

# 实现水窗波段 X 射线激光的途径

沈百飞 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 研究了类氢、类氦、类锂和类钠离子等四种实现复合机制 X 射线激光的方案, 对可能实现水窗波段 X 射线激光的几种方案比较, 分析了其各自的优缺点, 并讨论了可能的具体实验方法。

**关键词** 水窗波段 X 射线激光, 复合泵浦机制。

目前, 实验上成功地演示的 X 射线激光主要是以激光等离子体为介质, 泵浦机制为电子碰撞激发和复合泵浦。在电子碰撞激发机制方法中, 研究得最多的是类氦锗方案, 在提高增益长度积, 改善相干性方面取得了很大进展<sup>[1]</sup>, 然而在使 X 射线激光推向“水窗”波段方面, 由于所需的泵浦激光功率密度太高, 很难有所突破, 于是人们又从研究机制着手, 对功率密度要求相对较低的类镍机制<sup>[2]</sup>, 取得较大进展。与此同时, 复合泵浦机制, 由于所需的泵浦激光功率密度较低, 而且可能更容易实现小型化, 所以一直引起人们广泛的重视, 这也是本文研究的重点。并且, 本文只考虑  $\Delta n = 1$  的激光跃迁, 而不考虑  $\Delta n > 1$  的激光跃迁。

## 1 原子过程

对复合泵浦 X 射线激光, 其主要机制是先设法产生大量高阶离子, 也称为“母离子”, 然后让等离子体迅速冷却, 由于母离子优先复合到低一阶离子(工作离子)的高激发态能级, 从而形成粒子数反转及激光增益。目前人们研究的比较多的主要是类氢, 类氦, 类锂和类钠方案。选中这四种方案是与它们的原子结构分不开的。它们大都是裸离子或满壳层加一个电子这样的结构。众所周知, 原子的各阶电离能在满壳层处有一个跳跃, 也即满壳层不易再继续电离。这样上面的几种方案就比较容易得到较多的母离子。从而迅速冷却时, 将有更多的离子复合到低阶离子的高激发态, 只有类氦方案稍有不同, 类氢离子和类氦离子的电离能相差不多, 但仍能得到足够大的类氢, 类氦离子丰度比<sup>[3]</sup>。这些离子的共点, 激光下能级的寿命都很短, 从而容易形成激光下能级的迅速排空, 以利于实现粒子数反转。现列出一些有希望实现 X 射线激光增益的跃迁的波长(表 1, 表 2, 表 3, 表 4)\*。类氦离子部分缺少的跃迁波长,

\* 表内的数据许多是作者按 Cowan 的原子结构与光谱结构程序, 用 Hartree-Fock 方法计算得到的。类氦离子的跃迁波长来自文献[4]。

用莫塞莱定律推导得到。从表中可以看出各类机制首先进入“水窗”波段的分别为类氢铝, 类氮硅, 类锂钒, 类钠铈, 所以这些元素是实现复合泵浦机制 X 射线激光的候选材料。

Table 1. The data of H-like ion scheme

element	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al
ionization energy (eV)	490.0	667.0	871.4	1103.1	1362.2	1648.7	1962.7	2304.2
wavelength of $3d - 2p$ (nm)	18.22	13.39	10.25	8.10	6.56	5.42	4.55	3.88
suitable electron density ( $\text{cm}^{-3}$ )	$7.8 \times 10^{18}$	$2.8 \times 10^{19}$	$8.2 \times 10^{19}$	$2.1 \times 10^{20}$	$4.8 \times 10^{20}$	$1.0 \times 10^{21}$	$1.9 \times 10^{21}$	$3.6 \times 10^{21}$

Table 2. The data of He-like ion scheme

element	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si
ionization energy (eV)	552.1	739.3	953.9	1195.9	1465.1	1761.9	2086.0	2437.8
wavelength of $1s3d - 1s2p$ (nm)	17.0	12.9	10.0	7.99	6.52	5.42	4.57	3.91
suitable electron density ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.2 \times 10^{19}$	$7.8 \times 10^{19}$	$2.3 \times 10^{20}$	$5.8 \times 10^{20}$	$1.3 \times 10^{21}$	$2.8 \times 10^{21}$	$5.4 \times 10^{21}$	$1.0 \times 10^{22}$

Table 3. The data of Li-like ion scheme

element	ionization energy (eV)	wavelength of $4f - 3d$ (nm)	suitable electron density ( $\text{cm}^{-3}$ )
Al	442.1	15.4	$1.7 \times 10^{19}$
Si	523.5	13.0	$3.3 \times 10^{19}$
P	611.9	11.1	$6.1 \times 10^{19}$
S	707.2	9.57	$1.1 \times 10^{20}$
Cl	809.4	8.30	$1.8 \times 10^{20}$
Ar	918.0	7.30	$2.9 \times 10^{20}$
K	1034.9	6.46	$4.6 \times 10^{20}$
Ca	1158.1	5.77	$7.0 \times 10^{20}$
Sc	1288.4	5.16	$1.0 \times 10^{21}$
Ti	1425.9	4.64	$1.5 \times 10^{21}$
V	1570.3	4.20	$2.2 \times 10^{21}$

Table 4. The data of Na-like ion scheme

element	ionization energy (eV)	wavelength of $5g - 4f$ (nm)	element	ionization energy (eV)	wavelength of $5g - 4f$ (nm)
Cu	670.6	11.1	Kr	1205	5.94
Zn	737.0	10.0	Rb	1294	5.51
Ga	806.7	9.10	Sr	1387	5.12
Ge	879.7	8.29	Y	1484	4.77
As	956.1	7.59	Zr	1583	4.46
Se	1036	6.97	Nb	1686	4.18
Br	1114	6.42			

由原子结构还可以讨论量子效率。电子碰撞激发类氦方案的激光跃迁是 3-3, 所以量子

效率比较低, 而复合泵浦机制激光跃迁  $\Delta n = 1$ , 所以量子效率就比较高, 这里定义量子效率 = 激光跃迁能量/电离能, 所得结果如表 5 所列。可以看到类氦方案量子效率最低, 然后依次为类氢方案, 类钠方案, 类锂方案。为什么类氦离子的量子效率低于类氢离子, 而且类钠离子的量子效率低于类锂离子? 作者认为: 先粗略估算各种方案的量子效率, 由氢原子模型得到各能级的电离能分别为 1, 1/4, 1/9, 1/16, ..., 从而类氢, 类氦, 类锂, 类钠离子的电离能分别为 1, 1, 1/4, 1/9, 而相应的激光跃迁能级差分别为 5/36, 5/36, 7/144, 9/400, 因此量子效率分别为 0.14, 0.14, 0.19, 0.20。由于电子轨道贯穿作用, 类氦, 类锂, 类钠离子的电离能变大, 其中类钠离子变大最多, 从而得到现在的结果。即量子效率分别为 0.14, 0.13, 0.18, 0.17。由此也可以定性知道, 如果用电子碰撞电离的方法得到母离子, 则所需的初始电子温度, 类氦离子最高, 然后依次为类氢, 类钠, 类锂离子。假定电离至工作离子的数量小于 10%, 可以对类氢铝, 类氦硅, 类锂钒, 类钠铌离子分别进行计算。计算中只包括最重要的电离态。在高温下复合到激发态上的粒子比较少, 所以可以不考虑激发态的影响, 由于到基态的三体复合(在这里)不重要, 所以也只考虑辐射复合和电子碰撞电离这两种原子过程。计算结果如表 5 所列, 这也证实了上面的讨论。

Table 5. Comparison of several scheme used to produce the X-ray lasers in "water windows"

	H-like Al	He-like Si	Li-like V	Na-Like Nb
quantum efficiency	0.14	0.13	0.18	0.17
suitable electron density ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.6 \times 10^{21}$	$1.0 \times 10^{22}$	$2.2 \times 10^{21}$	
rate of lasing transition $\text{gA}(\text{S}^{-1})$	$1.1 \times 10^{13}$	$8.0 \times 10^{12}$	$2.2 \times 10^{13}$	$4.0 \times 10^{13}$
rate of emptying transition $\text{gA}(\text{S}^{-1})$	$7.2 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{14}$
initial electron temperature (eV)	2000	1800	1400	1600

现在再比较一下有关的速率系数。类氦离子的激光下能级的排空速率最快, 而激光跃迁速率最慢, 因此, 虽然其量子效率最差, 却可以得到最大的粒子数反转。比较类氢离子, 类锂离子, 类钠离子三种方案, 发现激光跃迁下能级的跃迁速率依次变大, 这对形成粒子数反转是有利的, 不过激光跃迁的自发辐射速率增加更快, 这也应引起注意。

## 2 等离子体条件

### 2.1 最大增益

通过仔细考虑复合泵浦机制 X 射线激光的特点, 可以得到所需等离子体参数的定标律。众所周知要实现最大激光增益, 希望有尽可能多的激光跃迁上能级粒子, 同时尽可能少的激光跃迁下能级粒子。在一定的电子温度下, 随着电子密度的增加, 激光跃迁上能级的粒子数分布迅速增加(因为三体复合速率和电子密度平方成正比), 直到激光跃迁上能级的粒子数分布和更高激发态能级以及母离子基态达到萨哈-波尔兹曼平衡。若电子密度继续增大, 则激光跃迁上下能级之间也将达到波尔兹曼平衡, 这时粒子数反转将消失, 激光增益也将消失。所以最大增益基本出现在激光跃迁上能级和更高的激发态以及母离子基态已达到萨哈-波尔兹曼平衡, 而激光跃迁上下能级之间还没有达到波尔兹曼平衡的时候。

## 2.2 最佳电子密度

达到波尔兹曼平衡的条件是电子碰撞退激发速率远大于自发辐射速率,由此可得到

$$\frac{N_e}{T_e} \propto Z^6$$

再用  $T_e \propto Z^2$ , 就可得到  $N_e \propto Z^7$ , 由此可见, 随着原子序数的增加, 所需的电子密度也迅速增加, 作者具体计算了类氢, 类氦, 类锂离子各元素所需的电子密度(结果如表 1, 表 2, 表 3 所示)。其中, 类氢离子的电子密度  $N_e = 1 \times 10^{14} Z^7$ , 采用了 Elton 的结果<sup>[5]</sup>, 类氦和类锂离子则利用作者自己和文献的一些已有结果, 通过拟合得到  $N_e = 2.77 \times 10^{14} Z^7$  和  $N_e = 1.7 \times 10^{12} Z^7$ , 再代入  $Z$  计算得到。这样就得到了产生复合机制 X 射线激光所需的最佳电子密度。现在再对电子温度稍作讨论。

## 2.3 电子温度

众所周知, 复合泵浦机制的关键要快速冷却, 但由于萨哈-波尔兹曼分布的限制, 过冷的等离子体也没有太大的好处, 并且在通常的实验中, 一般存在的问题是, 不易在得到远离平衡的电离态分布的同时, 得到很低的电子温度, 而不是电子温度太低。所以 X 射线激光增益区的电子温度低于电离能的 10% 就可以了。这也是已有的实验和数值模拟结果所证实的。

## 3 实验方法

首先, 由于实验需要很高的等离子体初始电子温度(表 5)(光电离机制例外), 从而要求很高的泵浦激光功率密度。其具体的功率密度大小和激光脉宽有关。其次, 各种方案所需的电子密度都很高, 所以泵浦激光的波长要比较小。如果用钽玻璃激光作为泵浦光源, 必须用倍频光。第三, 由于电子密度很高, 等离子体趋向平衡的速度特别快, 因此为了得到远离平衡态的电离态分布, 就必须有极快的冷却速度。其方法有: 膨胀冷却, 电子热传导冷却, 辐射冷却, 也可采用不加热电子的方法直接电离至所需的母离子。由于电子密度比较高, 电子热传导冷却难于起重要作用。加强膨胀冷却有两种方法, 1) 采用二维膨胀冷却(如用纤维靶<sup>[6]</sup>以及细焦线打靶<sup>[7]</sup>), 甚至三维膨胀冷却(如串粒靶和光栅靶<sup>[8]</sup>), 2) 用短脉冲打靶<sup>[9]</sup>。加强辐射冷却的方法是加入高  $Z$  元素。已有的数值模拟表明, 这也是很有效的方法<sup>[10]</sup>。加入高  $Z$  元素还能有效减小光厚的影响。从另外一个角度考虑也可能得到所需的等离子体条件, 即用高功率, 超短脉冲( $< 1$  ps)<sup>[11]</sup>, 期望利用多光子电离的方法, 直接得到高度电离的等离子体, 同时又不加热等离子体。但这一方案目前可能很难推进到“水窗”波段。因为推进到“水窗”波段需要更高的功率密度, 而这使得受激喇曼后向散射引起的电子加热变得非常严重<sup>[11]</sup>。另一种有效的方法, 可能是强 X 光电离。由于激光等离子体可以产生很强的 X 光源, 人们已开始研究 X 光和等离子体的相互作用。在 X 射线激光方面, 把 X 光作为内壳层光电离的泵浦源, 人们作过不少研究<sup>[12]</sup>。但把它作为复合泵浦 X 射线激光的泵浦源, 还很少有这方面的报道。作者曾做过这方面的初步研究<sup>[13]</sup>, 发现这也是很有希望的一种方案, 甚至可能实现稳态“水窗”波段 X 射线激光。

**小 结** 本文给出了类氢, 类氦, 类锂和类钠离子等复合机制 X 射线激光研究所需的原子参数, 和等离子体参数。通过研究各种方案的特点和许多可能的实验方法, 表明, 只要精心设计实验方案, 实现“水窗”波段 X 射线激光的显著激光增益是很有希望的。

## 参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen *et al.*, Demonstration of a soft x-ray amplifier. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**(1): 110~113  
T. N. Lee, E. A. McLean, R. C. Elton, Soft X-ray lasing in neonlike germanium and copper plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(12): 1185~1198
- [2] S. Maxon, Calculations of a Ta soft X-ray laser (4.48 nm) using a subkilojoule pump. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(1): 10~12  
S. Maxon, K. G. Estabrook, M. K. Osterheld *et al.*, High gain X-ray lasers at the water window. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(15): 2285~2288
- [3] J. P. Apruzese, P. C. Kepple, J. Davis, *et al.*, Recombination lasing in heliumlike silicon; a possible path to the water window, *IEEE Trans. on Plasma. Sci.*, 1988, **PS-16**(5): 529~533
- [4] R. L. Kelly, Atomic and ionic spectrum line below 2000 angstroms. *J. Phys. and Chemical Reference Data*, 1987, **16**(Suppl.)
- [5] R. C. Elton, *X-ray laser*. San diego, Academic, 1990, 150
- [6] C. L. S. Lewis, R. Corbett, D. O'Neill *et al.*, Status of X-ray laser research at Rutherford-appleton laboratory. *Plasma. Phys. and Contro. Fusion*, 1988, **30**(1): 35~44
- [7] T. Hara, K. Ando, N. Kusakabe *et al.*, Soft X-ray lasing in an Al plasma produced by a 6 J laser. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**(6): L1010~L1012
- [8] E. J. Valeo, S. C. Cowley, K. Krushelnick *Et al.*, A microsphere-based X-ray laser. *Int. Colloquium on X-ray Laser*, Schliersee, Germany, 1992
- [9] H. Azuma, K. Yamakawa, S. A. Ramsden *et al.*, Short pulse puping of Balmer- $\alpha$  sodium laser. *RAL-90* 10~12
- [10] 沈百飞, 徐至展, 韩申生, 类氦铝离子软 X 射线激光. *光学学报*, 1995, **15**(3): 272~275
- [11] P. Amendt, D. C. Eder, S. C. Wilks, X-ray lasing by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2589~2592  
N. H. Burnett, G. D. Enright, Population inversion in the recombination of optically-ionized plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(10): 1797~1808
- [12] H. C. Kapteyn, R. W. Lee, Observation of a short wavelength laser pumped by Auger decay. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**: 2939~2942
- [13] Shen Baifei, Xu Zhizhan, Teng Huaguo *et al.*, X-ray laser pumped by intense X-ray. *Chinese Phys. Lett.*, 1993, **10**(Suppl.): 223~225

## The Path to The Water Window X-Ray Lasing

Shen Baifei      Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 27 April 1994; revised 6 June 1994)

**Abstract** Recombination schemes used to produce water window X-ray laser, of hydrogen-like, helium-like, lithium-like or sodium-like ions have been compared. Possible experimental designs have been discussed.

**Key words** water window X-ray laser, recombination-pumping scheme.