

基于高斯型脉冲驱动的一类镍瞬态 X 射线 激光的流体力学模型*

庞海龙¹⁾ 李英骏^{1)†} 鲁欣²⁾ 张杰²⁾

1) 中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

2) 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2006 年 3 月 22 日收到, 2006 年 8 月 10 日收到修改稿)

在激光脉冲为高斯型的条件下对瞬态 X 射线激光的流体力学自相似模型进行了修正, 并将计算结果与自相似模型解析解的结果进行了比较. 研究表明, 修正模型的结果比解析解更为精确, 从而验证了新模型的可靠性. 利用该模型对类镍钼 X 射线激光实验进行了优化设计, 得到了优化的实验方案.

关键词: 自相似模型, 高斯型脉冲, 类镍钼 X 射线激光

PACC: 4215D, 4255V, 4278

1. 引言

X 射线激光应用研究的一个重要目标就是实现“台式”X 射线激光的应用. 自从 1997 年在只有若干焦耳的驱动激光能量下第一次实现瞬态碰撞激发(TCE)方案产生 X 射线激光^[1]以来, 各国的科研工作者在这方面进行了大量的研究. Dunn 等^[2]在 1998 年将电子 TCE 方案扩展到了类镍离子的研究中并实现了类镍钼离子 $4d-4p$ $J=0-1$ 的粒子数反转, X 射线激光的波长为 14.68 nm. Kalachnikov 等^[3]首先在实验上实现了类氩钛离子和类氩锆离子的瞬态 X 射线激光的饱和输出, 波长分别为 32.6 和 19.6 nm, 驱动激光的能量分别为 32 和 60 J. 2000 年, Dunn 等^[4]实验上实现了波长为 14.7 nm 的类镍钼($4d-4p$)离子 X 射线激光, 其增益系数高达 35/cm, 增益长度积为 12.5, 而所需的驱动激光能量仅为 5 J, 这大大提高了 TCE 方案的效率, 为进一步降低驱动激光源的能量开辟了一条道路.

由于 TCE 方案产生 X 射线激光的物理过程为非平衡态过程, 且随着脉冲宽度趋近于皮秒甚至达百飞秒量级, 强度达 10^{15} W/cm² 以上, 激光能量对不同吸收机制之间的吸收份额比例已发生了较大的改

变, 从数值模拟方法中不容易得到直观简洁的物理图像. 为此, 文献[5]中提出了一个简化的一维模型, 用于电子 TCE 产生 X 射线激光流体动力学研究. 该模型物理图像直观明确, 且与实验及模拟结果符合较好, 为瞬态 X 射线激光的研究提供了一个简单直观的方法.

在文献[5]中, 激光脉冲被假定为不随时间变化, 而在实际的实验中, 激光脉冲随时间的变化一般为高斯型, 这就降低了自相似解的精度. 本文在激光脉冲为高斯型的情况下, 得到了自相似方程的数值解. 结果比文献[5]更精确, 使用的程序具有简单、耗时少的特点, 能为实验的快速设计提供一种有效工具.

2. 高斯型激光脉冲下自相似方程的导出

X 射线激光增益发生在晕区, 在此区域内 $n_e < n_c$. 在激光脉冲内等离子体作近似的等温膨胀, 电子和离子的速度达到各自的麦克斯韦分布. 由于离子的质量远大于电子, 为简化模型, 我们将离子作为背景, 等离子体近似看作理想流体. 在等温膨胀的假设下得到了等离子体流体力学的自相似模型方程^[5]

* 国家自然科学基金(批准号: 10474137, 10374114)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn

$$L \left(\frac{1}{2} \frac{d \ln T}{dt} + 1 \right) = \frac{\rho t}{\rho}, \quad (1)$$

$$C_v \frac{dT}{dt} = H - \frac{P}{\rho t}. \quad (2)$$

在文献 5 中,由于激光被假定为平顶型脉冲影响了烧蚀质量的精度.由 De Groot 等^[6]在激光烧蚀的研究中得到的质量速率公式,导出烧蚀质量与打靶激光及靶材参数之间的关系为

$$\frac{dm}{dt} = 1.7 \times 10^{-13} \frac{I^{2/3}}{(Z \ln \Lambda)^{1/3}} \left(\frac{A}{Z+1} \right)^{7/6}. \quad (3)$$

这里, I 为激光强度,单位为 W/cm^2 ; t 为时间,单位为 ns ; Z 为离子的平均离化电荷; A 为靶材物质的原子量; $\ln \Lambda$ 为库仑对数.考虑到激光脉冲在时间上的分布为高斯型,

$$I = I_0 \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{t - \tau_1}{\tau_1} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

将 (4) 式代入方程 (3) 并积分,可得

$$\underline{m} = \frac{m_0 \underline{mt}}{T^{1/2}}. \quad (5)$$

式中,

$$m_0 = 4.80543 \times 10^{-4} \frac{I_0^{2/3} A^{2/3}}{\underline{\Delta}^{1/3}}, \quad (6)$$

$$\underline{mt} = \int_0^t t^{-1/3} \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{t - \tau_1}{\tau_1} \right)^2 \right] dt.$$

这里 τ_1 为激光脉冲的半高宽.本文中带下划线的变量表示使用了文献 5 中的方便单位.

对于电子密度 $n_e < n_c$ 的电晕区,可以认为激光能量的沉积是逆韧致吸收的结果.加热速率由激光通量的吸收部分来确定,

$$H = I/m [1 - \exp(-\tau_{\text{ib}})],$$

式中 τ_{ib} 为通过靶的逆韧致吸收的光学厚度,

$$\tau_{\text{ib}} = \int k_{\text{ib}} dx. \quad (7)$$

逆韧致吸收系数 k_{ib} 由下式决定:

$$k_{\text{ib}} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{4}{3} \left[\frac{Ze^6 (\log \Lambda) \lambda^2 n_c^2}{c^3 (m_e T)^{3/2} \left(1 - \frac{n_e}{n_c} \right)^{1/2}} \right].$$

3. 高斯型激光脉冲下瞬态 X 射线激光的计算公式

TCE 方案抽运产生 X 射线激光一般使用预-主脉冲技术.预脉冲为纳秒量级的长脉冲,它辐照靶面产生等离子体并将其离化到类镍或类氙状态.主脉冲为皮秒量级的短脉冲,主脉冲到达后迅速加热等

离子体,产生很高的电子温度同时保持离子温度不变.这对于产生 X 射线激光是很有好处的,因为 X 射线激光的增益系数与电子温度成正比,与离子温度的平方根成反比.

为便于比较,我们选取了与文献 3 5 相同的实验条件.整个的实验过程中时间可以分为四段 $0 < t < t_{1L}$, $t_{1L} < t < t_m$, $t_m < t < t_{2L}$, $t_{2L} < t$, 其中 $t_{1L} = \Delta t_{1L}$ 为长脉冲周期, $\Delta t = t_m - t_{1L}$ 为延迟时间, $t_{2L} = t_m + \Delta t_{2L}$, Δt_{2L} 为短脉冲的周期.

3.1. 长脉冲周期内 ($0 < t < t_{1L}$) 的数值计算公式

在此时间段内,等离子体对激光并不透明,因此能量方程 (2) 化简为

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} + \frac{2}{3} \frac{T}{t} &= 43.31 \frac{I_0 A^{2/3} T^{1/6}}{m_0 \underline{mt}} \\ &\times \exp \left(- \ln 2 \left(\frac{t - \tau_1}{\tau_1} \right)^2 \right) \\ &\times [1 - \exp(-\tau_{\text{ib}})], \end{aligned} \quad (8)$$

$$L \left(\frac{t}{2T} \frac{dT}{dt} + 1 \right) = 1.29 \times 10^{-2} \frac{T^{2/3} t}{\underline{A}^{1/3}}, \quad (9)$$

$$n_0 = 0.11 \times 10^{20} \frac{m_0 \underline{mt}}{\underline{A}^{2/3} L T^{1/6}}. \quad (10)$$

这里 n_0 为电子密度的最大值,结合公式 $n_e = n_0 \exp(-x/L)$,我们就可以确定等离子体的电子密度随时间和空间的变化规律.

3.2. 延迟时间内 ($t_{1L} < t < t_m$) 的数值计算公式

当 $t_{1L} < t$ 后长脉冲停止,等离子体作绝热膨胀.此时能量方程 (2) 可表示为

$$\frac{dT}{dt} + \frac{2}{3} \frac{T}{t} = 0. \quad (11)$$

由方程 (1) 可知,标长 L 的计算公式不变.由于此时 $I=0$,烧蚀过程随之停止,因此 $\underline{m} = \underline{m}_0 \underline{mt}/T^{1/2}$ 为常数,电子密度公式表示为

$$n_0 = 0.11 \times 10^{20} \frac{\underline{m} T^{1/3}}{\underline{A}^{2/3} L}. \quad (12)$$

3.3. 短脉冲周期内 ($t_m < t < t_{2L}$) 的数值计算公式

由于主脉冲为皮秒量级,作用时间极短,强度很高,因此我们可以作如下的假设 (1) 烧蚀质量 $\underline{m} = \underline{m}_0 \underline{mt}/T^{1/2}$ 为常数. (2) 由于离化的时间尺度远大于短脉冲周期,可以假设平均的离化度 Z 保持不变.由以上两点假设,能量方程 (2) 表示为

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} + \frac{2}{3} \frac{T}{t} &= 25.69 \frac{A I_0}{Z m} \\ &\times [1 - \exp(-\tau_{ib})] \\ &\times \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{t - \tau_2}{\tau_2}\right)^2\right). \quad (13) \end{aligned}$$

由方程(1)得标长公式为

$$L\left(\frac{t}{2T} \frac{dT}{dt} + 1\right) = 1.61 \times 10^{-2} \frac{Z^{1/2} T^{1/2} t}{A^{1/2}}. \quad (14)$$

此时最大电子密度 n_0 为

$$n_0 = 0.16 \times 10^{20} \frac{Z m}{AL}. \quad (15)$$

3.4. 短脉冲结束后 ($t > t_{2L}$) 的数值计算公式

当主脉冲停止以后, $H = 0$, 能量方程(2)表示为

$$\frac{dT}{dt} + \frac{2}{3} \frac{T}{t} = 0. \quad (16)$$

对于定标长度 L 仍用(14)式表示, 最大电子密度用(15)式表示.

4. 高斯型激光脉冲下数值模拟结果及其与解析模型结果的比较

通过对高斯型脉冲下瞬态 X 射线激光自相似方程的推导可以看出, 无论在长脉冲周期还是在短脉冲周期内, 能量方程都为非线性方程, 无法得到方程的解析解. 在文献[3]的实验条件下 ($I_1 = 0.07 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, $\tau_1 = 0.8 \text{ ns}$, $I_2 = 5.2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, $\tau_2 = 1.1 \text{ ps}$), 对类镍钨 X 射线激光的流体力学行为进行了数值计算. 结果表明, 在高斯型脉冲假设下, 方程的解与文献[5]的解在趋势上是一致的, 都与实验条件符合得很好, 如图1—图3所示.

图1为电子温度随时间的变化. 从图1可以看到, 两种不同形式的脉冲假设下, 温度随时间的变化趋势是基本一致的, 特别是在主脉冲后期, 在两种脉冲假设下都存在一个近似的等温过程, 这对 X 射线激光的产生是十分有利的. 预脉冲结束时, 平顶型脉冲假设下的电子温度为 187 eV, 对应的离化度为 18.1, 高斯型脉冲假设下电子的温度为 164 eV, 对应的离化度为 17.3^[7]. 前者偏高一些, 其主要原因是因为平顶型脉冲假设下激光能量在整个作用过程中是不变的, 这导致能量的计算比实验中的能量值要大, 从而使得电子温度要偏高一些. 同时, 高斯型脉冲条件下的计算表明, 我们可以通过提高激光脉冲的强

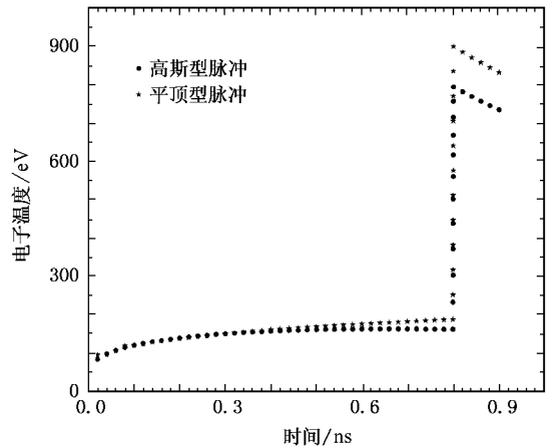


图1 电子温度随时间的变化

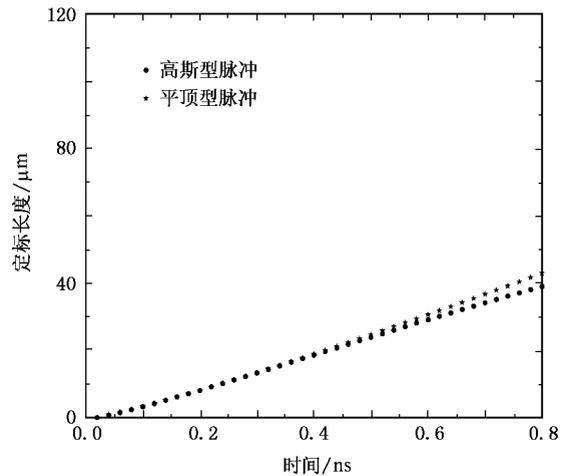


图2 定标长度随时间的变化

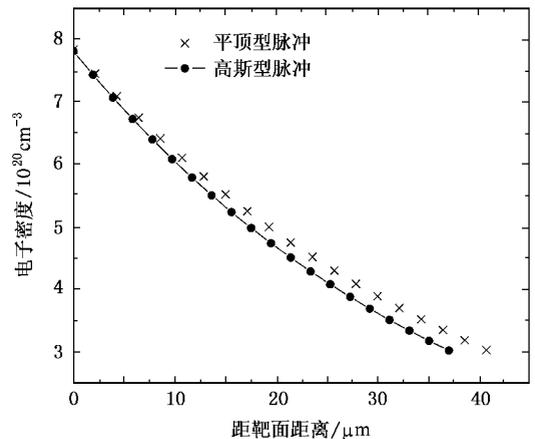


图3 电子密度的空间分布

度或者增大预脉冲周期进一步对实验条件进行优

化,从而使得预脉冲结束后电子温度进一步提高,以使对应的平均离化度达到 18. 在主脉冲阶段,平顶型脉冲假设下的最高电子温度为 900 eV,高斯型脉冲假设下最高电子温度为 800 eV,两种模型的电子温度都大大高于激光跃迁所需能量.图 2 是等离子体定标长度随时间的变化规律,两种模型的变化趋势是一致的,预脉冲结束后都为 $40 \mu\text{m}$ 左右.图 3 为预脉冲中期等离子体电子密度的空间分布,两种模型的电子密度变化趋势是一致的,电子密度均为 $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} - 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,由于在计算烧蚀质量的过程中文献 [5] 使用的是平顶型脉冲,使得电子密度比高斯型脉冲的结果要高一些.由数值计算结果可知,光强为高斯型脉冲的自相似方程数值解是可信的,比解析结果更接近实际.

5. 类镍钼瞬态 X 射线激光实验的优化设计

根据中国科学院物理研究所“极光”激光装置的实验条件,我们利用高斯型脉冲下的自相似模型对类镍钼 X 射线激光的流体力学行为进行了实验设计优化,得到了等离子体在三种实验条件下的定标长度、增益区内的电子温度、电子密度的分布和离化度.实验条件如表 1 所列.

表 1 瞬态 X 射线激光的实验条件

	条件 I	条件 II	条件 III
激光波长/ μm	0.8	0.8	0.8
长脉冲激光强度/ $10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$	8.3	12.5	18.7
长脉冲激光脉冲宽度/ps	300	300	200
延迟时间/ps	300	350	350
短脉冲激光强度/ $10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$	6.25	6.25	6.25
短脉冲激光脉冲宽度/ps	1	1	1

在实验条件 I 下,短脉冲到达时的最高电子温度为 95.3 eV,对应的离化度为 13.9,定标长度约为

$27.3 \mu\text{m}$,短脉冲周期内的最高电子温度为 940.3 eV.在实验条件 II 下,短脉冲到达时的电子温度为 100.2 eV,对应的离化度为 14.1,定标长度约为 $36.7 \mu\text{m}$,短脉冲周期内的最高电子温度为 948.9 eV.在实验条件 III 下,短脉冲到达时的最高电子温度为 97.3 eV,对应的离化度为 14,定标长度约为 $30 \mu\text{m}$,短脉冲周期内的最高电子温度为 947 eV.显然,实验条件 II 的延迟时间比实验条件 I 的延迟时间要长并且短脉冲到达时的定标长度也要优于实验条件 I,实验条件 II 的长脉冲周期要比实验条件 III 长而强度比其要小一些,这使得实验条件 II 更为容易实现.在“极光”激光装置的实际实验条件下,实验条件 II 较为合适,最终的实验条件优化设计及计算结果如表 2 所列.

表 2 自相似模型的数值计算结果

	长脉冲	短脉冲
激光波长/ μm	0.8	0.8
激光强度/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.25×10^{13}	6.25×10^{14}
激光脉冲宽度/ps	300	1
最高电子温度/eV	100.2	948.9
离化度	14.1	14.1

6. 结 论

考虑到实际实验条件下激光脉冲一般为高斯型脉冲,在高斯型脉冲条件下我们修正了 X 射线激光的自相似模型,并给出了数值解.该模型与实验条件及文献 [5] 的结果符合很好,且比文献 [5] 在平顶型脉冲假设得到的解析结果更为精确,从而验证了该模型的可靠性,为实验的快速设计提供了一种更为精确的有效工具.在此基础上,利用该模型在中国科学院物理研究所“极光”激光装置的实验条件下对类镍钼 X 射线激光实验进行了优化设计,得到了优化的实验方案.

[1] Nickles P V, Shlyaptsev V N, Kalachnikov M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748
 [2] Dunn J, Osterheld A L, Shepherd R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2825
 [3] Kalachnikov M P, Nickles P V, Schnurer M *et al* 1998 *Phys. Rev.*

A **57** 4778

[4] Dunn J, Li Y, Osterheld A L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4834
 [5] Li Y J, Zhang J 2001 *Phys. Rev. E* **63** 036410
 [6] De Groot J S 1992 *Phys. Fluids B* **4** 701
 [7] Colombant D, Tonon G F 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 3524

Hydrodynamic model of transient Ni-like X-ray lasers driven by Gaussian laser pulse^{*}

Pang Hai-Long¹⁾ Li Ying-Jun^{1)†} Lu Xin²⁾ Zhang Jie²⁾

¹⁾ College of Science, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

²⁾ Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Received 22 March 2006; revised manuscript received 10 August 2006)

Abstract

The self-similarity model of hydrodynamics of transient collisional excitation X-ray lasers is modified for drive laser pulse with a Gaussian temporal profile. The results show that the modified model can more accurately describe the hydrodynamic process of transient collision emission X-ray laser than the self-similarity model. Using the modified model, the experimental design of the Ni-like Mo X-ray lasers is optimized.

Keywords : self-similarity model, Gaussian pulse, Ni-like Mo X-ray lasers

PACC : 4215D, 4255V, 4278

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10474137, 10374114).

[†] Corresponding author. E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn