

类锂硅离子的软 X 射线放大*

范品忠 徐至展 张正泉 陈时胜 林礼煌 陆培祥

王晓方 余加进 钱爱娣 周锦智 冯贤平

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 本文描述了最近进行的复合泵浦类锂硅离子软 X 射线激光增益实验结果。利用 1 m 消像散掠入射光栅谱仪拍摄了平面硅靶线聚焦激光等离子体在 5~12 nm 波长范围里的光谱。利用线聚焦激光等离子体轴向和非轴向光谱的时间积分强度比求得 $\text{Si}^{11+}5f-3d(8.89\text{nm})$ 和 $5d-3p(8.73\text{nm})$ 跃迁的增益系数分别为 1.4 和 0.9cm^{-1} ; 用轴向强度随线聚焦激光等离子体长度的变化得到靶面 $300\mu\text{m}$ 处的增益系数分别为 1.5 和 1.4cm^{-1} 。

关键词: 类锂离子, 软 X 射线激光, 增益系数

Soft X-ray amplification in lithium-like silicon ions

Fan Pinzhong, Xu Zhishan, Zhang Zhengquan, Chen Shisheng,

Lin Lihuang, Lu Peixiang, Wang Xiaofang, Yu Jiajin,

Qian Aidi, Zhou Jinshi, Feng Xianping

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Results of the recombination pumped soft X-ray laser gain experiment of Li-like silicon ions are described. The spectra from line-focused laser plasmas on slab silicon targets in 5~12nm region are taken by an 1m unastigmatic grazing incidence grating spectrograph. The gain coefficients of $\text{Si}^{11+}5f-3d(8.89\text{nm})$ and $5d-3p(8.73\text{nm})$, deduced from the ratio of on-axis to off-axis time-integrated intensity are 1.4cm^{-1} and 0.9cm^{-1} , respectively; The corresponding gain coefficients deduced from the growth curve of on-axis intensity with the length of the line-focused laser plasma are 1.5cm^{-1} and 1.4cm^{-1} , respectively.

Key words: Li-like ions, soft-X-ray laser, gain coefficients

一、引言

在软 X 射线区导致能级粒子数反转的主要机制有电子碰撞激发、三体复合、内壳层光电离和共振光激发等。前三种机制产生的自发发射放大(ASE)型短波长激光已在实验室得到演示。这些机制各有优点。1984 年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室用电子碰撞激发机制类氦离子方案首次成功演示实验室 ASE 型软 X 射线激光^[1]; 而且迄今为止得到的最大增益长度乘积的(GL~16)仍然是这种类氦离子方案^[2]。但该机制要求的驱动激光功率比较高, 如对 10nm

收稿日期: 1990 年 3 月 14 日。

* 本工作得到中国科学院重大项目、国家自然科学基金和国家高技术项目资助。

激射波长,要求靶面线功率密度高达 10^4GW/cm ,即使采用类镍离子方案^[3],要达到水窗上限波长($\sim 4.4 \text{nm}$),线功率密度也要高达 10^4GW/cm 。三体复合机制所要求的驱动激光功率则要小得多,如对 10nm 激射波长,三体复合类氢离子方案所要求的线功率密度约为 10^3GW/cm ^[4]。类锂离子方案是三体复合机制的一个非常重要的方案^[5],它不仅对驱动激光功率的要求比类氢离子方案更低(对 10nm 的激射波长,线功率密度约为 $10 \sim 10^2 \text{GW/cm}$),对驱动激光的脉宽和波长的要求也不苛刻,而且以比类氢离子($\sim Z^{-2}$)更快的速度($\sim Z^{-2.5}$)随原子核电荷 Z 定标至短波长。表 1 给出了从 B 到 Fe 的类氢离子 $3d-2p$ 和类锂离子 $5f-3d$ 、 $4f-3d$ 和 $5d-3p$ 跃迁的波长和相应电离阶的电离电位。从表中可以看出要获得相同的激射波长,类锂离子所要求的电离能比类氢的要小得多。

法国南巴黎大学最早开始关于类锂铝离子软 X 射线激光的研究^[5],他们用宽度为几百 ps

表 1

Z	元素	类氢离子		类 锂 离 子			
		$V_i(\text{eV})$	$3a-2p(\text{nm})$	$V_i(\text{eV})$	$5f-3d(\text{nm})$	$5d-3p(\text{nm})$	$4f-3d(\text{nm})$
5	B	340	26.9	38	142.1	136.2	207.7
6	C	490	18.2	64	79.9	77.0	116.9
7	N	667	13.4	98	51.2	49.5	74.8
8	O	871	10.2	138		34.5	52.0
9	F	1103	8.1	185		25.5	37.0
10	Ne	1302	6.6	239		19.5	29.2
11	Na	1649	5.4	300		15.5	23.1
12	Mg	1963	4.5	368	12.8	12.6	18.7
13	Al	2304	3.9	442	10.6	10.4	15.5
14	Si	2673	3.3	524	8.9	8.7	13.0
15	P	3070	2.9	612		7.5	11.1
16	S	3494	2.6	707	6.5	6.5	9.6
17	Cl	3946	2.3	809		5.7	8.1
18	Ar	4426	2.0	918			
19	K	4934	1.8	1035		4.4	5.8
20	Ca	5470	1.6	1157	4.0	3.9	
21	Sc	6034	1.5	1288		3.5	5.1
22	Ti	6626	1.3	1426		3.1	4.6
23	V	7246		1570			
24	Cr	7895		1721	2.6		3.9
25	Mn	8672	1.0	1880		2.4	
26	Fe	9278	0.97	2045		2.2	

到几十 ns 的 $1.06 \mu\text{m}$ 钕玻璃激光脉冲用吸收光谱方法成功地演示了 Mg^{9+} 和 $\text{Al}^{10+} 5f-3d$ 跃迁的软 X 射线放大作用, 波长分别为 12.79 nm 和 105.7 nm , 并对 $\text{S}^{13+} 5f-3d$ 跃迁增益作了初步测量, 相应波长为 6.52 nm ^[6]; 日本大阪大学和英国卢瑟福实验室用二倍频钕玻璃激光脉冲获得了 $\text{Al}^{10+} 5f-3d$ 和 $5d-3p$ (10.38 nm) 跃迁的软 X 射线放大^[7,8]; 普林斯顿大学等离子物理实验室用高功率 CO_2 激光脉冲获得了 Al^{10+} 和 $\text{Si}^{11+} 4f-3d$ (波长分别为 15.4 nm 和 12.9 nm) 跃迁的软 X 射线放大^[9]; 上海光机所最近在较低功率密度条件下 ($1.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$) 演示了 $\text{Al}^{10+} 5f-3d$ 跃迁的软 X 射线放大^[10]。最近日本理化研究所在更小的激光装置上 (激光功率密度约为 $1.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$) 获得了 $\text{Al}^{10+} 5f-3d$ 和 $4f-3d$ 跃迁的软 X 射线放大^[11]。至于类锂硅离子, 除普林斯顿大学的工作以外, 南巴黎大学已做了光谱研究^[12]。但 $\text{Si}^{11+} 5f-3d$ 和 $5d-3p$ 跃迁的激光放大至今未见报道。我们在做类锂铝离子软 X 射线激光实验的后期于 1989 年初在 6 路装置上开展了类锂硅离子软 X 射线增益实验, 利用轴向和非轴向光谱强度比获得了 $\text{Si}^{11+} 5f-3d$ (8.89 nm) 和 $5d-3p$ (8.73 nm) 跃迁的增益系数分别为 1.4 cm^{-1} 和 0.9 cm^{-1} 。后来又于 1989 年 8 月在 LF 12 激光装置上的预备实验中获得了一组不同等离子体长度的轴向光谱, 获得上述跃迁的增益系数分别为 1.5 cm^{-1} 和 1.4 cm^{-1} 。

二、实验和结果

有关实验装置如图 1 所示, 其中自制的 1 m 消像散掠入射光栅光谱仪 (摄谱范围 $2 \sim 12 \text{ nm}$, 当入射缝为 $5 \mu\text{m}$ 时光谱分辨约为 0.005 nm , 近轴空间分辨约为 $50 \mu\text{m}$) 和针孔透射光栅光谱仪 (摄谱范围 $0.5 \sim 20 \text{ nm}$, 针孔直径 $25 \mu\text{m}$ 或 $50 \mu\text{m}$, 光栅每毫米刻槽 1000 或 2000, 光谱分辨约为 $0.3 \sim 0.2 \text{ nm}$) 是增益测量的主要仪器, 被安置在线聚焦激光等离子体轴线的两头。消像散谱仪系统中的环面镜不仅补偿了掠入射光栅谱仪的像散, 从而获得一维空间分辨光谱, 而且起了集光作用。实验中线聚焦激光等离子体最大线度 ($\sim 1 \text{ cm}$) 大大小于它至环面镜的距离 ($> 40 \text{ cm}$)。因此可以把光源看成点光源, 而且系统具有较大的接收立体角 ($> 10^{-5}$ 球面度)。这些保证在摄取轴向和非轴向光谱时光源各点发出的辐射都能全部被系统所接收。

在 6 路激光装置上所做的实验中所用的激光束是由该装置的第二路和第三路光束作空间和时间上的叠加而成。组合光束的脉冲宽度 t 约为 300 ps , 能量约为 15 J 。激光束经柱面透镜 C ($R=200 \text{ mm}$) 和非球面透镜 A ($f/2, 60$) 聚焦到平面靶上, 产生作为 X 射线激光增益介质的线状等离子体。焦线长度约为 10 mm , 宽度约为 $200 \mu\text{m}$, 靶面线功率密度约为 50 GW/cm , 靶面功率密度约为 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。为了消除焦线端部的影响, 取用中间比较均匀的线状等离子体, 实验中选用宽度小于 10 mm 的硅平面靶。将柱面透镜绕其光轴 (即驱动激光束的

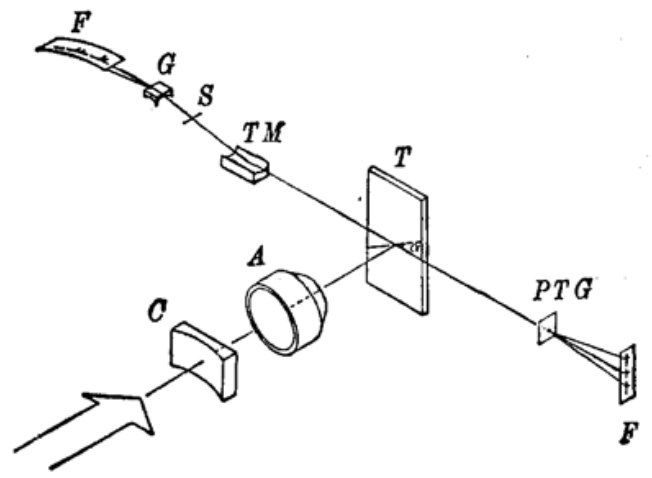


图 1 实验装置草图

C—柱面透镜; A—非球面透镜; T—平面Si靶;
TM—环面反射镜; G—光栅; F—底片;
PTG—针孔透射光栅; S—入射狭缝

光轴和平面靶的法线方向)转动一个角度 α , 而保持环面镜-掠入射光栅谱仪系统不变, 可以获得非轴向光谱。实验中采用无保护层医用 X 光底片(由上海感光胶片厂提供)拍摄了沿线聚焦激光等离子体轴线方向和偏离轴线 $\alpha=13.8^\circ$ 方向的硅等离子体光谱。虽然采用了无保护层底片, 但灵敏度还是不够高。为获得能定量处理的光谱, 采用多发积累的摄谱方式。乳剂感光理论和实验研究指出^[18]: 在软 X 射线区不存在曝光互易定律失效问题。因此采用多次曝光积累不会影响乳剂的感光特性; 而且多次曝光本身是一个很好的平均过程, 抹平了激光或其他

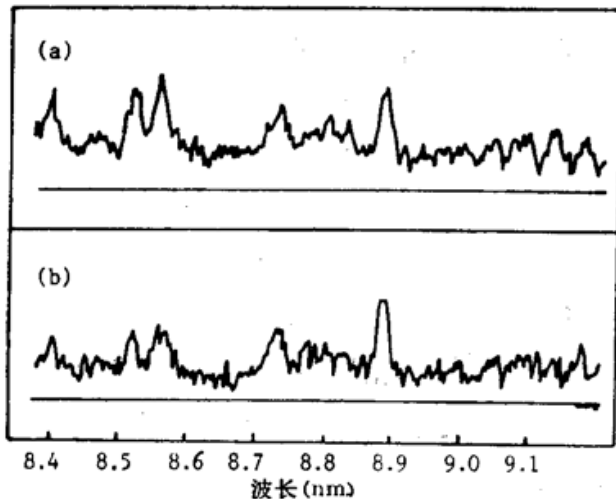


图 2 轴向 (b) 和非轴向 (a) 线聚焦激光等离子体光谱

实验参数起伏所产生的影响。用 MP-3 型测微光度计沿波长方向扫描获得的光谱示于图 2, 相应的扫描空间范围约为 $600 \mu\text{m}$ 。表 2 给出了上述两个光谱的激光总能量 E 及其它参数, 其中 n 为累计打靶次数, E/n 为每发平均能量, d 和 L 分别为线聚焦硅等离子体的宽度和长度。上述两个光谱的黑密度值都小于 0.3。根据感光乳剂对 X 射线的响应特性: 即在曝光不足部分(相应黑密度值一般小于或等于 0.5), 曝光量与底片黑密度成线性关系^[13~15], 在我们的实验中相对光谱强度能从测得的黑密度值直接获得。由此得到的 $\text{Si}^{11+} 5f-3d(8.89\text{nm})$ 、 $5d-3p(8.73\text{nm})$, $\text{Si}^{4+} 4d-2p(8.52\text{nm})$ 和 $\text{Si}^{5+} 3d-2p(8.41\text{nm})$ 扣除近旁连续谱后的相对强度列于表 3。结果表明预期的两条激光谱线其轴向和非轴向强度比都大于 1, 表明存在增益; 而非激光谱线强度比都小于 1, 表明这些谱线在等离子体中存在吸收。

表 2

编号	$E(\text{J})$	n	$E/n(\text{J})$	$t(\text{ps})$	$d(\mu\text{m})$	$L(\text{mm})$	$\alpha(^{\circ})$
890117	148.3	9	16.5	300	200	8.0	0
8.0120	198.8	12	16.6	300	200	7.2	13.8

表 3

$\lambda(\text{nm})$	I_L/I_t	$G(\text{cm}^{-1})$
8.89	1.36	1.4
8.73	1.20	0.9
8.52	0.60	
8.41	0.71	

对于具有自发发射放大性质(增益系数为 G)长度为 L 的介质, 其自发发射强度由下式表示^[10]

$$I_{ASE} = I_0 \frac{(e^{GL} - 1)^{3/2}}{(GL e^{GL})^{1/2}} [\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{ster} \cdot \Delta\nu] \quad (1)$$

其中 I_0 为常数。考虑一个长度为 L , 截面直径为 D 的圆柱形自发发射源, 设沿轴向观察的总强度为 I_L 和与轴成 α 角方向上的总强度为 I_t 。在轴向和非轴向观察时, 光源各点发出的辐射都能进入探测系统的假设下, 轴向和非轴向强度之比为

$$\frac{I_L}{I_t} = \left[\frac{D}{L \sin \alpha} \cdot \frac{\exp GL - 1}{\exp G \frac{D}{\sin \alpha} - 1} \right]^{3/2} \cdot \exp \frac{G}{2} \left(\frac{D}{\sin \alpha} - L \right) \quad (2)$$

实验上可以定出 L 、 D 、 α 和 I_L/I_t , 于是可以用 (2) 式推得增益系数 G 。这是一种简单方便的判断是否存在放大作用的方法, 其优点是当 G 和 L 均比较小时 ($GL < 1.5$), 轴向和非轴向强度相差不大, 因此对探测器的动态范围要求不高。对于 Si^{11+} 8.89 nm 和 8.73 nm 由上式算出的增益系数列于表 3。计算时 D 值取留在靶面上的焦线坑痕的实测宽度 ($\sim 300 \mu\text{m}$), 并对轴向和非轴向观察时不同的激光总能量和激光介质长度作了修正。

此外对获得的消像散光谱在垂直于色散方向作空间分辨扫描 (见图 3), 获得了 8.89 nm 谱线及其附近连续谱空间扫描曲线的峰值强度。扣除连续谱后获得了 $I_L/I_t = 1.41$ 。由 (2) 式算得的增益系数 $\sim 1.5 \text{ cm}^{-1}$, 与前述处理结果符合得很好。

最近在 LF 12 激光装置上进行了考核诊断仪器的预备实验。实验中用 LF 12 激光装置南路光束, $1.05 \mu\text{m}$ 激光脉冲宽度约为 900 ps, 抵达靶面的激光能量约为 50 J。由于采用 LF 12 靶场研制的柱面透镜列阵, 获得了非常均匀的线状激光等离子体, 焦线长度约为 21 mm, 宽度约为 $130 \mu\text{m}$, 线功率密度约为 26 GW/cm , 靶面功率密度约为 $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。改变硅片的宽度 (9、12、15 和 18 mm) 可以获得不同长度的等离子体。实验中用 Kodak 101-01 单颗粒乳剂层底片接收记录。这种特殊的软 X 射线底片, 不仅灵敏度高, 而且颗粒细, 灰雾低, 噪声小, 因此一发激光足以获得很好曝光的光谱。图 4 是所获得的 XUV 光谱照片 (a) 及其测微光度计扫描经迹 (b)。由于摄谱系统具有一维空间分辨能力, 因此可以获得离开靶面一定距离处的黑密度值。采用 T. Kishimoto 关于 Kodak 101-01 底片在 8 nm 处的标定数据将黑密度值转换成强度^[17]。于是得到了四种不同长度硅等离子体的 8.89 nm 和 8.73 nm 两条谱线离开靶面一定距离处的相对强度。图 5 给出了离靶面 $300 \mu\text{m}$ 处这两条谱线的强度随等离子体长度的变化。将这些数据按公式 (1) 进行最小二乘法拟合, 获得了 8.89 nm 和 8.73 nm 两条谱线在离靶面 $300 \mu\text{m}$ 处的增益系数分别为 1.5 cm^{-1} 和 1.4 cm^{-1} 。

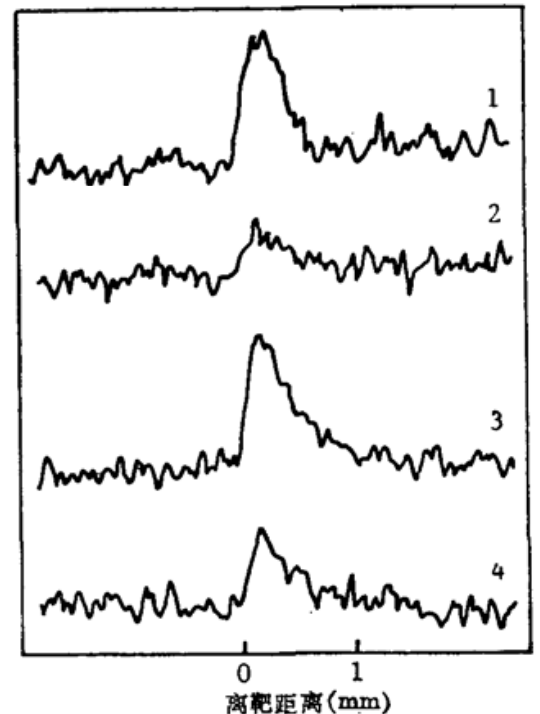


图 3 轴向(曲线 1、2)和非轴向 $\alpha = 13.8^\circ$ (曲线 3、4) 光谱的空间扫描曲线。1、3 为谱线 (8.89 nm); 2、4 为连续谱 (8.94 nm)

三、讨 论

对于 6 路装置上的实验, 由于激光能量涨落较大 (25%), 所用底片灵敏度较低, 信噪比小, 估

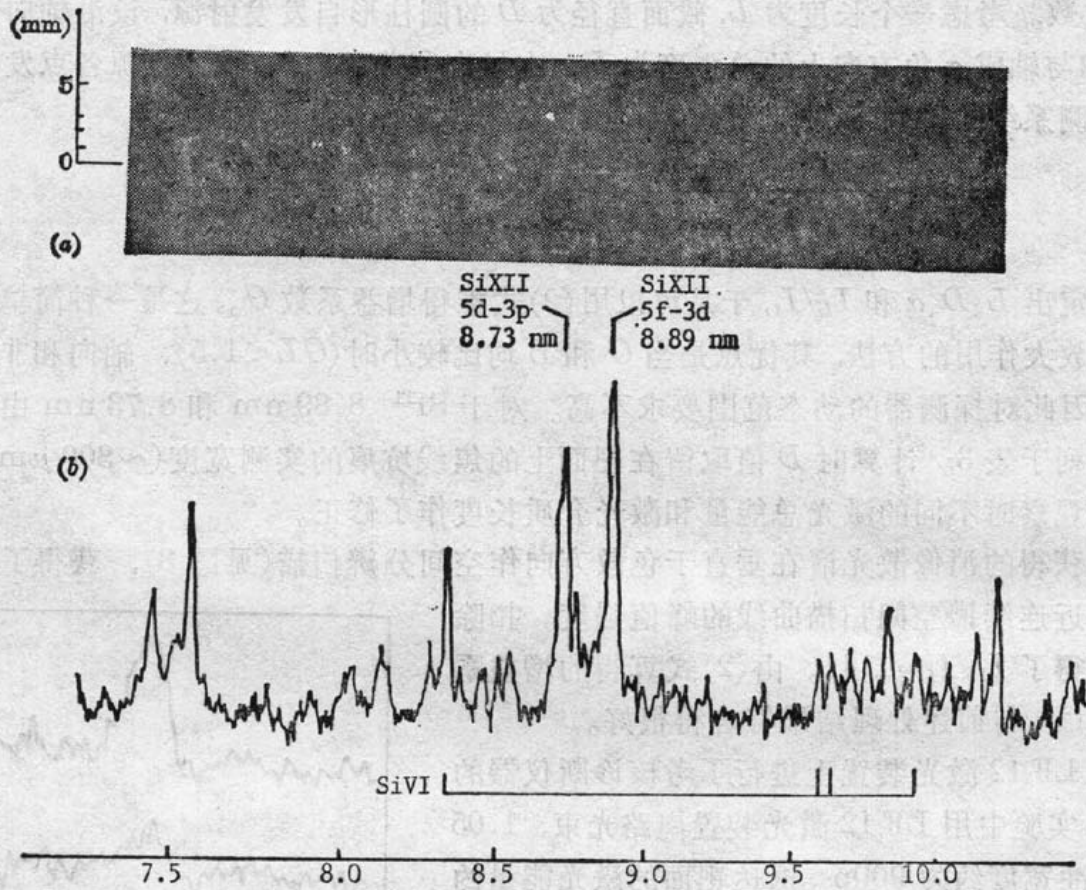


图4 线状硅等离子体(长度为18mm)轴向XUV光谱照片(a)及其相应的测微光度计扫描曲线(b)

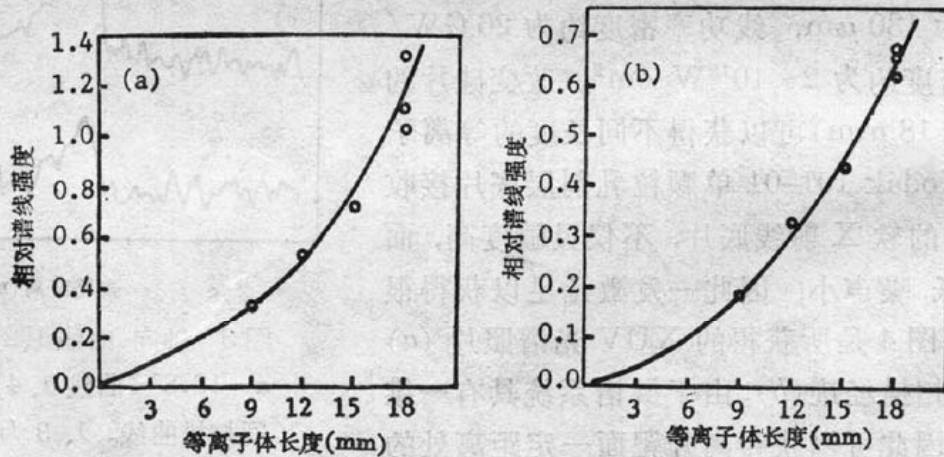


图5 离靶面 $300 \mu\text{m}$ 处谱线强度随等离子体长度的变化及拟合曲线

(a) SiXII 5f-3d, 8.89nm, $G=1.5\text{cm}^{-1}$; (b) SiXII 5d-3p, 8.73nm, $G=1.4\text{cm}^{-1}$

计增益系数测量的相对误差约为 50%; 对于 LF12 装置上的实验, 激光能量起伏小 ($<10\%$), 所用底片灵敏度高, 信噪比高, 估计增益系数测量的相对误差约为 30%。

6 路装置上所做的实验, 其靶面线功率密度约 50 GW/cm , 是由激光输出能量直接换算得到, 未扣除打靶光学系统的损失, 而且是多发平均值; 而 LF12 装置上所做的实验, 其靶面线功率密度约为 26 GW/cm , 已扣除了这些损失。所以这两组实验到达靶面的实际线功率密度相差不会很大。然而这两组实验的焦线宽度和驱动脉冲宽度都是不同的, 而且前者的结果是空间平均的, 后者的结果是空间分辨的。

四、结 论

本实验首次观察到类锂硅离子 $5f-3d$ 和 $5d-3p$ 跃迁的 ASE 型激光增益使我们的软 X 射线激光波长突破了 10 nm。用线聚焦激光等离子体轴向和非轴向谱线强度比和轴向谱线强度随线聚焦等离子体长度的变化分别测定了 Si^{11+} $5f-3d$ 和 $5d-3p$ 跃迁的空间平均增益系数和空间分辨增益系数。本实验的结果显示了采用复合泵浦机制有可能在中等规模, 甚至小规模激光装置上将软 X 射线激光波长推进至水窗波段的前景。

作者衷心感谢中国科学院上海光机所高功率激光物理联合实验室 6 路激光装置运行组和 LF12 激光装置运行组的紧密配合和大力协助, 尤其要感谢 LF12 靶场组为本实验提供柱面透镜列阵线聚焦系统。作者也衷心感谢上海感光胶片厂宋建时和张良梅为我们提供无保护层 X 光底片、本所半导体激光室方祖捷为实验提供硅片和西德马普学会生物物理化学研究所所长 F. Schäfer 教授提供 Kodak 101-01 底片。

参 考 文 献

- 1 D. L. Matthews, P. L. Hagelstein *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 110 (1985)
- 2 B. J. Mac Gowan, S. Brown *et al.*, *SPIE*, **688**, 36 (1986)
- 3 B. J. MacGowan, S. Maxon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2157 (1987)
- 4 O. Willi, D. Bassett *et al.*, *SPIE*, **688**, 2 (1986)
- 5 P. Jaegle, G. Jamelet *et al.*, *J. O. S. A.*, **B4**, 563 (1987)
- 6 G. Jamelet, P. Jaegle *et al.*, *IEEE. Transactions on Plasma Science*, **16**, 497 (1988)
- 7 P. R. Herman, T. Tachi *et al.*, *IEEE. Transactions on Plasma Science*, **16**, 520 (1988)
- 8 G. P. Kiehn, J. Edwards *et al.*, *SPIE*, **831**, 270 (1987)
- 9 D. Kim, C. H. Skinner *et al.*, *J. O. S. A.*, **B6**, 115 (1989)
- 10 徐至展, 张正泉 *et al.*, *中国激光*, **16**(7), 385 (1989)
- 11 T. Hara, K. Ando *et al.*, *Japanese J. Appl. Phys.*, **28**, L1010 (1989), *Proc. Japan Acad.*, **65B**, 60 (1989)
- 12 G. Jamelet, P. Jaegle *et al.*, Springer Proceedings in Phys. 30 Short-Wavelength Lasers and Their Applications, Nov. 11~13 1987 Ed. G. Yamanaka, P75
- 13 C. E. K. Mees & T. H. James, 照相过程理论, 中译版(科学出版社, 1979) M. G. Hobby & N. J. Peacock, *J. Phys.*, **E6**, 854 (1973)
- 14 M. A. Blokhin, "Methods of X-Ray Spectroscopic Research", Pergamon, Oxford, 1965
- 15 范品忠, 毛楚生, *光学学报*, **4**, 956 (1984); C. L. S. Lewis & E. R. Mahoney *J. Phys.*, **E17**, 744 (1984); B. L. Henke *et al.*, *J. O. S. A.*, **B1**, 818~827, 828~849 (1984)
- 16 G. J. Linfood, E. R. Peressini *et al.*, *Appl. Opt.*, **13**, 397 (1974)
- 17 T. Kishimoto, Report of Max-Planck-Institut für Quantenoptik Garching MPQ-108, 1985

本刊荣获中国科学院优秀期刊二等奖

最近由院内外专家组成的中国科学院优秀期刊评选委员会对中国科学院主办的期刊进行了认真评选, 一批优秀期刊分别获得了一等奖(7个)、二等奖(12个)和三等奖(33个), 同时表扬了一批作出成绩的期刊(27个)。本刊被授予二等奖, 这是广大作者、读者、编委和关心本刊的同志共同努力的结果。我们决心再接再厉, 不断取得新的成绩, 为激光事业作出应有的贡献。