

# 微毛细管激光等离子体 X 光源

钟方川 邓 健 覃 岭 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

**摘 要** 利用脉宽为45 fs 的超短脉冲强激光系统, 进行了强激光与微毛细管相互作用的初步实验研究. 成功地观测了超短强激光作用下不锈钢毛细管和玻璃毛细管的 X 射线谱, 获得了重复频率为10 Hz 具有较好定向性的 X 射线源.

**关键词** 超短强激光, 微毛细管, X 射线.

## 1 引 言

利用超短强激光与物质相互作用来获得高亮度、高重复频率的相干的或非相干的 X 射线源是当前强激光与物质相互作用研究中的重要内容<sup>[1-3]</sup>. 中空的微毛细管常用于可见光、紫外或 X 射线的传输和聚焦<sup>[4-6]</sup>. 近年来利用强激光与微毛细管相互作用来获得相干的或非相干的 X 射线源的研究得到了开展<sup>[7-10]</sup>. 利用毛细管对激光传输, 可获得较大尺度的等离子体, 同时增加激光与等离子体的作用长度, 从而有望增加 X 射线强度. 由于毛细管内壁对 X 射线的掠反射, 也因此改善了射线的方向性, 有利于满足应用的需要. 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复合泵浦 X 射线激光的可行方案. 本文进行了超短强激光与毛细管作用的初步研究, 成功地获得了较好定向性的 X 射线源.

## 2 实验安排

实验所用激光器的脉宽为45fs, 最高能量为120mJ, 重复频率为10Hz, 中心波长为785 nm, 光路如图1所示. 来自激光器的线偏振光经分光镜后分成预脉冲和主脉冲. 利用预脉冲是为了提高 X 射线的强度. 主脉冲经一定延时后再与预脉冲合在一起, 经同一聚焦透镜聚焦到毛细管径内. 预脉冲和主脉冲合光后的重合性由远场监测系统来监测(图中未画出). 而激光能否完全聚焦到毛细管内通过成像系统成像后由 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在毛细管的尾端进行测量, 谱由 X 射线 CCD 记录.

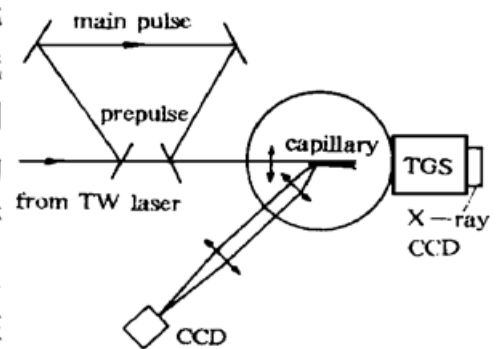


Fig. 1 The experimental setup

### 3 实验结果

本文进行了两种靶材的实验. 实验时预主脉冲的能量比为1.30, 主脉冲相对预脉冲延迟了24 ns. 所用光栅参数为1000 l/mm. 为了扣除打靶光本底并保护光栅不被激光打坏, 在光栅前加了铝膜. 在实验中, 用 $F/1$ 的非球面透镜将激光聚焦到毛细管端口, 在对靶时利用图1的毛细管端口的成像监测系统, 使打靶激光最大限度地注入毛细管, 90%以上的激光能量耦合进毛细管内. 为了从毛细管尾端测得X射线, 实验对打靶激光、毛细管及透射光栅谱仪进行了严格的准直. 图2给出CCD记录的激光与不锈钢微毛细管作用时时间积分的X射线谱, 积分时间为40 s. 毛细管的内径为300  $\mu\text{m}$ , 长为8 mm. 打靶时激光能量为20 mJ, 对应毛细管内的最大光强为 $2.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  ( $I_{\text{max}} = P_L / \pi r^2 2F$ ,  $P_L$ 为激光功率、 $r$ 为毛细管半径、 $F$ 为聚焦透镜的F数)<sup>[9]</sup>. 图3为由图2得到的强度对波长的扫描图. 由于光栅前加了铝膜, 而铝膜在8~17 nm内存在吸收带, 从而造成一级谱在17 nm左右有一跃变. 图中纵坐标的取值为CCD的计数. 其数值大小代表X射线的强弱.

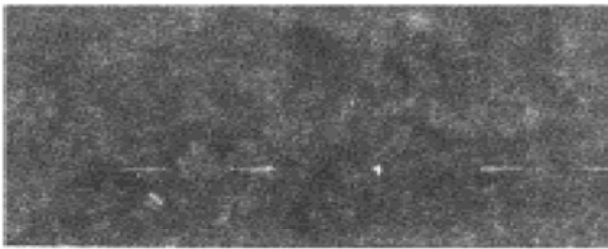


Fig. 2 The X-ray spectrum of stainless steel microcapillary

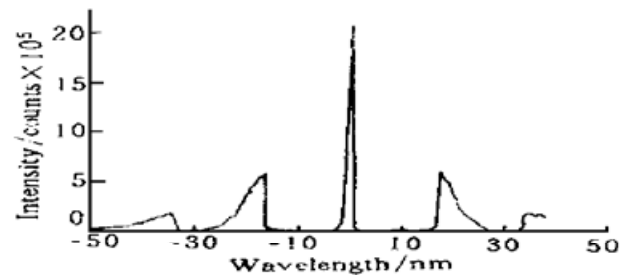


Fig. 3 The X-ray intensity spectrum of stainless steel microcapillary

图4给出激光与玻璃微毛细管作用时的X射线谱. 毛细管的内径为100  $\mu\text{m}$ , 长为8 mm. 打靶时激光能量为40 mJ, 对应毛细管内的最大光强为 $5.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ . 图5是由图4得到的射线强度随波长的变化. 同图3由于铝膜的存在, 造成谱中8~17 nm内的X射线被吸收, 未能在谱中反应出来. 与不锈钢毛细管相比, 玻璃毛细管出现了2~3 nm的谱线, 这



Fig. 4 The X-ray spectrum of glass microcapillary

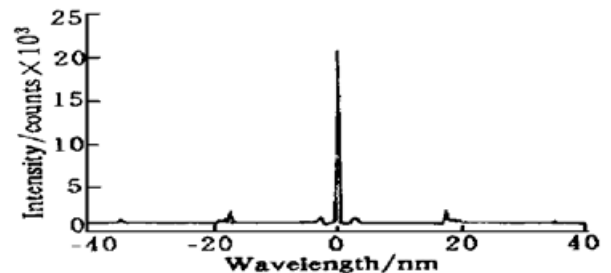


Fig. 5 The X-ray intensity spectrum of glass microcapillary

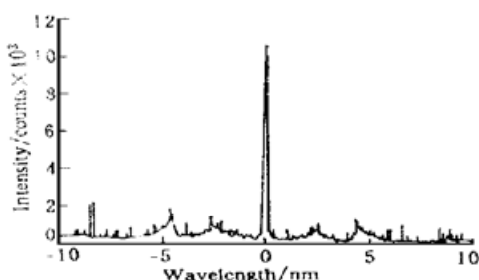


Fig. 6 X-ray spectrum of Cu plate target

是由于玻璃毛细管口径小, 打靶能量变高, 管内光强增强从而将离子电离到更高阶所致.

为了比较毛细管靶和平面靶的X射线强度的差异, 图6给出平面铜靶的X射线谱. 对应的打靶能量也为40 mJ. 积分时间为7 s. 比较两种靶下的零级谱的计数, 并考虑积分时间的长短, 发现不锈钢毛细管和玻璃毛细管靶的X射线强度分别约为平面铜靶的30和18倍. 因此毛细管X射

线的强度要比平面靶的高一个量级. 这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 射线方向变好. 因此利用毛细管靶来获取激光等离子体 X 射线源比平面靶具有优越性.

**结 语** 本文进行了超短强激光与微毛细管作用的实验. 实验的难点在于对靶的准直, 激光束、毛细管、谱仪三者的精确准直及打靶激光本底的扣除. 经过实验, 成功地获得了强激光作用下毛细管的 X 射线谱, 实现了具有较好方向性的 X 射线源, 并发现毛细管靶的 X 射线源的亮度比平面靶高.

### 参 考 文 献

- [1] Joshi C J, Corkum P B. Interaction of ultra-intense laser light with matter. *Phys. Today*, 1995, **48** (1) : 36~ 43
- [2] Murnane M M, Kapteyn H C, Falcone R W. High density plasma produced by ultra-fast laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(2) : 155~ 158
- [3] Kyrala G A, Fulton R D, Wahlin E K *et al.*. X-ray generation by high irradiance subpicosecond lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(18) : 2195~ 2197
- [4] Anan'in O B, Bykovskii Y A, Zver'kov A K *et al.*. Collimation of soft-X-ray radiation. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1987, **17**(3) : 383~ 384
- [5] Thiel D J, Bilderback D H, Lewis A *et al.*. Guiding and concentrating hard X-rays by using a flexible hollow-core tapered glass fiber. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(7) : 987~ 992
- [6] Jackel S, Burris R, Gran J *et al.*. Channeling of terawatt laser pulses by use of hollow waveguides. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10) : 1086~ 1088
- [7] Cunningham P F, Weber R, Ladrach P *et al.*. Plasma evolution in laser-irradiated cylindrical cavities. *Opt. Commun.*, 1988, **68**(6) : 412~ 417
- [8] Lin Z Q, Yu W Y, Tan W H *et al.*. A new target configuration producing effective population inversion at energy levels of Mg XI 1s3p and 1s4p. *Opt. Commun.*, 1988, **65**(6) : 445~ 451
- [9] Stockl C, Tsakiris G D. Experiments with laser irradiated cylindrical targets. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(6) : 725~ 747
- [10] Korobkin D V, Nam C H, Suckewer S. Demonstration of soft X-ray lasing to ground state in LiIII. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26) : 5206~ 5209
- [11] Augst S, Meyerhofer D D, Strickland D *et al.*. Laser ionization of noble gases by Coulomb-barrier suppression. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(4) : 858~ 867

## Laser-Produced X-Ray Source by Using Microcapillary Target

Zhong Fangchuan    Deng Jian    Zhang Zhenquan    Qing Ling    Xu Zhizhan  
(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 10 December 1997; revised 23 March 1998)

**Abstract** A new experiment was carried out for studying the interaction of high intensity laser with microcapillaries by using an ultra-short high intensity laser with 45 fs pulse width. X-ray spectra of stainless steel microcapillary and glass microcapillary are obtained successfully. An X-ray source with good direction and 10 Hz repetition rate is created.

**Key words** ultra-short high intensity laser, microcapillary, X-ray.