

文章编号: 0258-702X(2001)07-0612-05

飞秒强激光作用下微毛细管等离子体 X 射线辐射特性*

钟方川 覃岭 邓健 胡雪原 朱瑜哲 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所强光光学开放实验室 上海 201800)

提要 进行了超短强激光脉冲与玻璃微毛细管相互作用的探索性研究。对不同能量下,不同长度的玻璃毛细管的 X 射线谱进行了测量、分析。结果表明由于微毛细管的光导作用,随着微毛细管长度的增加,X 射线的强度显著增强。利用复合辐射吸收边测量了作用过程中毛细管等离子体温度,表明随着激光能量增加电子温度升高。

关键词 飞秒强激光,微毛细管,X 射线辐射

中图分类号 O 434.1 **文献标识码** A

X-ray Emission Properties of Micro-capillary Plasma Irradiated with Femtosecond Intense Laser

ZHONG Fang-chuan QIN Ling DENG Jian HU Xue-yuan

ZHU Yu-zhe ZHANG Zheng-quan XU Zhi-zhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A novel experiment has been carried out for studying the interaction between ultra-short intense laser pulses and glass micro-capillary. The X-ray emissions from variety capillary lengths and in different laser energy have been measured and analyzed. Experimental results show that owing to the light guide of capillary, the intensity of X-ray emission is increased intensively when the capillary length is longered. The plasma temperature is estimated by the recombination edge method and found that the temperature is increased with the increasing of the laser pulse energy.

Key words femtosecond intense laser, micro-capillary, X-ray emission

1 引言

由于结构特殊的微毛细管在各方面得到了应用,如对从可见到 X 射线波段的光信号的传输、聚焦和成像^[1~3]。近年来飞秒强激光与毛细管相互作用的研究开展很快,这主要是因为:1) 强光传输和整形。由于毛细管内壁对激光的反射,使毛细管具有光导效应,从而可用来传输飞秒强激光。S. Jackel 等用玻璃微毛细管传输了功率达 1 TW 的飞秒强激光^[4]。当毛细管内充以气体介质,通过强激光场作用下介质的非线性效应,使激光脉宽发生改变。C. Spielmann 等在毛细管里充氩气对激光脉冲进行展

宽然后压缩获得了 5 fs 的超短激光脉冲^[5]。2) 大尺度等离子体 X 射线源的获得。由于毛细管的光导作用,增加了激光与等离子体的作用长度,可用于获得高亮度、高重复频率的等离子体 X 射线源。同时毛细管 X 射线源使 X 射线的产生与传输合为一体,提高了传输效率,并可利用微毛细管对 X 射线的聚焦作用,改善其发散度和方向性,使其能更好地应用于医学、电子等领域。C. Stockl 等进行纳秒激光与微毛细管作用 X 射线发射的研究^[6]。而飞秒强激光与微毛细管作用下的 X 射线辐射特性还待开展。3) 毛细管等离子体波导及 X 射线激光。利用放电或预激光脉冲,在毛细管内产生预等离子体,预等离子体向毛细管轴扩散,形成管壁附近高轴上低的密度通道,构成等离子体波导。由于毛细管能产生大尺度的等离子体,而波导的形成又进一步增

* 863 计划和中国科学院上海分院择优项目资助。

收稿日期 2000-04-24;收到修改稿日期 2000-07-04

加了抽运激光与等离子体的作用长度,从而可以提高 X 射线激光的增益长度积(GL 值)。Ehrlich 等利用毛细管放电获得了等离子体密度通道^[7]。J. J. Rocca 等利用毛细管放电实现了 C VI Balmer 线的 X 射线激光^[8]。而最近美国 Princeton 大学的 D. V. Korobkin 等报道了通过预、主脉冲与毛细管相互作用,用预脉冲形成密度通道,实现了类-H Li 和类-H B 的 X 射线激光^[9,10]。

为了研究超短强激光与微毛细管作用过程中 X 射线的发射特性,了解激光和 X 射线在毛细管中的传输和吸收过程,并探索用毛细管进行强激光光场诱导电离 X 射线激光的可行方案,我们进行了超短强激光与毛细管作用时 X 射线辐射特性的研究。利用高灵敏度的大面积透射光栅谱仪对不同激光能量下不同长度玻璃微毛细管的 X 射线辐射进行了测量和分析。结果表明由于微毛细管对激光的光导作用,随着毛细管增长,X 射线辐射明显增强。

2 实验安排

实验是在中国科学院上海光机所强光光学开放实验室进行的。所用激光器为脉宽 45 fs,最高能量 250 mJ,中心波长为 785 nm 的 5 TW 级钛宝石飞秒激光器。实验光路如图 1 所示。来自激光器的线偏振

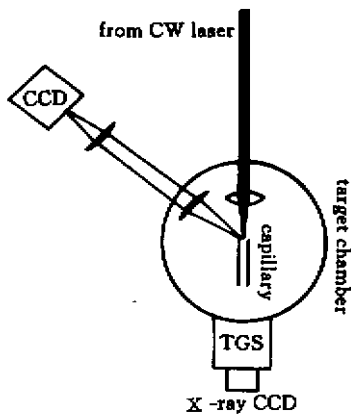


图 1 实验光路图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

光经聚焦透镜聚焦到置于真空靶室的毛细管口内。激光能否完全聚焦到毛细管内由与光束成 45° 的放大成像系统成像后由 CCD 监测。X 射线谱由轮胎镜加大面积透射光栅组成的透射光栅谱仪(TGS)在毛细管尾端来获得,谱由软 X 射线 CCD 记录。实验时采用 1000 lines/mm,5000 lines/mm 两种大面积光

栅(主要是前者),在 CCD 敏感面内对应的摄谱范围分别为 0~50 nm,0~15 nm,谱分辨分别为 0.15 nm 和 0.05 nm。摄谱时在光栅前加了 400 nm 厚的铝膜,以滤去前向摄谱时强的打靶光本底。为了获得 X 射线谱,我们对打靶激光、微毛细管、透射光栅谱仪进行了严格的准直。实验时靶室真空好于 1.0×10^{-3} Pa。

实验时选用玻璃毛细管,因其取材和制作比较容易,且其内壁比较光滑,对激光具有较好的反射。采用玻璃毛细管还可进行在光场诱导电离下实现氧的 X 射线激光的探索。

3 实验结果和分析

3.1 毛细管 X 射线辐射

图 2 给出了 5000 lines/mm 大面积透射光栅获得的波长在 0~10 nm 内的玻璃毛细管 X 射线谱。毛细管的内径为 100 μ m,长为 6 mm,打靶时激光能量为 50 mJ。主要线谱对应的离子态已标在谱线上方。强的氧的 2.16 nm 的出现表明 O 已经被电离到

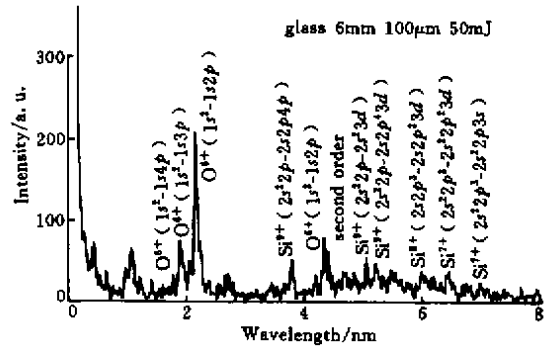


图 2 5000 lines/mm 光栅测得的玻璃毛细管 X 射线谱

Fig.2 X-ray spectrum from glass capillary measured with 5000 lines/mm grating

类 He。而 Si 最高被电离到 Si^{9+} 。图 3 为由 1000 lines/mm 得到在相同条件下的 10~50 nm 范围内的 X 射线谱。谱中 10~17 nm 范围内的谱线由于铝膜吸收边的影响而未能得到真实的反映。17.2 nm 左右的强辐射带主要来自 O V 的辐射。而 35 nm 后的信号主要为 17.2 nm 左右辐射的二级谱。由图 2,图 3 可知在作用过程中毛细管靶的 X 射线辐射在波长上具有较宽分布,从 2 nm 左右开始到 30 nm。且等离子体具有 O^{6+} , O^{5+} , O^{4+} , Si^{9+} , Si^{8+} , Si^{7+} 等多个阶态的离子共同存在。在激光与毛细管作用过程中,等离子体的产生由光场电离和碰撞电离共同作用。

多电离态的存在是由毛细管壁内光强分布不均所致。表 1 给出了 O 及 Si 元素由光场电离到各阶离子所需的光强。根据激光与毛细管相互作用中毛细管壁上的光强计算^[12], 可得 50 mJ 下毛细管内壁上的最大光强为 $5.89 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 光场电离所能得到的最高电离态为 OIV 和 SiV。实验中比较高的离子不是光场电离产生的, 而是作用过程中的碰撞电离所致。因此在毛细管与激光作用过程中, 除光场电离外, 碰撞电离起着重要作用。下面我们对在不同能量的激光作用下不同长度的玻璃毛细管的 X 射线进行了分析。

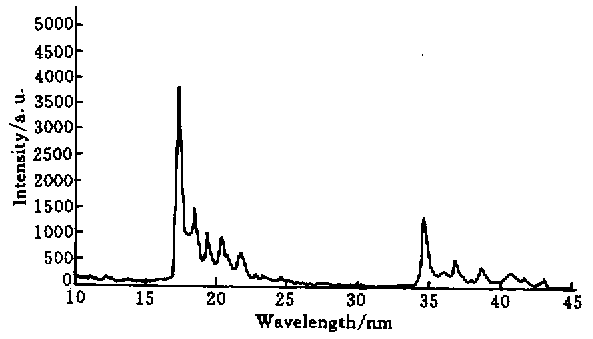


图 3 1000 lines/mm 光栅得到的玻璃毛细管 X 射线谱
Fig.3 X-ray spectrum from glass capillary measured with 1000 lines/mm grating

表 1 光场电离各阶 O 和 Si 离子的阈值光强及电离后电子的能量

$$(I_{th} = 4.0 \times 10^9 E_i^4 / Z^2, T_e = 7.6 \times 10^{-6} E_i^{9/2} / Z^3, E_i \text{ 为电离能, } Z \text{ 为有效电荷}^{[11]})$$

Table 1 Laser intensity threshold and the residual energy of electrons after optical-field ionization for O and Si ions

$$(I_{th} = 4.0 \times 10^9 E_i^4 / Z^2, T_e = 7.6 \times 10^{-6} E_i^{9/2} / Z^3, E_i \text{ is ionization energy, } Z \text{ is effective charge}^{[11]})$$

Ionization state	Ionization energy/eV	Laser intensity $I_{th}/\text{W/cm}^2$	Electron temperature T_e/eV
O I	13.614	1.37×10^{14}	0.96
O II	35.06	1.51×10^{15}	8.5
O III	54.936	4.0×10^{15}	18.9
O IV	77.414	9.0×10^{15}	37.52
O V	113.9	2.69×10^{16}	109.209
O VI	138.121	4.04×10^{16}	150.4972
Si I	8.149	1.76×10^{13}	9.56×10^{-2}
Si II	16.345	7.13×10^{13}	0.27
Si III	33.492	5.59×10^{14}	2.04
Si IV	45.141	1.03×10^{15}	3.312
Si V	166.77	1.23×10^{17}	607
Si VI	205.05	7.06×10^{18}	890.694

3.2 毛细管长度对辐射的影响

图 4 给出了 40 mJ 激光光强下, 内径为 $100 \mu\text{m}$, 长度分别为 3 mm, 6 mm, 9 mm 的玻璃毛细管的 X 射线谱。可以看出, 随着微毛细管长度的增加, X 射线的发射明显增强。因此由于毛细管的光导作用, 使等离子体长度增加, 从而增强 X 射线辐射。

由图 4 还发现 17.2 nm 的谱峰随着微毛细管长度的增加强度的增加是非线性的。但是在 CCD 敏感面内 10 nm 以外的谱线只能由 1000 lines/mm 的光栅来获得。谱仪的谱分辨率本领较低, 无法确认是否产生 $O^{4+}(2s^2-2s2p)$ 的增益。将来利用具有更高谱分辨率的谱仪对这一波段的谱进行研究, 以判断有无增益的存在。

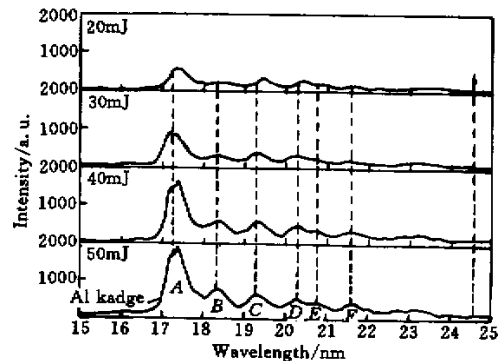


图 4 不同长度的玻璃微毛细管的 X 射线谱
Fig.4 X-ray spectrum from glass capillaries with different length

A : $O^{4+}(2s^2-2s3p)$, $O^{5+}(1s^22p-1s^23d)$; B : $O^{4+}(2s2p-2p3p)$, $O^{5+}(1s^22p-1s^23s)$; C : $O^{4+}(2s2p-2s3d)$; D : $O^{4+}(2p^2-2p3d)$; F : $O^{4+}(2s2p-2s3s)$

由于微毛细管的光导作用, 从而使 X 射线的强

度得到增加的另一个有利证据是毛细管靶和平面靶的 X 射线强度差异的比较。图 5 给出了在相同激光能量和打靶条件下,由 5000 lines/mm 光栅得到的平面铜靶 (a) 和玻璃毛细管靶 (b) 的时间积分谱。平面靶积分时间为 7 s,毛细管靶为 6 s。打靶时的能量均为 40 mJ。比较两种靶的零级谱的计数,并考虑积分时间的长短,我们发现玻璃毛细管靶的 X 射线强度约为平面铜靶的 18 倍。考虑到高 Z 金属铜靶比 SiO₂ 具有更高的 X 射线转换效率,如果平面靶的材料也为玻璃,则上述的倍数会更高。因此相同条件下毛细管靶 X 射线的强度要比平面靶至少高一个量级。这正是由于前面所述的在毛细管靶下可获得较大尺度的等离子体,同时激光与等离子体的作用长度得到增加。另外由于毛细管对射线的掠反射,使 X 射线定向性变好。因此毛细管靶可能用来产生满足应用需要的高亮度、高重复频率的 X 射线光源。

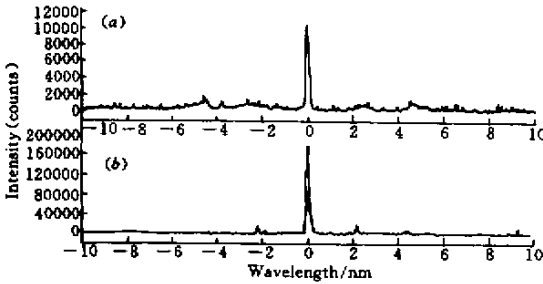


图 5 平面靶和毛细管靶的 X 射线强度比较

Fig.5 X-ray spectrum of plane target and capillary target
(a) Cu plane target ; (b) SiO₂ capillary target

3.3 不同能量下的 X 射线谱

为了分析激光打靶能量对毛细管 X 射线辐射的影响,测量了不同能量下相同内径和长度的玻璃毛细管的 X 射线谱。图 6 给出了长度为 9 mm,内径 100 μm,能量分别为 20 mJ,30 mJ,40 mJ,50 mJ 下由 1000 lines/mm 光栅拍摄的玻璃微毛细管 15 ~ 25 nm 的 X 射谱。图中可以发现随着激光能量的增加,玻璃微毛细管 X 射线的发射明显增强。这是由于随着激光能量的增加,毛细管内等离子体温度、密度增加。同时由于能量的增加,激光在毛细管内产生的等离子体长度也有所增长。

为了获得毛细管等离子体温度,我们用复合辐射吸收边的斜率对不同能量下的温度进行测量。得到不同能量下毛细管的温度随平均光强的变化(如

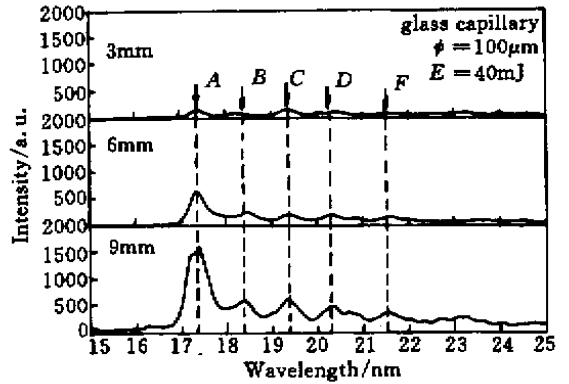


图 6 不同能量下毛细管的 X 射线谱

Fig.6 X-ray spectrum of glass capillary in various laser pulses energy

A: O⁺(2s²-2s3p), O⁺(1s²2p-1s²3d); B: O⁺(2s2p-2p3p), O⁺(1s²2p-1s²3s); C: O⁺(2s2p-2s3d); D: O⁺(2p²-2p3d); E: O⁺(2p²-2p3d); F: O⁺(2s2p-2s3s); G: Si⁺(2s²2p⁵-2s2p⁶).
glass capillary φ = 100 μm, length = 9 mm

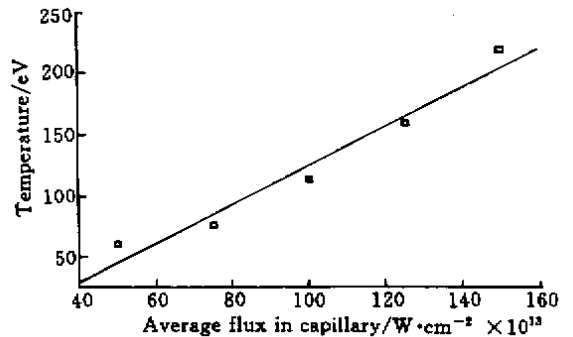


图 7 不同激光能量下毛细管的等离子体温度

Fig.7 Average electron temperature of capillary plasma in different pulse energy

图 7)。根据文献 [12] 的计算激光能量为 20,30,40,50,60 mJ 时毛细管内的平均光强分别为 5 × 10¹³ W/cm²,7.5 × 10¹³ W/cm²,1.0 × 10¹⁴ W/cm²,1.25 × 10¹⁴ W/cm²,1.5 × 10¹⁴ W/cm²。图中“□”为实验点,直线为线性拟合结果。由图可见等离子体温度从 20 mJ 的 60 eV 上升到 60 mJ 时的 218 eV。比较表 1 中光场电离后电子温度的理论值,可见实验的温度值均比相应光强下的理论值为高。从而也进一步说明在激光与毛细管相互作用产生等离子体过程中,除光电离外,碰撞电离和加热具有显著作用。飞秒强激光与平面固体靶作用的理论和实验研究表明,平面靶等离子体温度与打靶光强具有 T_e ∝ I^γ 的关系,γ 在 0.2 ~ 0.5 之间 [13,14],这里 I 为激光光强。实验显示,在微毛细管靶下 T_e ∝ I,对光强的依赖增强。

显示在强激光与微毛细管相互作用过程中存在与平面靶不尽相同的过程。等离子体温度的升高可能来源于激光脉冲结束后,毛细管壁上的等离子体向中心轴上扩散,相互碰撞过程中将动能转换为热能。时间积分谱不能对此进行分辨。由我们的结果推知,在利用毛细管进行复合 X 射线激光时,如果直接用飞秒强激光与毛细管内壁作用,产生的电子温度过高,将对复合过程产生的粒子数反转不利。故应先用预脉冲产生预等离子体,待预等离子体冷却后再用飞秒强激光与预等离子体作用,获得所需的价态离子。

4 结 论

进行了超短强激光脉冲与玻璃微毛细管相互作用的探索性研究。利用高灵敏度的大面积透射光栅谱仪对不同能量下不同长度的玻璃毛细管的 X 射线谱进行了测量、分析。结果表明,由于微毛细管的光导作用,有效地增加了等离子体的体积,并增加了激光与等离子体的作用长度,因此随微毛细管长度的增加, X 射线的强度显著增强。在相同激光能量下,毛细管靶的 X 射线具有比平面靶高一个量级以上的强度。作用过程中,等离子体的产生,除光场电离外,碰撞电离具有重要作用。利用复合辐射吸收边对作用过程中毛细管等离子体温度进行了测量,表明随着激光能量增加,电子温度升高。

致谢 感谢激光器件组杨晓东、王文跃、江云华、彭家辉的大力协助和支持。

参 考 文 献

1 S. V. Kikhlevsky, G. Lupkovics, K. Negrea *et al.*. Guiding of femtosecond pulses by microcapillary light-pipes. *Pure.*

- Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):97~102
- 2 O. B. Anan'in, Yu. A. Bykovskii, A. K. Zver'kov *et al.*. Collimation of soft X radiation. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1987, **17**(3):383~384
- 3 D. J. Thiel, D. H. Bilderback, Aaron Lewis *et al.*. Guiding and concentrating hard X-rays by using a flexible hollow-core tapered glass fiber. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(7):987~992
- 4 S. Jackel, R. Burris, J. Grun *et al.*. Channeling of terawatt laser pulses by use of hollow waveguides. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10):1086~1088
- 5 C. Spielmann, S. Sartania, F. Krausz *et al.*. Ti:sapphire laser produces intense sub-5-fs pulses. *Laser Focus World*, 1997, **33**(5):127~135
- 6 C. Stockl, G. D. Tsakiris. Experiments with laser irradiated cylindrical targets. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(3):725~747
- 7 Y. Ehrlich, C. Cohen, A. Zigler *et al.*. Guiding of high intensity laser pulses in straight and curved plasma channel experiments. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(20):4186~4189
- 8 J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft X-ray laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16):2192~2195
- 9 D. V. Korobkin, C. H. Nam, S. Suckewer. Demonstration of soft X-ray lasing to ground state in LiIII. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26):5206~5209
- 10 D. Korobkin, A. Goltsov, A. Morozov *et al.*. Soft-X-ray amplification at 26.2 nm with 1-Hz repetition rate in a table-top system. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(8):1607~1610
- 11 B. N. Chichkov, A. Egbert, H. Eichmann *et al.*. Soft-X-ray lasing to the ground states in low-charged oxygen ions. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(2):1629~1639
- 12 Zhong Fangchuan, Deng Jian, Lu Quanming *et al.*. Light flux on the capillary wall while guiding a laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10):1408~1411 (in Chinese)
- 13 M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, M. D. Rosen *et al.*. Ultrafast X-ray pulses from laser-produced plasmas. *Science*, 1991, **251**(2):531~536
- 14 U. Teubner, P. Gibbon, E. Forster *et al.*. Subpicosecond KrF-laser plasma interaction at intensities between 10^{14} and 10^{17} W/cm². *Phys. Plasma*, 1996, **3**(7):2679~2685