

文章编号: 1001-4322(2006)03-0405-05

# 长波长激光驱动 Ni-like Ag 13.9 nm X 射线激光的理论研究\*

张国平, 张覃鑫, 郑无敌

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 为了进一步深入理解掠入射驱动碰撞机制的特点与长处,以基频光正入射驱动为参照,用系列程序研究了  $6\ \mu\text{m}$  和  $3\ \mu\text{m}$  激光正入射驱动类镍银碰撞激发机制。在波长  $6\ \mu\text{m}$  的激光正入射驱动下,激光能量直接沉积到增益区,大大提高了增益区的电子温度;以  $5\ \text{J}$  驱动能量,获得有效增益系数为  $20.7\ \text{cm}^{-1}$  的高增益和有效增益长度积为  $41.4$  的深度饱和增益,与波长  $1.053\ \mu\text{m}$  的正入射相比,以  $19\%$  的驱动能量,使有效增益系数提高了  $60\%$ 。在波长  $3\ \mu\text{m}$  的激光正入射驱动下,激光能量沉积到增益区附近,大大提高了增益区的电子温度;以  $15\ \text{J}$  驱动能量,获得有效增益系数为  $21.2\ \text{cm}^{-1}$  的高增益和有效增益长度积为  $42.4$  的深度饱和增益,与波长  $1.053\ \mu\text{m}$  的正入射相比,以  $57\%$  的驱动能量,使有效增益系数提高  $64\%$ 。

**关键词:** X 射线激光; 类镍离子; 电子碰撞激发机制; 亚稳态; 数值模拟

**中图分类号:** TN246; O432.12

**文献标识码:** A

类镍钡和银离子的电子碰撞激发机制 X 射线激光(XRL)输出波长分别为  $14.7\ \text{nm}$  和  $13.9\ \text{nm}$ 。美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)和我国上海激光等离子体实验室分别利用这两种激光为探针,用 Mach-Zehnder 干涉仪成功地诊断了激光等离子体临界面附近的电子密度分布<sup>[1-3]</sup>。为了提高分辨能力和进一步诊断临界面附近的中 Z 和高 Z 等离子体,需要进一步提高输出 XRL 的亮度和相干性。为此,需要继续对类镍离子的电子碰撞激发机制进行研究,提高其增益系数,以达到深度饱和增益,从而提高 XRL 输出能量和光束质量。

在基频激光以  $100\ \text{ps}$  脉宽预主脉冲方式驱动类镍银一类的电子碰撞激发机制中,增益区的电子密度为  $10^{19}\ \text{cm}^{-3}$  量级<sup>[4]</sup>。驱动激光的能量主要沉积在接近临界面的电子密度为  $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$  量级的区域。在增益区,等离子体对驱动激光的吸收很小,主要由电子热传导加热,驱动激光的大部分能量就被浪费掉了。

针对这种情况,LLNL 的科学家进行了驱动激光掠入射辐照钼靶的实验<sup>[5]</sup>,采用主脉冲和靶面成  $13.6^\circ$  掠入射角的点聚焦方式驱动,预主脉冲驱动激光总能量为  $150\ \text{mJ}$ ,获得了类镍钡  $18.9\ \text{nm}$  波长、增益长度积为  $14$  的饱和增益。

在 1 维条件下掠入射角为  $\phi$  的驱动激光在电子密度为  $N_c^*$  处返回,  $N_c^* = N_c \sin^2 \phi$ , 其中  $N_c$  为驱动激光的临界电子密度,  $N_c = 1.15 \times 10^{21} \lambda^{-2} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\lambda$  为驱动激光的波长,以  $\mu\text{m}$  为单位。采用掠入射后,驱动激光能量直接沉积到增益区,大大增加了在折返点附近驱动激光的光程,提高了对驱动激光的吸收,成倍地提高了增益区的电子温度。在  $13.6^\circ$  掠入射角时,驱动激光在轴向的速度达到光速的  $97\%$ ,可以有效地克服等离子体的老化。因而,掠入射对类镍银一类的瞬态碰撞激发机制是很有效的,可以使其增益系数成倍提高。

我们用系列程序<sup>[6-9]</sup>对掠入射方式驱动亚稳态类镍银碰撞激发机制进行了研究。与正入射方式相比,掠入射也可以使增益系数成倍提高<sup>[10-11]</sup>。为了进一步深入理解掠入射驱动的优点,以基频光正入射驱动为参照,本文用系列程序又研究了长波长  $6\ \mu\text{m}$  和  $3\ \mu\text{m}$  激光正入射驱动类镍银的碰撞激发机制的情况。

## 1 波长 $6\ \mu\text{m}$ 激光低功率密度正入射驱动亚稳态碰撞激发机制

如果驱动激光波长能增加到  $6\ \mu\text{m}$  或  $3\ \mu\text{m}$ ,则相应  $N_c$  与波长为  $1.053\ \mu\text{m}$  基频光相比,分别降低到  $1/36$  和  $1/9$ 。若能使驱动激光能量直接沉积到增益区或增益区附近,也可以大幅度提高电子温度,从而大幅度提高

\* 收稿日期:2005-04-06; 修订日期:2005-08-18

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助课题(69989801);国家 863 计划项目资助课题

作者简介:张国平(1941—),男,博士生导师,主要从事 XRL 理论研究工作; zhang\_guoping@mail.iapcm.ac.cn。

增益系数和降低驱动激光的功率密度,进而达到减小驱动激光的能量,提高 XRL 效率的目的。

驱动激光波长为  $6\ \mu\text{m}$ ,脉宽 100 ps,预、主脉冲均为正入射,  $N_e$  为  $3.19 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ,主脉冲能量 5 J,主脉冲功率密度  $2.27 \times 10^{12}\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,线聚焦长 22 mm,宽  $100\ \mu\text{m}$ ,驱动银平板靶。

靶长 20 mm,预脉冲强度  $I$  分别为 10% 和 1% 时,进行了对预主脉冲时间间隔  $t_{12}$  的优化。有效增益系数  $G_{\text{ef}}$  随  $t_{12}$  的变化见图 1。两种情况下,  $G_{\text{ef}}$  开始都随  $t_{12}$  的增加而显著增加,当  $t_{12}$  为 11 ns 左右达到峰值,两者的差别不大;当  $t_{12}$  分别为 11 ns 和 11.5 ns 时,  $G_{\text{ef}}$  的峰值均为  $20.7\ \text{cm}^{-1}$ 。其驱动激光的吸收效率  $\eta_a$  随  $t_{12}$  变化见图 2, 10% 的预脉冲吸收效率明显高于 1%, 两者都随  $t_{12}$  的增加而近似线性增加,当  $G_{\text{ef}}$  达到峰值时,两者的  $\eta_a$  分别为 21.5% 和 17.5%。该图表明在驱动激光波长为  $6\ \mu\text{m}$ ,脉宽为 100 ps 时,即使有预脉冲,驱动激光的吸收效率也比较低。

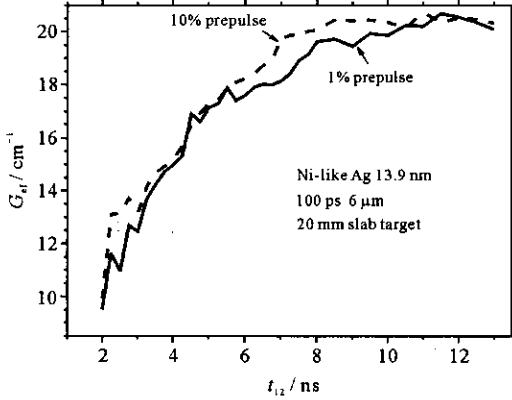


Fig. 1 Optimization of  $t_{12}$  driven by  $6\ \mu\text{m}$  wavelength laser

图 1  $6\ \mu\text{m}$  波长激光驱动时对预主脉冲时间间隔的优化

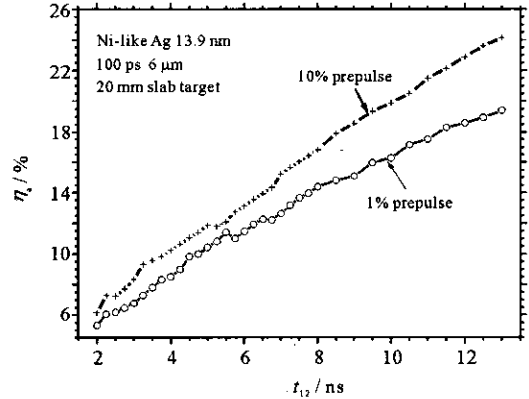


Fig. 2  $\eta_a$  vs  $t_{12}$  driven by  $6\ \mu\text{m}$  wavelength laser

图 2 波长  $6\ \mu\text{m}$  激光驱动时,吸收效率与时间间隔的关系

下面主要研究  $I$  为 1%,  $t_{12}$  为 11.5 ns 的 Asiw 模型。在本文中均以主脉冲峰值时刻作为时间的零点。20 mm 靶长输出 XRL 的主要参数如下:折射角 1.32 mrad,发散角 0.57 mrad,近场分布的峰值和半高全宽分别为  $72.9\ \mu\text{m}$  和  $4.9\ \mu\text{m}$ ,输出激光时间分布的峰值和半高全宽分别为  $-6\ \text{ps}$  和  $10.9\ \text{ps}$ 。其  $t$  为 4, 29 和 59 ps 时刻增益区的等离子体状态分别见图 3~5。在这三个时刻,时间分布峰值的光线分别近似地传播到靶的始端,中点和末端。在  $t$  为 4 ps 时,增益区的电子密度分布刚刚形成两边高中间低的现象,而在后两个时刻,该现象随增益区宽度增大而更加明显,这利于 XRL 在等离子体波导中传播。大部分增益区的电子温度  $T_e$  已被电子热传导拉平,也是等离子体中电子温度最高的区域。

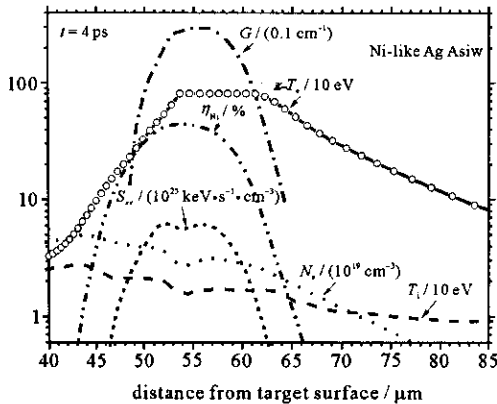


Fig. 3 Gain region in model Asiw at 4 ps

图 3 Asiw 模型在 4 ps 时的增益区状态

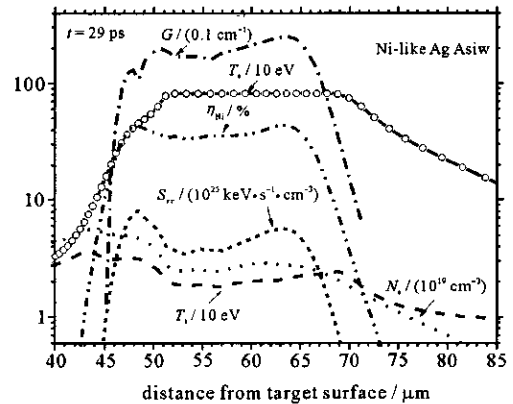


Fig. 4 Gain region in model Asiw at 29 ps

图 4 Asiw 模型在 29 ps 时的增益区状态

在 29 ps 时,在  $63.8\ \mu\text{m}$  处增益达到峰值,增益区的半高全宽为  $19.4\ \mu\text{m}$ ,增益的峰值  $G_p$  为  $25.3\ \text{cm}^{-1}$ 。在峰值处  $T_e$  和离子温度  $T_i$  分别为 814 eV 和 21.1 eV,电子密度  $N_e$  为  $2.78 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ,类镍离子丰度  $\eta_{\text{Ni}}$  为 43.6%,类镍 Ag 波长 13.9 nm 激光线的自发辐射强度  $S_{\text{rr}}$  为  $5.62 \times 10^{25}\ \text{keV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与基频光正入射的 Asn7 模型相比<sup>[10]</sup>,Asiw 的  $G_{\text{ef}}$  从  $12.9\ \text{cm}^{-1}$  提高到  $20.7\ \text{cm}^{-1}$ ,增加了 60%,其中  $T_e$  增加了 70%, $T_i$  下降 7%, $\eta_{\text{Ni}}$  增加 20%, $N_e$  下降 55%,导致  $G_p$  上升 38%, $S_{\text{rr}}$  下降 10%;XRL 折射和等离子体老化都比 Asn7 模型有

所改善,并导致了  $G_{ef}$  另外有 22% 的增加。

Asiw 模型增益区的演化见图 6。当 11 ps 时,  $G_p$  达到最大值为  $30.5 \text{ cm}^{-1}$ 。随着时间的推移,增益区在不断地向外移动,其宽度从窄变宽,再从宽变窄。从 1 ps 到 81 ps 之间,  $G_p$  均大于  $15 \text{ cm}^{-1}$ , 共延续了 80 ps, 移动距离为  $20.6 \mu\text{m}$ , 移动角度为  $0.86 \text{ mrad}$ 。由于增益区存在波导现象, 很难根据平均电子密度梯度的大小去估计平均折射角。需要指出的是增益区移动角度占了光路程序计算的折射角  $1.32 \text{ mrad}$  的 65%。

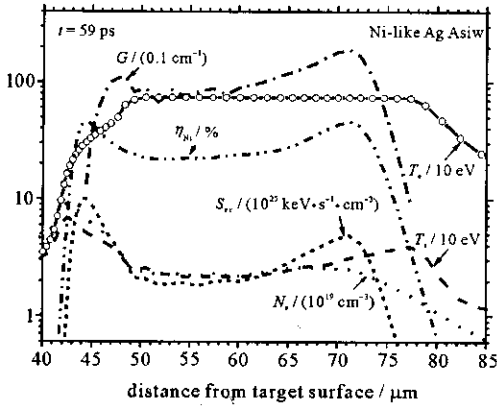


Fig. 5 Gain region in model Asiw at 59 ps  
图 5 Asiw 模型在 59 ps 时的增益区状态

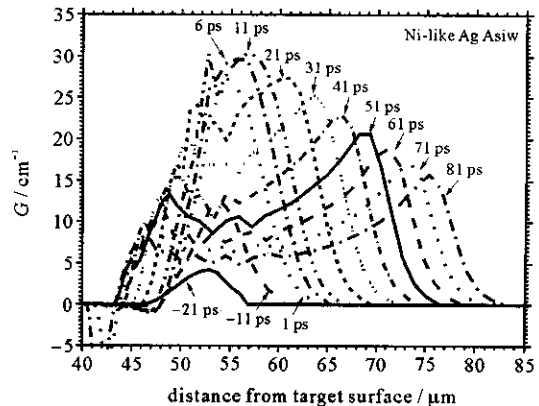


Fig. 6 Gain evolution in model Asiw  
图 6 Asiw 模型增益的演化

## 2 波长 3 μm 激光低功率密度正入射驱动亚稳态碰撞激发机制

驱动激光波长为  $3 \mu\text{m}$ ,  $N_e$  为  $1.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 主脉冲能量 15 J, 主脉冲功率密度  $6.81 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 其它条件和驱动激光波长为  $6 \mu\text{m}$  时相同。

靶长 20 mm 时对于  $I$  分别为 1% 和 10% 时, 进行了对  $t_{12}$  的优化, 其  $G_{ef}$  随  $t_{12}$  的变化见图 7。对于  $I$  为 1% 和 10%,  $G_{ef}$  开始都随  $t_{12}$  的增加而有所下降。  $I$  为 10% 时, 下降不明显, 在  $t_{12} > 2.5 \text{ ns}$  后又显著上升, 在 7 ns 时  $G_{ef}$  达到峰值  $20.7 \text{ cm}^{-1}$ , 然后较快下降。在  $t_{12}$  为 9~13 ns 之间时,  $G_{ef}$  在 19 到  $18.7 \text{ cm}^{-1}$  范围内非常平稳地下降。  $I$  为 1% 时, 开始下降比较明显, 在  $t_{12}$  为 3.75 ns 时  $G_{ef}$  达到最低值, 然后快速上升, 10 ns 时  $G_{ef}$  达到  $20.9 \text{ cm}^{-1}$ , 以后转为平稳上升, 12.5 ns 时,  $G_{ef}$  达到峰值  $21.2 \text{ cm}^{-1}$ 。其驱动激光的吸收效率  $\eta_a$  随  $t_{12}$  的变化见图 8, 由图可见 1% 预脉冲的吸收效率明显低于 10%, 两者都随  $t_{12}$  的增加而近似线性增加。当  $G_{ef}$  达到峰值时, 两者的  $\eta_a$  分别为 42.6% 和 54.1%, 与波长  $6 \mu\text{m}$  相比,  $\eta_a$  有了 1~2 倍的提高。

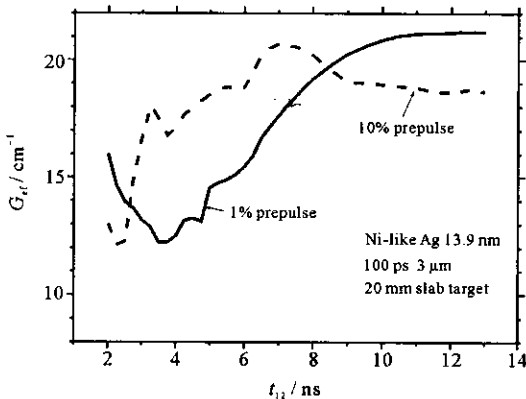


Fig. 7 Gain vs  $t_{12}$  driven by  $3 \mu\text{m}$  wavelength laser  
图 7 波长  $3 \mu\text{m}$  激光驱动时增益随预脉冲时间间隔变化

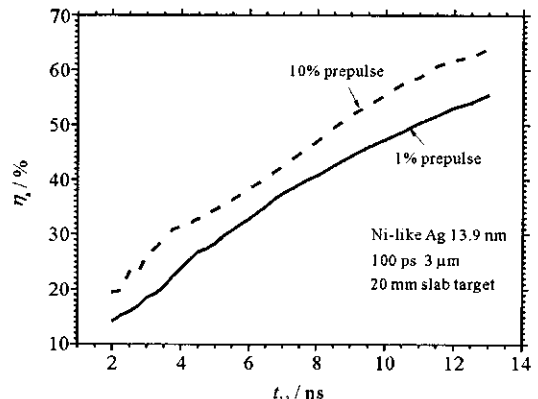


Fig. 8  $\eta_a$  vs  $t_{12}$  driven by  $3 \mu\text{m}$  wavelength laser  
图 8 波长  $3 \mu\text{m}$  激光驱动时吸收效率随时间间隔的变化

下面主要研究  $I$  为 1%,  $t_{12}$  为 12.5 ns 的 Asky 模型。20 mm 靶长输出 XRL 的主要参数如下: 折射角  $3.08 \text{ mrad}$ , 发散角  $0.86 \text{ mrad}$ , 近场分布的峰值和半高全宽分别为  $113 \mu\text{m}$  和  $9.4 \mu\text{m}$ , 输出激光时间分布的峰值和半高全宽分别为  $-17 \text{ ps}$  和  $27.7 \text{ ps}$ 。其  $t$  分别为  $-17, 16$  和  $50 \text{ ps}$  时, 增益区的等离子体状态分别见图 9~11。在这三个时刻, 输出 X 射线激光时间分布峰值时刻的光线分别传播到靶的始端, 中点和末端。临界面附近的电子温度已被电子热传导拉平。增益区在这一区域外侧, 其电子温度大约是峰值温度的 50%。在增益区内电子温度和密度的最大值比最小值都近似大 1 倍。

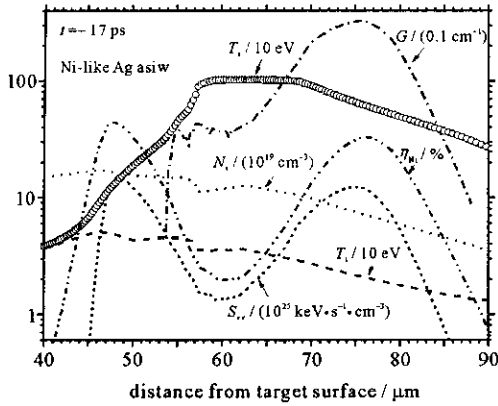


Fig. 9 Gain region in model Asky at -17 ps

图 9 Asky 模型在 -17 ps 时的增益区状态

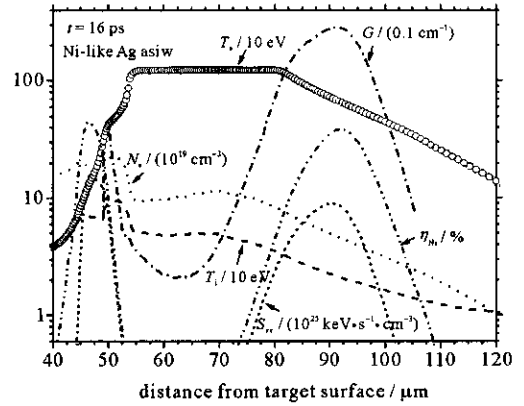


Fig. 10 Gain region in model Asky at 16 ps

图 10 Asky 模型在 16 ps 时的增益区状态

在 16 ps 时,增益区  $G_p$  在  $91.6 \mu\text{m}$  处,增益区的半高全宽为  $13.7 \mu\text{m}$ ,  $G_p$  为  $28.6 \text{ cm}^{-1}$ 。在峰值处,  $T_e$  和  $T_i$  分别为 669 eV 和 21.2 eV,  $N_e$  为  $4.76 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\eta_{\text{Ni}}$  为 38.6%,  $S_{\text{rr}}$  为  $8.74 \times 10^{25} \text{ keV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与基频光正入射的 Asn7 模型相比, Asky 模型的  $G_{\text{ef}}$  从  $12.9 \text{ cm}^{-1}$  提高到  $21.2 \text{ cm}^{-1}$ , 增加了 64%, 其  $T_e$  增加 40%,  $T_i$  下降 6%,  $\eta_{\text{Ni}}$  增加 6.6%,  $N_e$  增加 10%, 最后导致  $G_p$  增加 56%,  $S_{\text{rr}}$  增加 40%。所以  $G_{\text{ef}}$  的增加主要来源于  $G_p$  本身的增加, XRL 折射和等离子体老化的影响只有 8%。增益区的平均电子密度梯度为  $-2.53 \times 10^{19} \text{ cm}^{-4}$ , XRL 的平均折射率为 2.19 mrad/cm, 在 1 cm 靶长范围内, 折射距离为  $11 \mu\text{m}$ , 已达到其增益区宽度的 80%, 说明折射对增益放大的影响相当大。

Asky 模型增益区的演化见图 12, 在 -40 ps 时, 增益达到最大值为  $36.3 \text{ cm}^{-1}$ , 因增益区窄和电子密度梯度大, 此时输出的 XRL 强度并不大。增益区在不断地向外移动, 宽度开始从窄变宽, 很快就维持不变。从 -50 ~ 70 ps 之间, 峰值增益大于  $20 \text{ cm}^{-1}$ , 共延续了 120 ps。移动距离为  $53.6 \mu\text{m}$ , 移动角度为 1.49 mrad, 加上 2.19 mrad 的折射, 总的折射角为 3.68 mrad, 比光路程序计算的 3.09 mrad 大了 19%。所以光路程序计算的平均折射角大约为 1.60 mrad, 折射距离为  $8 \mu\text{m}$ , 达到其增益区宽度的 58%。

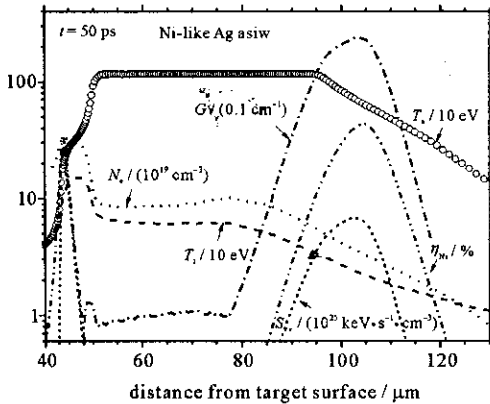


Fig. 11 Gain region in model Asky at 50 ps

图 11 Asky 模型在 50 ps 时的增益区状态

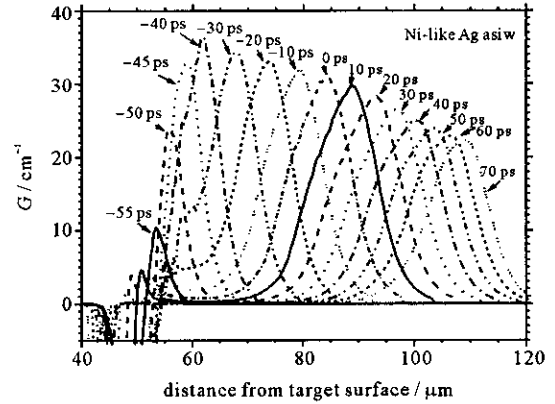


Fig. 12 Gain evolution in model Asky

图 12 Asky 模型增益的演化

### 3 结束语

在波长  $6 \mu\text{m}$  的激光正入射驱动下, 以 5 J 驱动能量,  $2.27 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的主脉冲功率密度和不到 1 J 的能量吸收, 激光能量直接沉积到增益区, 使增益区的电子温度提高了 70%, 获得  $G_{\text{ef}}$  为  $20.7 \text{ cm}^{-1}$  的高增益和有效增益长度积为 41.4 的深度饱和增益。与波长  $1.053 \mu\text{m}$  的正入射相比, 19% 的驱动能量, 使  $G_{\text{ef}}$  提高了 60%, 增益区的半高全宽也从  $13.2 \mu\text{m}$  增加到  $19.4 \mu\text{m}$ 。在波长  $3 \mu\text{m}$  的激光正入射驱动下, 以 15 J 驱动能量,  $6.81 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的主脉冲功率密度和 8 J 的能量吸收, 激光能量直接沉积到增益区附近, 使增益区的电子温度提高了 40%, 获得  $G_{\text{ef}}$  为  $21.2 \text{ cm}^{-1}$  的高增益和有效增益长度积为 42.4 的深度饱和增益。与波长  $1.053 \mu\text{m}$  的正入射相比, 57% 的驱动能量, 使有效增益系数提高 64%, 增益区的半高全宽也从  $13.2 \mu\text{m}$  增加到  $13.7 \mu\text{m}$ 。这两种波长激光作为类镍银的驱动源都比波长  $1.053 \mu\text{m}$  的基频光好得多。

就目前的技术能力而言,脉宽为 100 ps,波长 3  $\mu\text{m}$  和 6  $\mu\text{m}$  的驱动激光暂时是无法实现的。然而,通过本文的研究可以理解到,在基频光正入射驱动时,激光能量主要沉积在接近临界密度的地方,因其电子密度高,电离快,电子温度还未升高到足以产生类镍银增益时就过电离了。大部分激光能量被浪费了,尽管其激光吸收系数高,然而高密度区的辐射能量损耗以及转化为动能的速率更高,这就导致整个等离子体电晕区电子温度低,增益区的电子温度和 XRL 的增益系数也就低。同时也可以比较容易地理解到采用基频激光掠入射驱动类镍银时,同样可以使驱动激光能量直接沉积到增益区或其附近,可以大幅度提高增益区的电子温度,从而有可能大幅度提高 XRL 的增益系数。

致 谢 本工作得到于敏院士的指导,李月明、颜君、邱玉波和方泉玉等提供了原子参数,在此表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] Da Silva L B, Barbee T W Jr, Cauble R, et al. Electron density measurements of high density plasmas using soft X-ray laser interferometry [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**(20):3991-3994.
- [2] Smith R F, Dunn J, Nilsen J, et al. Picosecond X-ray laser interferometry of dense plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(6):065004-1-4.
- [3] 王琛,王伟,孙今人,等. 利用 X 射线激光干涉诊断等离子体电子密度[J]. 物理学报,2005, **54**(1): 202-205. (Wang C, Wang W, Sun J R, et al. Experiment diagnoses of plasma electron density by interferometry using an X-ray laser as probe. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 202-205)
- [4] 张国平,张覃鑫,郑无敌. 30 J 能量驱动类镍银 X 光激光的理论研究[J]. 强激光与粒子束,2004, **16**(11):1375-1379. (Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D. Theoretical study on Ni-like Ag X-ray laser driven by 30 J energy. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(11): 1375-1379)
- [5] Keenan R, Dunn J, Patel P K. High-repetition-rate grazing-incidence pumped X-ray laser operating at 18.9 nm[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**(10):103901-1-4.
- [6] 张国平,盛家田,杨明伦,等. “四靶串接”类氖锗软 X 光激光趋向饱和和增益的理论研究[J]. 强激光与粒子束,1992, **4**(4):521-530. (Zhang G P, Sheng J T, Yang M L, et al. Laser in Neon-like Germanium plasmas. *High Power Laser and Particle Beams*, 1992, **4**(4):521-530)
- [7] 张国平,张覃鑫,吴建周. 双短脉冲驱动类镍钐 X 光激光的模拟[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(3):352. (Zhang G P, Zhang T X, Wu J Z. Research on Ni-like Sm X-ray laser pumped by double short duration pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3):352)
- [8] 张国平,张覃鑫,郑无敌. 用类氖锗 X 光激光实验检验理论模拟[J]. 强激光与粒子束,2004, **16**(1):35-39. (Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D. Test of simulation by experiments of Ne-like Ge X-ray lasers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1):35-39)
- [9] 张国平,张覃鑫,郑无敌. 19.6 nm 波长类氖锗 X 光激光光源理论模拟[J]. 强激光与粒子束,2004, **16**(2):171-176. (Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D. Theoretical designs of 19.6 nm Ne-like Ge XRL source. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2):171-176)
- [10] 张国平,张覃鑫,郑无敌. 掠入射低功率密度驱动 Ni-like Ag X 射线激光的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(12):1817-1823. (Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D. Theoretical research on Ni-like Ag X-ray laser by grazing incidence in low power density. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(12):1817-1823)
- [11] 张国平,张覃鑫,郑无敌. 掠入射较高功率密度驱动 Ni-like Ag X 射线激光的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2):210-214. (Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D. Theoretical research on Ni-like Ag X-ray laser by grazing incidence in higher power density. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2):210-214)

## Theoretical research on Ni-like Ag 13.9 nm X-ray laser driven by 3 $\mu\text{m}$ or 6 $\mu\text{m}$ wavelength laser

ZHANG Guo-ping, ZHANG Tan-xin, ZHENG Wu-di

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to understand the good qualities of the laser driving scheme with grazing incidence against to the scheme with normal incidence, the schemes of Ni-like Ag driven by normal incident lasers with long wavelengths of 6  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  were studied. Results show that for X-ray laser of Ni-like Ag, adopting laser with 6  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  wavelength, the laser energy mainly deposits on gain region or nearby, the electronic temperature on gain region dramatically increases and the gain coefficients dramatically increase too. With 3  $\mu\text{m}$  wavelength laser, using 5 J driven laser energy, an effective gain of 20.7  $\text{cm}^{-1}$  and a deeply saturated gain with a gain length product being 41.4 can be obtained. Comparing to  $1\omega$  laser driven, only 19% driven laser energy is needed, and the effective gain increases 60%. With 6  $\mu\text{m}$  wavelength laser, using 15 J driven laser energy, an effective gain of 21.2  $\text{cm}^{-1}$  and a deeply saturated gain with an effective gain length product of 42.4 can be obtained. Comparing to  $1\omega$  laser driven, only 57% driven laser energy is needed, and the effective gain increases 64%.

**Key words:** X-ray laser; Ni-like ion; Scheme of electronic collision excitation; Quasi-stable state; Numerical simulation