

类 Na 铜离子软 X 射线激光初步研究*

张正泉 范品忠 徐至展 陆培祥 周锦智

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道在上海光机所 LF12[#] 激光装置上利用自制极紫外掠入射光栅摄谱仪, 进行类 Na 铜离子复合泵浦软 X 射线激光研究的初步实验结果, 低泵浦条件下 (2.5×10^{12} W/cm²) 的光谱表明, 得到自发发射放大是有希望的。文章还给出了类 Na 等电子数序列离子复合激光波长与原子序数的关系及推广到水窗波段的可能性。

关键词: XUV 光谱, X 激光, 类 Na 离子。

近年来, X 射线激光研究取得了迅速的进展, 许多泵浦机制都观察到了软 X 射线波段的自发发射放大^[1~8], 其中包括类 Ne 和类 Ni 离子的电子碰撞激发泵浦和类 H、类 He 和类 Li 离子的复合泵浦; 同时, 各国实验室也在通过各种不同的方式改进 X 射线激光的输出特性, 如获得更短的具有实用意义的水窗波长 (23~44 Å) 激光和选择更好的泵浦机制提高激光器效率, 使器件小型化。目前研究最成熟、性能最好的是类 Ne 硒离子电子碰撞激发激光, 波长在 206 Å, 209 Å 附近, 但是类 Ne 离子要达到水窗波长 (相应于 $z=64$ 所要求的驱动激光功率远远超出了现有高功率激光装置所能提供的水平^[9, 10])。从实验结果外推有希望得到水窗波长激光增益的是: 类 Ni 钽或钨离子 ($z=73, 74$)、类 H 铝离子 ($z=13$)、类 He 硅离子 ($z=14$) 和类 Li 钙或铬离子 ($z=20, 24$)。比较起来, 类 Ni 离子, 类 H 离子和类 He 离子对泵浦功率的要求偏高, 所以只有在一些巨型的驱动激光装置上才可能实现; 类 Li 离子的要求较低, 在一些中、小型激光装置上都已经取得了很好的结果^[7, 8, 11]。

和类 Li 离子一样, 双电子复合泵浦的类 Na 离子由于具有封闭内壳层带单个价电子的结构, 其电离能比类 H、类 He 或类 Ne 离子的电离能低很多, 亦同样具有低泵浦要求、高效率和易于推向更短波长等优点。这种利用长寿命的类 Ne 基态离子复合到类 Na 离子高激发态从而产生激光的可能性, 在 Key^[12]、Brown 等人^[13] 的文章中曾提出过, 但是卢瑟福实验室最早进行的初步实验效果不大理想。他们用涂铜碳纤维靶做实验^[14], 观察到强的连续谱发射和密集的复杂的谱线, 但 CuXIX 5 $g-4 f$ 谱线 (111.3 Å) 却很弱, 看不出有增益。作者估计, 可能是因为泵浦激光强度过高的缘故。

作者曾在上海光机所的 LF 12[#] 激光装置上进行了类 Na 铜离子复合泵浦激光的初步实验。实验中仅用了两路装置的南路激光束, 1.05 μm 波长激光束到达靶面的能量为 60 J (相对起伏小于 10%, 脉冲宽度约为 900 ps)。采用一新颖的六单元柱面透镜列阵-非球面透镜组合系统^[15], 将 LF 12[#] 装置输出的激光束分为六个子光束, 聚焦在同一焦线上, 其强度

收稿日期: 1990 年 7 月 20 日

* 本课题得到国家高技术基金、国家自然科学基金和中国科学院重大项目资金的资助。

分布相互补偿,从而得到一照明非常均匀的焦线,其长度为 20 mm,线宽约为 130 μm 靶面上相应的平均激光强度约为 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。实验中所用的靶是表面经过抛光的厚平板铜靶。为了避免边缘效应和保证使用均匀照明的焦线的中央部分,平板靶的宽度总是小于焦线长度,改变靶的宽度可以获得不同长度的线状等离子体。

实验的主要诊断设备是一台自制的消象散一维空间分辨掠入射光栅极紫外摄谱仪,其光谱分辨率和空间分辨率分别为 0.05 \AA 和 50 μm ^[16]。实验时摄谱仪安放在水平焦线的一端,利用谱仪内的超环面镜可将光轴准直到线聚焦的轴线方向上,超环面镜和焦线的距离为 74 cm,对准精度为 0.1 mrad 和 10 μm ,系统的空间放大倍率为 0.6。靶室线聚焦的角精度优于 $\pm 1 \text{ mrad}$,而超环面镜的集光角为 5~10 mrad。实验中采用了 Kodak 101-01 软片记录极紫外光谱,一发打靶即能摄得清晰的光谱照片。

图 1 中示出了用掠入射光栅摄谱仪得到的非常清晰的铜激光等离子体极紫外光谱,从图中可见,有可能产生激光作用的类 Na 离子 CuXIX 5g-4f 跃迁(111.3 \AA)、5f-4d 跃迁(103.0 和 103.2 \AA)、6g-4f 跃迁(72.22 \AA) 和 6f-4d 跃迁(68.65 和 68.74 \AA) 光谱线,它们对应于复合泵浦类 Li 离子 4f-3d、4d-3p、5f-3d 和 5d-3p 跃迁谱线,这些谱线已经在软 X 射线波段观测到自发发射放大增益(参见图 2)。另外,从光谱图中还可以见到强的类 F 和类 O 铜离子谱线,而类 Ne 铜离子谱线不在这个波段范围内。由此可见,在本文实验的泵浦激光强度下,可以产生相当多的类 Na 离子复合泵浦所需的类 Ne 铜离子。

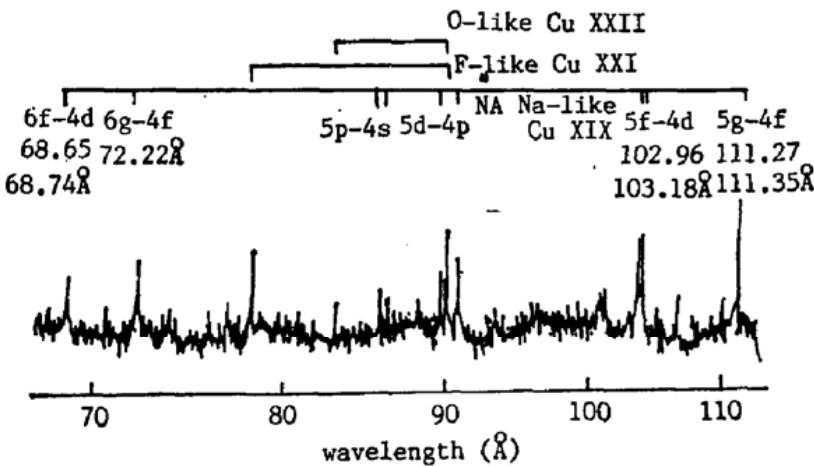


Fig. 1 The microdensitometer trace of XUV emission spectrum of a line-shaped copper plasma recorded by 1 m grazing incidence grating spectrograph with 5 μm entrance slit. The laser intensity on the copper slab target is about $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$. The errors of measured wavelength are $\pm 0.05 \text{ \AA}$. The Na-like Cu XIX 5g-4f, 5f-4d, 6g-4f and 6f-4d transitions are expected to get gains, which are analogous to the 4f-3d, 4d-3p, 5f-3d and 5d-3p transitions of Li-like ions. Some strong F-like and O-like copper spectral lines can also be seen.

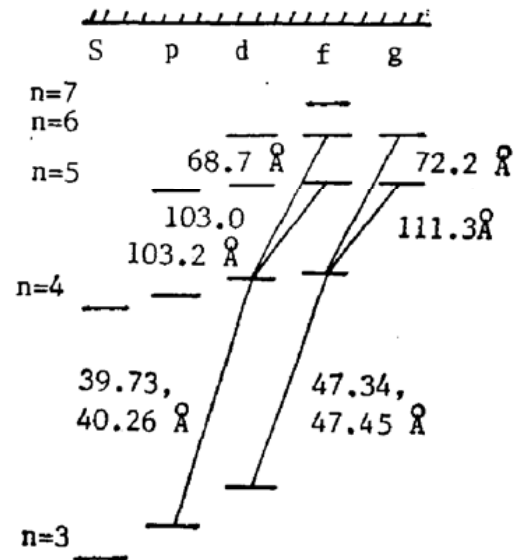


Fig. 2 Term diagram of Na-like Cu XIX. The energy level structure is analogous to that for the Li-like ions. The 5g-4f, 5f-4d, 6g-4f and 6f-4d transitions are full of promise in soft X-ray amplification.

通过改变铜平板靶的宽度可以得到不同长度的作为增益介质的线状激光等离子体,由 Kodak 101-01 软片的响应特性曲线^[17]可以从光谱的黑密度得出谱线的相对强度。由此得到的空间积分的类 Na 铜离子 $5g-4f$ 跃迁谱线(111.2 \AA) 轴向强度与线状等离子体长度的关系如图 3 所示,初步的实验没有显示出非线性增长的放大现象。探其原因,一方面可能因为泵浦条件仍不十分合适,另一方面主要是因为在我们的初步实验中,等离子体源的成象波长位置实际调整在 50 \AA 附近,而不是在需要的 100 \AA 附近,因此不能得到上述谱线的强度空间分布,就有可能观察不到在离靶面一定距离才存在的增益。进一步实验,将紧靠靶面的连续谱吸收区分开来,得到增益仍旧是有希望的。

沿类 Na 等电子数序列将复合泵浦软 X 射线激光推向更短波长的前景是光明的。根据我们的计算外推和实验测量数据,表 1 给出了类 Na 等电子数序列离子复合激光波长与原子序数的关系,以及类 Ne 离子电子碰撞激发激光已观测到放大的波长和相应的泵浦水平。沿着类 Na 等电子数序列,可以比类 H 离子序列($\lambda \propto z^{-2}$)和类 Li 离子($\lambda \propto z^{-2.5}$)更快地推向短波长

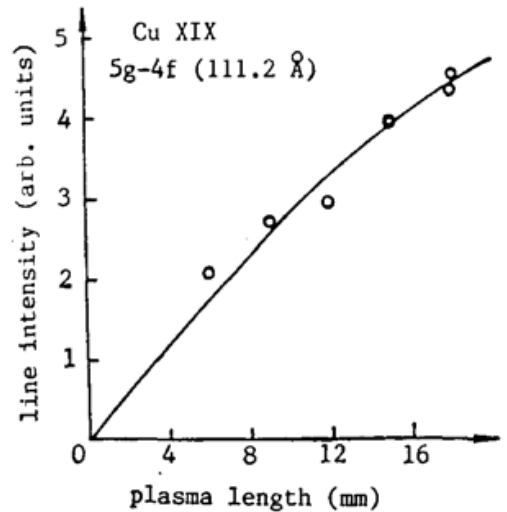


Fig. 3 The spatial-integrated intensity of the $5g-4f$ spectral line (111.2 \AA) of Na-like copper ion vs the plasma length, which shows no evidence of gain. It is mainly because the pumping condition is still not quite adequate, or because in this preliminary experiment the stigmatic grazing incidence grating spectrograph had not been adjusted to image the plasma source onto the neighbourhood of 100 \AA wavelength.

Table 1 Possible wavelengths of Na-like recombination laser and observed wavelengths of Ne-like collisional excitation laser lines as well as corresponding pumping level.

Z	wavelength of Na-like transition				Ne-like ion			
	5g - 4f	5f - 4d	6g - 4f	6f - 4d	observed laser lines	pumping level		
	(Å)				(Å)	(W/cm ²)		
29	CuXIX	111.274	102.960	72.22	68.65	CuXX	121 - 284	8×10^{12}
		111.353	103.179		68.65			
30	ZnXX	100.410	93.122		(61.98)			
		100.487	93.351		(62.09)			
31	GaXXI	91.071	84.649		(56.35)			
		91.149	84.867		(56.43)			
32	GeXXII	82.975	77.287		(51.40)	GeXXIII	196 - 286	
		83.058	77.510		(51.50)			
33	AsXXIII	75.916	70.845		(47.04)			
		76.003	71.050					
34	SeXXIV	69.731§	65.188§		(43.25)	SeXXV	182 - 263	7×10^{13}
		69.818§	65.406§					
35	BrXXV	64.242	(60.26)		(39.88)			
		64.331						
36	KrXXVI	(59.44)	(55.80)					
37	RbXXVII	(55.12)	(51.82)					
38	SrXXVIII	(51.26)	(48.24)			SrXXIX	160 - 167	
39	YXXIX	(47.78)	(45.03)			YXXX	155 - 157	1.4×10^{14}
40	ZrXXX	(44.65)	(42.13)					
41	NbXXXI	(41.82)	(39.50)					
42	MoXXXII	(39.24)	(37.10)			MoXXXIII	106 - 139	4×10^{14}

Experimental wavelength data adopted from Kononov 1979.

§—from Brown 1985. ()—extrapolated value.

($\lambda \propto z^{-2.9}$); 对于 $5g-4f$ 和 $5f-4d$ 跃迁, 水窗波长相应的类 Na 离子原子序数 $z=40\sim 42$ (锆、铌、钼), 对于 $6g-4f$ 和 $6f-4d$ 跃迁, 相应的原子序数更小一些, $z=34, 35$ (硒、溴)。由表可见, 在较高的泵浦功率条件下, 利用电子碰撞激发已经观测到不少类 Ne 离子的波长大于 100 \AA 的激光线; 与此相对比, 在同样或更低的泵浦条件下, 利用类 Ne 离子到类 Na 离子的复合泵浦机制, 同一元素可以将激光波长缩短 $2\sim 4$ 倍, 更容易接近水窗, 而没有类 Ne 离子电子碰撞激发泵浦推向更短波长所要求的高电子密度, 以及折射效应方面的限制^[9, 10]。

中、高 z 元素类 Na 离子高激发态能级的理论计算和实验光谱研究, 以进一步求得更精确的数值是有意义的。为了得以实现类 Na 离子复合激光, 除了做好空间分辨和时间分辨光谱测量外, 考虑到短脉冲激光泵浦有利于在等离子体复合期间得到更高密度的等离子体, 将利用更短的驱动激光脉冲进行实验, 为更高的增益创造更合适的条件。

参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**, No. 2 (Jan), 110.
- [2] T. N. Lee *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 11 (Sep), 1185.
- [3] B. J. MacGowan *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2157.
- [4] S. Suckewer *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **55**, No. 17 (Oct), 1753.
- [5] C. Chenais-Popovics *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2161.
- [6] G. P. Kiehn *et al.*; *Proc. SPIE*, Vol. 831, 1987, 270.
- [7] P. Jaegle *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1987, **B1**, No. 4 (Apr), 563.
- [8] Zhi-zhan Xu *et al.*; *Appl. Phys. (B)*, 1990, **B50**, No. 3 (Mar), 147.
- [9] M. D. Rosen *et al.*; *Phys. Fluids*, 1988, **31**, No. 3, 666.
- [10] B. L. Whitten *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1988, **B5**, No. 12 (Dec), 2537.
- [11] T. Hera *et al.*; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**, No. 6 (Jun), L1010.
- [12] M. H. Key; *J. Physique, Colloque C1, Supplement an 1988*, **49**, No. 3, c-135.
- [13] G. M. Brown *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1986, **B3**, No. 5 (May), 701.
- [14] C. L. S. Lewis *et al.*; *Rutherford Appleton Laboratory Annual Report RAL-88-042*, **19**.
- [15] Wannian Chen *et al.*; *CLEO/IQEC'90*, 1990, CWF-42.
- [16] 张正泉等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 8 (Aug), 762.
- [17] T. Kishimoto; «*Report of Max-Planck Institute for Quantum-Optics*, 108, 1985», **70**.
- [18] E. Ya. Kononov *et al.*; *Physica Scripta*, 1979, **19**, No. 4, 328.

Preliminary research of Na-like copper X-ray recombination laser

ZHANG ZHENGQUAN, FAN PINGHONG, XU ZHIZHAN, LU PEIXIANG AND ZHOU JINZHI

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800*)

(Received 20 July 1990)

Abstract

Experimental results of preliminary Na-like copper X-ray laser research are presented using a home-made XUV grazing incidence grating spectrograph on the LF12 laser facility. It shows that amplification of spontaneous emission is full of promise at low pumping condition ($2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$). The feasibility of isoelectronic scaling to water window wavelengths is discussed.

Key words: XUV spectroscopy, X-ray laser, Na-like ions.