

线聚焦——实现实用 X 射线激光饱和输出的关键技术*

李汉明^{1,2} 李英骏^{1,2,†} 王琛³ 张杰²

(1 中国矿业大学(北京校区) 北京 100083)

(2 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(3 上海激光等离子体研究所 上海 201800)

摘要 自从 X 射线激光问世以来,在产生机制从准稳态到瞬态,抽运方式从横向抽运到纵向抽运,再到全新的掠入射抽运方式的过程中,大增益的饱和输出一直是研究的根本目标.线聚焦问题是实现辐照均匀化进而达到饱和输出的关键.伴随着抽运方式的发展,先后出现了一系列对应的线聚焦器件,取得了不错的线聚焦效果.文章对 X 射线激光发展历史上出现的主要线聚焦器件进行了总结.

关键词 X 射线激光 纵向抽运 掠入射 线聚焦 饱和输出

Line focusing—a key factor in the generation of saturated output from X-ray lasers

LI Han-Ming^{1,2} LI Ying-Jun^{1,2,†} WANG Chen³ ZHANG Jie²

(1 China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

(2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

(3 Shanghai Institute of Laser Plasmas, Shanghai 201800, China)

Abstract Since the first demonstration of X-ray laser the pump design has developed from transverse to longitudinal to the new grazing incidence pumping scheme, the main objective being to realize saturated output. Line focusing is a key factor in the generation of saturation output through uniform irradiation. With the development of various pumping schemes a series of line focus systems have been successfully implemented. An overview of the main types of these systems will be presented.

Keywords X ray laser, longitudinal pump, grazing-incidence pump, line focus, saturated output

1 引言

X 射线激光就是波长在 X 射线波段(30—0.01 nm)的激光,兼具了 X 射线波长短、穿透能力强和激光方向性好、相干性好的优点,使得 X 射线激光在很多领域都有着巨大的应用前景.在 X 射线激光的实现过程中,面临的困难主要表现在两个方面:(1)对驱动源要求高;(2)无腔运转.因此,尽管在激光实现之初(1960 年)就有人研究向 X 射线波段的推广工作,但是直到 1984 年才在实验室第一次演示了 X 射线激光^[1,2].目前,经过 20 多年的发展,X 射线激光取得了

很大的发展,获得了 7nm 到 50nm 的类氙 Ge^[3], Se^[4], Y^[5], 以及类镍 Ag^[6], Sm^[7] 等的饱和输出,驱动激光能量从几 kJ 到百 mJ,脉冲宽度从几 fs 到 1ns.其中已经有一些小型化的台式装置^[8]问世,进行了一系列应用实验研究.

在增益介质中实现粒子数反转是产生激光的必要条件,这就需要大的激光驱动能量.在准稳态条件下,由于驱动激光的作用时间比较长,因而在等离子体中基本达到了稳态或者准稳态,其特征就是空间

* 国家自然科学基金(批准号:10474137)、国家高技术研究发展计划(批准号:2005AA847050)资助项目

2005-05-23 收到初稿 2006-06-16 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: lyj@aphy.iphy.ac.cn

位置固定,持续时间长,增益系数稳定但是偏低.同时驱动激光需要大型的高功率激光支持,从而限制了X射线激光的发展和应用.

与稳态相对应,瞬态机制指的是在增益区等离子体远没有达到平衡的时候,依靠快速的驱动和输运来获得瞬时的粒子数反转,从而产生X射线激光.特征就是增益系数很高,但持续时间很短.目前已经有很多实验室进行了利用几个皮秒脉冲宽度激光作为预脉冲的长短脉冲联合驱动X射线激光的实验演示,获得了一系列波长的饱和输出的X射线激光^[9,10].增益区的不稳定性在很大程度上决定了很难做出较长的增益长度,很难达到饱和输出.对于X射线激光这种依靠自发辐射放大的系统来说,必须有一定长度的增益区才能获得有效地增益放大.当增益区的持续时间比激光在增益区中传播时间还要短的时候,末端的等离子体不但不会对X射线激光有放大作用,相反还会有吸收,大大影响了输出强度.因此必须采用行波抽运驱动方式.简单地说,就是依照X射线激光的前进方向,依次驱动,使得增益区的产生和X射线激光束的前进同步,能够始终都对激光束进行放大.

纵向驱动方式作为一种自然满足行波的驱动方式,李儒新等人^[11]在1998年提出了纵向抽运方案.2002年,日本的Ozaki等人^[12]第一次在实验上用类镍钼演示了这种方案.首先,300ps的预脉冲线聚焦在2mm长的靶上,形成预等离子体.接着经过几个ps的延迟,475fs的高强度脉冲沿纵向点聚焦抽运预等离子体.实验中他们获得了X射线激光输出.由于受到等离子体吸收和密度梯度引起的折射的影响,仅有的2mm增益长度,不足以获得X射线激光的饱和输出.

由于X射线激光通常只能通过自发辐射放大(ASE)单程模式运行,因此需要产生一个相对均匀的柱状等离子体来实现.对于激光打靶驱动方式,通常是引入像散等光学手段,使得驱动激光在靶面上聚集成一条细长而且均匀的焦线,以获得均匀的线状等离子体.

根据驱动方式,分为纵向和横向两种.本文的第二部分主要对比了横向驱动和纵向驱动的线条聚焦,第三部分是结论和展望.

2 X射线激光发展历程中出现的线条聚焦器件

横向驱动线条聚焦是最常用的产生线条聚焦的方式,横向驱动指的是线条聚焦的方向与入射激光前进方向基本垂直的情况.它通常采用单柱面透镜系统、相对旋转负柱面透镜系统、离轴球面反射系统、柱面透镜列阵系统、列阵光劈系统等等来实现.其中单柱面透镜系统因构造简单而获得广泛使用,但其焦线的均匀性并不好,需要通过增加光阑来改善,能量利用率较低.柱面透镜列阵系统能够得到效果非常好的线条聚焦,并且能量的利用率非常高,因此也获得了很好的应用.上海的高功率激光联合实验室(NLH-PLP)在实验中就一直使用此类的线条聚焦系统,在十多年的实践中获得了非常好的使用结果^[13].

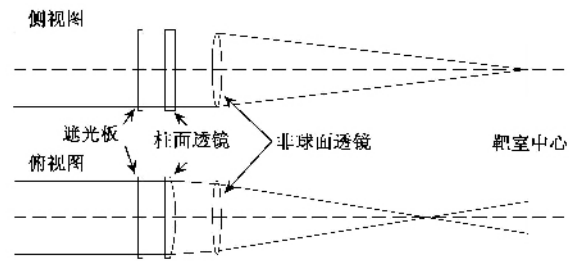


图1 单柱面透镜线条聚焦系统

图2是柱面透镜列阵线条聚焦系统的原理示意图,其基本原理和单柱面线条聚焦系统类似,都是通过柱面透镜引入的像散来实现.但是通过把柱面透镜分成单元列阵的形式把入射激光分割,每个单元的激光都在主聚焦透镜的焦面上形成一段独立的线条聚焦.各个单元的线条聚焦互相叠合,就可能形成一条在长度方向上强度分布非常均匀的线条聚焦.图3为王琛^[13]等人测得的不等宽五单元柱面透镜列阵线条聚焦实验效果图.

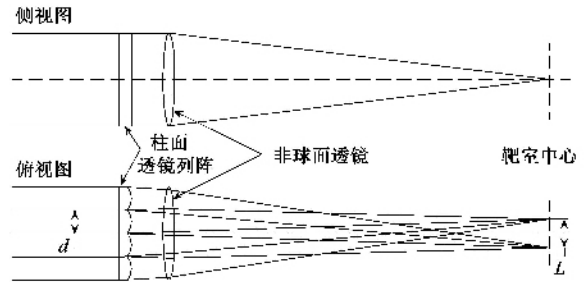


图2 柱面透镜列阵线条聚焦系统原理示意图

与横向驱动线条聚焦相对应,纵向驱动线条聚焦指的是线条聚焦的方向与入射激光前进方向相一致的情况.两种驱动方式各有优缺点,特别是在对于气体作为工作物质、超短超强激光作为驱动源的情况下,纵

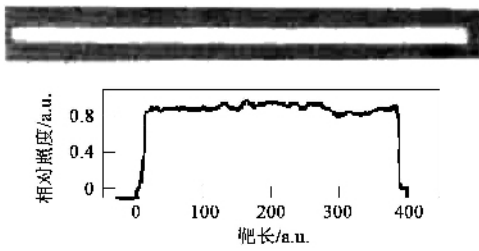


图3 王琛等人等宽五单元柱面透镜阵列线聚焦实验效果图

向驱动的优点更加显著. 产生纵向驱动线聚焦的方式一般是采用长焦距透镜或球面反射镜把驱动激光聚焦到一个点, 那么在焦点前后的小段范围内, 光束的发散很小, 可以近似地认为是一段均匀性很好的轴向线聚焦^[14]. 一般情况下, 增益介质, 特别是高温高密度等离子体对抽运激光的强烈吸收作用, 会使抽运强度随着介质长度的增加而显著下降, 因此纵向抽运的线聚焦长度不可能很长, 通常在几个毫米的范围内才可能得到相对比较满意的线聚焦效果. 但是由于出光方向和驱动方向一致, 自然地满足行波条件是它在超短激光驱动中获得应用的最主要原因.

为了改善纵向驱动线聚焦的均匀性, 一些实验方法, 例如二元随机相位菲涅尔波带片等方法^[15]被提了出来, 基本的原理参见图4. 波带片可以等效地看作是透镜, 并且可以通过改变中心带的半径改变焦距. 随机相位波带片的每个扇面的焦点对应在轴向上不同位置的一个点. 如果扇面分割数目增加, 并且各中心带半径近似连续变化, 那么各焦点互相靠近, 组合就可以得到沿轴向的线聚焦. 从理论上讲, 该方案的确能够很好地改善均匀性, 但是能量利用率偏低, 在线聚焦周围还存在较大的散射光, 并且还没有经过实验的检验.

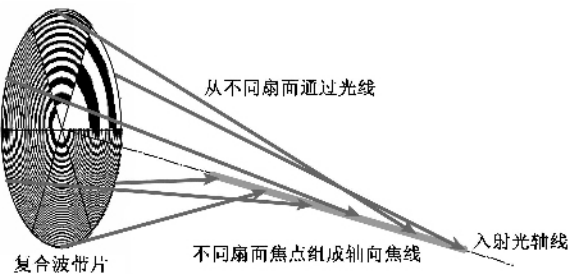


图4 利用二元随机相位菲涅尔波带片产生轴向线聚焦

由于纵向抽运自身存在的一系列问题, 例如焦线均匀性不好, 长度不能控制等, 因此应用不是很广

泛. 目前使用的还是横向驱动方式. 对于这种方式, 实现真正的行波有很大难度. 作为一种简化, 利用台阶镜方法能够实现“准行波”驱动, 基本上目前采用的瞬态 X 射线激光实验研究, 都是采用不同形式的台阶镜来实现行波驱动^[16]. 台阶镜的结构如图5所示, 入射激光波前起始光程相等, 经过台阶镜后, 在与光线前进方向垂直的面上, 各参考点对应的光程已经发生变化, 也就是说, 图中 7' 处的等光程波面相对于 1' 处已经落后了. 如果用来产生线聚焦, 则 7' 处对应的等离子体增益区的形成将会晚于 1' 处对应的增益区的形成.

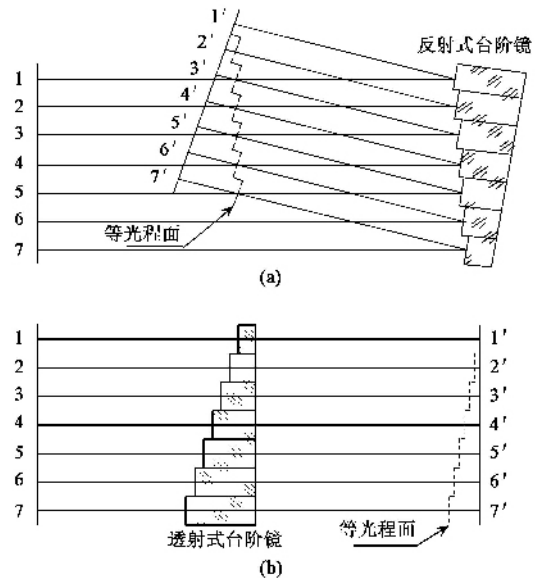


图5 台阶镜原理示意图 (a)反射式 (b)透射式

为了实现真正意义上的行波抽运, 人们提出了一种全新的轴向线聚焦方案. 众所周知, 抽运激光在等离子体中传输的时候, 由于受到等离子体的吸收和密度梯度引起的折射影响, 激光强度指数衰减, 为了达到一种真正意义上的均匀辐照, 不同增益区的能量反向补偿是必须的. 利用具有 3 个不同的通光口径和曲率半径的球面组合, 可以实现入射激光的分光点聚焦, 从而有效地增加抽运激光聚焦的线聚焦长度. 采用组合透镜(如图6所示), 可调制聚焦点能量, 从而实现轴向强度分布的均匀. 计算结果表明, 线聚焦长度可以进行调制, 同时能量可以实现反向补偿, 基本上可以满足激光等离子体实验的要求. 至于实验上的应用有待证实.

2004 年, 国际 X 射线激光会议提出了一些新的研究成果, Dunn 等人^[17]提出了掠入射的抽运方式, 如图7所示. 这. 与传统方式相比, 它利用全反射原理, 增加等离子体对激光的二次吸收, 从而增加激

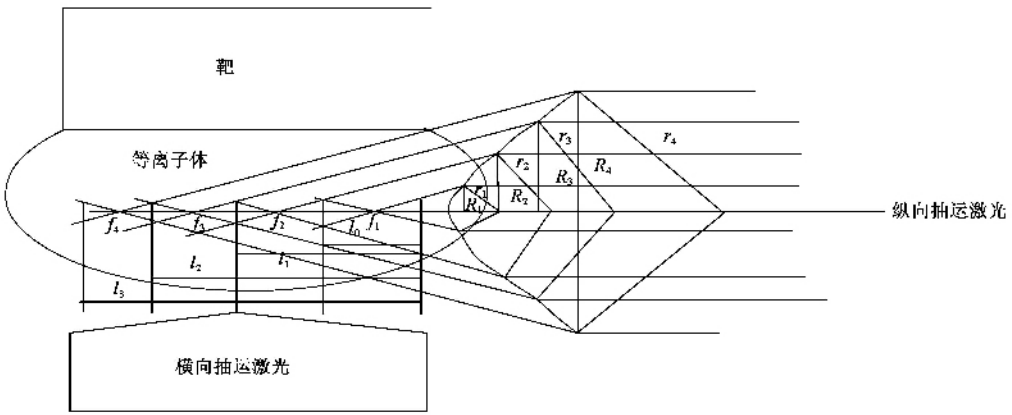


图6 纵向抽运中一种全新的线聚焦器件——组合透镜

光增益区长度,并且在实验上取得了巨大的成功,抛物镜的采用,获得了 $5\text{mm} \times 15\mu\text{m}$ 的线聚焦,实现了 18.9nm 类镍铝 X 射线激光的饱和输出^[18]. 在掠入射实验布局中,实现线聚焦的关键器件是共轴抛物镜. 入射激光束以一定的掠入射角入射在抛物镜上,初始入射激光面的光程相等,由于入射激光掠入射,在与反射光线前进方向垂直的面上,各参考点对应的光程已经发生变化,反射激光束以二倍的掠入射角辐照靶面,在靶面方向上实现线聚焦.

碑式的器件. 其中横向抽运中的单柱面聚焦系统和柱面列阵已经取得了很好的实验效果,波带片有待进一步研究,纵向抽运中的组合透镜也已经进行了深入研究,掠入射的共轴抛物镜取得了一定的实验成果. 各种线聚焦器件的提出以及线聚焦技术的不断发展,必将获得更高增益,更加接近实用的 X 射线激光输出.

参 考 文 献

[1] Rosen M D *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1985 54 2
 [2] Mattews D L *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1985 54 :2
 [3] Carillon A , Chen H Z , Dhez P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1992 ,68 :2917 ; Zhang J , Warwick P J , Wolfrum E *et al.* Phys. Rev. A ,1996 ,54 :R4653
 [4] Koch J A , MacGowan B J , DaSilva L B *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1992 ,68 3291
 [5] DaSilva L B , MacGowan B J , Mrowka S *et al.* Opt. Lett. , 1993 ,18 1174
 [6] Zhang J , MacPhee A G , Nilsen J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 ,78 3856
 [7] Zhang J , MacPhee A G , Lin J *et al.* Science ,1997 276 :1097
 [8] Rocca J J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1996 ,77 1476
 [9] Nickles P V *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 78 2748
 [10] Dunn J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 80 2825
 [11] Li R *et al.* Phys. Rev. E ,1998 ,57 7093
 [12] Ozaki T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 253902
 [13] Wang S J *et al.* , Chin. Phys. Lett. ,1991 ,8 :618
 [14] Nagata Y *et al.* Phys. Rev. Lett ,1993 ,71 3774
 [15] Stevenson R M *et al.* Optics Letters ,1994 ,19 363 ;Bett T H *et al.* Applied Optics ,1995 ,34 #025
 [16] 王世绩等. 中国激光杂志(B) ,1993 2 :481[Wang S J *et al.* Chin. J. Lasers B ,1993 2 :481(in Chinese)];王琛等. 中国激光 ,2002 29 37 [Wang Ch *et al.* China Laser. ,2002 29 : 37(in Chinese)]
 [17] Dunn J *et al.* Oral report , ICXRL(Beijing) 2004
 [18] Keenan R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,94 :103901

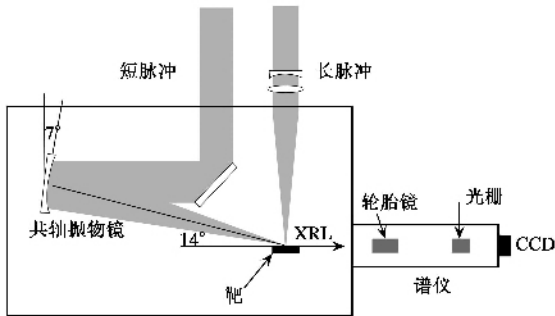


图7 掠入射实验布局

入射激光掠入射到共轴抛物镜上,可以实现较好的线聚焦,基本上可以满足 X 射线激光实验要求. 共轴抛物镜必将成为未来掠入射线聚焦中的关键器件.

3 结 论 和 展 望

在 X 射线线聚焦的发展进程中,产生机制从准稳态到瞬态,抽运方式从横向抽运到纵向抽运,再到全新的掠入射抽运方式的过程中,线聚焦器件先后经历了柱面镜、柱面镜列阵、Fresnel 波带片等里程