

# 瞬态电子碰撞激发类氪锗 19.6 nm X 射线 激光的理论研究\*

乔秀梅 张国平

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2006 年 6 月 30 日收到 2007 年 1 月 26 日收到修改稿)

近来,许多实验室仅采用一个脉宽为几个 ps 的短脉冲就得到了强放大的软 X 射线激光.这表明瞬态是来得及电离的.为此,在类氪锗的瞬态电子碰撞激发 19.6 nm 波长 X 射线激光研究中,提出了采用低预脉冲产生低电离度的预等离子体,后续一个 ps 级短脉冲既电离又加热等离子体的驱动方式.并用系列程序进行了模拟.模拟结果表明,这种驱动方式也可以得到高增益.

关键词: X 射线激光, 等离子体, 增益系数, 瞬态电子碰撞激发

PACC: 4255V, 5250J, 8220W

## 1. 引 言

自从 1984 年美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)成功演示类氪硒软 X 射线激光(XRL)以来<sup>[1]</sup>, XRL 的研究取得了很大进展,多脉冲或预主脉冲抽运技术大大减小了所需的抽运能量<sup>[2-10]</sup>,提高了输出 XRL 的亮度.主要有两种抽运方法.第一种方法采用多个(例如三个)约 100 ps 的脉冲系列,这些脉冲具有同样的强度.峰值强度时刻的时间间隔约 400 ps,第一个脉冲产生等离子体中,增益区很窄,电子密度梯度太陡.实验中都没有观察到放大的 XRL.等离子体经过一段时间的膨胀和冷却后,对后续的抽运激光是不透明的.因而随后的抽运激光能够更有效的被吸收.在第二和第三个脉冲打靶后,产生了很宽的均匀等离子体.且其电子密度处于有利于产生高增益和 XRL 传播的区域.实验在第二和第三个脉冲期间都观察到了放大的 XRL.另一种抽运方式也是采用约 100 ps 的短脉冲,但是采用低的预脉冲(例如主脉冲能量的百分之几十到百分之几甚至千分之几),预脉冲形成低温低电离度的等离子体,通过几个 ns 的膨胀,主脉冲加热并电离等离子体,使之达到高的类氪或类镍离子,同时又具有高的电子温度,从而产生高增益.以上产生 XRL 的过程中,电离不平衡,基

态和激发态处于平衡,这种机理称为亚稳态电子碰撞激发机理.目前亚稳态电子碰撞机理一般采用后一种抽运方案,虽然第一种抽运方案可以产生较宽的增益区( $\sim 100 \mu\text{m}$ ),电子密度梯度也较小,利于克服折射和功率密度不均匀的影响,但是增益系数很小.后一种方案等离子体边升温边电离,能够在达到高的类氪离子丰度时保持更高的电子温度和较低的离子温度,因而可以产生高增益.不足之处是增益区靠近临界面,电子密度梯度比较大,而且增益区比较窄( $\sim 10-20 \mu\text{m}$ ),折射和线聚焦的轴向功率密度不均匀性对 XRL 增益和放大的影响大.但是选用合适的延迟时间和保持线聚焦的轴向功率密度均匀性,仍然能取得高增益.

与亚稳态电子碰撞激发机理类似,瞬态电子碰撞激发机理似乎也在经历相类似的发展过程.最初在瞬态电子碰撞激发机理中,预脉冲产生含有大量的类氪或者类镍离子预等离子体,ps 短脉冲只是将其迅速加热到高的电子温度,使其产生高增益.普遍认为在瞬态电子碰撞激发机理中,在 ps 脉冲加热等离子体的过程中,电离过程是来不及或者非常缓慢<sup>[11-15]</sup>.近来许多实验室仅采用单个脉宽只有几个 ps 的短脉冲也得到了放大的 XRL<sup>[16-18]</sup>.对实验结果分析后,人们发现由于 ps 级的脉冲是用光栅对将亚 ns 脉冲压缩而来的,除了输出 ps 级的脉冲外,还有

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(批准号 803-804-7-1)资助的课题.

ns 级的功率密度很低的本底噪声, ns 级的本底产生了低温、低电离的等离子体, 后续的高强度短脉冲在短时间内将等离子体电离到类镍态, 并获得高的电子温度, 产生了高增益. 这表明在脉宽为 ps 量级的激光驱动瞬态电子碰撞激发中, 电离是来得及发生的. 基于这种思想, 我们研究了瞬态电子碰撞激发类氪锗 19.6 nm XRL, 并用系列程序进行了模拟, 下面介绍模拟结果.

## 2. 模拟结果

对于类氪锗 19.6 nm XRL, 由于受等离子体折射的影响大, 需要产生密度较平缓的等离子体, 我们采用两个脉宽分别是 1 ns 和 10 ps 的高斯型脉冲作为预脉冲横向辐照锗平板靶, 产生低电离度的预等离子体. 这两个脉冲的强度分别为  $\sim 1.7 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 和  $3.4 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>, 两个脉冲峰值之间的间隔为 1.93 ns, 波长为 0.5265  $\mu\text{m}$ . 用一个 5 ps 脉宽的高斯型短脉冲加热并电离预等离子体. 其波长为 1.053  $\mu\text{m}$ , 强度为  $\sim 4.33 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>. 第二和第三个脉冲峰值的间隔为 198 ps. 线聚焦的焦线长 1 cm, 宽  $\sim 30$   $\mu\text{m}$ . 抽运激光的总能量  $\sim 8$  J, 采用行波抽运.

在瞬态电子碰撞激发类氪锗 XRL 的电离和反转动力学程序<sup>[19]</sup>进一步完善之前, 我们用亚稳态电子碰撞激发类氪锗的系列程序进行了模拟. 亚稳态的系列程序经过了与国内外实验的检验. 长脉冲驱动时, 对波长 19.6, 23.2 和 23.6 nm 三条激光线, 理论模拟与实验数据基本符合. 在多个短脉冲驱动时, 除了与严重过电离的复合等离子体有关的实验外, 理论模拟与实验也基本符合<sup>[20-23]</sup>. 利用亚稳态程序系列模拟瞬态电子碰撞激发所得到的增益系数可能偏低, 但可以定性地研究瞬态电子碰撞激发产生 XRL 的一些特点, 所以我们的模拟对于研究瞬态电子碰撞激发机理还是有意义的.

图 1 描述了预脉冲产生的等离子体状态. 从中可以看到, 预等离子体中最大电离度不到 15, 电子温度和离子温度非常接近, 均不到 60 eV. 在离开靶面大约 10 到 25  $\mu\text{m}$  范围内, 电子密度在约  $(6-8) \times 10^{20}$  cm<sup>-3</sup> 之间, 形成了一个变化非常平缓的区域. 在它的两侧, 电子密度随离开靶面距离呈指数下降. 这一平缓区域是由波长为 0.5265  $\mu\text{m}$  的双预脉冲所产生的.

图 2 描述了短脉冲峰值时刻后 2.4 ps 时的等离

子体状态. 从中可以看到, 增益区在距离靶面大约 10 到 30  $\mu\text{m}$ . 因等离子体的继续电离, 与图 1 相比, 增益区的电子密度也大幅度增加, 达到  $(7-12) \times 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>, 它横跨了基频激光的临界面. 在增益区电子温度、离子温度变化比较平缓. 最大电子温度  $\sim 1915$  eV, 最大离子温度  $\sim 75$  eV, 最大增益系数 ( $G_p$ )  $\sim 40$  cm<sup>-1</sup>. 增益区比较宽, 其半高全宽  $\sim 18$   $\mu\text{m}$ . 在其离开靶面 13 到 24  $\mu\text{m}$  的中心区, 其电子密度、电子温度和增益系数均在 10% 到 15% 的范围内的变化. 这特别有利于 XRL 的传播和放大.

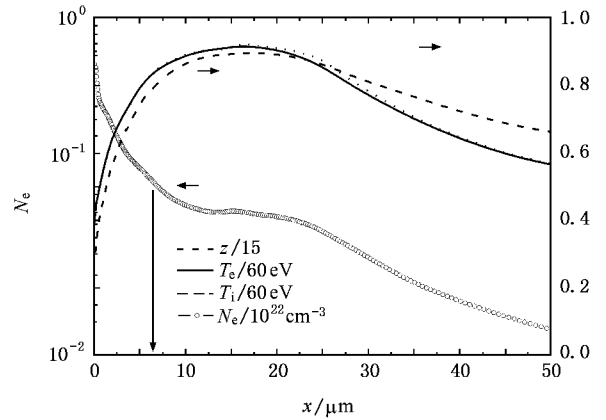


图 1 ps 短脉冲峰值前 10 ps 时的等离子体状态 (电子密度 ( $10^{22}$  cm<sup>-3</sup>) (空心圆)、电离度 (破折线)、以及电子温度 (实线) 和离子 (点线) 温度随到靶面距离  $x$  ( $\mu\text{m}$ ) 的变化, 电子温度和离子温度以 60 eV 为单位, 电离度以 15 为单位, 横坐标是到靶面的距离, 初始靶面的位置为 0  $\mu\text{m}$ )

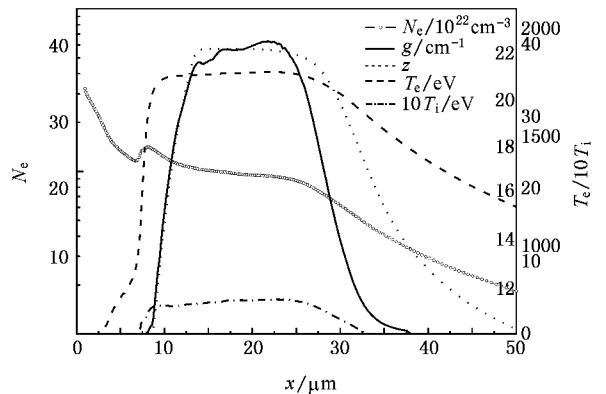


图 2 短脉冲峰值后 (2.4 ps) 等离子体状态 (电子密度 ( $10^{22}$  cm<sup>-3</sup>) (空心圆)、增益系数 (cm<sup>-1</sup>) (实线)、电离度 (虚线)、电子温度 (eV) (点线) 以及 10 倍离子温度 (eV) (点线) 随到靶面距离  $x$  的变化)

以下研究增益区等离子体状态的时间演化. 图 3 是在短脉冲峰值时刻后五个时刻等离子体中增益

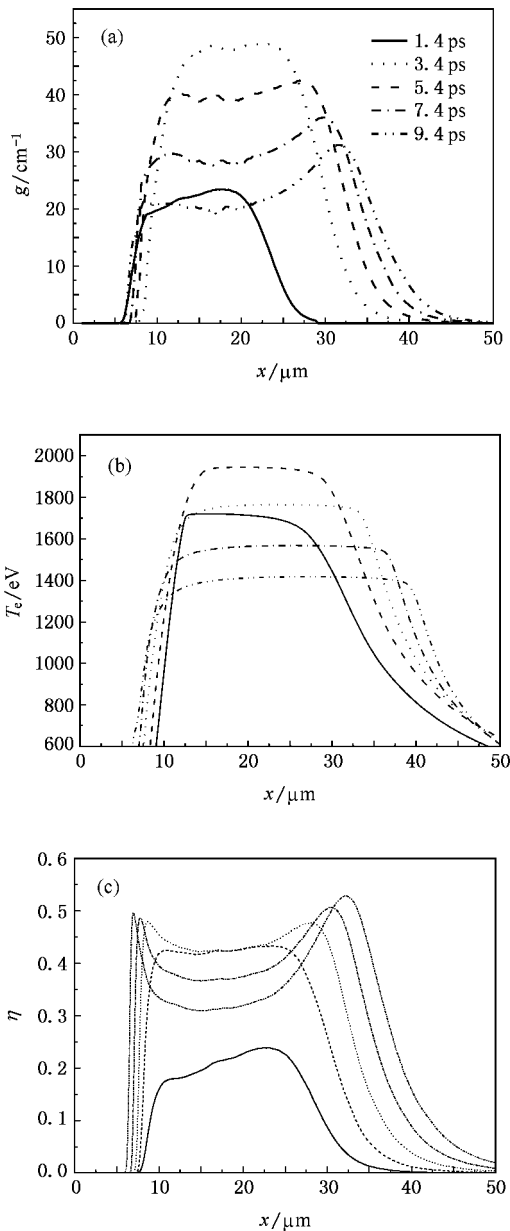


图3 短脉冲峰值时刻附近增益系数(a)电子温度(b)类氩离子丰度(c)随到靶面距离 $x$ 的变化(设短脉冲峰值时刻为0)

系数(a)电子温度(b)类氩离子丰度(c)随到靶面距离的变化,图中横坐标是到靶面的距离.从图3(a)中可以看出, $G_p$ 大于 $20\text{ cm}^{-1}$ 的时间约有8 ps. $G_p$ 首先出现在临界密度附近的高密度区,在低密度区域增益系数非常小.这是因为激光能量主要沉积在临界面附近的高密度区,高密度区的电子温度也高,因而首先电离到类氩离子占优的状态.随着时间的推移,因等离子体的过电离,临界面附近增益系数在减小.在较低密度的区域,因电子热传导作用,电子温度逐渐升高,逐渐电离到合适的电离度,增益系

数逐渐增大. $G_p$ 也随着时间向外漂移,增益区有向外扩展的趋势.这与亚稳态电子碰撞激发机理增益区的演化有些类似.

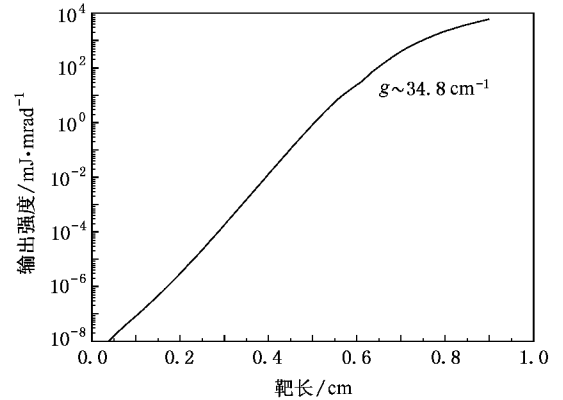


图4 XRL输出强度随靶长的变化

图4是输出XRL强度随靶长的变化,根据Linford公式拟合<sup>[24]</sup>的小信号增益系数 $\sim 34.8\text{ cm}^{-1}$ .它并不小于电离合适的预等离子体产生的小信号增益系数<sup>[19,25]</sup>.首先增益区的电子密度相当平缓,可以缓解XRL在等离子体中的折射,使XRL得到有效的放大;另外由于增益的峰值向外移动,增益区的宽度也在随时间扩展,这也有利于XRL的放大.如果采用瞬态电子碰撞激发的系列程序,有可能获得更大的增益系数.

### 3. 结 论

本文介绍了低电离度的预等离子体产生瞬态电子碰撞激发类氩锗 $19.6\text{ nm}$ 波长XRL的研究成果.增益区在基频光的临界密度附近, $G_p \sim 40\text{ cm}^{-1}$ , $G_p$ 大于 $20\text{ cm}^{-1}$ 维持了 $\sim 8\text{ ps}$ .与亚稳态情况相类似,也观察到 $G_p$ 随着时间向外漂移,增益区有向外扩展的趋势.平缓的电子密度和增益维持时间长,使得XRL能够得到很好的放大,其小信号增益系数 $\sim 34.8\text{ cm}^{-1}$ .在驱动激光总能量为8J条件下获得了小信号增益长度积为31的结果.应该指出的是,采用双预脉冲倍频光驱动,形成了一个电子密度在 $(6-8) \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 之间变化非常平缓的预等离子体起了很关键的作用.如果采用瞬态电子碰撞激发的系列程序,有可能得到更高的小信号增益系数.这表明采用低电离度的预等离子体和几个ps长的短脉冲可以产生高的瞬态增益系数.

本所原子参数组提供了原子参数,在此表示衷心感谢.

- [ 1 ] Matthews D L , Hagelstein P L , Rosen M D 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
- [ 2 ] Rosen M D , Hagelstein P L , Matthews D L *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 106
- [ 3 ] Key M H 1992 *Proc of the 3rd Intern Conf on X-Ray Lasers , Institute of Physics London* 171
- [ 4 ] Maxon S , Estabrook K G , Prasad M K *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2285
- [ 5 ] 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 ]
- [ 6 ] 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 ]
- [ 7 ] Daido H , Kodama R , Murai K *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 61
- [ 8 ] Smith R , Tallents G J , Zhang J *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **59** R47
- [ 9 ] Daido H , Kodama R , Murai K *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 61
- [ 10 ] Nilsen J , Moreno J C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1386
- [ 11 ] Healy S B , Janulewicz K A , Plowes J A , Pert G J 1996 *Opt. Comm.* **132** 442
- [ 12 ] Whitney K G , Dasgupta A , Pulsifer P E 1994 *Phys. Rev. E* **50** 468
- [ 13 ] Nickles P V , Shlyaptsev V N , Kalachnikov M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748
- [ 14 ] Dunn J , Osterheld A L , Shepherd R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2825
- [ 15 ] Ozaki T , Ganeev R A , Lshizawa A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 253902
- [ 16 ] Janulewicz K A , Lucianetti A , Priebe G *et al* 2003 *Phys. Rev. A* **68** 051802 ( R )
- [ 17 ] Janulewicz K A , Lucianetti A , Priebe G *et al* 2002 *Proc of the 8th on X-Ray Lasers ( Colorado , America )* p26
- [ 18 ] Janulewicz K A , Nickles P V , King R E , Pert G J 2004 *Phys. Rev. A* **70** 013804
- [ 19 ] Qiao X M , Zhang G P , Zhang T X 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 71 ( in Chinese )[ 乔秀梅、张国平、张覃鑫 2005 强激光与粒子束 **17** 71 ]
- [ 20 ] Zhang G P , Sheng J T , Shao Y F 1990 *High Power Laser and Particle Beams* **2** 298 ( in Chinese )[ 张国平、盛家田、邵云峰 1990 强激光与粒子束 **2** 298 ]
- [ 21 ] Zhang G P , Zhang T X , Wu J Z 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 352 ( in Chinese )[ 张国平、张覃鑫、吴建周 1998 强激光与粒子束 **10** 352 ]
- [ 22 ] Zhang G P , Zhang T X , Zheng W D 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 35 ( in Chinese )[ 张国平、张覃鑫、郑无敌 2004 强激光与粒子束 **16** 35 ]
- [ 23 ] Zhang G P , Zhang T X , Zheng W D 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 171 ( in Chinese )[ 张国平、张覃鑫、郑无敌 2004 强激光与粒子束 **16** 171 ]
- [ 24 ] Linford G J , Peressini E R , Soody W L , Spaeth M L 1974 *Appl. Opt.* **13** 379
- [ 25 ] King R E , Pert G J , McCabe S P *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **64** 053810

## Theoretical study of TCE Ne-like Ge 19.6 nm X-Ray laser<sup>\*</sup>

Qiao Xiu-Mei Zhang Guo-Ping

( Institute of Applied Physics and Computational Mathematics , Beijing 100088 , China )

( Received 30 June 2006 ; revised manuscript received 26 January 2007 )

### Abstract

Strongly amplified X-ray laser observed in the recent transient collisional excitation ( TCE ) experiments pumped by a single short pulse suggests that with the help of low level prepulse producing lowly ionized preplasma it is also possible to obtain high gain in the TCE scheme. The TCE Ne-like Ge 19.6 nm X-ray laser pumped by low level prepulse were studied with our code series. Time evolution of plasma status shows that the position of peak gain drifts outward and the gain region is widened as time goes on , which is similar to the QSS scheme.

**Keywords :** X-ray laser , plasm , gain , transient collisional excitation

**PACC :** 4255V , 5250J , 8220W

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 803-804-7-1 ).