

# 预脉冲激光对线状等离子体 X 射线 发射特性的影响

李儒新 张正泉 徐至展 范品忠 韩申生 陆培祥  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 报道了能量比为 1:10、间隔为 200 ps、脉冲宽度为 120 ps 的双脉冲激光驱动线状等离子体的 X 射线发射特性。通过与单脉冲驱动情况比较, 获得了预脉冲作用下, 等离子体轴向辐射增强的空间分布特性。并针对若干重要的辐射跃迁的增强情况, 讨论了它们各自的物理原因。

**关键词** 预脉冲, 激光等离子体, X 射线发射增强。

## 1 引 言

激光等离子体 X 射线在诸如 X 射线激光和其他基本过程研究领域引起人们广泛的兴趣<sup>[1]</sup>。对于等离子体 X 射线源的应用, 如 X 射线显微、全息以及 X 射线光刻, 增强 X 射线的发射, 尤其是增强某些特定波长范围(如对活生物样品的 X 射线显微和全息有用的水窗波段)的发射是非常重要的。增强非相干或相干的 X 射线发射的一个行之有效的方法就是采用预脉冲加主脉冲的双脉冲激光驱动<sup>[2]</sup>。

利用预脉冲使 X 激光的泵浦更加有效并提高 X 激光的输出强度, 已不仅在理论上<sup>[3~5]</sup>而且在实验上<sup>[6~9]</sup>得到了验证。针对光场诱导(Optical-field induced)复合机制, Burnett 等和 Amendt 等分别从理论上导出采用预脉冲能有效产生容易达到反转状态的等离子体<sup>[3]</sup>。即在尽量少加热自由电子的情况下达到反转所需的电离级。针对碰撞激发机制, Maxon 等和 Norreys 等提出的双脉冲驱动方案可望在中等功率激光装置上实现增益饱和的水窗波段的 X 激光<sup>[4]</sup>。Nilsen<sup>[5]</sup>认为在主脉冲到来之前用预脉冲形成预等离子体的主要作用在于能够减小高密度区的密度梯度, 从而减少折射, 达到提高有效增益长度和改善输出光束的方向性和相干性的目的。在实验上, 许多小组利用预脉冲或多脉冲技术在不同的泵浦机制的极紫外激光研究中, 有很多成功的报道。例如, Sher 等<sup>[6]</sup>利用预脉冲技术使内壳层光电离 Xe III 109 nm 激光输出提高 10 倍以上。Hara 等<sup>[7]</sup>采用不等强度的 16 个短脉冲驱动, 使 Al<sup>10+</sup> 4f - 3d 的增益系数由等强度多脉冲情况下的 2 cm<sup>-1</sup> 提高到 4 cm<sup>-1</sup>。Cairns 等<sup>[8]</sup>采用预脉冲技术使类氦锗 X 射线激光线中的 J = 0 - 1 跃迁线相对于 J = 2 - 1 线大大增强。Nagata 等<sup>[9]</sup>采用两步电离方案在电子温度极低时达到所需离化态, 实现了高增益的光场诱导电离复合 Lyman- $\alpha$  跃迁激光。

关于预脉冲对非相干 X 射线产生效果的报道, 几十皮秒到纳秒脉冲的工作主要是点聚焦

情况下无严格光谱分辨的某些波段的 X 射线发射增强<sup>[10]</sup>, 研究了预脉冲强度和主脉冲延时等因素对发射的影响。最近 Teubner 等<sup>[11]</sup>研究了脉宽为 0.5 ps 的双脉冲激光等离子体的辐射中一些特定的跃迁特性, 并由此得出了导致发射增强的物理原因。关于预脉冲对相干 X 射线产生的研究中, Hara 等<sup>[12]</sup>的结果是时间分辨的, Cairns 等<sup>[8]</sup>的结果是角分辨的。预脉冲对 X 射线产生的影响主要来源于预脉冲会改变主脉冲吸收区和 X 射线发射区的空间分布<sup>[5~11]</sup>, 因此获得预脉冲作用下 X 射线发射增强的空间特性对正确理解双脉冲加热的物理过程十分重要。另外, 由于线聚焦等离子体的膨胀过程与点状等离子体明显不同, 针对提高相干 X 射线发射性能的目的, 本文以线状 Si 等离子体为例, 着重研究了能量比为 1:10、间隔为 200 ps、脉冲宽度为 120 ps 的双脉冲激光驱动线状等离子体的 X 射线发射特性。通过与单脉冲驱动情况比较, 获得了预脉冲作用下, 等离子体轴向辐射增强的空间分布特性。并针对若干重要的辐射跃迁的增强情况, 讨论了它们各自的物理原因。

## 2 实验条件和诊断设备

实验在上海光学精密机械研究所高功率激光 LF12 装置上进行的。激光波长为 1.05  $\mu\text{m}$ , 脉宽为 120 ps, 入射激光束经列阵柱面透镜和非球面透镜聚焦后, 形成长为 20 mm、宽为 100  $\mu\text{m}$  的焦线。实验中采用表面抛光的硅平板靶(靶长为 18 mm), 靶面激光功率密度约为  $10^{13} \text{ W/cm}^2$ , 用可见光条纹相机实时监测打靶脉冲的波形和脉宽。打靶双脉冲能量比为 1:10, 间隔为 200 ps。图 1 为由条纹相机得到的双脉冲激光波形。

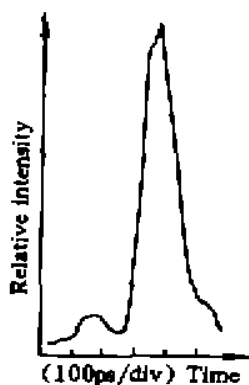


Fig. 1 The double-pulse trace obtained by streak camera

实验主要的诊断设备为沿线状等离子体轴向放置的消像散掠入射平面光栅光谱仪<sup>[13]</sup>, 具有沿靶面法向的一维空间分辨能力, 光谱分辨率约为 0.01 nm, 空间分辨率约为 35  $\mu\text{m}$ , 成像放大倍数为 2。采用已相对标定的 SIOFM-5FW X 光底片<sup>[14]</sup>记录时间积分光谱。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 轴向发射增强

有预脉冲和无预脉冲激光驱动时的轴向光谱如图 2 所示。发现短波处(4~6 nm)的连续谱和线谱在有预脉冲情况下明显增强, 较长波段虽然也有类似现象, 但由于这些波段的光谱中来自短波长高级谱的影响较严重, 必须在解谱之后才能得出准确的结论。4~6 nm 的连续谱是由多重复合谱(即由多级离化态到低级离化态的基态或低激发态的复合谱)叠加而成的, 假设连续谱是光性薄的, 则轴向发射的增强对应于等离子体电子温度的增加, 这是因为在预脉冲作用下, 激光被等离子体吸收的比例增大了。而在单脉冲作用下, 120 ps 的脉冲在功率密度为  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  时, 激光能量仅被吸收 40%

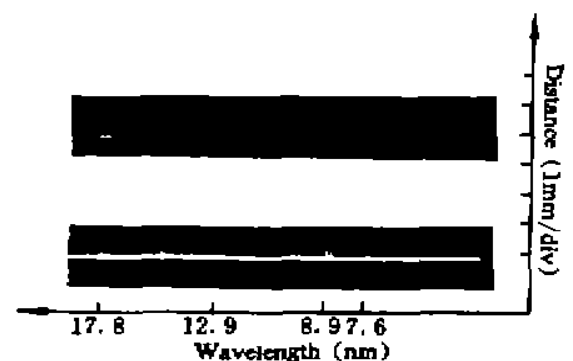


Fig. 2 The typical photograph of on-axis spectra obtained with pre-pulse (lower) and without pre-pulse (upper)

左右。

图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)分别给出两种激光驱动情况下  $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$ 、 $4f - 3d$  和  $5f - 3d$  跃迁的轴向强度及强度比的空间分布，可以看出强度增强系数在空间上近似地呈 V 字形分布。 $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$  的增强最为显著，在近靶面处最大增强倍数约为 7，而  $\text{Si}^{11+} 4f - 3d$  和  $5f - 3d$  在近靶面处最大增强倍数分别为 2.4 和 3 左右。这三个跃迁的轴向强度增强系数在距靶面 100  $\mu\text{m}$  附近有一极小值，然后随离开靶面距离的增大而增大(由于单脉冲产生的  $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$  在远靶面处较弱，信噪比低，在分析中只取 300  $\mu\text{m}$  以内的数据)。 $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$ 、 $4f - 3d$  和  $5f - 3d$  跃迁在近靶面处都是光性厚的，在预脉冲作用下，激光吸收增大，电子温度增高使光学厚度减低是这些跃迁发射增强的一个可能的原因。此外， $3d - 2p$  主要是在加热期间和复合早期发射的，对应于高温和高密度区，在预脉冲作用下，更高的电子温度和更小的电子密度梯度均有利于近靶面处的发射增强。 $4f - 3d$  和  $5f - 3d$  则主要是在复合的中、后期发射的，它们的强度与类氦离子丰度、电子密度和温度直接相关，在下文将进一步讨论。

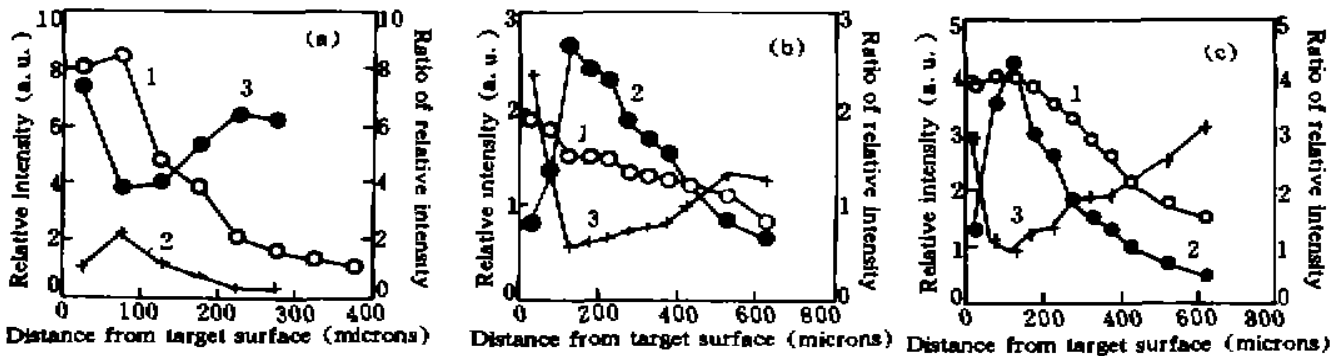


Fig. 3 The spatial distribution of on-axis intensity of  $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$  (a),  $4f - 3d$  (b) and  $5f - 3d$  (c) transition under two kinds of laser conditions and intensity ratio of that obtained with pre-pulse to that obtained without pre-pulse. Curve 1, 2, 3 represent with pre-pulse, without pre-pulse, intensity ratio respectively

### 3.2 等离子体参数的估计

Zhang 等<sup>[15]</sup>论证了类氦和类氢离子的共振线强度比可用于诊断快速复合的等离子体的参数，沈百飞等<sup>[16]</sup>将此法推广到利用类锂和类铍离子共振线强度比诊断剥离到类氦离子的复合等离子体的参数。本文利用  $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$  与  $\text{Si}^{10+} 2s3d - 2s2p$  强度比作为等离子体相对温度的近似判据。图 4 给出了两种驱动方式下，这一强度比随离靶面远近的变化情况。由图可见，有预脉冲情况下的强度比始终高于无预脉冲情形，表明等离子体的温度确实增高。虽然近靶面处由于光厚影响，误差较大，但离靶面较远处的结果是可靠的。当然绝对温度的测量必须采用其他的诊断方法。

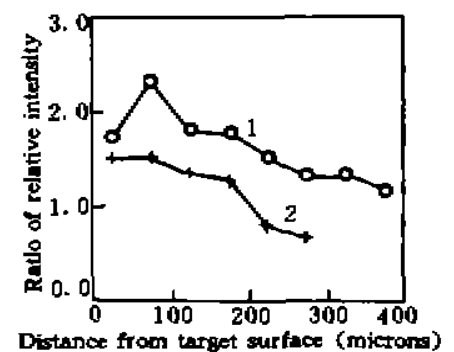


Fig. 4 The spatial distribution of on-axis intensity ratio of  $\text{Si}^{11+} 3d - 2p$  transition to  $\text{Si}^{10+} 2s3d - 2s2p$  transition. Curve 1, 2 represent with and without pre-pulse respectively

作者曾利用类锂离子  $5f - 3d$  跃迁谱线的斯塔克加宽来估测等离子体电子密度<sup>[17]</sup>。这种方法的不足是只能得出  $5f - 3d$  发射期间的密度。本文采用准静态近似的线性斯塔克理论来计算电子密度。电子密度的绝对值有高达 2 ~ 3 倍的误差<sup>[18]</sup>，但本文中只比较两种驱动方式下电子密度的相对差别，其结果是可靠的。测量结果表

明两种驱动方式下近靶面处电子密度的梯度类似,考虑到 $5f-3d$ 主要是在复合的中、后期的中低密度区发射的,上述实验结果就不难理解。然而在远靶面处( $>300\ \mu\text{m}$ ),有预脉冲时的电子密度比无预脉冲时要高1倍左右,这可能与高温时流体速度较大有关。

$4f-3d$ 跃迁在距靶面约 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 处有一个发射减弱区,如图3(b)所示,即有预脉冲时的发射比无预脉冲时更弱。如果假设单脉冲时,此空间范围为 $4f-3d$ 辐射的放大区,但在有预脉冲时由于电子温度高,不适合三体复合泵浦产生反转和放大,则可以解释此现象。这一结论也可由两种驱动情况下,该空间区域的 $4f-3d$ 和 $4d-3p$ 跃迁强度比的比较来作定性的验证。当然,要对图3的结果作全面的解释则需从理论上详细模拟双脉冲加热、膨胀和辐射的全过程。

进一步的工作将研究预脉冲对等离子体参数沿线状等离子体长度方向的分布的时间过程的影响,以期发现它对改善等离子体轴向均匀性的作用。

**结 论** 研究了能量比为1:10、间隔为 $200\ \text{ps}$ 、脉冲宽度为 $120\ \text{ps}$ 的双脉冲(主脉冲功率密度为 $10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$ )激光驱动线状等离子体的X射线发射特性。通过与单脉冲驱动情况比较,获得了预脉冲作用下,等离子体轴向辐射增强的空间分布特性。着重比较了两种驱动情况下 $\text{Si}^{11+}$   $3d-2p$ 、 $4f-3d$ 和 $5f-3d$ 跃迁的轴向强度的空间分布,以及电子温度和密度的空间分布情况,可以看出轴向强度增强系数在空间上呈近似的V字形分布,并讨论了它们各自的物理原因,包括激光吸收、光厚、折射、电子温度等等。发现对不同的跃迁,起主要作用的因素各有不同。

作者衷心感谢中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光系统LF12运行组的大力支持和合作。王晓方副研究员、刘亚清硕士、张令清博士和宋向阳博士也参加了部分实验工作,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] R. Sigel, X-rays from laser-produced plasma. *Proc. SPIE*, 1989, 1140: 6~10
- [2] M. H. Key, XUV laser research at Rutherford Appleton Laboratory. *Proc. SPIE*, 1989, 1140: 21~27
- [3] N. H. Burnett, G. D. Enright, Population inversion in the recombination of optically ionized plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-28(10): 1797~1808
- P. Amendt, D. C. Eder, S. C. Wilks et al., X-ray lasing by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66(20): 2589~2592
- [4] S. Maxon, K. G. Estabrook, M. K. Prasad et al., High gain X-ray lasers at the water window. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70(10): 2285~2288
- P. A. Norreys, A. Djaoui, Ni-like collisional lasers using moderate power laser drivers. *Annual Report of Central Laser Facility*, Rutherford Appleton Laboratory, 1994: 95~96
- [5] J. Nilsen, B. J. MacGowan, L. B. Dasilva et al., Prepulse technique for producing low-Z Ne-like X-ray laser. *Phys. Rev. (A)*, 1993, 48(6): 4682~4685
- [6] M. H. Sher, S. J. Benerofe, Prepulsing of laser-produced plasmas for more efficient pumping of extreme-ultraviolet laser. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, 8(12): 2437~2441
- [7] T. Hara, K. Ando, H. Hiro et al., Compact soft X-ray lasers pumped by a pulse-train laser, in *X-ray lasers 1994*, paper 2P12, AIP Conference Proceedings 332: 181~185
- [8] G. F. Cairns, C. S. Lewis, A. G. MacPhee, et al., Enhancement of the  $J=0-1$  (19.6 nm) line relative to the  $J=$

- 2-1 (23.6 nm) line in the germanium XUV laser Using a prepulse technique, Annual Report of Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory, 1994, 15~17
- [9] Y. Nagata, K. Midorikawa, S. Kubodera *et al.*, Soft-X-ray amplification of the Lyman- $\alpha$  transition by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71(23): 3774~3777
- [10] R. Weber, J. E. Balmer, Soft X-ray emission from double-pulse laser-produced plasma. *J. Appl. Phys.*, 1989, 65(5): 1880~1884
- R. Kodama, T. Mochizuki, K. A. Tanaka *et al.*, Enhancement of KeV X-ray emission in laser-produced plasmas by a weak prepulse laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 50(12): 720~722
- K. A. Tanaka, A. Yamauchi, R. Kodama *et al.*, Enhancement of soft X-ray emission using prepulses with  $2\omega$  and  $4\omega$  laser plasmas. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63(5): 1787~1789
- [11] U. Teubner, G. Kühnle, F. F. Schäfer, Detailed study of the effect of a short prepulse on soft X-ray spectra generated by a high-intensity KrF laser pulse. *Appl. Phys. (B)*, 1992, 54(4): 493~499
- [12] T. Hara, K. Ando, H. Hiro *et al.*, Compact soft X-ray laser pumped by a pulse-train laser. *Physics of High Power Laser Matter Interactions*, S. Nakai and G. H. Miley Ed., World Scientific, 1992, 138~144
- [13] P. Z. Fan, Z. Q. Zhang, J. Z. Zhou *et al.*, Stigmatic grazing-incidence flat-field grating spectrograph. *Appl. Opt.*, 1992, 31(31): 6720~6723
- [14] P. X. Lu, P. Z. Fan, Z. Z. Xu *et al.*, A simple in situ calibration technique for soft-X-ray film. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, 64(10): 2879~2882
- [15] J. Zhang, F. Walsh, P. A. Norreys *et al.*, Diagnostic of rapidly recombining plasmas using resonance line ratio. *Annual Report of Central Laser Facility*, Rutherford Appleton, Laboratory, 1994, 6~7
- [16] 沈百飞, X 射线激光的理论研究和数值模拟. 上海光机所博士学位论文. 1994, 7
- [17] P. X. Lu, Z. Q. Zhang, Z. Z. Xu *et al.*, Spatial distributions of X-ray lasing line width and electron density in a Li-like silicon plasma. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(10): 1649~1651
- [18] J. C. Moreno, H. R. Griem, R. W. Lee *et al.*, Stark-broadening measurements of  $3d - 5f$  transitions in lithiumlike and heliumlike ions. *Phys. Rev. (A)*, 1993, 47(1): 374~379

## Effect of Pre-Pulse on Line-Shaped Laser-Produced-Plasma X-Ray Radiation

Li Ruxin      Zhang Zhengquan      Xu Zhizhan  
Fan Pinzhong      Han Shensheng      Lu Peixiang

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

(Received 9 February 1995)

**Abstract** The effect of pre-pulse on line-shaped laser-produced-plasma X-ray radiation was studied. The intensity of pre-pulse is 10% of that of mainpulse, the duration of each pulse is 120 ps, and the delay of main-pulse to pre-pulse is 200 ps. The spatial characteristics of the pre-pulse effect were obtained, and some important transitions and their physical origin were discussed.

**Key words** pre-pulse, laser-produced-plasma, enhancement of X-ray emission