基本参数。同一谱带的发射的峰值波长与 Moseley 定律符合很好，即：峰值波长  $\lambda$  与原子序数  $Z$  的关系为  $\sqrt{\lambda} \propto Z^{-1}$ ，因此可利用这一关系选择合适的原子序数，使水窗波段 X 光的转换效率最高。以水窗中  $3.0 \text{ nm}$  波长为例，图 1 给出了不同原子序数的等离子体在此波长辐射的相对强度比较。可见中  $Z$  元素材料产生的辐射对这一波长贡献大。这和其它文献中的研究是一致的<sup>[5, 7]</sup>。图 2 给出了典型的中  $Z$  元素 Mo 的 X 光谱，X 光发射主要来自 Mo 的 M 带。实验表明，选取合适材料可产生窄带宽的发射<sup>[1]</sup>。

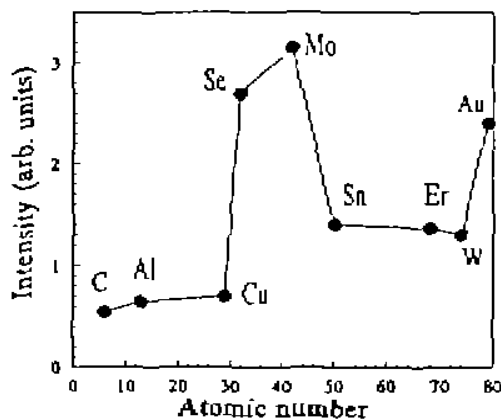


Fig. 1 Dependence of laser plasma x-ray emission at  $3.0 \text{ nm}$  on atomic number. (Laser wavelength;  $1.06 \mu\text{m}$ , pulsedwidth;  $250 \sim 300 \text{ ps}$ , intensity;  $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ )

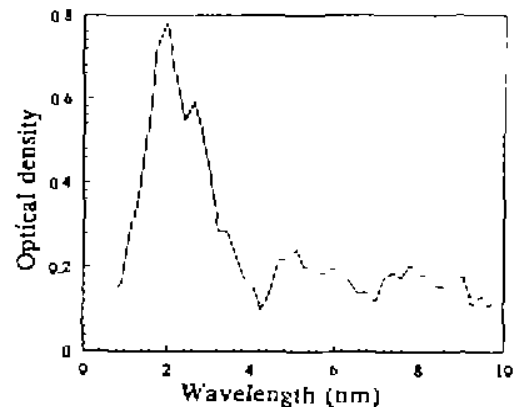


Fig. 2 Laser produced Mo plasma spectra. Laser condition is the same as in Fig. 1

X 光激光是单色性好，亮度高的光源，因而用它可进一步提高分辨力，如进行 X 光全息照相。目前利用激光等离子体产生的 X 光激光已完全可进行这方面实验研究<sup>[8]</sup>，但波长较长，尚在  $20 \text{ nm}$  附近。实现水窗波段的 X 光激光将对 X 光显微带来突破。目前已利用  $4.48 \text{ nm}$  激光演示了显微成像的原理实验，但已用到了世界上最大的高功率激光装置来驱动产生 X 光激光<sup>[9]</sup>。为了使这样的实验实用化，进行 X 光激光研究的一个基本重点是研究高效率的 X 光激光，向水窗波段迈进<sup>[4]</sup>。作者利用中型高功率激光装置（功率  $1 \text{ TW}$ 、脉宽  $100 \text{ ps}$ 、能量  $100 \text{ J}$ ），采用高效率的类锂机制，将 X 光激光波长推进到  $4.68 \text{ nm}$  ( $\text{Ti}^{19+} 4f - 3d$  跃迁)<sup>[10]</sup>。图 3 给出了产生这一波长 X 光激光条件下，等离子体 X 光辐射的光谱结构。从中可见，这一波长激光发射在等离子体的 X 光光谱中所占的强度没有明显优势，表明其亮度仍很低。目前尚需进一步提高效率，增强 X 光激光亮度。

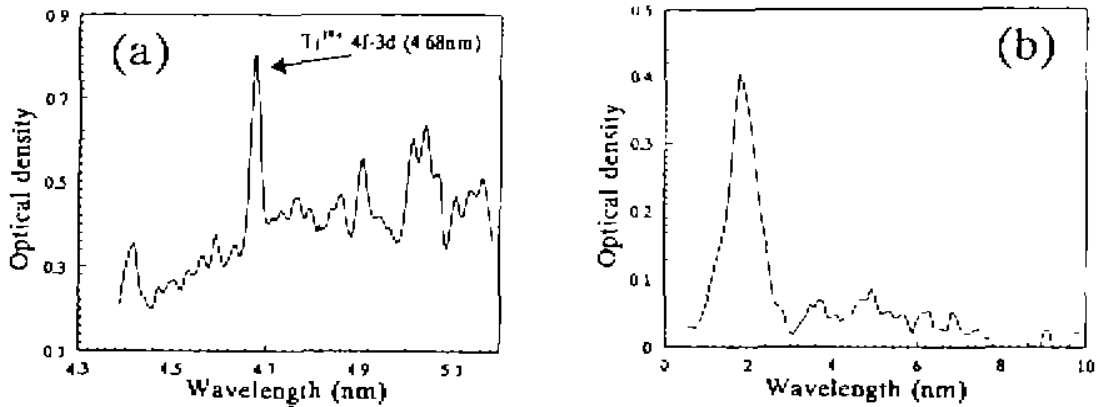


Fig. 3 (a) laser plasma X-ray spectra. (a) high resolution spectra near 1.7 nm. (b) Soft X-ray spectra from 1.0 to 10.0 nm. Laser wavelength: 1.05  $\mu\text{m}$ , pulsewidth: 110 ps, intensity:  $4 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$

高功率激光可将其能量在极短的时间(皮秒)内,注入到很小的区域(微米量级),因此可望产生高温的黑体辐射。由黑体辐射的维恩(Wien)位移定律,产生合适的辐射温度,可使黑体辐射的峰值波长位于水窗。研究表明,利用高 $Z$ 材料和空腔,由于辐射输运过程的作用,在适当条件下,可产生非常接近黑体的辐射谱<sup>[11]</sup>。如果黑体辐射的峰值波长为 3.0 nm,则要求辐射温度为 83 eV。由斯蒂芬-波耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律,其辐射能流为  $5.0 > 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。考虑一个直径为 2 mm 的腔体,这要求  $3 > 10^{11} \text{ W}$  的功率。对于 500 ps 的泵浦激光,设 X 光发射时间与激光脉宽同一量级,并取激光-X 光转换效率 40%,则要求激光能量 375 J。因此采用中型激光装置即可产生这样的光源。图 4 给出峰值波长为 3.0 nm 的黑体辐射的能谱。由此可见,其辐射强度半极大值全宽度对应的波段仅为 1.8~5.3 nm。因此,利用这一带宽光源进行 X 光显微照相也是可行的。而且,由于采用腔体光源,避免了等离子体溅射对成像的干扰。

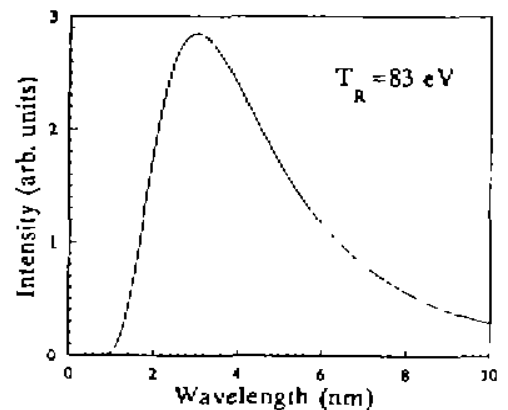


Fig. 4 Black body radiation spectra corresponding to temperature 83 eV

近年来飞秒高亮度激光的出现,产生黑体辐射的方法更为简便。无需采用空腔的约束,而是直接利用超快飞秒激光同高 $Z$ 平面靶的作用来实现。在飞秒脉冲与固体靶的作用期间,等离子体膨胀的尺度很小,因此可产生接近固体密度的等离子体<sup>[12]</sup>。在此高密度条件下,等离子体易达到热力学平衡。因此利用飞秒激光等离子体也可实现黑体辐射光源。设焦斑直径为 200  $\mu\text{m}$ (注:飞秒激光等离子体的尺度可比这一值小一个量级以上,本文考虑到记录介质的灵敏度,设为这样的尺度),X 光发射同激光脉宽同一量级,并考虑 0.1% 的激光-X 光转换效率,对于 200 fs 的激光,则产生峰值波长为 3.0 nm 的黑体辐射要求激光能量约 628 mJ,即要求一台 3 TW 量级的飞秒激光。目前在利用飞秒激光产生黑体辐射这方面的工作已取得了进展<sup>[13]</sup>。由于极短的脉宽,用这样的光源除了可实现理想的瞬态过程成像之外,将这种连续辐射的飞秒 X 光源结合 X 光单色仪还可产生连续可调的飞秒单色 X 光,因此在材料的时间分辨动力学过程研究,时间分辨光谱等研究中(要求的 X 光能流较前面讨论的显微成像低得多)也具有重要应用。

**结 论** 利用中 $Z$ 元素,可在水窗波段产生相对强的 X 光发射,并可进行窄带宽的 X 光显微成像研究。X 光激光可实现更高分辨的显微成像分析,但目前的水窗波段附近的 X 光激光

的亮度尚较低,不足以进行显微成像的实验研究,发展这一波段高效率的激光是它在显微成像方面实用化的前提。利用高 $Z$ 元素的激光等离子体,可实现峰值波长在水窗波段的强黑体辐射源,并可用于X光显微成像。采用超快飞秒激光辐照固体靶产生的飞秒时间尺度黑体辐射源,将在包括瞬态成像在内超快时间分辨过程等研究中具有重要应用。

致谢:作者感谢林礼煌、项惠珠等二室其他人员在有关实验中提供的指导和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] J. C. Solem, G. C. Baldwin, Microholography of living organisms. *Science*, 1982, 218(4589): 229~235  
D. Attwood *et al.*, X-ray microscopy for the life and physical sciences. *OSA Proc. Short Wavelength Coherent Radiation: Generation and Application*, R. Falcone and J. Kirz eds. (OSA, WA, DC, 1988), pp. 274~276
- [2] R. A. London, M. D. Rosen, J. E. Irebes *et al.*, Wavelength choice for soft x-ray laser holography of biological samples. *Appl. Opt.*, 1989, 28(15): 3397~3404
- [3] 颜一鸣, 用于亚微米光刻的金属等离子体箍缩(Pinch)软X射线源, (北京师范大学低能核物理研究所, 1994年7月)
- [4] T. Tomie *et al.*, Three-dimensional readout of flash x-ray images of living sperm in water by atomic-force microscopy. *Science* 1991, 252: 691~693
- [5] K. Eidmann, T. Kishimoto, Absolutely measured x-ray spectra from laser plasmas with targets of different elements. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(7): 377~378
- [6] X. Wang *et al.*, Laser plasma x-ray emission studies using a pinhole transmission spectrometer. *J. Appl. Phys.*, 1991, 69(4): 2015~2020
- [7] T. Mochizuki *et al.*, Atomic-number dependence of soft-x-ray emission from various targets irradiated by a 0.53- $\mu\text{m}$ -wavelength laser. *Phys. Rev.*, 1986, A33(1): 525~539
- [8] D. Eder, D. Matthews eds. *X-Ray Lasers 1994*, Amer. Inst. Phys. Press., NY, 1994, 553~558
- [9] L. B. Da Silva *et al.*, Demonstration of X-ray microscopy with an x-ray laser operating near the carbon K edge. *Opt. Lett.*, 1992, 17(10): 754~756
- [10] 同[8], pp. 68~75
- [11] R. Sigel, Laser generated intense thermal radiation. *Handbook of Plasma Physics Vol. 3*, A. M. Rubenchik and S. Witkowski eds. (Elsevier Science, Amsterdam, 1991), pp. 163~197
- [12] M. Murnane *et al.*, High-density plasmas produced by ultrafast laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62(2): 155~158
- [13] Terawatt lasers generate x-ray continuum from gold target. *Laser Focus World*, 1995, 31(2): 15~16

## Paths to the Production of Water-Window X-Ray with Laser Plasmas

Wang Xiaofang      Zhang Zhengquan      Fan Pinzhong      Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 August 1995)

**Abstract** Various approaches to the production of soft x-ray in the water-window (2.3~4.4 nm) and the nearby wavelength range are discussed. Atomic number of the material used as target is the most fundamental factor which affects x-ray production and conversion efficiency. High intense x-rays can be realized with laser plasmas in nonequilibrium or in equilibrium state, and that x-rays from black body sources produced by laser plasmas in equilibrium state be used for x-ray microscopy of living samples is proposed. With the present lasers, x-ray microscopy can be made using narrow band emission or black body radiation from laser plasmas. The black body x-ray source produced by high intense femtosecond laser interaction with solids of high atomic number is useful in time-resolved spectroscopy as well as in x-ray microscopy.

**Key words** X-ray source, laser plasma.