

激发态之间的电离与复合过程对类氖锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的影响^{*}

乔秀梅 郑无敌 张国平

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2007 年 9 月 24 日收到, 2008 年 1 月 9 日收到修改稿)

考察了激发态之间的电离与复合过程对等离子体状态的影响, 并对其原因进行了细致的分析, 分别考察了对 1.0 ns, 100 ps 和 5 ps 激光驱动类氖锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的影响. 研究表明, 对于 5 ps 激光驱动的瞬态机理 X 射线激光来讲, 因增益区处在高密度区, 所以, 激发态之间的电离与复合过程对 X 射线激光将不可以忽略. 对于 1.0 ns 和 100 ps 激光驱动的亚稳态机理 X 射线激光来讲, 在电子密度小于等于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 忽略激发态之间的电离与复合使增益的时间半高全宽延长了 $\sim 10\%$, 峰值增益的空间半高全宽分别增加了 $\sim 13\%$ 和 $\sim 23\%$, 相对于增益的维持时间(半高全宽)峰值增益出现的时间分别延迟了 $\sim 1.4\%$ 和 $\sim 6.9\%$, 差异并不十分显著, 因此矩阵分块法可以对亚稳态机理 X 射线激光进行粗略地、规律性地研究, 但是准确地模拟还是不能忽略激发态之间的电离与复合过程, 且如果关心等离子体电离的全过程, 则激发态之间的电离与复合过程不能忽略.

关键词: X 射线激光, 矩阵分块法, 类氖锗, 双电子激发态

PACC: 4255V, 5250J, 8220W

1. 引言

在 X 射线激光的理论研究中, 一维非平衡辐射流体力学 JB19 程序、一维电离与反转动力学程序和二维几何光学旁轴近似下 XRL 传播和小讯号放大的 XBPA 程序组成模拟 XRL 产生全过程的系列程序^[1-3]. 电离与反转动力学程序 N6 以 JB19 提供的电子温度、电子密度、光场分布等量为输入量, 通过求解含时速率方程, 确定激光上、下能级的粒子占据数, 从而确定增益系数. 然而, 由于程序采用细致组态模型, 从原子一直计算到裸核, 考虑到离子的双激发态后, 能级组态的数目巨大, 尤其是对于像类镍银或类镍钽这样的高 Z 元素, 需要求解巨大维数的速率方程组, 非常费时. 矩阵分块法^[4-7]将庞大的速率方程组进行分块求解, 可以使其求解大为简化, 大大提高计算速度. 其做法是, 首先采用追赶法求解离子基态满足的方程组, 得到各种离子基态占据数, 然后将其代入激发态所满足的方程组中, 便可以得到激发态的布居. 这种方法要求等离子体中离子激发态

之间的电离与复合过程是可以忽略的, 其依据是认为激发态的布居很小. 本文研究在 X 射线激光感兴趣的等离子体状态下, 激发态之间电离与复合过程对等离子体电离过程的影响, 从而考察矩阵分块法在 X 射线激光研究中应用的可能性.

采用稀疏矩阵法求解大型速率方程组, 把离子激发态之间的电离与复合过程的速率系数赋 0, 考察离子激发态之间电离与复合过程的影响, 这样计算的结果以下角标 nlk 表示, 而不作这种近似的结果以下角标 lk 表示. 本文以 1.0 ns 激光驱动类氖锗为例, 细致分析忽略激发态之间电离与复合过程对等离子体状态的影响, 然后分别给出其对 1.0 ns, 100 ps 预主脉冲以及 5 ps 预主脉冲激光驱动类氖锗 X 射线激光增益系数的影响.

2. 对等离子体状态的影响

脉宽为 1.0 ns 的梯形脉冲驱动锗平板靶, 产生的焦距长 5.5 cm, 宽 $150 \mu\text{m}$, 驱动激光波长为 $1.053 \mu\text{m}$, 能量为 1547 J, 限流因子取 0.1, 驱动激光脉冲的

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 804-07-01)资助的课题.

时间波形为梯形,前后沿各 0.25 ns.

图 1 是分别是激光脉冲强度上升时、中间时以及下降时三个不同时刻等离子体状态的空间分布,可以看到,等离子体已经被电离到了类氙离子占优的状态,在忽略与不忽略激发态之间电离与复合的两种情况下,等离子体电离度 Z_{nk} 与 Z_{lk} 的差别小于

1.但是,电离度和类氙离子丰度在远离初始靶面的地方差别较大,对于电离中的等离子体,在距离初始靶面较近的高密度区域,电离度差别最小,此时类氙离子丰度分布也最接近,而在抽运脉冲结束后的复合等离子体中,两者在低密度区域电离度和类氙离子丰度分布的差别逐渐显现.

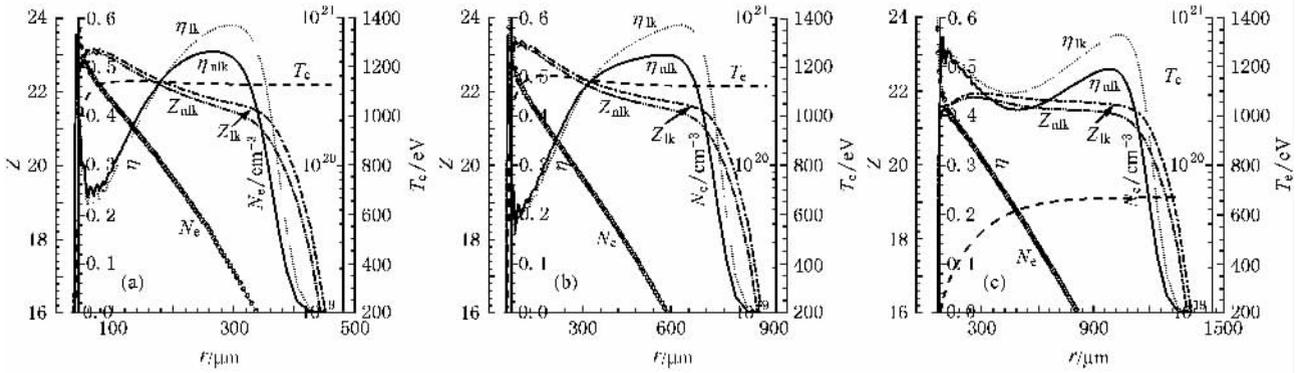


图 1 0.61 ns (a) 1.0 ns (b) 和 1.4 ns (c) 时,电子温度 T_e 、电子密度 N_e 、电离度 (Z_{lk} , Z_{nk})、类氙离子丰度 (η_{lk} , η_{nk}) 随到靶面距离 r 的变化 (初始靶面在 $30 \mu\text{m}$ 处)

为了分析其原因,我们选取三个拉氏点,观察这些点等离子体状态随时间的演化,如图 2 所示.从图 2 可以看到,在忽略激发态之间电离与复合过程的情况下,等离子体电离慢,这三个拉氏点电离度随时间的变化趋势相同, Z_{nk} 与 Z_{lk} 的差值都是在某一时刻达到最大,随着等离子体逐渐电离到类氙离子占优的状态,其差别逐渐减小至最小.在早期,对于先

被烧蚀的第 286 个拉氏点来讲,电子温度 T_e 增加较快,离子通过级联激发到双电子激发态,主要通过双电子激发态的自电离或电子碰撞电离而电离,而后被烧蚀的第 260 个和第 235 个拉氏点,其 T_e 上升缓慢,通过双电子激发态电离的过程慢,因此在电离的早期,忽略激发态之间的电离与复合过程对先被烧蚀的等离子体造成的影响较大.

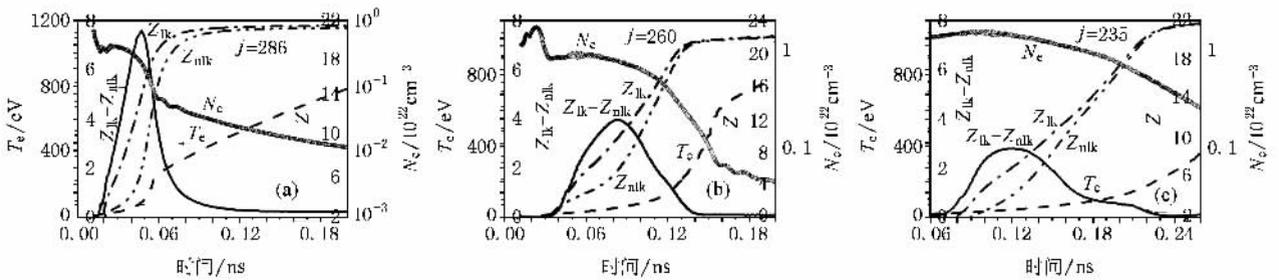


图 2 第 286 (a)、第 260 (b) 和第 235 (c) 个拉氏点在电离早期,等离子体状态随时间的演化

为此可以看一下,这三个拉氏点在 Z_{lk} 与 Z_{nk} 差别最大的时刻,在两种情况下,等离子体中各种离子丰度分布如图 3 所示.可以看到,如果忽略激发态之间的电离与复合过程,类铜离子积聚了大量粒子而没有电离,这是导致两种情况下电离度差别最大的主要原因,同时从表 1 可以看到,不考虑激发态之间的电离过程,~99%的粒子占据双电子激发态,使类铜离子无法电离,为了进一步说明这一点,表 2 给出

了考虑激发态之间电离与复合过程的情况下,在类铜离子占优的时刻,第 260 个拉氏点类铜离子部分能级上粒子的占据概率,以及该能级通过直接电离和自电离到类镍离子基态和激发态的速率(1k 0.1 ns))从表 2 可以看出,类铜离子基态和单激发态主要通过直接电离最外壳电子到类镍离子基态而电离的,而对于双电子激发态,其通过直接电离或自电离到类镍离子激发态的速率大于其自电离到类镍离子

基态的速率 其中 $\alpha^{Ni,Cu}$ 是类铜离子激发态电离到类镍离子激发态的电离贡献与电离到类镍离子基态的贡献之比 其值为 27.36 表明类铜离子激发态电离到类镍离子激发态的贡献非常重要 原因是此时类铜离

子中有 $\sim 95.7\%$ 的粒子占据双电子激发态(参见表 3 中同一时刻 类铜离子各能级粒子数的占据份额) 因此 忽略激发态之间的电离与复合过程 将会大大影响双电子激发态占据多数的离子的电离.

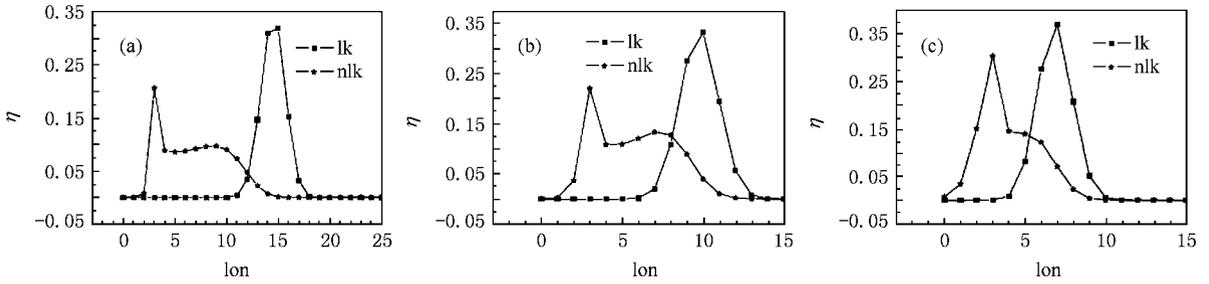


图 3 Z_{lk} 和 Z_{nlk} 相差最大时刻等离子体中各种离子丰度分布 (a) $j = 286, t = 0.047 \text{ ns}$; (b) $j = 260, t = 0.084 \text{ ns}$; (c) $j = 235, t = 0.115 \text{ ns}$ (横坐标 0 代表锗原子, 1 代表类镓, 2 代表类锌, 依次往下, 32 代表裸核)

表 1 第 286, 260, 235 个拉氏点, 两种情况下, 电离度相差最大的时刻, 不考虑激发态之间的电离与复合过程的情况下, 类铜离子基态、单激发态及双电子激发态的占据份额

拉氏点	时间/ns	基态	单激发态	双激发态	丰度	电子密度/ 10^{22} cm^{-3}	电子温度/eV
286	0.047	9.42×10^{-5}	0.001	0.999	0.202	0.22	93.1
260	0.084	1.96×10^{-4}	0.003	0.997	0.208	0.77	54.3
235	0.118	4.16×10^{-4}	0.005	0.994	0.286	1.41	41.4

表 2 考虑激发态之间电离与复合过程的情况下, $t = 0.044 \text{ ns}$ 时, 第 260 个拉氏点, 类 Cu 离子个别能级的布居概率及其到类 Ni 离子基态及激发态的电离速率 ($1/(0.1 \text{ ns}), T_e = 23.3 \text{ eV}, N_e = 0.84 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)

类 Cu 离子组态	组态布居概率 P_i^{Cu}	$C_{g,i}^{Ni,Cu} + R_{g,i}^{Ni,Cu}$	$\sum_{j \neq g} (C_{j,i}^{Ni,Cu} + R_{j,i}^{Ni,Cu})$	$(A^a)_{g,i}^{Ni,Cu}$	$\sum_{j \neq g} (A^a)_{j,i}^{Ni,Cu}$	$\alpha^{Ni,Cu}$
基态 $3^{18}4^15^0$	0.891×10^{-3}	0.2089×10^4	0.5503×10^2	0.0000	0.0000	27.36
$3^{18}4^05^1$	0.740×10^{-3}	0.1364×10^5	0.4353×10^2	0.0000	0.0000	
$3^{18}4^010^1$	0.205×10^{-2}	0.1668×10^6	0.3463×10^2	0.0000	0.0000	
$3^{17}4^2$	0.485×10^{-2}	0.0000	0.1775×10^4	0.2019×10^4	0.0000	
$3^{17}4^16^1$	0.938×10^{-2}	0.0000	0.3158×10^5	0.1530×10^3	0.0000	
$3^{17}4^110^1$	0.214×10^{-1}	0.0000	0.1667×10^6	0.1106×10^2	0.0000	
$3^{17}4^05^2$	0.276×10^{-2}	0.0000	0.2306×10^5	$0.5176(2)$	$0.3608(5)$	
$3^{17}4^05^17^1$	0.825×10^{-2}	0.0000	0.5779×10^5	$0.6979(1)$	$0.3709(4)$	
$3^{17}4^06^2$	0.373×10^{-2}	0.0000	0.5217×10^5	$0.528(1)$	$0.1331(4)$	
$3^{17}4^06^18^1$	0.115×10^{-1}	0.0000	0.9934×10^5	$0.990(0)$	$0.580(4)$	
$3^{17}4^06^110^1$	0.168×10^{-1}	0.0000	0.1822×10^6	$0.3001(0)$	$0.1835(4)$	

注: $C_{g,i}^{Ni,Cu}, R_{g,i}^{Ni,Cu}$ 分别为类铜离子第 i 个能级碰撞电离和光电离到类镍离子基态的速率, $C_{j,i}^{Ni,Cu}, R_{j,i}^{Ni,Cu}$ 分别为类铜离子第 i 个能级碰撞电离和光电离到类镍离子激发态的速率, $(A^a)_{g,i}^{Ni,Cu}, (A^a)_{j,i}^{Ni,Cu}$ 分别为类铜离子第 i 个能级自电离到类镍离子激发态和基态的速率, $\alpha^{Ni,Cu} = \frac{\sum_{j \neq g} [C_{j,i}^{Ni,Cu} + R_{j,i}^{Ni,Cu} + (A^a)_{j,i}^{Ni,Cu}] P_i^{Cu}}{\sum_i [C_{g,i}^{Ni,Cu} + R_{g,i}^{Ni,Cu} + (A^a)_{g,i}^{Ni,Cu}] P_i^{Cu}}$ 是类 Cu 离子激发态到类 Ni 离子激发态的电离贡献与到类 Ni 离子基态的电离贡献之比.

表 3 考虑激发态之间的电离与复合过程的情况下,第 260 个拉氏点等离子体中类铜、类铬、类钪、类氩、类镁离子占优的时刻,该离子各态基态、单激发态及双电子激发态的占据概率,归一化到该离子的丰度

时间/ns	基态	单激发态	双电子激发态	丰度	电子密度/ 10^{22} cm^{-3}	电子温度/eV	离子
0.044	0.004	0.038	0.957	0.207	0.84	23.2	类 Cu
0.075	0.031	0.392	0.576	0.360	0.83	44.8	类 Cr
0.090	0.075	0.471	0.454	0.329	0.72	62.1	类 Sc
0.103	0.145	0.525	0.329	0.313	0.62	82.8	类 Ar
0.129	0.445	0.491	0.065	0.332	0.29	193.1	类 Mg

为了考察 Z_{lk} 与 Z_{nlk} 的差异随等离子体的继续电离而逐渐减小的原因,以第 260 个拉氏点为例,在考虑激发态之间的电离与复合过程的情况下,选取电离的不同时期等离子体中类铜、类铬(Cr)、类钪(Sc)和类氩及类镁离子分别占优的时刻,这五种离子的基态、单激发态以及双激发态所占的份额,如表 3 所示.从表 3 可以看出,在电离的初期,等离子体电子密度高,对于某一电离度的离子来讲,其 90% 以上的粒子处于双电子激发态,随着等离子体的继续电离和等离子体的膨胀,电子密度逐渐减小,等离子体中双激发态的数目逐渐减小,基态和激发态的占据份额增加,激发态与激发态之间电离与复合过程的影响逐渐减小.

3. 对增益系数的影响

分别考察了对 100 ps 和 5 ps 预主脉冲驱动的锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的影响,其驱动激光条

件如表 4 所示.为表述方便,令上述 1 ns 激光驱动的模式为 Q_1 .为了计算增益系数,将类氩离子基态和第一单激发态细分为 37 个组态,将类钠离子和类氟离子的基态和第一单激发态分别细分为 12 个和 113 个细分组态,细分组态的能级和电子碰撞激发系数、以及能级之间的自发辐射系数均由数据库提供,其他离子只考虑到轨道量子数层次,且采用类氢近似.图 4 给出在考虑激发态之间电离与复合过程的情况下,增益峰值时刻,这三个模型在两种情况下等离子体状态的空间分布.可以看出,两种情况下增益系数空间分布的形状相似且其空间位置接近,增益区等离子体电离度的差别小,但是类氩离子丰度却有较大差别,对于模型 Q_1 来讲,两种情况下,增益系数在低密度区域的差别非常小,但是对于模型 Q_2 和 T_1 来讲,其差别就很明显,这表明,激发态之间的电离与复合过程不仅通过影响类氩离子丰度分布,同时也通过影响激光上、下能级粒子占据概率,而影响增益系数.

表 4 100 ps, 5 ps 激光驱动类氩锗 X 射线激光的驱动条件

模型	T_1/ps	T_2/ps	T_3/ps	$\lambda_1/\mu\text{m}$	$\lambda_2/\mu\text{m}$	$\lambda_3/\mu\text{m}$	E_1/J	E_2/J	E_3/J	dt_{12}/ps	dt_{23}/ps	$L_{\text{foc}}/\text{cm}, D_{\text{foc}}/\mu\text{m}$
Q_2	100	100		1.053	1.053					3000		1.8 100
T_1	1000	10	5	0.53	0.53	1.053	0.51	1.02	6.50	1930	198	1.0 30

注: $t_{1,2,3}$ 分别为三个脉冲的脉冲宽度, $\lambda_{1,2,3}$ 和 $E_{1,2,3}$ 分别为驱动激光波长和能量, dt_{12} 为第一与第二脉冲的峰值时刻的延迟时间, dt_{23} 为第二与第三脉冲的峰值时刻的延迟时间, L_{foc} 和 D_{foc} 分别为焦线的长度与宽度.脉冲的时间波形为高斯型.

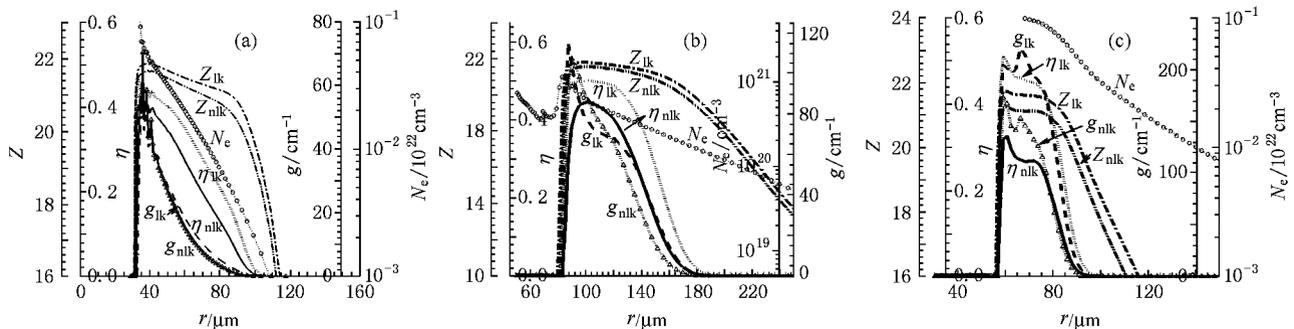


图 4 考虑激发态之间电离与复合过程的情况下,增益峰值时刻,两种情况下等离子体状态的空间分布 (a) $Q_1, t = 230.7 \text{ ps}$; (b) $Q_2, t = 13.6 \text{ ps}$; (c) $T_1, t = 8.67 \text{ ps}$

增益系数的时间、空间分布直接影响输出 X 射线激光的时间、空间分布, 因此图 5 给出了三个模型类氩锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的时间、空间分布($Q_1((a)(d)), Q_2((b)(e)), T_1((c)(f))$)。图 5 (a)(b)(c) 是忽略激发态之间电离与复合过程计算的结果。从图 5 可以看出, 增益系数空间分布的形状和位置非常相近, 在早期, 忽略激发态之间的电离与复合过程都使增益系数减小, 对这三个模型来讲, 其最大差别分别为 60%、66% 和 78%。随着时间的延长, 两者的差别逐渐减小, 这是因为增益首先出现在密度较高的临界面附近, 此时双激发态的影响较大, 由于电子热传导, 低密度区域的等离子体在随后的时间里, 逐渐电离到类氩离子, 也会出现增益, 在这些区域两者表现出较小的差别。对于 T_1 模型, 由于增益区电子密度较高(临界面附近), 激发态之间的电离与复

合过程对输出 X 射线激光的强度、小信号增益系数等的影响不容忽视, 对于模型 Q_1 和 Q_2 , 大量的理论模拟均表明, 对输出 X 射线激光贡献大的区域是较晚时刻的增益区, 较早时刻的增益系数小, 对最终 X 射线激光的放大的贡献并不大, 因此, 在高密度区域虽然增益系数相差较大, 但是最后输出 X 射线激光的强度、发散角等可能相差并不大, 因此, 考察了电子密度小于等于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 增益系数时间、空间演化的包络曲线的特性, 如表 5 所示。可以看到, 在电子密度小于等于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的区域, 忽略激发态之间的电离与复合使增益的时间半高全宽(FWHM)延长了 $\sim 10\%$, 峰值增益的空间半高全宽分别增加了 $\sim 13\%$ 和 $\sim 23\%$, 相对于增益的维持时间(半高全宽), 峰值增益出现的时间分别延迟了 $\sim 1.4\%$ 和 $\sim 6.9\%$, 差异并不十分显著。

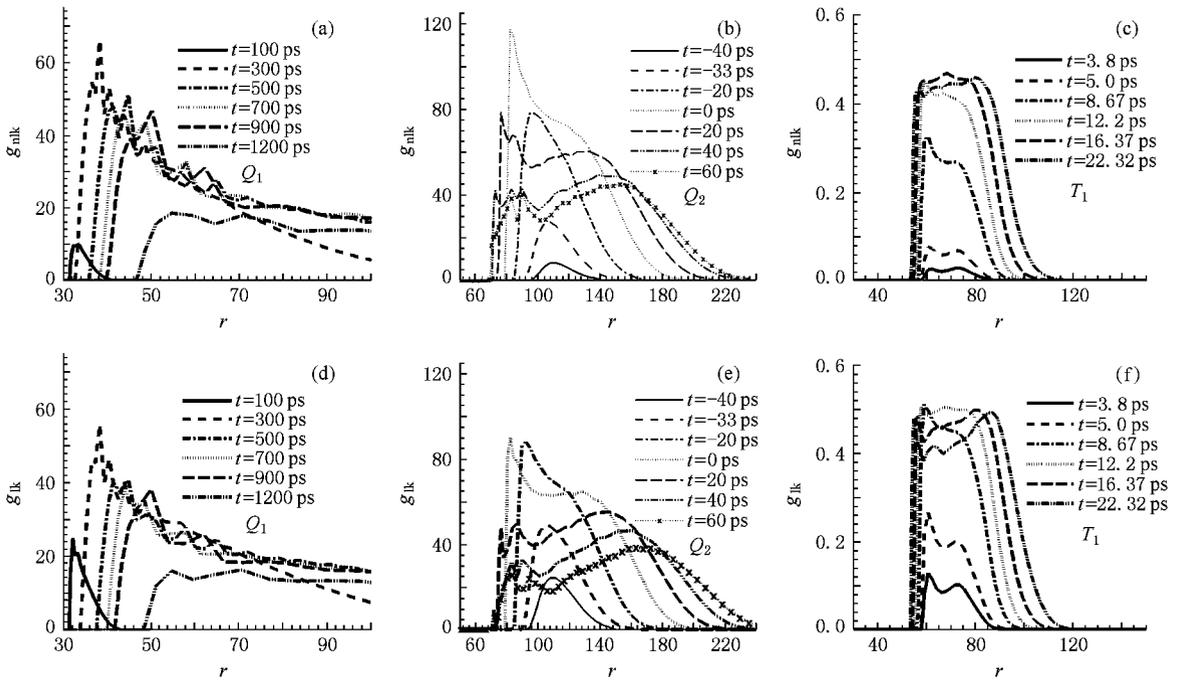


图 5 三个模型 $Q_1((a)(d)), Q_2((b)(e)), T_1((c)(f))$ 类氩锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的时间、空间分布

表 5 1.0 ns, 100 ps, 5 ps 激光驱动类氩锗 X 射线激光时空演化包络曲线的特征量

模型	g_{pk} / cm^{-1}	T_{epk} /eV	η_{pk}	Z_{pk}	x_{pk} / μm	x_1 / μm	x_2 / μm	Δx_{pk} / μm	t_{pk} /ps	t_1 /ps	t_2 /ps	Δt_{pk} /ps	$\frac{g_{lk} - g_{nlk}}{g_{lk}}$	
Q_1	lk	~ 48.5	~ 860.0	~ 0.44	~ 21.85	~ 10.6	~ 4.3	~ 35.6	~ 31.3	~ 230.7	~ 116.8	~ 1017.8	~ 901	-0.04
	nlk	~ 50.4	~ 895.3	~ 0.40	~ 21.72	~ 11.3	~ 5.0	~ 40.5	~ 35.5	~ 243.3	~ 133.4	~ 1130.4	~ 997	
Q_2	lk	~ 70.0	~ 963.4	~ 0.50	~ 21.72	~ 82.0	81.2	143.2	62.0	~ -13.9	-36.1	70.2	~ 106.3	-0.10
	nlk	~ 76.8	~ 1069.4	~ 0.45	~ 21.65	~ 82.3	81.5	129.0	47.5	~ -6.6	-28.1	67.3	~ 95.4	

注: t_{pk} 和 x_{pk} 分别是增益峰值时刻和到靶面的距离, g_{pk} , T_{epk} 分别为峰值增益和此时的等离子体电子温度, Z_{pk} 和 η_{pk} 为增益峰值时刻的类氩离子丰度和电离度, $t_{1,2}$, $x_{1,2}$ 表示在 $t_{1,2}$ 时刻在 $x_{1,2}$ 处增益为峰值增益的一半, Δt_{pk} 和 Δx_{pk} 为增益的时间半高全宽和空间半高全宽。

4. 讨 论

本文以 1.0 ns 激光驱动的一类氙锗等离子体为例,研究了电离等离子体中激发态之间电离与复合过程对等离子体状态的影响,并对其原因进行了细致分析,同时也考察了忽略激发态之间的电离与复合过程对 100 ps 预主脉冲驱动和 5 ps 预主脉冲驱动的一类氙锗 19.6 nm X 射线激光增益系数的影响.研究表明,忽略激发态之间的电离与复合过程将使等离子体电离变慢,其对电离早期以及先被烧蚀的等离子体影响较大.在等离子体电离早期,等离子体电子密度高,双电子激发态占据的份额大,等离子体主要通过级联激发到双电子激发态而电离,对于先被烧蚀的等离子体由于 T_e 上升较快,激发态之间的电离过程的贡献较大,随着等离子体继续膨胀和电离,双电子激发态的占据份额减小,其贡献逐渐减小,激发态之间的电离与复合过程对等离子体电离的影响逐渐减小,到类氙离子占优势的时刻,两种情况下等离子体电离度和类氙离子丰度相差很小,所以如果不关心等离子体电离的中间过程,可以考察激发态之间的电离与复合过程对类氙锗 X 射线激光增益系数的影响.

分别考察了对 1.0 ns, 100 ps 和 5 ps 激光驱动下类氙锗 19.6 nm X 射线激光增益时间、空间特性的影响.研究表明,从增益系数的时间、空间演化曲线来看,两种情况下,增益系数空间分布的形状和位置非常接近,但忽略激发态之间的电离与复合将影响

增益的大小和时间特性.在临界面附近,其影响最大,增益系数的数值最大相差分别为 $\sim 60\%$, $\sim 66\%$ 和 $\sim 78\%$,但是在密度较低的区域其影响逐渐减小.对于 5 ps 激光驱动的瞬态机理 X 射线激光来讲,因增益区处在高密度区,所以,激发态之间的电离与复合过程对 X 射线激光将不可以忽略,对于 1.0 ns 和 100 ps 激光驱动的亚稳态机理 X 射线激光来讲,考虑到折射的影响,对 X 射线激光放大起主要作用的区域在低密度区,在电子密度小于等于 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的区域,忽略激发态之间的电离与复合使增益的时间半高全宽延长了 $\sim 10\%$,峰值增益的空间半高全宽分别增加了 $\sim 13\%$ 和 $\sim -23\%$,相对于增益的维持时间(半高全宽),峰值增益出现的分别时间延迟了 $\sim 1.4\%$ 和 $\sim 6.9\%$,差异并不十分显著,因此矩阵分块法可以粗略地对亚稳态机理 X 射线激光进行规律性的研究,但是准确的模拟还是不能忽略激发态之间的电离与复合过程.实际上,在电离的早期,等离子体处于低温、高密度状态,其中不仅有大量的双激发态,而且还存在三激发态、四激发态,甚至更高的激发态,因此,不仅激发态之间的电离与复合过程不能忽略,而且只考虑双激发态也是不够的,但是就目前的计算机水平来讲,很难考虑这么多高激发态,因此,如何描述这种条件下等离子体的电离过程仍然是一个需要进一步研究的问题.

感谢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.

- [1] Qiao X M, Zhang G P, Zhang T X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1182 (in Chinese) [乔秀梅、张国平、张覃鑫 2006 物理学报 **55** 1182]
- [2] 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]
- [3] Qiao X M, Zhang G P, Zhang T X 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1344 (in Chinese) [乔秀梅、张国平、张覃鑫

2005 强激光与粒子束 **17** 1344]

- [4] Lan K, Zhang Y Q 1995 *High Power Laser and Particle Beams* **7** 225 (in Chinese) [蓝 可、张毓泉 1995 强激光与粒子束 **7** 225]
- [5] Lan K, Zhang Y Q, Yu M 1994 *High Power Laser and Particle Beams* **6** 330 (in Chinese) [蓝 可、张毓泉、于 敏 1994 强激光与粒子束 **6** 330]
- [6] Lan K, Zhang Y Q, Zheng W D 1999 *Phys. Plasmas* **6** 4343
- [7] Lan K, Zhang Y Q, Yu M 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1631

Effect of ionization and recombination between excited states on gain of 19.6 nm X-ray laser^{*}

Qiao Xiu-Mei Zheng Wu-Di Zhang Guo-Ping

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

(Received 24 September 2007 ; revised manuscript received 9 January 2008)

Abstract

As it is difficult to solve a large number of rate equations including doubly excited states of various ions, block matrix method is expected to dramatically reduce the machine time by dividing the large number of equations into pieces of small units, and solving them one by one, on condition that the ionization and recombination between excited states of ions can be ignored. In this paper, the influence of ionization and recombination between excited states on plasma status was studied, and detailed analysis of its mechanism was made. The effect on gain of Ne-like Ge 19.6 nm X-ray laser respectively driven by 1.0 ns pulse, 100 ps pulse and 5 ps pre-pulse and main pulse was studied. The simulation shows that for the 5 ps driving pulse case, the ionization and recombination between excited states has relatively large influence, and it can not be ignored and that for the two quasi-stable state cases, in the gain region with electron density less than $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, the FWHM temporal width of gain increases by $\sim 10\%$, and the FWHM spatial width of gain increases respectively by $\sim 13\%$ and $\sim -23\%$, and the time the peak gain appears is delayed respectively by $\sim 1.4\%$ and $\sim 6.9\%$, which is tolerable, implying that the block matrix method could be applied in the qualitative modeling of QSS scheme X-ray laser. However, for accurate study, the ionization between the excited states could not be neglected.

Keywords : X-Ray laser, block matrix method, Ne-like Ge, doubly excited states

PACC : 4255V, 5250J, 8220W

^{*} Project supported by the National High-Tech Research and Development Program of China (Grant No. 804-07-01).