

光场电离下玻璃微毛细管的 X 射线谱*

覃 岭 张正泉 钟方川 邓 健 朱喻哲 胡雪原 陈 丽

(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 利用软 X 射线大面积透射光栅谱仪, 对超短强激光脉冲辐照下玻璃微毛细管靶的软 X 射线发射特性进行了研究。测得了不同的激光能量下、不同长度(3 mm、6 mm、9 mm)的微毛细管的软 X 射线发射谱, 并观察到随着微毛细管长度的增加, X 射线发射强度增强。

关键词 光场电离, 微毛细管靶, 超短强激光脉冲, 大面积透射光栅谱仪, X 射线发射谱。

1 引 言

利用具有很高光强的激光脉冲与物质相互作用, 可以研究各种新颖的强场激光物理。获得超短、高亮度的 X 射线源是超短强激光脉冲与物质相互作用研究的主要目标之一。在 $10^{15} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 的功率密度下, 线偏振的激光通过光场电离(OFI), 可以把原子电离到需要的电离态, 为激发态到基态的反转提供了条件, 从而可以产生复合 X 射线激光。类 H $n = 2$ 到 $n = 1$ 跃迁以及类 Li $n = 3$ 到 $n = 2$ 跃迁由于具有较高的增益系数, 成为复合 X 射线激光研究中的重点^[1~4]。

为增强超短强激光脉冲与物质相互作用过程中 X 射线的产额, 或者产生相干的 X 射线激光辐射, 一个有效的途径是增加激光与物质相互作用的长度。近年来, 由于微毛细管对激光的引导作用, 因而在国内外进行了广泛的研究。实验发现, 激光经聚焦后射入微毛细管中, 毛细管内壁对激光的多次反射可以增加激光与物质相互作用的长度^[5]。Jackel 等人利用中空的微毛细管产生了激光波导^[6]; 以后许多的 X 射线源的实验都利用了微毛细管技术, Korobkin 等人^[7]用 LiF 毛细管甚至获得了高增益的类 H-Li 13.5 nm 的 X 射线激光。

我们实验研究了超短强激光脉冲与微毛细管的相互作用。利用软 X 射线大面积透射光栅谱仪, 对玻璃微毛细管的 X 射线发射特性进行光谱诊断, 测得了 15~ 25 nm 范围内的 X 射线谱, 并观察到 X 射线的发射强度随激光光强和微毛细管长度的增加而增加。

2 实验安排

实验安排如图 1 所示。整个装置由飞秒激光器、微毛细管靶和大面积透射光栅谱仪以及激光监视系统组成。上海光机所强光光学开放实验室建成的 5 TW/45 fs 的钛宝石激光器中

* 国家科委 863 高科技项目及中国科学院上海分院择优资助项目。

收稿日期: 1998-12-30; 收到修改稿日期: 1999-06-14

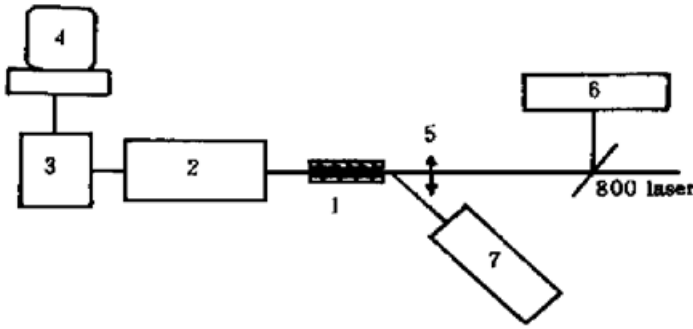


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

1: glass capillary, 2: transmission grating spectrograph, 3: X-ray CCD, 4: computer, 5: focus lens, 6: He-Ne laser, 7: Capillary image system

心波长 785 nm, 谱宽 34 nm, 可提供的最大能量为 250 mJ, 工作频率为 10 Hz^[8]。聚焦透镜的焦距为 60 mm, 激光聚焦后焦斑大小小于 100 μm。实验中用 He-Ne 激光作为模拟光进行调靶与准直。近远场监视系统与靶点监视系统可以保证激光与模拟光的同轴, 并且保证飞秒激光射入微毛细管内的准确度。

大面积透射光栅谱仪在相对于打靶光束 180°方向上观测飞秒激光与微毛细管作用后产生的软 X 射线。谱仪由镀金轮胎镜、无衬底大面积透射光栅和软 X 光 CCD 相机等组成。轮胎镜收集的立体角为 7.45×10^{-5} sr。

实验中采用 1000 l/mm 的大面积透射光栅进行摄谱, 谱仪的色散方向上光谱的分辨率为 0.25 nm。光栅前面加一厚 400 nm 的 Al 膜, 用于挡掉该方向的可见光。软 X 射线 CCD 在我们的摄谱范围内具有很高的灵敏度。在整个实验过程中, 真空度高于 1.0×10^{-3} Pa。

3 实验结果与分析

图 2 给出了软 X 射线 CCD 接收面上获取的玻璃微毛细管的 X 射线谱。图中横向对应光栅的色散方向, 可以看出十分对称的 X 射线谱; 纵向对应光栅加强筋的衍射方向, 此方向的谱强度分布与 X 射线源的空间特性有关。

3.1 不同能量下的玻璃微毛细管的 X 射线谱

光场电离下, O 离子的阈值光强分别为:

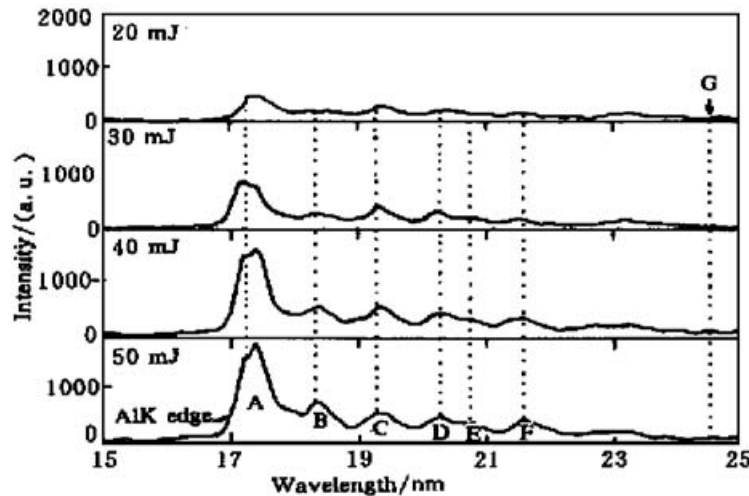


Fig. 3 Spectra of glass microcapillaries irradiated by fs laser pulses with different energies

10^{15} W/cm² (30 mJ)、 1.01×10^{16} W/cm² (40 mJ)、 1.42×10^{16} W/cm² (50 mJ)。与前面比较, 可知该光强可以分别把 O、Si 电离成 O⁵⁺、Si⁴⁺。

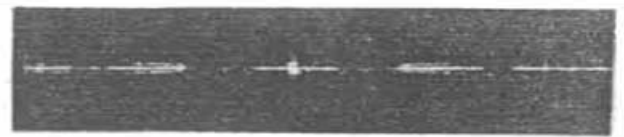


Fig. 2 Spectra taken by transmission grating spectrograph with an X-ray CCD camera (glass 100 μm 3 s 50 mJ 9 mm)

$$4.05 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2 (\text{O}^{3+}),$$

$$8.98 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2 (\text{O}^{4+}),$$

$$2.69 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2 (\text{O}^{5+}),$$

$$4.04 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2 (\text{O}^{6+}),$$

Si 离子的阈值光强分别为:

$$7.14 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2 (\text{Si}^{2+}),$$

$$5.59 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2 (\text{Si}^{3+}),$$

$$1.04 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2 (\text{Si}^{4+}),$$

$$1.24 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2 (\text{Si}^{5+})^{[1, 2]}.$$

用图 1 中描述的打靶透镜, 在不同的激光能量下, 玻璃微毛细管口壁上的激光光强为 5.10×10^{15} W/cm² (20 mJ)、 $8.49 \times$

图 3 给出了相同长度(9 mm)、相同内径(100 μm)、能量分别为 20 mJ、30 mJ、40 mJ、50 mJ 下玻璃微毛细管的解谱结果。图中可以看出:

- 1) 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;
- 2) 微毛细管谱中主要有 6 个谱峰,

A: $\text{O}^{5+} 2s^2 - 2s3p$ 、 $\text{O}^{6+} 1s^2 2p - 1s^2 3d$,

B: $\text{O}^{5+} 2s2p - 2s3p$ 、 $\text{O}^{6+} 1s^2 2p - 1s^2 3s$,

C: $\text{O}^{5+} 2s2p - 2s3d$,

D: $\text{O}^{5+} 2p^2 - 2p3d$,

E: $\text{O}^{5+} 2p^2 - 2p3d$,

F: $\text{O}^{5+} 2s2p - 2s3s$,

其中 A 峰最强。这说明飞秒激光作用下的微毛细管, 可用作为高亮度、方向性好的 X 射线光源。另外, X 射线的发射以 O^{5+} 线为主, 这是因为飞秒激光与等离子体相互作用时, 光场电离占主导地位, 等离子体系中只存在少数的几个电离态。由于 Al 膜在 8~17 nm 处吸收很大, 未看到位于该区域 Si^{5+} 的发射强线(11.1 nm);

3) A、B 峰中有 O^{6+} 线的存在, 以及当高能量(40 mJ、50 mJ) 时有 $\text{Si}^{6+} 2s^2 2p^5 - 2s2p^6$ (24.6 nm) 线的发射, 说明飞秒激光与等离子体相互作用中, 碰撞电离也存在, 并且激光能量升高时碰撞电离更明显。

3.2 不同长度下的玻璃微毛细管的 X 射线谱

理论表明, 激光与微毛细管相互作用时, 随着距离的增加, 管壁上的光强会阶跃式地衰减。由于毛细管内壁对光的反射作用, 当激光入射到毛细管内 2 cm 后, 激光光强仍能保持较高的量级^[5]。图 4 给出了 40 mJ 的激光光强下, 内径为 100 μm , 长度分别为 3 mm、6 mm、9 mm 的玻璃微毛细管的 X 射线谱, 其中产生的 5 个谱峰依次与图 3 中 A、B、C、D、F 的能级跃迁一一对应。可以看出, 随着微毛细管长度的增加, X 射线的发射强度增加了一个量级, 这说明了微毛细管可以增强 X 射线的发射强度。当微毛细管的长度为 9 mm 时, 该靶实际上是一个高亮度的 X 射线源。另外, 图中也可以看出, 17.2 nm 的谱峰(A) 随着微毛细管长度的增加强度增长比较明显。但是, 由于碰撞电离存在, 以及谱仪的谱分辨率本领较低, 无法确认该线是否产生增益。因此, 将来利用具有更高谱分辨率的谱仪对这一波段的谱研究有可能获得更好的结果。

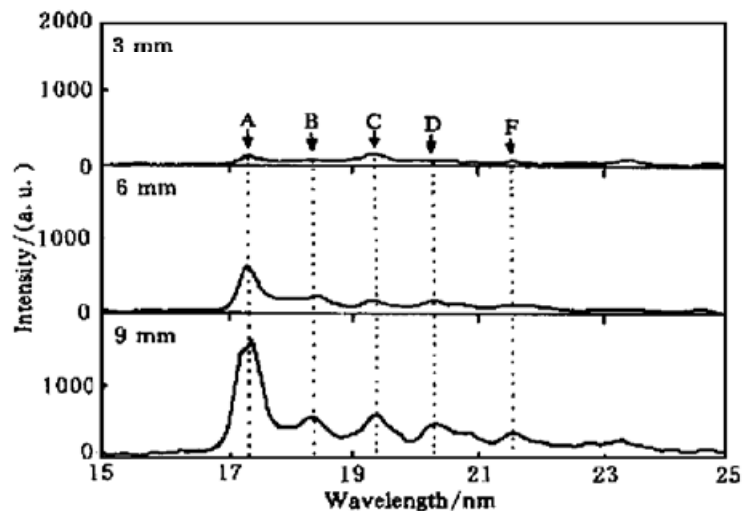


Fig. 4 Spectra of glass capillaries of different lengths irradiated by fs laser

结 论 利用大面积透射光栅谱仪对超短强激光脉冲与玻璃微毛细管相互作用进行了研究, 比较了不同能量下, 不同长度的玻璃微毛细管的 X 射线谱, 观测到随着微毛细管长度的增加, X 射线的强度明显增强。飞秒激光脉冲与玻璃微毛细管相互作用时, 电离机制以光场电离为主, 等离子体系中只有少量的几种电离态。但由于有碰撞电离的存在, 电子温度升高, 因此对复合 X 射线激光的产生将产生不利的影

响。由于玻璃毛细管对激光光强的阶跃式衰减, 研究不同内径的毛细管对光的引导作用, 使

微毛细管中光强分布更均匀, 将对 X 射线源和 X 射线激光的产生具有重要的意义。同时, 利用具有更高谱分辨率的谱仪对飞秒激光与微毛细管相互作用的研究将获得更多更好的信息。

感谢中科院上海光机所强光光学开放研究实验室器件组杨晓东、王文跃、江云华、陆海鹤、印定军、彭家晖的大力支持, 感谢项惠珠及同济大学物理系为我们提供 Al 膜。

参 考 文 献

- [1] Burnett N H, Corkum P B. Cold-plasma production for recombination extreme-ultraviolet lasers by optical-field-induced ionization. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(6) : 1195~ 1199
- [2] Eder D C, Amendt P, Wilks S C *et al.*. Optical-field-ionized plasma X-ray lasers. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **45**(9) : 6761~ 6772
- [3] Fill E, Borgstrum S, Zarsson J *et al.*. XUV spectra of optical-field-ionized plasmas. *Phys. Rev. (E)*, 1995, **51**(6) : 6016~ 6027
- [4] Chehkov B N, Egbert A, Eichmann H *et al.*. Soft-X-ray lasing to the ground states in low-charged oxygen ions. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **52**(2) : 1629~ 1639
- [5] 钟方川, 邓 健, 陆全明等. 激光传输中微毛细管壁上的光强. *光学学报*, 1998, **18**(10) : 1408~ 1411
- [6] Jackel S, Burris R, Gran J *et al.*. Channelling of terawatt laser pulses by use of hollow waveguides. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10) : 1086~ 1088
- [7] Korobkin D V, Nam C H, Suckewer S *et al.*. Demonstraion of soft X-ray lasing to ground states in LiIII. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26) : 5206~ 5209
- [8] 徐至展, Vigroux L, Saviot F 等. 输出 2 TW/45 fs 的参钛宝石超短脉冲强激光系统. *中国科学*, 1997, **A272**(7) : 640~ 645

X-Ray Emission from the Glass Capillary Optical Field Ionization Plasma

Qin Ling Zhang Zhengquan Zhong Fangchuan Deng Jian
Zhu Yuzhe Hu Xueyuang Chen Li

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

(Received 30 December 1998; revised 14 June 1999)

Abstract Experiments on the diagnosis of emission spectrum from glass capillary target irradiated by ultrashort intense laser pulses have been carried out with a high efficiency high resolution transmission grating spectrograph. Emission spectra among 15 ~ 25 nm at different laser energies and capillary lengths (3 mm, 6 mm, 9 mm) were measured. X-ray emission intensity increases obviously when the capillary length is increased.

Key words optical field ionization (OFI), microcapillary, ultrashort intense laser pulse, transmission grating spectrograph, soft X-ray spectrum.

散射。对各次谐波辐射的角分布函数进行积分,

$$P_n = 2\pi \int \frac{dP_n}{d\Omega} \sin \theta d\theta, \quad (13)$$

可以得到各次谐波的辐射功率。图 5 是第 1、2、3、10、40 次谐波对立体角积分后的总的辐射

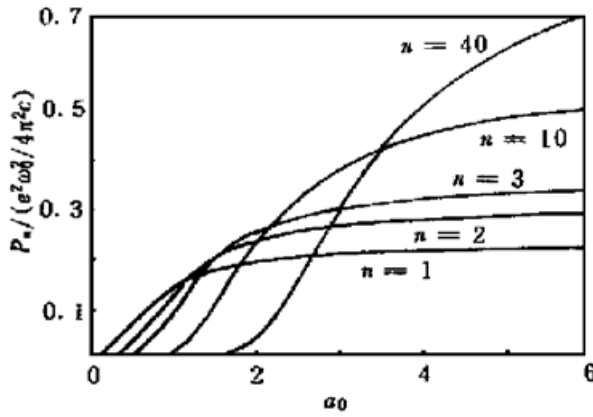


Fig. 5 The variation of the dimensionless quantity $P_n/(e^2\omega_0^2/4\pi^2c)$ at $n = 1, 2, 3, 10, 40$ harmonics for $a_0 = 1$ to 6

功率随激光强度 a_0 的变化图。从图中可看到每一次谐波的出现都有一个激光强度阈值, 次数越高的谐波, 相应阈值强度越高。另外, 在激光强度较低时, 低次的谐波辐射相对强些, 随激光强度的升高, 次数高的谐波辐射增强并超过低次的谐波辐射强度, 而较低次谐波(如 1 次谐波)在增加到一定程度后将趋于饱和, 也就是说, 当激光强度很大时, 电子作圆周运动而辐射的电磁波总强度

$$P_{\text{tot}} = (2e^2\omega_0^2/3c) a_0^2(1 + a_0^2) \quad (14)$$

大幅度增强, 但增加量主要来源于较高次的谐波而不是低次谐波。

总 结 研究了逆向运动的电子在进入超强激光场之后由于其作圆周运动而引起的非线性电磁波辐射的各种特性。结果发现, 电子的辐射是以高次谐波的形式出现, 且越是次数高的谐波其方向性越好, 其强度随激光能量的增加而增强。这为寻找 X 射线相干光源提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- [1] Sarachik E, Schappert G. Classical theory of the scattering of intense laser radiation by free electrons. *Phys. Rev. (D)*, 1970, 1(10): 2738~ 2757
- [2] Yu Wei, Yu M Y, Ma J X *et al.*. Strong frequency up-conversion by nonlinear Thomson scattering from relativistic electrons. *Phys. of Plasma*, 1998, 5(2): 406~ 409
- [3] Jackson J D. *Classical Electrodynamics*, New York: John Wiley Sons, 1975.

Synchrotron Radiation Characteristics of the High Power Laser-Driven Electron

Liu Yaqing Cheng Jing Yu Wei Xu Zhizhan

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

(Received 16 December 1998; revised 5 April 1999)

Abstract A simple average static model is proposed for studying the harmonic radiation characteristics of high power-driven electron in the laboratory frame, such as the angular distribution, the variation of the harmonic radiation with different laser power and so on. These results lend a novel way to find new coherent X-ray sources.

Key words high power laser, synchrotron radiation, harmonics.