

掠入射驱动产生 x 射线激光的数值模拟^{*}

燕 飞¹⁾ 张 杰^{1)†} 董全力¹⁾ 鲁 欣¹⁾ 李英骏²⁾

¹⁾中国科学院物理研究所光物理重点实验室 北京 100080)

²⁾中国矿业大学(北京)物理系 北京 100083)

(2005 年 1 月 19 日收到, 2005 年 3 月 30 日收到修改稿)

利用一维流体力学数值模拟程序 MEDUSA 和原子物理程序包, 以类镍钼 18.9nm x 射线激光为例, 对掠入射驱动 x 射线激光方案进行了研究. 掠入射驱动 x 射线激光方案可以通过调整掠入射角来选择适合的增益区间. 与正入射驱动方案相比, 掠入射驱动方案加强了驱动激光在增益区内的吸收, 提高了驱动激光向 x 射线激光的转换效率. 模拟结果与实验结果符合较好.

关键词: x 射线激光, 掠入射辐照, 激光等离子体

PACC: 4255V, 5250J

1. 引 言

自从 Matthews 等人在 1984 年首次观测到可见光激光驱动的 x 射线激光增益以来, 人们已经在许多波长实现了 x 射线激光^[1-10]. 随着人们对激光等离子体相互作用机制和对等离子体内部相互作用过程认识的加深, x 射线激光的饱和输出所需要的可见光激光驱动能量也在不断地降低. 从最初 Matthews^[1]和 Nilsen^[2]实现 x 射线激光增益和饱和输出所需要的 kJ 能量, 到张杰等人实现类镍 Ag 离子 14nm^[3]和类镍 Sm 离子 7nm^[4]所需要的百焦耳能量, 再到 1997 年, Nickles^[5]等人采用瞬态驱动的 x 射线激光概念^[6], 利用 10J 的能量, 产生了类氦 Ti 离子的 32.6nm x 射线激光的饱和输出, 产生 x 射线激光的驱动效率得到了大幅度提高. 但是, 由于这些实验方案都采用了驱动激光正入射到等离子体上的布局, 驱动激光的能量大多数淀积在等离子体临界面处, 产生了超热电子逃逸掉, 对 x 射线激光驱动没有贡献, 而被预期的 x 射线增益区间吸收的激光能量只占很少的一部分, 因此, 激光能量利用率很低.

Ozaki^[11, 12]等人在固体靶 x 射线激光实验中, 采用纵向瞬态碰撞驱动方案, 将驱动激光垂直靶面入

射改为预(长)脉冲激光垂直靶面入射, 而主(短)脉冲激光沿靶面方向纵向入射驱动. 这种纵向驱动方案可以选择远离临界面的等离子体区域作为增益区, 避免临界面附近大的密度梯度引起的折射效应, 而且能量主要在增益区被吸收, 驱动激光的能量浪费. 他们在小型激光装置上实现了波长为 18.9nm 的类镍钼 x 射线激光的输出, 但由于驱动激光在传输过程中被折射, x 射线激光远没有达到饱和.

2004 年 Dunn 提出的掠入射驱动产生 x 射线激光概念^[13, 14], 再次得益于人们对激光和等离子体相互作用规律的认识. 实验上, 人们将可见光驱动激光以 10—20 度角掠入射到增益介质等离子体中. 这种驱动机制有三个优点. 第一, 可以根据期望的 x 射线激光波长及相应的原子物理过程规律来选择合适的等离子体密度区做增益区, 克服了正入射驱动 x 射线激光机制中, 激光能量多数淀积在临界面处的不足. 第二, 通过调节掠入射角, 增加驱动光在增益介质的传输距离, 能够将增益介质对驱动光的吸收, 提高几倍, 这使利用亚皮秒可见光激光驱动 x 射线激光成为可能. 第三, 在实验中采用单一共轴抛物镜就能够自动实现行波驱动, 无需在驱动激光器中进行复杂的光栅对变化或引入光程变化元件, 因而在实验中, 在确保了良好的行波驱动同时, 实现良好的

^{*} 国家自然科学基金(批准号 10176034, 10374114, 10374116)及重点基础研究专项经费(批准号:G1999075206)和国家高技术激光聚变主题资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

线聚焦.

文章利用一维流体力学数值模拟程序 MEDUSA^[15]和原子物理程序包,对掠入射驱动的类型钼(18.9nm)x射线激光进行了模拟研究.通过比较掠入射和正入射两种驱动方案下增益介质的电子密度、电子温度、驱动激光的吸收效率等物理参量,研究了掠入射驱动方案产生x射线激光的具体过程和优势.

2. 模型描述

掠入射驱动方案产生x射线激光分两步实现,首先长脉冲垂直入射到平板靶上产生具有很高类钼 Mo 离子丰度的预等离子体,然后短脉冲以与靶面成 10—20°的小角度掠入射到预等离子体中迅速加热电子达到产生x射线激光所需的温度,如图1所示.短脉冲掠入射角度由实现x射线激光的原子物理过程所需要的等离子体状态决定.为了将更多的入射激光能量沉淀到产生增益的等离子体区域中,需要首先针对所研究的x射线激光优化计算得到产生增益的密度区域,不同波长的x射线激光增益区对应不同的电子密度,对于中低原子序数 Z 的元素来说,增益区的电子密度一般在 10²⁰ cm⁻³左右.然后根据入射角度与电子密度的相关公式就可以得到所需要的掠入射角度.

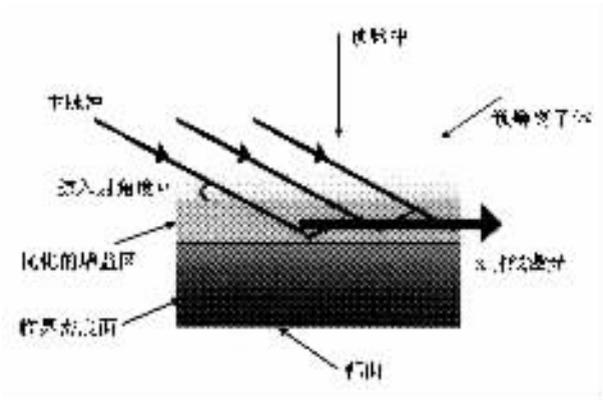


图1 掠入射驱动方案示意图

在实验中,预脉冲垂直入射到平面靶上,产生的等离子体在x方向膨胀.取真空和等离子体的界面为 z=0,入射角 phi 为入射激光波矢量和密度梯度方向之间的夹角,如图 2(a)所示.取类钼 Mo 离子最丰富且分布比较均匀的等离子体区间做增益区间,其电子密度设为 n_e.则入射激光掠入射到该增益区间

的角度有 sin² phi = epsilon(x),考虑无吸收时,epsilon(x) = 1 - n_e/n_c,n_c是入射激光对应的临界密度^[16].根据此公式便可对入射角度进行简单优化,保证驱动激光在此区域得到最大的吸收.实验前,我们利用一维流体力学程序 MEDUSA 对入射角度进行更细致的优化. MEDUSA 是一维拉格朗日流体力学程序,主要进行激光等离子体相互作用和x射线激光等方面的计算.此程序是针对正入射进行设计的.我们首先对程序进行了适当的改进,以模拟掠入射方案.由于类钼钼(18.9nm)x射线激光发生在低于临界密度的等离子体区域,并且我们要考虑的驱动脉冲长度在 1.5ps,强度低于 10¹⁵ W·cm⁻²,因而在处理等离子体对入射激光能量的吸收上主要考虑逆韧致吸收.

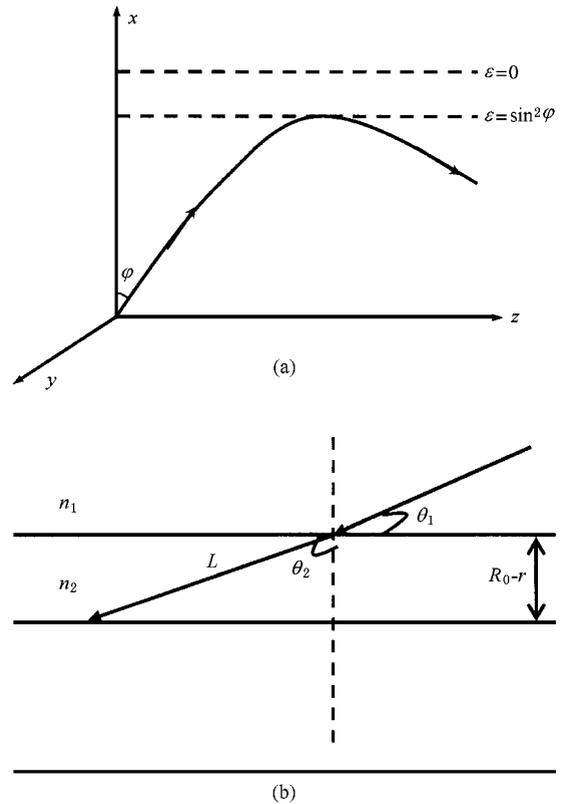


图2 激光在一维平面等离子体中的传播

程序中临界密度定义为: rho_c = (epsilon₀ M m_H m_e / Ze²) omega_L² (kg/m³)假定在等离子体边界 r = R₀ 处入射激光功率是 P_L(R₀) 则

$$P_L(r,t) = \exp[-\alpha(R_0 - r)]P_L(R_0,t) \quad (1)$$

吸收系数由下式给出:

$$\alpha = 13.51 \lambda^{-2} \beta^2 (1 - \beta)^{-1/2} T_e^{-3/2} \times (5.05 + \log \lambda T_e) \bar{Z}^2 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

其中 $\beta = \rho/\rho_c < 1$, λ 是激光波长.

正入射变化到斜入射,光波在增益介质中的传播路径增加,也就是说通过逆韧致吸收的路径增加.利用光线追踪法追踪短脉冲在预等离子体中的传播路径并对公式(1)加以修改.具体的计算过程如下:将长脉冲产生的预等离子体在垂直靶面方向上分成 N 个等离子体区域,由于预等离子体在预脉冲入射方向上存在电子密度梯度,所以掠入射激光在传播过程中会发生折射.假设激光从折射指数为 n_1 的平面层进入折射指数为 n_2 的平面层,根据折射定律有 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.当激光掠入射到等离子体时,激光在每个等离子体区域中的传播长度可以近似为 $L = (R_0 - r)\cos\theta_2$,其中 θ_2 为折射角,如图 2(b)所示.这样的处理,使得掠入射驱动激光在这个小区间的吸收可以近似为正入射的激光在 $L = (R_0 - r)\cos\theta_2$ 等离子体中的吸收.

3. 数值模拟结果

为了对我们的模拟结果进行验证,我们利用美国 LLNL 进行的掠入射类镍钼 x 射线激光实验^[13]驱动参数进行模拟.该实验使用的是 800nm 的光学激光驱动源,实验分为两个步骤,先是 70mJ, 200ps 的预脉冲垂直入射到平板钼靶上产生所需的预等离子体,然后 80mJ, 1.5ps 的主脉冲以接近 14° 的角度斜入射到预等离子体中,预脉冲和主脉冲聚焦后的焦线分别为 $15\mu\text{m} \times 4\text{mm}$ 和 $25\mu\text{m} \times 4\text{mm}$,两个脉冲之间的间隔是 500ps.此实验对于 4mm 长的靶获得了饱和输出,输出能量约为 10-20nJ.我们利用改造过的数值模拟程序对上述实验进行了模拟计算.

我们的数值模拟显示,对于波长为 18.9nm 的类镍钼 x 射线激光,在等离子体区域内的电子密度大约为 10^{20}cm^{-3} 时可以产生高的小信号增益系数.根据掠入射角度和入射激光在等离子体反射处电子密度之间的公式,得到主脉冲需要以角度 13.8° 沿靶面入射到预等离子体中,以确保驱动脉冲在 10^{20}cm^{-3} 密度区间得到最大吸收.图 3 给出了主脉冲峰值时刻的电子密度在垂直靶面方向上的分布.靶面位置在 $100\mu\text{m}$ 处,阴影部分表示的是这一时刻的增益区.增益区的电子密度接近 10^{20}cm^{-3} ,而且此等离子体区域内的电子密度梯度较小,有利于 x 射线激光的传播和放大.由于主脉冲持续的时间非常短,对预等离子体中电子密度的分布影响并不大,因此短脉

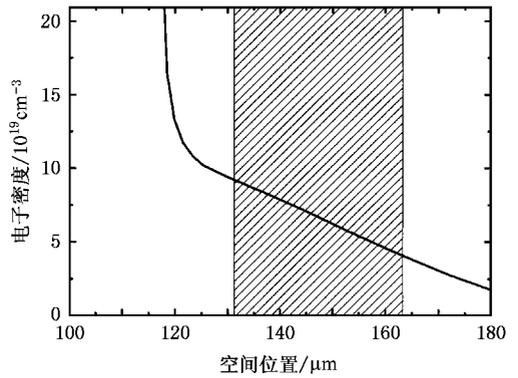


图 3 主脉冲峰值时刻电子密度在垂直靶面方向上的分布,阴影区是此时刻的增益区

冲的入射方案对电子密度的分布影响不大.图 4 比较了主脉冲掠入射(实线)和正入射(虚线)两种入射

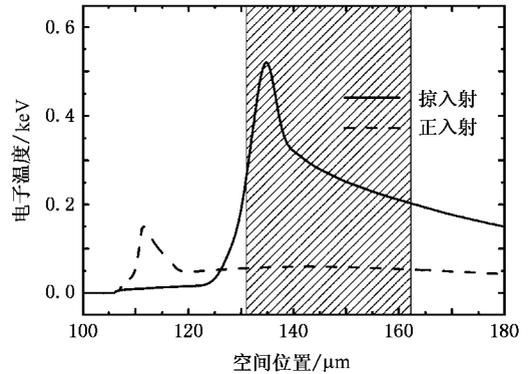


图 4 主脉冲峰值时刻电子温度在垂直靶面方向上的分布,虚线和实线分别表示主脉冲正入射和斜入射的情况,阴影区是此时刻的增益区

方案下电子温度的分布,图中所描述的是主脉冲峰值时刻的电子温度在垂直靶面方向上的变化,靶面位于 $100\mu\text{m}$ 处.从图中可以看出当主脉冲垂直靶面入射时,能量主要在临近面附近通过共振吸收机制被吸收,电子温度在临界密度面处(约为 $112\mu\text{m}$ 处)达到最大值,约为 150eV,在小于临界密度的增益区内(图中阴影部分)电子温度较低约为 55eV,远远达不到产生增益需要的温度.而当主脉冲以 14° 的角度斜入射到预等离子体区域时,增益区内最高电子温度可以达到 520eV.为了进一步解释相同的入射激光能量利用掠入射方案能够在优化的增益区将电子加热到高温,我们计算了入射激光能量在等离子体中的吸收.图 5 给出了主脉冲峰值时刻主脉冲在掠入射(实线)和正入射(虚线)两种情况下等离子体吸收的激光能量密度在垂直靶面方向上的分布,这里

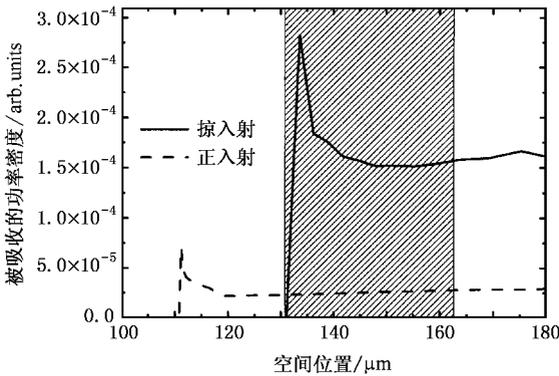


图5 主脉冲正入射(虚线)和斜入射(实线)情况下通过逆韧致吸收被等离子体吸收了的激光功率密度在垂直靶面方向上的分布,阴影区是此时此刻的增益区

的激光能量密度定义为一定体积内被吸收的激光能量与该体积内的电子密度之比.在正入射的情况下,激光能量的吸收主要发生在临界面附件,在产生增益的区域内等离子体的吸收相对较小,这与电子温度的分布相对应.在主脉冲掠入射的情况下,预等离子体区域内的密度梯度造成的折射效应会增加入射激光的传播路径,致使逆韧致吸收增加,在主脉冲的反射处吸收的激光能量密度达到最大,这也是电子温度在此处有最大值的原因.吸收效率由正入射方案的小于10%提高到掠入射方案的大于50%.

图6给出了利用该实验条件模拟得到的小信号增益在空间和时间上的分布.图中740ps对应的时刻是主脉冲的功率密度峰值时刻,靶面在100 μm 位置处.图中颜色由浅到深分别代表增益系数大于

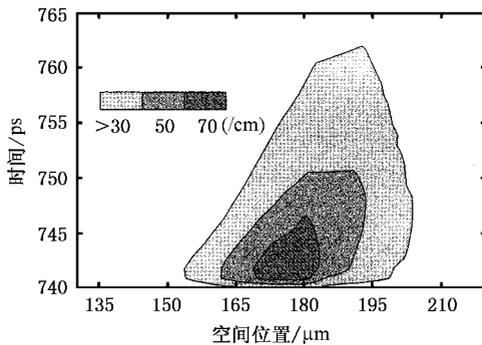


图6 模拟实验^[13]得到的小信号增益系数在空间和时间上的分布.图中颜色由浅到深分别代表了增益系数大于30,50,70 cm^{-1}

30,50,70 cm^{-1} .较高的增益系数($>70\text{cm}^{-1}$)在时间上大约持续5ps,在空间上的分布大约是10 μm .利用产生最大小信号增益时刻的相关物理量,如增益系

数,电子密度和上能级粒子数等计算x射线激光在等离子体介质中的传输和放大.图7中实线表示的是模拟上述实验条件得到的激光输出强度随等离子体靶长的变化.从图中可以看出,当增益介质长度约为0.41cm时开始出现饱和输出.利用Linford公式^[17]拟和得到有效增益系数为36.7,增益长度积约为15.1.这与实验中利用4mm长的靶达到饱和输出的结果基本相同,LLNL实验测量值由图中圆点表示.

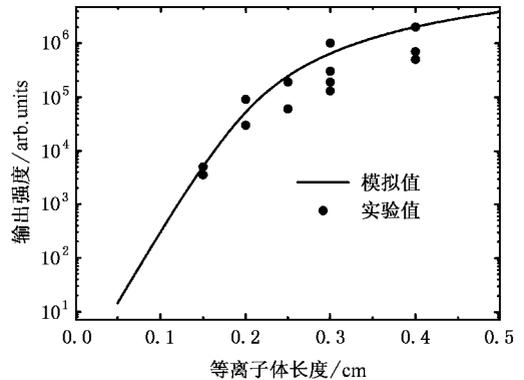


图7 x射线激光输出强度随靶长的变化.图中圆点表示的是参考文献^[13]中的实验测量值,实线表示的是模拟结果

我们的模拟结果和LLNL的实验结果的对比证明了我们的x射线激光数值模拟程序的正确.这为以后的优化设计和理论分析掠入射x射线激光提供了必要手段.

4. 结 论

掠入射主要分为两步进行,长脉冲正入射到平板靶面上产生向外膨胀的预等离子体,然后主脉冲以一定角度斜入射到预等离子体中,将激光能量主要沉淀在能够产生增益的区域.这主要是利用了斜入射的激光在介质内的传播长度要大于正入射的情况,这样通过逆韧致吸收沉淀在介质内的激光能量大大增强,使得较少的入射激光能量就能产生所需要的电子温度,大大提高了驱动效率,同时斜入射的角度相对较小,这种入射方案本身具有行波驱动的优点.对于掠入射角度的选择,主要是根据产生增益所需的电子密度进行选择,使掠入射激光在所需要的等离子体区域进行反射.

本文以波长为18.9nm类镍钼x射线激光为例分析了掠入射瞬态驱动方案产生x射线激光.在原

有一维流体力学数值模拟程序基础上将驱动激光从正入射驱动方案改为掠入射驱动方案,具体模拟了类镍钼 x 射线激光,为了便于验证我们的程序和对所得到的结果进行比较,本文的驱动结构参数都是采用美国 LLNL 实验室进行的实验^[13]参数,具体比较了相同驱动条件下主脉冲正入射和掠入射两种驱

动方案得到的电子密度、电子温度以及介质吸收的激光功率密度等参数,得到在相同驱动能量下,掠入射方案提高了增益区内的电子温度和吸收效率,提高了能量转换效率.利用实验参数对掠入射驱动方案产生 18.9nm 类镍钼 x 射线激光的输出强度和增益系数进行了模拟,得到与实验相符的结果.

-
- [1] Matthews D L *et al* 1984 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
- [2] Nilsen J and Moreno J C 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3376
- [3] Zhang Jie, MacPhee A G, Nilsen J *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3856
- [4] Zhang Jie, MacPhee A G, Lin J *et al* 1997 *Science* **276** 1097
- [5] Nickles P V, Lewis C L S, Kalachnikov M P *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748
- [6] Afanasiev Yu V and Shlyaptsev V N 1989 *Sov. J. Quantum Electron.* **19** 1606
- [7] Rus B, Mocek T, Präg A R *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **66** 063806
- [8] Lin J Y, Tallents G J, MacPhee A G *et al* 1999 *Opt. Commun.* **166** 211
Kawachi T, Kato M, Tanaka M *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **66** 033815
- [9] Dunn J, Li Y L, Osterheld A L *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4834
- [10] Tommasini R, Loewenthal F, Balmer J E *et al* 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1664
Sebban S, Daido H, Sakaya N *et al* 2000 *Phys. Rev. A* **61** 043810
Kawachi T, Kado M, Tanaka M *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **66** 033815
- [11] Janulewicz K A, Lucianetti A, Priebe G *et al* 2003 *Phys. Rev. A* **68** 051802
- [12] Ozaki T, Ganeev R A, Ishizawa A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 253902
- [13] Li R X, Ozaki T, Kanai T and Kuroda H 1998 *Phys. Rev. E* **57** 7093
- [14] Keenan R, Dunn J, Patel P K *et al* *Talk on the 9th International Conference of X-Ray Lasers*, Beijing, China
Keenan R, Dunn J, Patel P K *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 103901
- [15] Dong Q L, Yan F, Zhang J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 603
- [16] Christiansen J P, Ashby D E T F and Roberts K V 1974 *Computer Phys. Commun.* **7** 271
- [17] Peng H M, Wang S J *et al* 1997 *X-ray Laser*(Beijing: Science Press)(in Chinese [彭惠民、王世绩等 1997 x 射线激光(北京:科学出版社)])
- [17] Linford G J, Poressini E P, Sooym W R and Spaeth M L 1974 *Appl. Opt.* **13** 379

Numerical simulation of x-ray lasers pumped by grazing incidence pulses^{*}

Yan Fei¹⁾ Zhang Jie^{1)†} Dong Quan-Li¹⁾ Lu Xin¹⁾ Li Ying-Jun²⁾

¹⁾ (Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²⁾ (Department of Physics, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

(Received 19 January 2005; revised manuscript received 30 March 2005)

Abstract

Numerical simulation of the Ni-like Mo x-ray laser at 18.9 nm ($4d \rightarrow 4p$, $J = 0 \rightarrow 1$) pumped by grazing incidence pulses is performed using a modified one-dimensional hydrodynamic code MEDUSA. By comparing the electron density, the electron temperature, and the absorbed laser energy density obtained by the grazing incidence and the normal incidence schemes respectively, it is clearly shown that the absorption efficiency is greatly increased in the grazing incidence scheme due to the increased absorption of driver laser in the gain region.

Keywords : x-ray lasers, grazing incidence, laser plasmas

PACC : 4255V, 5250J

^{*} Project supported by the NSFC (Grant Nos. 10176034, 10374114 and 10374116) and the NKBRSF of China (Grant No. G1999075206) and the National Hi-tech ICF program of China.

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