

# 瞬态类氖铁 x 射线激光抽运脉冲结构的优化计算\*

燕 飞 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2002 年 3 月 18 日收到)

利用一维拉格朗日流体动力学模拟程序对由纳秒预脉冲和皮秒主脉冲相结合而成的抽运脉冲组合, 产生瞬态类氖铁 x 射线激光(25.5nm,  $3p \rightarrow 3s$ ,  $J = 0 \rightarrow 1$ )的过程进行了优化计算. 通过对抽运脉冲组合的强度、宽度、脉冲间隔等参数的优化计算, 得到了在预脉冲将靶物质充分电离到类氖离子化的前提下(类氖离子丰度  $> 80\%$ ), 在主预脉冲峰值之间的脉冲间隔为零时, 产生有效增益的条件是最好的. 这一结论与实验结果相符.

关键词: x 射线激光, 瞬态增益, 离子丰度

PACC: 4255V, 5250J

## 1. 引 言

自从 1984 年 Matthews 等人首次观测到软 x 射线激光以来<sup>[1]</sup>, 人们对其进行了深入的实验和理论上的研究, 取得了多方面的显著进展. 目前在实验上已经产生了波长短至 5.8nm 的 x 射线激光的饱和输出<sup>[2]</sup>. 但是通常在短波长产生 x 射线激光, 需要大型的激光装置, 这为 x 射线激光的应用带来了困难. 因此越来越多的研究转向了如何使用尽可能小的激光装置来有效地产生 x 射线激光.

碰撞激发是产生 x 射线激光的一种主要机理, “传统”的碰撞激发机理存在转换效率低, 不利于发展台式 x 射线激光装置等缺点. Afanasiev 和 Shlyaptsev 提出了一种新的抽运机理——瞬态碰撞激发(TCE) x 射线激光<sup>[3]</sup>. “标准”的 TCE<sup>[4]</sup>是由一个纳秒脉冲和一个皮秒脉冲相结合进行抽运. 纳秒激光脉冲产生具有合适的类氖离子化态及大的标尺长度的等离子体. 然后, 皮秒脉冲快速加热等离子体到所需要的状态, 具有高的电子温度和低的离子温度. 这样有利于产生高的增益, 因为增益系数正比于电子温度而与离子温度的平方根成反比. 瞬态增益仅维持很短的时间(从飞秒到几个皮秒), 然后逐渐到达准稳态(QSS)<sup>[5]</sup>. 目前分析设计 TCE x 射线激光实验一般利用流体力学和原子动力学数值模拟程序, 也有简单

的相似模型为实验的准备提供方便<sup>[6]</sup>. Kalachnikov 等人首次观测到 TCE x 射线激光的饱和输出<sup>[7]</sup>, 它证实了使用瞬态机理发展台式 x 射线激光装置的可行性, 而且对于 x 射线激光向更短波长推进提供了一种新的途径.

为了提高抽运能量转换为 x 射线激光能量的效率, 近年来开展了预(双)脉冲和多脉冲打靶的电子碰撞激发机理的研究<sup>[8,9]</sup>. 在这个方案中选用第一个低强度脉冲加热靶产生以类氖(镍)离子为主的等离子体, 待等离子体适当膨胀变为低密度梯度、低温等离子体后, 第二个高强度脉冲把已形成的等离子体快速加热到高增益的状态. 这样可以产生一段低密度梯度、高温、高增益的等离子体, 减少 x 射线激光束在其中传播的折射效应. 与常用的单个长脉冲抽运相比, 此方案有较高的抽运激光使用效率、高增益的特点.

本文利用 Med103 程序<sup>[10]</sup>对驱动脉冲结构进行了优化计算. 此程序是一维拉格朗日流体力学程序, 能够对激光等离子体相互作用、x 射线激光增益的产生进行理论模拟. 本文采用类氖离子电子碰撞激发方案, 对类氖铁离子  $3p \rightarrow 3s$  的  $J = 0-1$  跃迁 25.5nm x 射线激光增益的产生进行了模拟优化. 使用纳秒预脉冲和皮秒主脉冲相结合的脉冲结构, 辐照 100 $\mu\text{m}$  厚的平板铁靶, 驱动激光脉冲都采用高斯形, 激光波长为 1.05 $\mu\text{m}$ .

\* 国家自然科学基金(批准号 60108007 和 19974074)资助的课题.

## 2. 结果与讨论

对双脉冲抽运结构进行模拟优化,需要涉及到多个物理参量,如脉冲强度、宽度、两个脉冲之间的时间延迟等.下面详细介绍对各个参数的模拟计算.

首先使用单个低强度的高斯脉冲(预脉冲),在脉宽分别为 1 和 2 ns 情况下,变化峰值强度从  $1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  到  $5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  辐照铁靶.图 1 给出脉宽为 2 ns 时不同强度下类氦、类氟、类钠离子丰度的变化曲线,取值时刻为脉冲的峰值时刻.得出强度为  $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  时,类氦离子丰度最大,在此强度下等离子体中的电子温度可达 200 eV.图 2 和图 3 分别给出脉宽为 1 和 2 ns、强度为  $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  下类氦离子丰度相对于时间和空间的等高线,脉冲的峰值时刻分别为 3000 和 1500 ps.从图 2 和图 3 可以看出,虽然两个不同的脉宽情况下类氦离子丰度都能达到 80%,但是在脉宽为 2 ns 时,高丰度类氦离子的空间区域较大,这有利于预等离子体对主脉冲能量的吸收.当抽运脉冲强度太低时,如在  $1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  情况下,不能将工作物质充分电离到类氦状态,此时得到的等离子体中所含类氦离子的数量很小,要想产生类氦 x 射线激光,还需要主脉冲继续电离等离子体.但是随入射激光强度的增高,预等离子体会出现过电离,在本次模拟中当强度增高到约  $7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  时开始过电离,当增高到  $1.25 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ,等离子体中类氟离子所占比重很大,同样会影响类氦 x 射线激光高增益的产生.

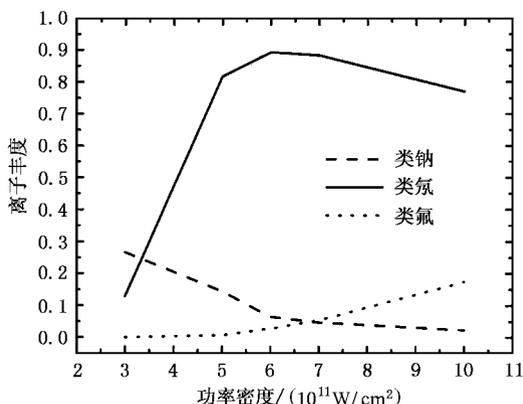


图 1 类氦离子丰度随入射脉冲强度的变化曲线

在确定了预脉冲的强度和宽度以后,固定主脉冲的强度  $1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ ,对主脉冲的宽度和主预脉冲之间的间隔进行优化.为了得到更准确的计算结

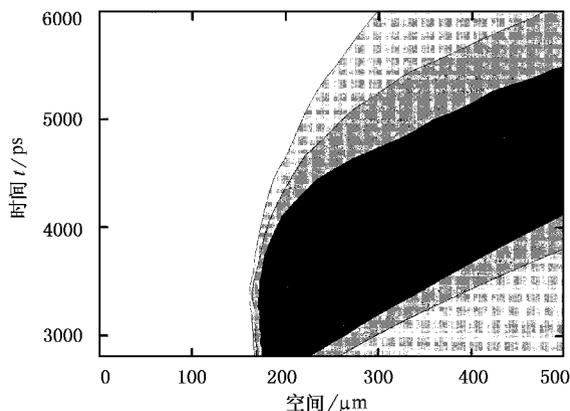


图 2 强度为  $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  宽度为 2 ns 的预脉冲产生的类氦离子丰度相对于时间和空间分布的等高线.颜色由浅到深分别代表离子丰度大于 10%、50%、80%.脉冲峰值时刻在 3000 ps 处,靶表面的位置在  $100 \mu\text{m}$  处

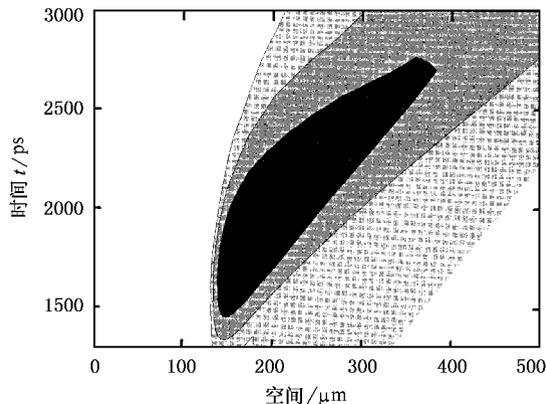


图 3 强度为  $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  宽度为 1 ns 的预脉冲产生的类氦离子丰度相对于时间和空间分布的等高线.颜色由浅到深分别代表离子丰度大于 10%、50%、80%.脉冲峰值时刻在 3000 ps 处

果,本文在不同间隔下对不同的脉宽情况进行了详细的模拟.首先确定主脉冲的宽度,变化主脉冲宽度从 1—10 ps 进行计算,在主脉冲宽度为 1 ps 时,得到的增益系数相对要小一些,而且增益的时空区域也会变小,这是由于脉冲太短,在功率密度一定的情况下所携带的能量降低,于是在主脉冲作用时间内不能充分加热电子,致使增益值下降;加大脉宽,增益系数也随之增大,在 5 ps 时得到最好的状态.但若再继续加大主脉宽,会出现增益系数下降,这是由于在脉冲作用时间内,等离子体过电离,致使类氦离子减少,影响了类氦 x 射线激光高增益的产生.然后固定主脉宽为 5 ps,对主预脉冲的间隔进行了优化.分别计算了间隔为  $\alpha$  (主预脉冲的峰值时刻重合), 50 ps、1.0 和 1.5 ns 的情况,图 4 给出不同峰值间隔下增益

相对于空间的变化曲线.从图 4 可以看出,间隔越小,高有效增益( $> 150\text{cm}^{-1}$ )空间区域越大,这是因为在预脉冲的峰值时刻,等离子体已经被充分电离到类氦态,预等离子体中含有大量的类氦离子,主脉冲迅速将电子加热到产生高增益所需的温度,产生瞬态粒子数反转.随着间隔的增大,在加入主脉冲前一刻的等离子体中类氟离子所占比重增高,影响了有效高增益的产生.同时还比较了主预脉冲间隔为 0 和 50ps 时的增益值,这两种情况下增益相对于时空分布的等高线差别不大,间隔为 0 时的最大增益值比间隔为 50ps 时的大,因此主预脉冲间隔为 0 是我们所需要的最合适的状态,此时得到的高增益系数( $> 150\text{cm}^{-1}$ )的区域较大,而且时空分布较均匀,有利于 x 射线激光的输出.

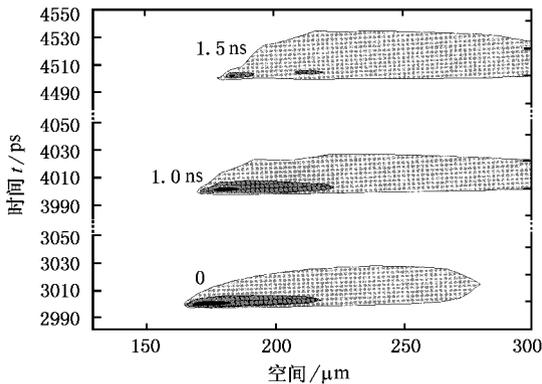


图 4 主预脉冲峰值间隔分别为 0, 1.0, 1.5ns 时增益相对于时空分布的等高线.颜色由浅到深分别代表增益系数大于 50, 100, 150 $\text{cm}^{-1}$

### 3. 与实验的比较

为了检验本文模拟的可靠性,本文对 Loewenthal 等人<sup>[11]</sup>进行的 25.5nm x 射线激光实验进行了模拟.在实验中使用的是双预脉冲结构,主脉冲的脉宽为 100ps,功率为 300GW(30J, 100ps),两个预脉冲的抽

运能量为主脉冲的 0.5%,脉宽同样为 100ps,第一、二个预脉冲与主脉冲的间隔分别为 2 和 5ns.实验中测得 9.2 $\text{cm}^{-1}$ 的增益.图 5 给出模拟得到的增益的时空等高线.我们得到的最大增益系数约为 40 $\text{cm}^{-1}$ ,实验中得到的增益是时空积分值,而且 x 射线在等离子体中的折射效应及实验工艺等因素导致了增益系数的下降.因此,模拟得到的最高增益值是实验得到的增益值的几倍是合理的.

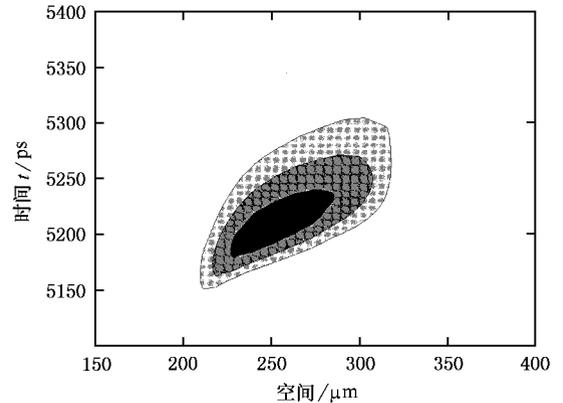


图 5 模拟类氦铁实验[参考文献 11]得到的增益的时空分布曲线.颜色由浅到深分别代表增益系数大于 20, 30, 40 $\text{cm}^{-1}$

### 4. 结 论

本文利用一维拉格朗日流体力学数值模拟程序 Med103,对产生瞬态类氦铁 x 射线激光的抽运脉冲的强度、宽度、脉冲之间的间隔进行了详细的模拟计算,得到了优化的脉冲结构.当预脉冲的强度为  $6 \times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$ ,宽度为 2ns 时,能将靶物质充分电离到类氦态,强度为  $1 \times 10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ ,宽度为 5ps 的主脉冲能迅速加热电子到产生增益的温度,同时也避免了过离化.在主预脉冲间隔为 0 时,得到有效增益系数为 150 $\text{cm}^{-1}$ .

[1] Matthews D L *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110  
 [2] Smith R *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **59** 47  
 [3] Afanasiev Yu V and Shlyaptsev V N 1989 *Sov. J. Quantum Electron.* **19** 1606  
 [4] Dunn J *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2825  
 [5] WeWhirter R W P and Hearn A G 1963 *Proc. Phys. Soc.* **82** 641  
 [6] Li Y J, Zhang J and Teng A P 2001 *Chin. Phys.* **10** 516

[7] Kalachnikov M P *et al* 1998 *Phys. Rev. A* **57** 4778  
 [8] Nilsen J and Moreno J C 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3376  
 [9] Zhang J *et al* 1997 *Science* **276** 1097  
 [10] Evans R G, Bell A R and MacGowan B J 1982 *J. Phys. D* **15** 711  
 [11] Loewenthal F, Tommasini R and Balmer J E 1998 *Opt. Commun.* **154** 325

# Optimization of drive pulse configuration for transient Ne-like Fe x-ray laser<sup>\*</sup>

Yan Fei Zhang Jie

(*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 18 March 2002)

## Abstract

Numerical simulation of transient Ne-like Fe ( $25.5\text{nm } 3p \rightarrow 3s, J = 0 \rightarrow 1$ ) x-ray laser pumped by a nanosecond prepulse followed by a picosecond main pulse is performed, using a one-dimensional hydrodynamic code in this paper. The effects of the pumping laser pulse intensity, duration and pulse delay are studied. The results indicate that under the pre-condition of maximum population of Ne-like ion abundance (over 80%), a maximum gain can be generated, when the main pulse is superposed on the peak of the prepulse.

**Keywords** : x-ray laser, transient gain, ion abundance

**PACC** : 4255V, 5250J

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60108007 and 19974074).