

利用皮秒脉冲激光驱动瞬态 X 射线激光^{*}

王 琛¹⁾ 方智恒¹⁾ 王 伟¹⁾ 熊 俊¹⁾ 孙今人¹⁾ 吴 江¹⁾ 傅思祖¹⁾ 顾 援¹⁾
王世绩¹⁾ 张国平²⁾ 郑无敌²⁾ 黄关龙³⁾ 管福义³⁾ 谢兴龙³⁾ 林尊琪³⁾

1) 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2) 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

3) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2005 年 6 月 3 日收到, 2006 年 4 月 21 日收到修改稿)

报道了利用皮秒激光驱动产生瞬态类镍银 X 射线激光的实验结果. 采用一路脉冲宽度为数百皮秒的激光作为预脉冲, 配合另一路皮秒激光作为主脉冲联合驱动平面靶, 获得了一定强度的类镍银 X 射线激光输出, 输出能量约为 5—10 nJ.

关键词: 瞬态 X 射线激光, 长短脉冲联合驱动, 皮秒脉冲激光

PACC: 4255V

1. 引 言

由于独特的优点和广泛的应用前景, X 射线激光研究受到了广泛的重视. 目前已经取得很大进展, 获得了波长从 3.5 到 50 nm 具有一定强度、甚至饱和强度的 X 射线激光输出^[1-7], 并且已在等离子体诊断、生物成像等方面开展了初步的应用研究^[8-15]. 但是, 这些进展大都是在以大型激光器作为驱动源的基础上获得的, 驱动条件和成本都很高. 因此, X 射线激光小型化的研究逐步开展起来. 小型化就是指利用尺寸更小、成本更低、更容易获得的方式来产生 X 射线激光. 迄今为止, 已发展了毛细管放电、高次谐波、超短超强激光驱动 X 射线激光等多种方式. 特别是随着近年来皮秒乃至飞秒超短超强激光技术的发展, 利用超短超强激光驱动瞬态 X 射线激光成为 X 射线激光小型化发展的一个重要方向. 国外已有多家实验室报道了利用若干皮秒脉冲宽度超短超强激光作为主脉冲的长短脉冲联合驱动 X 射线激光的实验结果^[16-22]. 国内也有一些单位在进行此类研究, 但尚未见实验结果报道.

本文介绍了利用超短超强激光驱动瞬态 X 射线激光的原理, 给出了利用皮秒激光驱动瞬态 X 射

线激光的方案及实验结果.

2. 瞬态 X 射线激光的基本原理

早期 X 射线激光通常采用大型高功率激光器作为驱动源. 驱动源的脉冲宽度为数十皮秒到数纳秒, 能量数百到数千焦耳. 由于驱动激光与靶的作用时间比较长, X 射线激光的增益区经过充分发展, 可以达到准稳态的平衡状态, 这种方案的 X 射线激光被称为准稳态 X 射线激光. 准稳态增益区的特征是空间位置相对稳定、持续时间长、增益系数稳定但是偏低.

利用超短超强激光驱动的瞬态 X 射线激光机制则完全不同. 驱动激光的脉冲宽度是皮秒或飞秒量级的, 在这么短的作用时间内, 等离子体还来不及动态平衡到准稳态. 此时增益区可能具有非常高的增益系数, 但持续时间却非常短, 由此产生的 X 射线激光被称为瞬态 X 射线激光. 增益区的特征是持续时间非常短、空间位置变化非常快, 因此很难获得较长的增益长度, 通常还需要行波驱动. 但是由于增益系数非常高, 也可能获得饱和输出的 X 射线激光.

在瞬态 X 射线激光中, 作为驱动源的超短超强

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 69989801)和国家高技术研究发展计划惯性约束聚变基金(批准号: 863-804-7-3, 863-804-2-9)资助的课题.

激光能够产生足够高的功率密度,但由于持续时间短,总能量比较低,在靶材料的电离、加热等方面效率很低.即使在主脉冲数纳秒前增加一个或多个预脉冲,也不能得到好的结果,因此通常采用长短脉冲联合驱动方式,即在超短超强激光脉冲到达之前,增加一个脉冲宽度数百皮秒的长脉冲激光作为预脉冲产生预等离子体.通过控制长短脉冲的时间关联,超短超强的主脉冲激光在合适的时机注入预等离子体,瞬间就可以产生非常高的增益,从而产生 X 射线激光的输出.预脉冲和主脉冲是由两路激光组成的,结构如图 1 所示.目前已进行的此类研究基本上都是采用这种长短脉冲联合驱动方式的,区别主要在于长短两路脉冲的注入方式的不同.

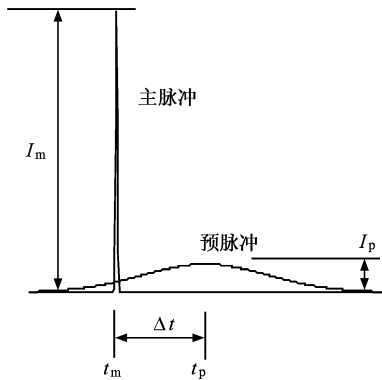


图 1 长短(预主)脉冲时间结构示意图

3. 长短脉冲联合驱动实验方案

实验在上海高功率激光物理国家实验室的“二路”激光装置上进行。“二路”激光装置能够同时输出两路脉冲宽度约 300 ps、最大能量约 25 J 的激光脉冲.其中一路激光经过光栅压缩后,可获得脉冲宽度约 1 ps 的啁啾脉冲放大的超短超强激光,其最大的输出能量约 15 J.

实验排布如图 2 所示.作为预脉冲的一路长脉冲激光的脉冲宽度约为 300 ps,能量为 1—15 J,从西侧窗口进入靶室,分别经过凸柱面透镜、窗口玻璃、主聚焦透镜,在靶室中心靶位处形成水平方向的线聚焦.作为主脉冲的一路短脉冲激光的脉冲宽度约为 1 ps,能量为 1—15 J,从东北侧进入靶室后,经过平面镜、凹柱面反射镜和离轴非球面反射镜,同样在靶位处形成水平方向的线聚焦.两条线聚焦以约 25° 的角度入射,在水平方向重叠,如图 2(b)所示,从而

联合驱动平面靶以产生 X 射线激光.长短两路激光产生的线聚焦的尺寸均为 $50 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$,由于采用的是单柱面线聚焦系统,焦线强度分布不均匀,因此只使用中间比较均匀的部分.实验中使用玻璃基板上镀约 $1 \mu\text{m}$ 金属膜的平面靶,最大的靶长度约 6 mm,以保证产生的等离子体始终位于强度比较均匀的线聚焦范围内.

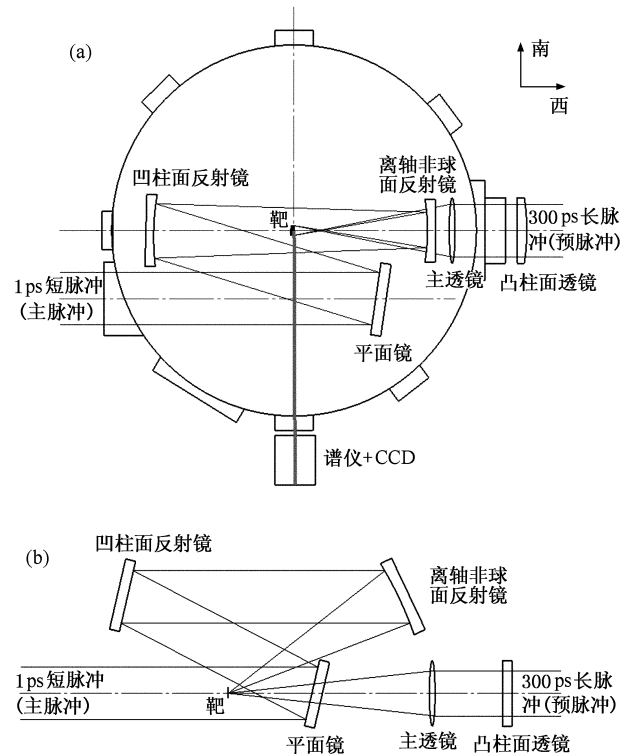


图 2 长短脉冲联合驱动 X 射线激光实验方案示意图 (a)俯视图 (b)侧视图

经过理论模拟计算,发现只利用脉冲宽度约 300 ps 的预脉冲产生的预等离子体,与 1 ps 的主脉冲配合仍难以获得很好的结果.因此,实验中在预脉冲之前又增加了一个预-预脉冲,强度为预脉冲的 5%—10%,时间间隔 1—4 ns.通过调整这些参数,可以对预等离子体的产生条件进行优化,从而与主脉冲达到比较好的匹配.主脉冲峰值与预脉冲峰值之间的时间间隔也是可调的($\pm 1 \text{ns}$),初始值选择主脉冲落后预脉冲约 120 ps.

靶室北面放置 1200 线平焦场光栅谱仪和软 X 射线电荷耦合器件(CCD)作为主要的诊断仪器进行 X 射线激光的时间积分谱线测量.光栅谱仪的狭缝距离靶出端约 900 mm,CCD 距狭缝 473 mm,光栅谱仪的角度接受范围由此可以确定为约 12 mrad.通过

水平移动谱仪和 CCD 能够探测到不同位置的 X 射线激光发射. 为了确定 X 射线激光在靶面法线方向上的折射角, 在狭缝上设置约 $75 \mu\text{m}$ 的细丝作为基准.

4. 实验结果及讨论

图 3 是在实验中经过优化以后获得编号为 050111020 的实验结果的局部记录图像. 图 4、图 5 分别为数据对应谱线 (CCD 单像素计数值) 以及在空间水平方向 (即靶面法线方向) 的强度角分布. 此发实验是采用长度为 6 mm 的 Ag 平面靶进行的类镍银 13.9 nm 的 X 射线激光出光实验. 实验中预脉冲宽度约为 414 ps (由示波器直接测量), 能量为 1.3 J, 预-预脉冲与预脉冲强度比为 7.3%, 时间间隔为 2.95 ns, 计算得到靶面功率密度约为 $5.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$. 主脉冲宽度约为 1 ps, 能量为 4.1 J, 靶面功率密度约为 $7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$. 主脉冲峰值落后预脉冲峰值约 120 ps.

图 4 显示该谱线在 8—20 nm 波段内占有绝对优势, 图 5 显示该谱线在靶面法线方向上有确定的角分布 (折射角约 10 mrad, 发散角约 4 mrad), 具有较高的强度和很好的方向性, 表明这不是普通的 X 射线辐射谱. 在谱仪、CCD、靶等各种条件均保持不变的情况下, 在光路中插入 Al 滤片. 根据记录到的 Al 吸收边 (波长 17.04 nm) 的位置, 配合光栅谱仪的色散关系, 比较精确地确定了该谱线的波长为 $13.9 \pm 0.1 \text{ nm}$, 表明该实验所获得的谱线确是类镍银 X 射线激光的输出. 根据实验条件和排布以及所用软 X 射线 CCD 对 13.9 nm 的吸收效率, 并且假定在靶面平行方向上发散角大致与法线方向上的一致 (通常 X 射线激光的输出光束呈弯月形, 在靶面平行方向上发散角要大得多), 初步估算出此发结果对应的类镍银 13.9 nm X 射线激光的输出能量为 5—10 nJ.



图 3 6 mm 靶长实验获得的类镍银 X 射线激光谱线局部记录图像

为研究驱动激光能量对 X 射线激光产生的影响, 在保持焦线宽度不变的情况下, 通过改变两路驱

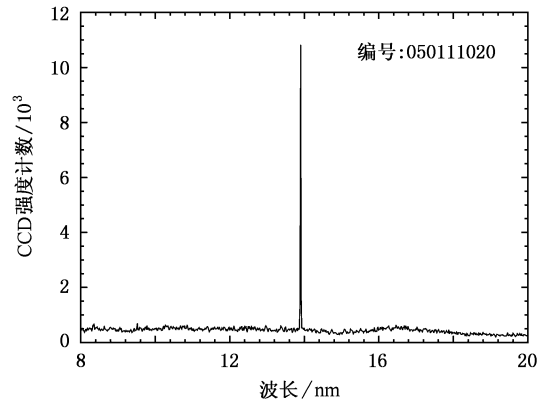


图 4 6 mm 靶长实验获得的类镍银 X 射线激光谱线

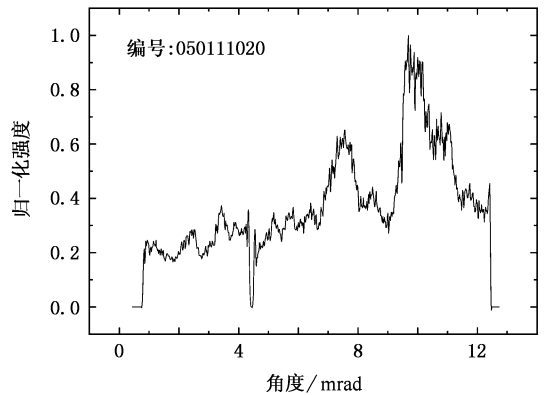


图 5 6 mm 靶长实验获得的类镍银 X 射线激光谱线角分布

动激光能量来记录类镍银 X 射线激光的输出强度. 结果表明, 在两路激光能量变化范围在 1—15 J 的情况下, 更高的能量并不能获得更好的结果. 特别是作为预脉冲的长脉冲激光, 当能量超过 3 J, 则类镍银 X 射线激光的谱线就很难记录到, 表明此时的条件不适合类镍银 X 射线激光的产生. 一种可能的解释是过高的预脉冲会使得预等离子体过早离化到较高状态, 从而预等离子体条件与短脉冲不能很好配合. 如果仔细地调整预-预脉冲和预脉冲之间的参数, 并且调节长短脉冲峰值之间的时间间隔, 也许能够找到更合适的条件. 但在当前这种实验条件下, 类镍银 X 射线激光最佳的出光条件为长脉冲激光的脉冲宽度约为 300 ps, 能量为 0.5—2 J, 预-预脉冲提前约 3 ns, 强度比约 5%, 短脉冲激光的脉冲宽度约为 1 ps, 能量约为 2—5 J. 对应的靶面功率密度分别为 $(2.0—7.0) \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 和 $(4.0—9.0) \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.

利用超短超强激光驱动 X 射线激光, 由于增益区的维持时间非常短, 通常需要采用行波或准行波

的驱动方式.本轮实验没有进行行波或准行波的驱动实验,对 X 射线激光的输出强度有较大影响.实验中,还进行了长度 4 mm 的平面 Ag 靶的实验,驱动条件与以上所述靶长 6 mm 的实验相一致,获得的类镍银 X 射线激光的强度相差不大(见图 4 与图 6 的比较),只是角分布在所测量的范围内差别很大,基本上观测不到明显峰(见图 5 与图 7 的比较).6 mm 靶的强度只比 4 mm 靶的强度高 30%,远远低于预想中几个量级的差别,一个重要原因可能就是等离子体增益区的严重老化.如果增加行波或准行波的驱动方式,有望获得更高强度,乃至饱和输出的瞬态 X 射线激光.

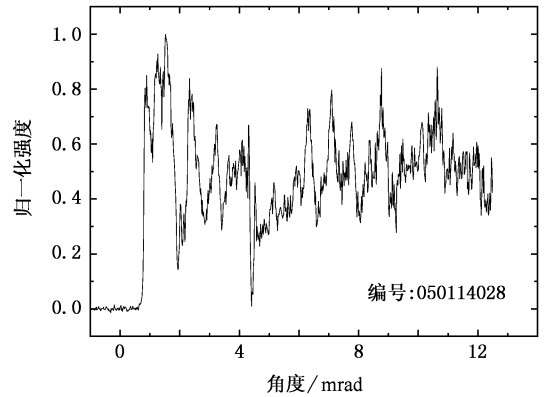


图 7 4 mm 靶长实验获得的类镍银 X 射线激光谱线角分布

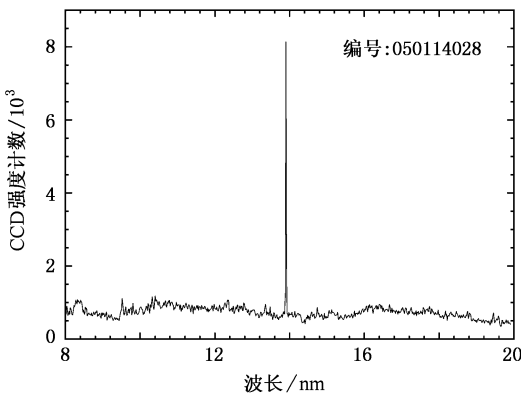


图 6 4 mm 靶长实验获得的类镍银 X 射线激光谱线

5. 结 论

利用百皮秒和皮秒超短超强激光联合驱动方式,实现了皮秒激光驱动瞬态小型化的 X 射线激光的输出.利用约 5 J 的总驱动能量,获得了较高强度的类镍银 13.9 nm 的 X 射线激光输出,能量为 5—10 nJ.在此基础上,优化方案并增加行波的驱动方式,有望获得更强乃至饱和的 X 射线激光,这将会对 X 射线激光本身及其各方面的应用研究产生很大的促进作用.

- [1] Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
- [2] Wang S J, Gu Y, Zhou G L *et al* 1991 *Chin. Phys. Lett.* **8** 618
- [3] Carillon A, Chen H Z, Dhez P *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 2917
- [4] Koch J A, MacGowan B J, DaSilva L B *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3291
- [5] Rocca J J, Clark D P, Chilla L A *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1476
- [6] Zhang J, MacPhee A G, Lin J *et al* 1997 *Science* **276** 1097
- [7] 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]
- [8] Trebes J E, Brown S B, Campbell E M *et al* 1987 *Science* **238** 517
- [9] DaSilva L B, Trebes J E, Balhorn R *et al* 1992 *Science* **258** 269
- [10] Röss D, DaSilva L B, London R A *et al* 1994 *Science* **265** 514
- [11] DaSilva L B, Barbee T W, Cauble R *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [12] Rocca J J, Moreno C H, Marconi M C *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 420
- [13] Wang C, Gu Y, Fu S Z *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 847 (in Chinese) [王琛、顾援、傅思祖等 2002 物理学报 **51** 847]
- [14] Filevich J, Rocca J J, Jankowska E *et al* 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056409
- [15] 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]
- [16] Nickles P, Shlyaptsev V N, Kalachnikov M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748
- [17] Dunn J, Osterheld A L, Shepherd R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 2825
- [18] Kalachnikov M P, Nickles P V, Schnürerl M *et al* 1998 *Phys. Rev. A* **57** 4778
- [19] Dunn J, Li Y, Osterheld A L *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4834
- [20] Kuba J, Klisnick A, Ros D *et al* 2000 *Phys. Rev. A* **62** 043808
- [21] King R E, Pert G J, McCabe S P *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **64** 053810
- [22] Klisnick A, Kuba J, Ros D *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **65** 033810

Experimental study of a transient X-ray laser pumped by a picosecond pulsed laser^{*}

Wang Chen¹⁾ Fang Zhi-Heng¹⁾ Wang Wei¹⁾ Xiong Jun¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Wu Jiang¹⁾ Fu Si-Zu¹⁾
Gu Yuan¹⁾ Wang Shi-Ji¹⁾ Zhang Guo-Ping²⁾ Zheng Wu-Di²⁾ Huang Guan-Long³⁾
Guan Fu-Yi³⁾ Xie Xing-Long³⁾ Lin Zun-Qi³⁾

¹ *Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*

² *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*

³ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

(Received 3 June 2005 ; revised manuscript received 21 April 2006)

Abstract

This paper presented the results of experimental studies on transient soft X-ray laser using a picosecond pulsed laser facility. A rather intensive Ni-like Ag X-ray laser at 13.9 nm with output energy of about 5—10 nJ was obtained by irradiating the solid flat targets with a several hundred picosecond long laser pulse in combination with an 1 ps ultra-short laser pulse.

Keywords : transient X-ray laser , united driving of long and short pulse lasers , picosecond pulse lasers

PACC : 4255V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69989801) and the National High Technology Development Program for Inertial Confinement Fusion Foundation of China (Grant Nos. 863-804-7-3 863-804-2-9).