

# 高增益复合泵浦 $O^{+7}$ X 射线激光 的理论研究

张 杰

(英国卢瑟福国家实验室)

## 提 要

用一维流体力学程序 MEDUSA 耦合原子物理程序 NIMP, 对超短脉冲激光辐照 Mylar 纤维靶和平面靶产生复合泵浦  $O^{+7}$  X 射线激光的物理过程进行了理论研究, 探讨了利用 VULCAN 激光装置的 CPA 皮秒脉冲光束进行饱和增益实验的可行性. 结果表明, 超短脉冲辐照激光靶可能是产生饱和增益的复合泵浦 X 射线激光的一条有效途径.

关键词 复合泵浦, 平面靶.

## 1 引 言

自 1984 年美国 Livermore 国家实验室 (LLNL) 率先在  $Se^{+24}$  激光等离子体中观察到波长 20.6 nm 和 20.9 nm 的激光辐射以来<sup>[1,2]</sup>, 对 X 射线激光的研究在理论和实验上都取得了长足的进展<sup>[3~7]</sup>. 采用电子碰撞泵浦的方法产生的 X 射线激光的最短波长已经达到 4.3 nm<sup>[8]</sup>; 在 20 nm 附近, 已产生出饱和的 X 射线激光<sup>[9~11]</sup>; 观察到 X 射线激光的相干性<sup>[12]</sup>. 一个旨在提高 X 射线激光相干性的英-美联合实验室将于 1992 年底在英国卢瑟福国家实验室 (RAL) 进行.

与电子碰撞泵浦的方法相比, 用复合泵浦方法产生相同波长的 X 射线激光所需要的激光能量要低得多, 且由于激光增益产生于激光等离子体的冷却阶段, 此时的等离子体密度梯度较小, 故增益区长度的折射限制(相对)不那么重要. 因此, 许多国家的 X 射线激光实验室都对复合泵浦产生 X 射线激光的机制进行了大量的实验和理论上的研究, 并取得了许多令人振奋的结果<sup>[4~6]</sup>. 采用这种机制, 已在  $Al^{+12}$  等离子体中观察到波长为 3.9 nm 的激光迹象<sup>[13]</sup>. 但是, 复合泵浦产生的 X 射线激光还一直没能达到饱和增益所要求的增益-长度乘积值大于 15 的必要条件. 因此, 对于如何提高复合泵浦激光增益的研究成了目前 X 射线激光研究中最重要关注的焦点之一.

本文用一维 Lagrangian 流体力学模拟程序 MEDUSA 耦合原子物理程序 NIMP, 对复合泵浦产生  $O^{+7}$  X 射线激光进行了理论研究, 探讨了利用卢瑟福实验室的 VULCAN 激光装置上新建成的 CPA 超短脉冲光束进行饱和增益实验的可行性. 结果表明, 超短脉冲(皮秒量级)激光辐照所产生的快速冷却等离子体中可能产生饱和的 X 射线激光. 相应的实验将在 1993 年第

二季度中进行。

## 2 模拟计算程序

MEDUSA 是一维 Lagrangian 流体力学程序,可用于模拟激光与靶相互作用产生等离子体的物理过程。这个模拟程序从八十年代以来,不断改进、完善,一直被广泛应用于卢瑟福实验室所进行的许多 X 射线激光和激光等离子体的研究中,其对物理结果预言的有效性,已被实验多次证实<sup>[4,14~17]</sup>。程序中考虑了激光在等离子体中的碰撞吸收与共振吸收,热电子的能量传输,等离子体的辐射冷却与复合再加热等流体力学和热力学效应的影响。

在模拟程序中,激光靶被分为 70 个 Lagrangian 层,每层均由各自的密度、速度、电子温度和离子温度等力学量来表征,这些量都是空间与时间的函数。Lagrangian 层的边界随流体一起运动,层的划分是非线性的,距靶表面越近,层分得越细,以保证能充分反映激光增益区中各力学量的空间变化。

激光与等离子体相互作用中的原子物理过程由一个随时间变化的非局域平衡(non-LTE)的原子物理程序 NIMP 来描述。为了计算等离子体中远离平衡态的离化过程,流体力学方程与描述原子束缚能级(主量子数 $\leq 10$ )布居的时间微分方程同时解出。最高束缚能级上的粒子布居与连续态假设处于局域平衡(LTE)之中。程序考虑了束缚态与连续态间的光电离与辐射复合过程,电子碰撞电离与三体复合及束缚能级间的辐射与碰撞过程。谱线宽度及线型由多普勒展宽与斯塔克(Stark)展宽的卷积来表示。类氢离化态中的共振跃迁赖曼(Lyman)线系的辐射俘获用 Sobolev 近似方法处理<sup>[14]</sup>。在计算巴耳末(Balmer)  $\alpha$  线的激光增益时,考虑了与之相关能级的精细结构。

## 3 皮秒脉冲产生的高增益等离子体

在复合泵浦产生 X 射线激光的物理过程中,完全离化的等离子体发生绝热膨胀而迅速冷却,等离子体中的自由电子通过三体碰撞与裸核复合后优先布居于类氢离子的高能级上。当等离子体的绝热膨胀速度足够大时,快速冷却会造成类氢离子  $n = 3$  与  $n = 2$  能级间的粒子数反转布居,从而在极紫外至 X 射线波段中产生激光辐射。

等离子体的快速冷却能增加粒子数的反转布居,提高 X 射线激光的增益系数。对激光等离子体的大量理论和实验研究表明,等离子体中由韧致辐射和辐射复合等过程导致的冷却速率与等离子体初始密度的平方成正比,因此,高初始密度的等离子体有较快的冷却速率,产生较高的激光增益。

皮秒量级的激光脉冲与固体靶的相互作用可以产生高初始密度的等离子体。用皮秒激光脉冲辐照固体靶后产生等离子体的流体力学运动在激光脉宽的时间内几乎可以忽略不计,所以,激光能量不再是通过脉冲前沿产生的低密度等离子体的逆向韧致辐射所吸收加热等离子体,而是由自由电子的热传导直接传输到接近于固体密度的高密度等离子体中,这样的等离子体正是产生高增益系数的复合泵浦 X 射线激光的理想工作介质。

当激光脉宽短于皮秒量级时,等离子体在激光脉宽的时间尺度内不能形成完全离化的裸

核等离子体,这对于复合泵浦 X 射线激光是有害的.

通过大量的模拟计算并考虑到卢瑟福实验室激光装置的实际能力,最后发现 2 ps 是产生高增益系数的复合泵浦 X 射线激光的最佳脉冲宽度.

图 1 是在产生最大峰值增益的那个 Lagrangian 层中对 2 ps 激光脉冲与直径为  $7 \mu\text{m}$  的 Mylar ( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ ) 纤维靶作用过程的模拟结果. 由这个温度、密度的增益系数随时间的变化关系可以看出,这个由 2 ps 激光脉冲产生的等离子体的冷却速度的确很快,初始温度也大大低于由长脉冲产生的等离子体的初始温度,因而产生了很多的峰值增益. 增益持续时间的半高宽 (FWHM) 约为 45 ps, 远大于泵浦激光脉冲宽度. 这是由于裸核等离子体的复合能持续较长时间,从而保证了 X 射线激光信号可以在较大区中传播一段距离以得到足够大的增益-长度乘积.

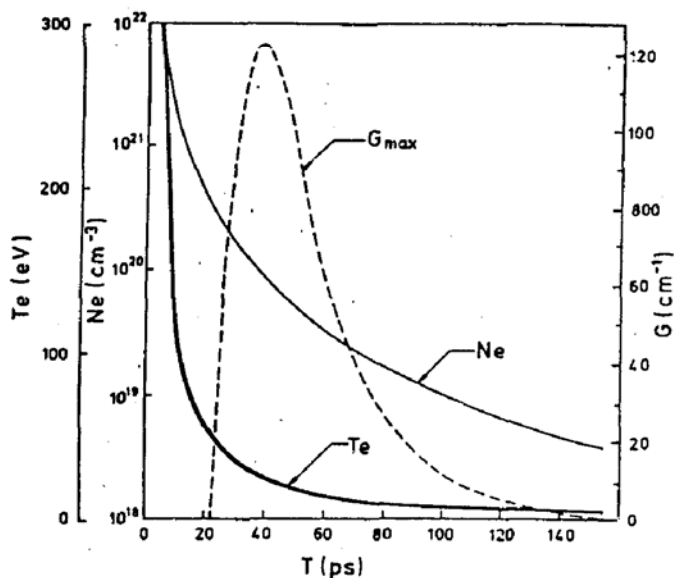


Fig. 1 Time evolution of Te, Ne and  $10.2 \text{ nm } O \text{ VIII}$  recombination peak gain coefficient in the Lagrangian cell which gives maximum peak gain for a 7 micron diameter fibre target irradiated by a 50 micron wide focus CPA beam with intensity of  $3 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$

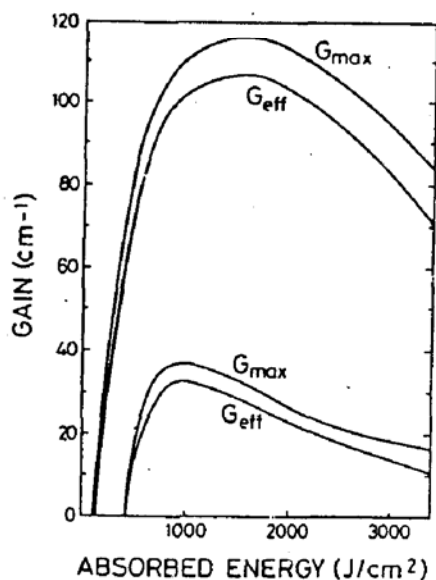


Fig. 2 The peak gain coefficient and effective gain coefficient for time-resolved and spatial integrated measurements as functions of absorbed energy. The upper two curves represent the performances of  $O^{+7}$  recombination laser action of a  $7 \mu\text{m}$  diameter fiber in a  $50 \mu\text{m}$  wide line focus CPA beam. The lower two curves are the corresponding performances for a slab target irradiated by a  $50 \mu\text{m}$  wide line focus CPA beam

#### 4 高增益复合泵浦 X 射线激光实验的可行性

卢瑟福实验室的大型激光装置 VULCAN 上新近完成了 CPA (Chirped pulse amplification) 光束的实验工作. VULCAN 的 CPA 光束的输出能量为  $20 \sim 40 \text{ J}$ , 波长  $1.053 \mu\text{m}$ , 靶上聚焦能力为  $50 \mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 2 ps 是研究高增益复合泵浦 X 射线激光的理想光源.

用 VULCAN 的 CPA 光束的参数作为计算机模拟的输入条件, 分别对纤维和平板 Mylar

靶的情况进行了优化模拟计算. 研究了在 2 ps 脉宽的 CPA 光束辐照下, 复合泵浦  $O^{+7}X$  射线激光的性质. 图 2 是  $O^{+7}$  复合泵浦 X 射线激光的峰值(空间分辨、时间分辨)增益系数和有效增益系数(空间积分、时间分辨)的计算值随吸收能量的变化关系. 上方的两条曲线对应于将直径为 7  $\mu\text{m}$  的 Mylar 纤维靶置于 CPA 光束 50  $\mu\text{m}$  宽的焦线中间时产生的峰值增益系数和有效增益系数. 下方则是 CPA 光束聚焦成 50  $\mu\text{m}$  焦宽, 辐照在平板 Mylar 靶上所产生的相应增益系数的计算值. 这里的有效增益系数就是实验上根据轴向积分强度随靶的长度非线性的变化关系拟合 Linford 公式而得出的增益系数. 模拟计算中的靶长为 0.5 cm.

严格说来, 激光辐照平板靶产生等离子体的过程要用二维流体力学程序精确模拟, 但由于二维程序的模拟计算要耗费极长的计算机机时, 根本无法用其对参数和条件进行优化计算. 二维模拟结算同一维的结果比较显示, 激光辐照平板靶产生等离子体的膨胀和冷却的流体力学过程, 可以用直径等于平板靶焦线宽度的圆柱靶产生的等离子体的一维流体力学过程近似地描述. 由于二维冷却速度大于一维冷却速度, 这里用一维程序对平板靶模拟得出的增益系数略小于用二维程序模拟得到的计算值.

在实际实验中, 激光对纤维靶的辐照来自靶的一侧, 而并不像在模拟计算中的柱面对称辐照, 但无论如何正对激光辐照一侧的靶面所产生的等离子体的性质应与对称辐照下的情形类似. 根据以前纤维靶的实验结果及理论模拟经验<sup>[14]</sup>, 在模拟计算中假设辐照在纤维靶上的激光能量有 10% 被吸收, 根据图 2 中增益系数随吸收能量的变化关系可以推算出, VULCAN 激光的 CPA 光束的能量可以保证对 0.5 cm 长的纤维靶有足够的辐照, 以使增益系数最大, 此时的增益系数-长度乘积高达 50. 在同样的假设下, 由平板靶产生的等离子体中相应的乘积值为 15. 然而, 对平板靶来说, 其对激光能量的吸收率大大超过了纤维靶, 模拟结果予言, 此时平板靶对入射激光能量的吸收应为 25%. 因此, 同样的激光能量下, 等离子体的长度可以增加至原长度的两倍. 再考虑到实验中的二维冷却效应, 对平板靶来说, 其增益系数-长度的乘积值应大于 30, 也已进入饱和区域.

为了进行比较, 对卢瑟福实验室的另一台大型激光装置 SPRITE 的喇曼光束辐照 Mylar 靶产生等离子体的过程也进行了类似的模拟计算, 结果示于图 3. SPRITE 装置的喇曼光束的输出能量为 5 J, 波长为 0.268  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 12 ps, 聚焦宽度为 7  $\mu\text{m}$ . SPRITE 装置相对长的脉冲, 聚焦在 7  $\mu\text{m}$  的纤维靶上产生的增益系数明显低于 CPA 2 ps 脉冲所产生的增益系数(靶上能量密度相同情况时). 在 10% 的能量被纤维靶所吸收的假设下, SPRITE 装置所能产生的最大的峰值增益系数-长度和乘积约为 15. 对平板靶来说, SPRITE 装置几乎不能产生任何增益. 由此可知, 在相同的能量密度辐照情况下, 用 2 ps 的激光脉冲辐照靶远比用较短波长但较长脉冲辐照能产生高得多的增益系数.

在模拟计算中, 设共振线辐射的俘获因子为最大, 以给出增益系数的下限. 并考虑了热传导、绝热冷却以及复合再加热对等离子体的影响.

对用 VULCAN 装置的 CPA 光束辐照靶产生等离子体的情况, 模拟结果表明, 产生增益的区域在膨胀等离子体的中部, 约有 20 个 Lagrangian 层产生了反转布居, 增益区的宽度约为 10~40  $\mu\text{m}$ . 一般说来, 实验上复合泵浦 X 射线激光增益的观察要比电子碰撞泵浦 X 射线激光的

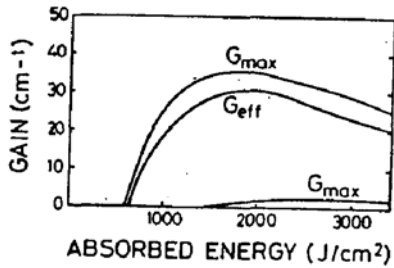


Fig. 3 Peak gain coefficient and effective gain coefficient as functions of absorbed energy. The upper two curves represent the performances of  $O^{+7}$  recombination laser action of  $7 \mu\text{m}$  fibre irradiated by  $7 \mu\text{m}$  tight focus SPRITE beam. The lower performances are the corresponding gains for a slab target in  $7 \mu\text{m}$  focus SPRITE beam

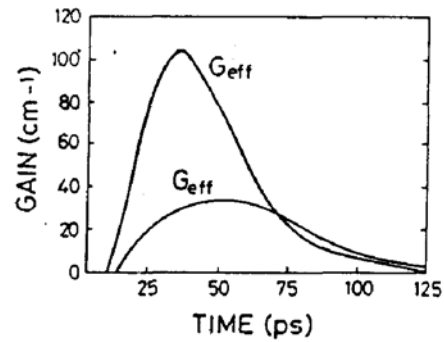


Fig. 4 Temporal characteristics of effective gain coefficients for  $7 \mu\text{m}$  fibre target irradiated by  $50 \mu\text{m}$  wide focus CPA beam (upper) and for a slab target (lower) respectively

增益观察困难得多. 其中一个主要原因是等离子体中非增益区域所发射的荧光会掩盖来自增益区域的相同波长的辐射信号, 使得由测量纵向和横向辐射强度比或是通过变化等离子体长度的方法得到的激光增益值(有效增益)远低于峰值增益系数. 但对于由  $2 \text{ ps}$  的 CPA 光束辐照靶产生的增益系数来说, 由于反转层数多, 增益区域较宽, 以上的困难并不严重, 空间积分的有效增益系数的时间特性如图 4 所示(上方是纤维靶, 下方是平板靶的模拟计算结果). 这也是用皮秒 CPA 脉冲激光产生复合泵浦 X 射线激光的另一个优点. 尽管如此, 我们仍准备在实验中进行空间和时间分辨的测量, 以把来自增益区域的辐射(轴向)从整个区域的背景辐射信号中隔离出来, 最大限度地减小实验测量值与峰值增益值的差别.

## 5 结 论

模拟计算的结果表明, 用皮秒脉冲激光辐照靶, 尤其是辐照纤维靶可能是产生饱和增益的复合泵浦 X 射线激光的一条有效途径. 根据这项理论研究, 作者已提出了利用 VULCAN 激光装置上的 CPA 光束实现饱和增益的复合泵浦 X 射线激光的实验方案并得到了英国科技研究部(SERC)的支持, 实验将于 1993 年第二季度在卢瑟福实验室进行.

## 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(2):110~113
- [2] M. D. Rosen, P. L. Hagelstein, D. L. Matthews *et al.*, Exploding-foil technique for achieving a soft X-ray laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(2):106~109
- [3] T. N. Lee, E. A. MacLean, R. C. Elton, Soft X-ray lasing in neonlike germanium and copper plasmas. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59(11):1185~1188
- [4] C. Chenais-Popovics, R. Corbett, C. J. Hooker *et al.*, Laser amplification at  $18.2 \text{ nm}$  in recombining plasma from a laser-irradiated carbon fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59(19):2161~2164
- [5] Z. Z. Xu, P. Z. Pan, Z. Q. Zhang *et al.*, Study of recombination X-ray laser and related plasma physics at

- Shanghai. *X-Ray Lasers 1990*, ed. G. J. Tallents, Bristol: IOP Publisher, 1991; 151~158
- [6] Y. Kato, H. Azuma, K. Murai *et al.*, Explosive-mode short wavelength recombination Balmer  $\alpha$  laser. *X-Ray Lasers 1990*, ed. G. J. Tallents, Bristol: IOP Publisher, 1991; 1~8
- [7] E. E. Fill, Th. Schlegel, J. Steingruber *et al.*, Experiments on X-ray laser photo-pumping. *X-Ray Laser 1990*, ed. G. J. Tallents, Bristol: IOP Publisher, 1991; 115~122
- [8] B. J. MacGowan, S. Maxon, L. B. DaSilva *et al.*, Demonstration of X-ray amplifiers near the carbon K edge. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(4); 420~423
- [9] A. Carillon, H. Z. Chen, P. Dhez *et al.*, Saturated and near-diffraction-limited operation of an XUV lasers at 23.6 nm. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(19); 2917~2920
- [10] 王世绩、顾援、傅思祖等, “双靶对接”高增益类 Ne 锶软 X 光激光实验研究. *中国科学*, 1991, **A** 辑 (2); 151~160
- [11] J. A. Koch, B. J. MacGowan, L. B. DaSilva *et al.*, Observation of gain-narrowing and saturation behavior in Se X-ray laser line profiles. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(22); 3291~3294
- [12] J. E. Trebes, K. A. Nugent, S. Mrowka *et al.*, Measurement of the spatial coherence of a soft-X-ray laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(5); 588~591
- [13] C. J. Keane, D. C. Eder, B. J. MacGowan *et al.*, Recombination of X-ray laser experiments using exploding ribbon aluminum targets. *X-Ray Lasers 1990*, ed. G. J. Tallents, Bristol: IOP Publisher, 1991; 93~96
- [14] J. Zhang, M. H. Key, P. Norreys *et al.*, Resonance line ratio as a diagnostic of initial conditions suitable for XUV laser action in recombining plasmas. *Opt. Commun.*, 1992, **93**(3); in press
- [15] N. Tragin, M. H. Key, S. J. Rose, Modelling high gain XUV laser amplifiers. *J. Modern Optics*, 1990, **37**(4); 435~445
- [16] G. J. Tallents, L. Dwivedi, Y. Kato *et al.*, X-ray recombination laser experiments pumped with 12 ps KrF pulses. *Third International Colloquium on X-Ray Lasers*, Schliersee, Germany, 1992, (in press)
- [17] J. Zhang, L. Dwivedi, Y. Kato *et al.*, Experimental studies of line intensity ratio as a diagnostic of recombining plasmas. *Third International Colloquium on X-Ray Lasers*, Schliersee, Germany, 1992, (in press)

## Theoretical study of $O^{+7}$ recombination X-ray laser with high gain driven by ultrashort pulses

ZHANG Jie

(Clarendon Laboratory, Oxford University, Oxford, OX1 3PU, UK)

(Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxon, OX11 0QX, UK)

(Received 26 September 1992; revised 13 January 1992)

### Abstract

Numerical modelling has been used to investigate the behaviour of  $O^{+7}$  recombination X-ray lasers produced by Mylar ( $C_{10}H_8O_4$ ) fibre or slab target irradiated by ultrashort pulses. Feasibility of experiment on saturated gains has been discussed. The theoretical results show that saturated recombination X-ray laser are possible by using ultrashort pulses.

**Key words** recombination pump, slab target.