

模拟卢瑟福实验室的实验以检验理论模拟*

乔秀梅¹⁾ 张国平²⁾ 张覃鑫²⁾

1) 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

2) 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2005 年 6 月 1 日收到, 2005 年 7 月 21 日收到修改稿)

在亚稳态电子碰撞激发系列程序的基础上研制成功了瞬态电子碰撞激发的系列程序, 并用此系列程序模拟了卢瑟福实验室 2000 年的类氪锆瞬态电子碰撞激发 19.6nm X 射线激光实验, 与实验数据的比较表明, 模拟结果与实验基本符合, 为以后研究瞬态电子碰撞激发机理打下了基础.

关键词: X 射线激光, 瞬态电子碰撞激发, 类氪锆, 亚稳态

PACC: 4255V, 5250J, 8220W

1. 引 言

自从 1984 年美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)成功地演示类氪硒电子碰撞激发 X 射线激光以来^[1], X 射线激光的研究取得了很大进展^[2], 瞬态电子碰撞激发机理^[3-5]极大地降低了抽运能量, 提高了实验的重复频率, 小型、高效的“台式”软 X 射线激光已经成为现实, 瞬态电子碰撞激发机理也很有可能实现水窗波段 X 射线激光, 目前采用这种机理, 最短波长已经做到了 7.9nm 的饱和输出^[6]. 在 XRL 理论研究中, 由一维非平衡辐射流体力学 JB19 程序, 一维反转动力学 ALPHA 程序和二维几何光学旁轴近似下 XRL 传播和小讯号放大 XBPA 程序所组成的模拟 XRL 全过程的程序系列被研制成功, 并用国内外的实验数据进行检验^[7], 在一个 ns 长脉冲驱动下, 类氪锆 19.6nm, 23.2nm 和 23.6nm 线与实验符合, 在多个短脉冲驱动时, 理论模拟除了与严重过电离的复合等离子体有关的实验外, 与实验数据也基本符合. 在亚稳态电子碰撞激发机理的反转动力学程序 ALPHA 的基础上, 开发了类氪锆的瞬态电子碰撞激发的程序, 我们用系列程序模拟了卢瑟福实验室 2000 年进行的类氪锆 19.6nm 的瞬态电子碰撞激发的 X 射线激光的实验^[6], 并与他们的结果进行了比较, 本文介绍模拟的结果.

2. 瞬态电子碰撞激发的电离和反转动力学程序 N6

类氪锆的瞬态电子碰撞激发的反转动力学程序 N6 是在亚稳态程序 ALPHA 的基础上, 主要由北京应用物理与计算数学研究所 X 射线激光研究组张覃鑫开发的, 考虑了从锆原子到裸锆原子核共 33 个电离度的离子, 162 个细致组态, 考虑了类氪主量子数到 3 的 37 个细致组态, 类氟 113 个细致组态, 类钠的主量子数到 4 的 12 个细致组态, 高能级和其他离子的能级的主量子数最大为 10, 主要考虑的原子过程包括电子碰撞激发、电子碰撞电离、光电离以及它们的逆过程, 以及能级之间的线跃迁. 程序中没有考虑双激发态, 考虑了类氟离子的基态到类氪离子各能级、类氪离子基态到类钠离子各能级的双电子复合过程. 用逃逸概率近似考虑了共振线的俘获效应对下能级粒子占据数的影响. 各细致组态能级的能量以及电子碰撞激发和自发辐射跃迁系数由北京应用物理与计算数学研究所原子参数组提供, 高能级和其他离子的能级只考虑了主量子数, 其能量由类氢近似得到, 电子碰撞激发和电离等原子过程的速率系数由经验公式得到^[8]. 利用模拟激光与靶相互作用的流体力学程序 JB19, 解出等离子体的密度和温度随时间的变化, 把这些量与描述能级粒子占

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-804-7-1)资助的课题.

据数的速率方程耦合,就可以得到各个电离度离子各个能级的粒子占据数,从而 X 射线激光的增益系数,最后结合 X 射线激光传播放大的 XPBA 程序,给出小信号增益系数,以及 X 射线激光强度分布等量.

3. 模拟卢瑟福实验室的实验^[6]

卢瑟福实验室用两束脉宽为 280ps 的钨玻璃激光横向辐照钨平板靶,一定时间间隔后 2.7ps 的短脉冲加热产生的预等离子体,两个预脉冲间隔 2ns,在靶面的强度分别为 10^{12} W/cm^2 和 10^{13} W/cm^2 ,短脉冲的强度为 10^{15} W/cm^2 ,考虑了不同的预、主脉冲时

间间隔的情况,图 1(b)是输出类氪锆 19.6nm X 射线激光的能量随延迟时间的变化关系曲线,为了比较,给出了文献 [6] 中的结果(图 1(a)),横坐标是短脉冲的峰值时刻相对于主预脉冲峰值时刻的延迟时间,以 ps 为单位,纵坐标是输出 X 射线激光的能量(μJ),图中对应的靶长为 5mm,图 1(b)表明,延迟时间为 0ps 时,输出 X 射线激光的能量最大,然后随延迟时间的增加而减小,这与实验结果一致,与图 1(a)相比,除了延迟时间为 350ps 以外,我们的模拟结果比实验值偏低,考虑到实验中测量 X 射线能量存在一些不确定的因素,我们的模拟结果与实验结果是符合的.我们看到,最佳的延迟时间是 0ps,为此可以看看不同延迟时间时等离子体的状态.

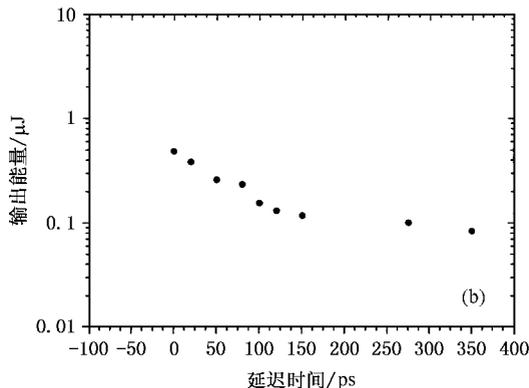
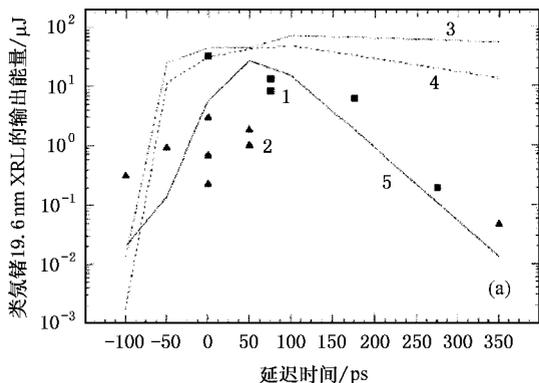


图 1 类氪锆 19.6nm X 射线激光的输出能量(μJ)随着超短脉冲峰值与第二个预脉冲峰值之间的时间间隔(ps)之间的变化曲线.(a)文献 [6] 的实验结果 (b)本文模拟的结果

图 2 是 0, 80, 175ps 延迟时间下,类氪锆 19.6nm X 射线激光的增益系数(a),类氪离子的丰度(b)以及电子密度(c)和电子温度(d)的空间分布,横坐标是到靶面的距离以 μm 为单位,可以看到,短脉冲延迟不同的时间,在增益区都产生了足够的类氪离子,延迟时间越长,具有足够类氪离子的区域越宽,这与等离子体的膨胀有关,因此,影响增益系数的主要因素就是增益区的电子温度.对于延迟时间为 80ps 来讲,在临界面附近的峰值增益系数最大,这是因为电子温度在这个区域最大,但是临界面附近的增益系数对最终的 X 射线激光的贡献很小,因为在临界面附近电子密度梯度较大,平均电子密度梯度为 $-8.9 \times 10^{23} \text{ cm}^{-4}$,X 射线激光光线将会被偏折出增益区(如图 3 所示),因而,对 X 射线激光输出贡献较大的主要增益区是临界面以下距离靶面约 $15\mu\text{m}$ 到 $50\mu\text{m}$ 的次临界区域,这里电子密度梯度相对要小,折射效应也较小.对于延迟时间最短的 0ps,经过同

样的分析可以知道,对 X 射线激光贡献较大的区域是距离靶面约 $20\mu\text{m}$ 到 $50\mu\text{m}$ 的区域,从图 2(a)和 (d)知道,在预主脉冲延迟时间为 0ps 时,这个区域的电子温度最大,在这个区域以外,随到靶面的距离的增加,电子温度迅速减小,电子温度的变化也导致了增益系数发生同样的变化,因为在增益区,增益系数很快减小为 0/cm,这就说明预主脉冲之间的延迟时间取 0ps 要好一些.从图 2(c)还可以看到,电子密度在临界面以上很薄的一层内也达到了较高的值,这是因为从流体力学程序 JB19 计算的电子密度和反转动力学程序 N6 计算的结果之间的差异造成的.

图 4 给出了由 Linford 公式^[9]拟合的输出 X 射线激光强度随靶的长度的变化曲线,其延迟时间是 80ps,为了方便与实验进行比较,在图 3 和本节的其他图中,靶长均为 9mm,延迟时间为 80ps.与文献 [6] 中的实验结果比较,我们的系列程序模拟的小信号增益系数大于 30/cm,输出的总的 X 射线激光的能

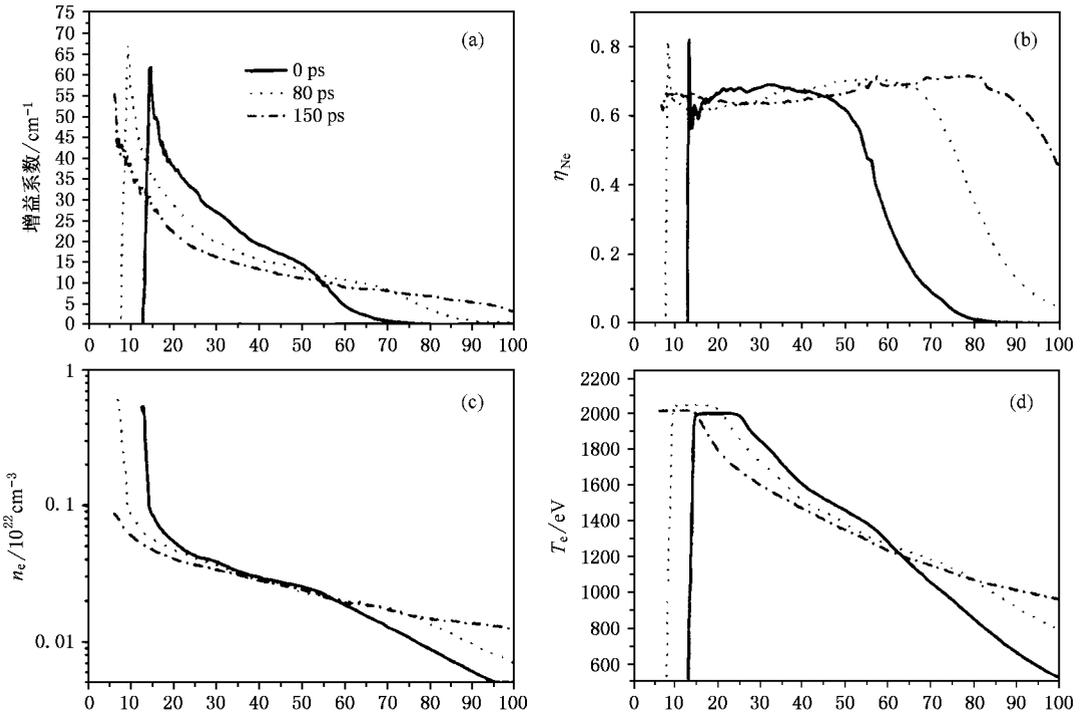


图2 不同延迟时间情况下,类氖锗 19.6nm X 射线激光的增益系数(单位为 cm^{-1}) (a)、类氖离子的丰度(b)、电子密度(10^{22} cm^{-3}) (c)和电子温度(eV) (d)的空间分布。实线、虚线和点线分别代表延迟时间为 0ps、80ps 和 175ps。横坐标代表到靶面的距离单位是 μm , 其上的零点代表靶面所在的位置。

量为 $40.5 \mu\text{J}$, 略低于实验测得的 $100 \mu\text{J}$, 这可以从几个方面来解释,一方面从实验的角度看,在测量输出 X 射线激光的能量时,由于无法有效地测量输出 X 射线激光的强度在垂直平面的分布,假定垂直方向的发散角是水平发散角的两倍,这有可能使得测得的能量偏高,再考虑到实验仪器的误差,实验上能量测量的精度仅大于 50%;另一方面,从模拟的结果

看,输出 X 射线激光的发散角偏小(见图 5(b)),这也使得模拟的 X 射线激光的能量偏低。

图 5 是 X 射线激光强度的角分布,可以看出我们模拟的输出 X 射线激光的折射角是 11.5 mrad , 发散角是 6.2 mrad , 实验值分别为 10 mrad 和 9 mrad , 我们的发散角比实验值稍微偏小,与实验相比,我们模拟的输出 X 射线激光的角分布的轮廓与实验结果

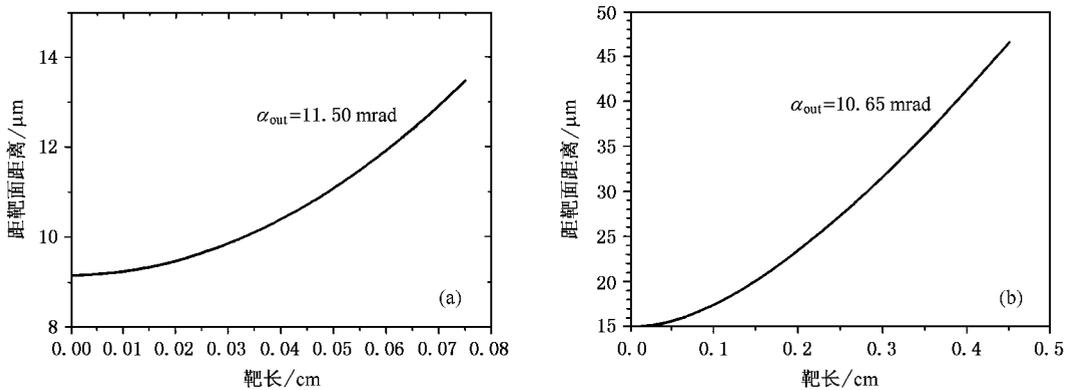


图3 X 射线激光在等离子体中不同区域传播的轨迹,入射角度均为 0 mrad , 预主脉冲的时间间隔是 80 ps 。可以看到,图(a)中, X 射线激光在等离子体中传播 0.75 mm , 就被偏折约 $4 \mu\text{m}$, 偏折角为 11.5 mrad , 这说明,临界面附近的这个高增益区对 X 射线激光的贡献非常小,对 X 射线激光贡献最大的区域是距靶面 $15 \mu\text{m}$ 到 $50 \mu\text{m}$ 的增益区。

符合较好.

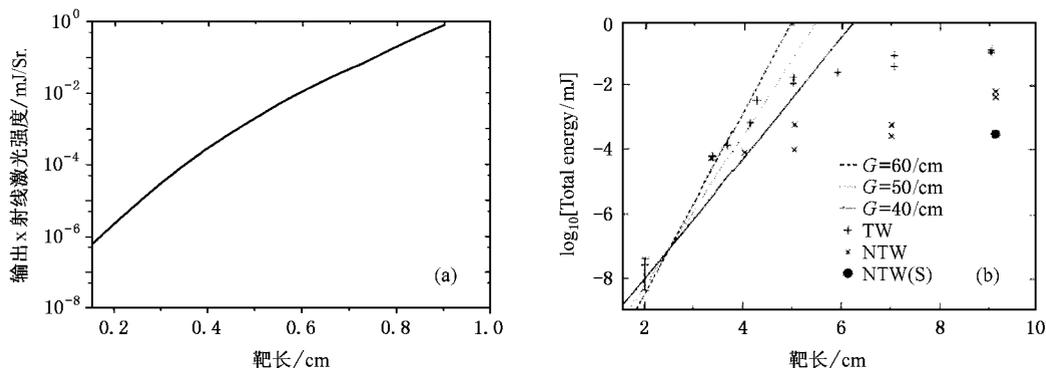


图 4 输出 X 射线激光强度 (mJ/Sr) 随靶长 (cm) 的变化 (a) 本文模拟的结果 (b) 实验结果: 准行波抽运 (+), 不采用行波抽运时, 靶北端的输出 X 射线激光能量 (x), 靶的南端输出的 X 射线激光的能量 (·)

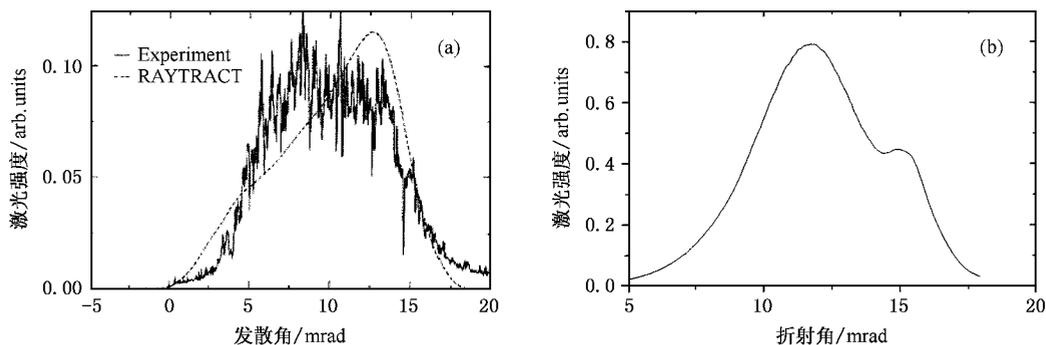


图 5 输出 X 射线激光强度 (任意单位) 随折射角 (mrad) 的变化 (a) 实验结果 (实线), 虚线是文献 [6] 的模拟结果 (b) 本文模拟的结果

4. 结 论

用新开发的类氙锆的瞬态电子碰撞激发系列程序模拟了卢瑟福实验室于 2000 年做的类氙锆 19.6nm X 射线激光的实验, 我们的模拟结果与实验

基本符合, 为以后研究瞬态电子碰撞激发机理提供了基础.

北京应用物理与计算数学研究所的原子参数组提供了原子参数, 在此向他们表示感谢.

[1] Matthews D L ,Hagelstein P L ,Rosen M D 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110

[2] Key M H , 1992 , Proc. of the 3rd Intern. Conf. on X-Ray Lasers , Institute of Physics ,London , 171

Maxon S ,Estabrook K G ,Prasad M K *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2285

Daido H , Kato Y , Murai K *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1074

Daido H , Kodama R , Murai K *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 61

Smith R ,Tallents G J , Zhang J *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **59** R47

[3] Wang C ,Wang W ,Wu J *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3752 (in Chinese) 王 琛,王 伟,吴 江等 2004 物理学报 **53** 3752]

[4] Wang C ,Wang W ,Sun J R *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 202 (in

Chinese) 王 琛,王 伟,孙今人等 2005 物理学报 **54** 202]

[5] Nickles P V , Shlyaptsev V N , Kalachnikov M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748

Dunn J , Osterheld A L , Shepherd R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett* **78** 2825

Ozaki T , Ganeev R A , Lshizawa A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett* **89** 253902

[6] King R E , Pert G J , McCabe S P *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **64** 053810

[7] Zhang G P , Zhang T X , Zheng W D *High Power Laser and Particle Beams* 2004 **16** 35

Zhang G P , Zhang T X , Zheng W D *High Power Laser and Particle*

Beams 2004 **16** 171

[9] Linford G J , Peressini E R , Soody W R *et al* 1974 *Appl . Opt .* **13**

[8] Lee Y T 1987 *JQSRT* **38**(2) 131

379

Modeling RAL experiment to test our simulation *

Qiao Xiu-Mei¹⁾ Zhang Guo-Ping²⁾ Zhang Tan-Xin²⁾

1 $\text{\textcircled{X}}$ Graduate School of China Academy of Engineering Physics , Beijing 100088 , China)

2 $\text{\textcircled{X}}$ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics , Beijing 100088 , China)

(Received 1 June 2005 ; revised manuscript received 21 July 2005)

Abstract

A code series for transient collisional excitation (TCE) was newly developed based on the previous code series for QSS scheme , the TCE Ne-like Ge 19.6nm X-ray laser experiment done by RAL in 2000 was modeled to test our code series , a relatively good fit is obtained which provides convenience for our study of TCE scheme .

Keywords : X-ray laser , transient collisional excitation , Ne-like Ge , QSS

PACC : 4255V , 5250J , 8220W

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No.863-804-7-1).