

反射镜双程放大对类氩锗软 X 射线激光的输出影响研究*

安红海¹⁾ 王琛^{1)†} 方智恒¹⁾ 熊俊¹⁾ 孙今人¹⁾ 王伟¹⁾ 傅思祖¹⁾
乔秀梅²⁾ 郑无敌²⁾ 张国平²⁾

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 100080)

(2010年9月4日收到; 2010年12月22日收到修改稿)

纳秒量级激光驱动的一类氩锗软 X 射线激光具有出光稳定和输出强度大等优点, 在诸多领域拥有很好的应用价值. 研究了通过在光路中增加一块多层膜反射镜实现双程放大对出光特性的影响. 通过估算和实验, 证实了增加反射镜双程放大确实能够提高类氩锗软 X 射线激光的输出强度, 对于 24mm 的双程放大长度, 总输出强度会增加约 2.3 倍. 但同时这种模式也带来了光束质量的下降, 对应用研究并非完全有益.

关键词: 软 X 射线激光, 反射镜双程放大, 增益饱和

PACS: 42.55.Vc

1. 引言

具有短波长、高强度、强相干性的软 X 射线激光 (XRL) 在物理学、生物学、化学、材料学以及惯性约束核聚变 (ICF) 等领域中具有广泛的应用前景^[1-17]. 利用纳秒量级软 X 射线激光脉冲宽度较长的特点配合 X 射线条纹相机可以对等离子体中快速发展的过程进行时间分辨的测量, 对诸如瑞利-泰勒 (R-T) 不稳定性发展等 ICF 感兴趣的问题的研究具有重要意义. 纳秒量级激光驱动的电子碰撞激发类氩锗软 X 射线激光正是进行这种时间分辨诊断的最佳探针光源之一. 类氩锗软 X 射线激光在国内外已有相当长的研究历史, 包括利弗莫尔 (LLNL) 在内的多家实验室均取得了饱和输出的好结果^[18,19].

国内高功率激光联合实验室对激光辐照平板厚靶产生类氩锗软 X 射线激光进行了深入研究^[20-24], 通过发展双靶对接、多靶串对接、反射镜双程放大等多种技术手段, 获得了近衍射极限的深度增益饱和的类氩锗软 X 射线激光输出. 所有这些技术, 主要的目

的是增加有效增益介质的长度. 对于纳秒激光驱动的一类氩锗软 X 射线激光, 尽管增益区维持时间较长, 相对比较稳定, 但是增益系数不大, 因此需要较长的增益长度才可能获得饱和输出; 但是单纯通过增加靶长的手段, 会由于强烈的折射效应而难以获得理想的结果. 双靶对接、多靶对串接、反射镜双程放大等技术手段的采用比较好的解决了折射效应和靶长配合这个问题. 关于双靶对接、多靶串对接已有较多详细的讨论, 本文针对反射镜双程放大方法的影响进行了深入研究. 通过仔细研究反射镜双程放大的原理, 对加与不加反射镜的情况进行了输出的估算与比较, 并分别进行了实验研究.

2. 反射镜双程放大原理

软 X 射线激光的实现与普通激光相比困难得多, 一方面对驱动源要求高; 另一方面只能采用无腔运转模式. 增益介质是高温稠密的等离子体, 这就要求驱动源具有很高的驱动能力来电离介质到所需的状态, 同时也决定了增益区的维持时间非常

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA8041014) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wangch@mail.shcnc.ac.cn

短. 其次,在软 X 射线波段,由于材料对 X 射线强烈的吸收,光学反射元件缺乏,通常采用的多层膜反射元件反射效率大约只有 30%. 在这种条件下,谐振腔多通放大的模式,不但没有效果,反而会减小软 X 射线激光的输出强度. 因此通常情况下,软 X 射线激光采用无腔的单通自发辐射放大(ASE)方式,要想获得更强的输出,在增益系数比较低并且稳定的情况下,只有想办法尽量增加有效增益介质的长度. 除了双靶对接、多靶串对接等通过减小折射效应影响进而增加增益介质长度的方法外,通过增加反射镜引入双程放大方式也是增加有效增益长度的好方法.

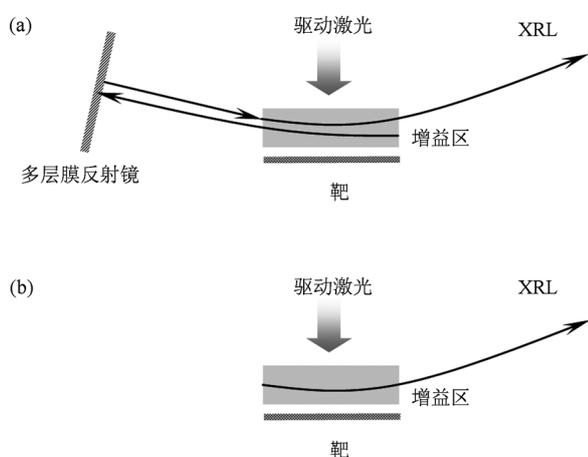


图 1 类氩锗软 X 射线激光加反射镜双程放大示意图 (a)有反射镜;(b)无反射镜

对于 ASE 方式,通过的增益介质长度越长,输出强度就会越大. 反射镜双程放大的示意图如图 1 (a)所示,经过增益介质最长的路径显然就是从增益区右端发出,先经过增益区后,再被多层膜反射镜反射回增益区左端,然后再通过增益区的路径;在不加反射镜的情况中(如图 1 (b)所示),最长的路径是从增益区左端出发直接经过增益区的路径. 可以明显的看出,图 1 (a)中的光线两次经过增益区,应当能够获得更大的输出强度增加. 但其中会有三个问题将会严重影响双程放大的效率,其一是增益区的维持时间问题,其二是反射镜本身的反射效率问题,其三是反射镜面型形状的影响.

如前所述,增益区的维持时间非常短,难以支持谐振腔多通放大,但如果选择合适的尺度和增益区维持时间,双程放大还是有可能的. 对于 1 ns 激光驱动类氩锗等离子体,增益维持时间约 800 ps,图 2 是理论模拟的结果,实验结果也基本如此. 如

果采用 24 mm 长度的靶,反射镜距离最近的靶端约 60 mm,则增益区右端发出的光线向左传播再经反射镜返回至增益区用时约 480 ps(X 射线激光在等离子体中传播速度近似等于光在真空中传播速度). 这表明,此条件下,对于 800 ps 的增益维持时间,双程放大是可以实现的. 由于时间的关系,有效的增益系数将会比峰值小,并且有效的增益放大维持时间也会短很多. 增加反射镜后,软 X 射线激光的脉冲宽度会变小.

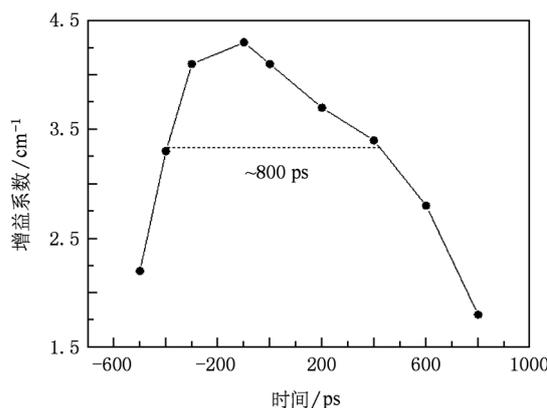


图 2 理论模拟给出的 1 ns 基频激光驱动类氩锗 23.2 nm 激光线增益维持时间

多层膜反射镜本身的反射效率问题比较容易理解. 在软 X 射线波段,由于材料强烈的吸收,光学反射元件制作比较困难. 目前比较成熟的 Mo/Si 多层膜反射镜的反射效率大约只有 30%.

反射镜面型形状的影响主要体现在从增益区左端出射的光束经过反射镜反射后如何返回增益区. 从增益区左端出射的光束具有一定的发散角. 经平面反射镜反射后,光束继续发散,仅有其中的一部分光束能够返回到增益区,见图 3 (a);而通过选择合适的球面,可以使得全部光束经会聚后进入增益区,见图 3 (b). 显然,用球面反射镜效率要高的多,但是对调节精度和系统的稳定性要求极高,略有偏差,就有可能导致光束完全偏离出增益区. 假设多层膜反射镜偏角误差为 δ ,反射镜与靶端距离 $l \sim 60$ mm,增益区横向尺寸 $L_x \sim 200$ μ m,光束强区位于增益区中心,当 $\delta > L_x / (2l) = 1.6$ mrad 时,返回光束就会完全偏离增益区. 考虑到稳定性和精度的因素,通常还是采用平面反射镜进行实验.

设 $\gamma = I_r / I_n$ 为有无反射镜两种情况输出强度的比,其中 I_r 为增加反射镜后软 X 射线激光的最终输出强度, I_n 为无反射镜时软 X 射线激光的最终输

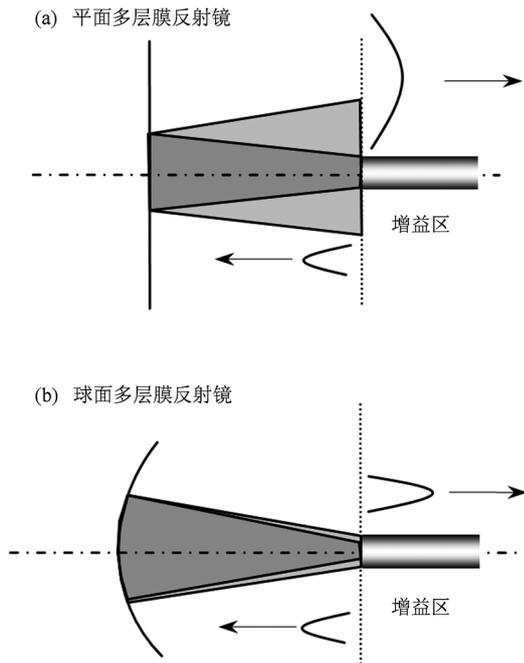


图3 不同形状的反射镜对光束的影响示意图

出强度. 显然, 如果 $\gamma > 1$ 表明增加反射镜带来了强度增加, 起到了有益作用. 根据图 1, 可以得到

$$I_n = I_0 e^{G_n L}, \quad (1)$$

其中 I_0 是增益区的自发辐射初始强度, 在增益区内各个位置应当是大致相同的; G_n 为对应的增益系数, L 为增益区长度. 同样有

$$I_f = I_0 e^{G_n L} \cdot \eta_M \cdot \eta_p \cdot e^{G_{r2} L}, \quad (2)$$

其中 $\eta_M \sim 30\%$ 为多层膜反射镜的反射效率, η_p 为由于光束发散而引起的效率下降; G_{r1} 和 G_{r2} 分别对应光束从右向左和从左向右两次穿越时感受到的增益系数, 为简单起见, 可以假设 $G_{r1} = G_{r2} = G_r$, 显然 $G_r < G_n$. 因此

$$\begin{aligned} \gamma = I_f / I_n &= \eta_M \cdot \eta_p \cdot e^{(G_{r1} + G_{r2} - G_n)L} \\ &= \eta_M \cdot \eta_p \cdot e^{(2G_r - G_n)L}. \end{aligned} \quad (3)$$

软 X 射线激光具有一定的发散角, 经过自由发散和多层膜平面镜反射后, 光束截面明显变大, 因此只有很少的一部分光束能够重新返回增益区. 假设增益区横向尺寸为 $L_x \sim 200 \mu\text{m}$, 反射镜与靶间距离 $l \sim 60 \text{ mm}$, 软 X 射线激光的发散角 $\theta \sim 5 \text{ mrad}$, 由简单的几何关系可得光束经过发散和反射后回到靶端时的尺寸 $L_x' \sim 800 \mu\text{m}$. 假设光束强度呈高斯型分布, 并且光束最强区返回到增益区, 可得 $\eta_p = (L_x / L_x')^2 = (200/800)^2 = 0.06$.

令(3)式中 $\gamma = 1$ 并且考虑 $L = 2.4 \text{ cm}$, 可以得

到 $(2G_r - G_n) = 1.7$, 此时增加反射镜的效果是得失相当的. 图 2 中, 增益系数的最大值约 4.3 cm^{-1} , 前后 200 ps 的区域大约 3.2 cm^{-1} , 因此, 可以考虑选择 $G_n = 4.3$ 和 $G_r = 3.2$, 此时 $(2G_r - G_n) = 2.1 > 1.7$, 表明增加反射镜带来了强度的提高. 代入(3)式

$$\gamma = 0.3 \times 0.06 \times e^{(2 \times 3.2 - 4.3) \times 2.4} = 2.8, \quad (4)$$

这表明, 在此参数的估算条件下, 增加反射镜能够提高输出强度约 2.8 倍. 但上述估算中有不少不确定因素, 特别是 G_n 与 G_r 的取值, 会严重的影响估算结果. 因此, 通过实验来验证是最好的方式.

3. 实验方案

事实上, 反射镜双程放大的类氖锆软 X 射线激光实验在上世纪 90 年代初就曾加以研究, 并且获得了很好的结果. 当时主要采用平焦场光栅谱仪测谱的方式进行诊断, 对于出射光束的发散角等特性的研究具有一定的局限性. 通过利用比较成熟的软 X 射线场图测量方法重新进行了反射镜双程放大的相关研究, 为将来进一步开展类氖锆软 X 射线激光应用研究打基础.

场图测量方案原理如图 4 所示. 在软 X 射线激光输出端方向, 利用多层膜成像元件对距离靶出端约 500 mm 处 (即图中“物面位置”) 的光束截面分布进行测量, 能够得到关于光束的相关信息. 多层膜反射元件中心波长 23.4 nm, 峰值 $\sim 30\%$, 带宽 $\sim 2.5 \text{ nm}$, 因此在所得到的场图中同时包含有类氖锆 X 射线激光的 23.2 nm ($J=2 \rightarrow 1$) 和 23.6 nm ($J=2 \rightarrow 1$) 的跃迁线, 而基本不包括 19.6 nm ($J=0 \rightarrow 1$) 等其他跃迁线. 在 CCD 前的光路中放置 Al 滤片来衰减软 X 射线激光信号的强度和阻挡可见光.

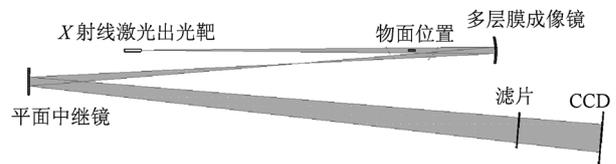


图4 软 X 射线激光场图测量方案示意图

类氖锆 X 射线激光是由神光 II 的基频 (1.053 μm) 纳秒激光作为驱动源, 辐照多块串或对接的平面靶产生的. 每路激光的脉冲宽度约 1 ns, 能量约 500 J, 通过柱面透镜列阵均匀线聚焦系统, 在靶面上形成长约 27 mm, 宽约 120 μm 的均匀焦线, 均匀

性优于 $\pm 10\%$, 靶面的功率密度 $\sim 1.4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$. 实验主要包括两部分, 一是单路激光驱动双靶顺接加反射镜实验, 总靶长 24 mm, 另一部分是双路激光驱动四靶串对接加反射镜实验, 总靶长 48 mm, 方案图分别见图 5 (a), (b). 其中 1—4 是锗平面靶, 长度 12 mm, 顺接双靶间距 1 mm, 因此完全在 27 mm 的焦线内, 两端不会产生冷等离子体. 而对于图 5 (b) 中的情况, 由于 1#激光比 7#激光延迟较多, 使得从靶 4 右端出发的光束在其后的传输过程中, 难以获得时间匹配的增益区, 并不能获得有效的放大, 因此实际上, 最长的放大路径仍然是从靶 2 右端开始的光束, 即参加双程放大的增益介质长度仍只有为约 24 mm.

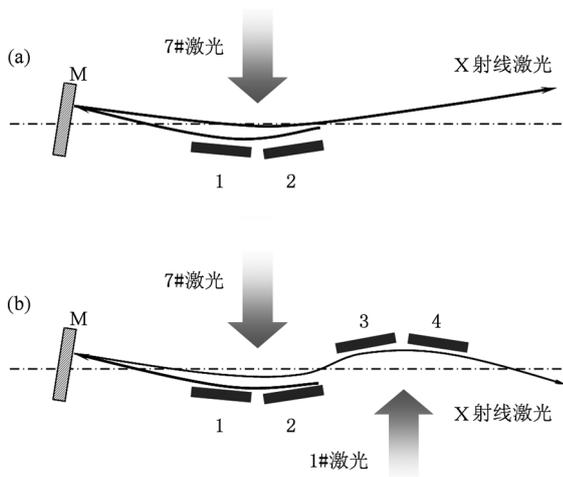


图 5 单路两靶加反射镜 (a) 和双路四靶加反射镜; (b) 方案示意图

4 实验结果

单路两靶 24 mm 的实验结果如图 6 所示, 图像是时间积分结果, 其中交叉丝状物是为标明位置而放置的金属丝, 交点对应主轴中心方向. 图 6 (a) 是不加反射镜的 CCD 图像记录结果; (b) 是增加了反射镜双程放大的结果, 两发实验的其他条件几乎相同. 同样图 7 给出了两路四靶 48 mm 的实验结果. 表 1 给出了四发数据分别对应的输出强度数据和据此计算得到的反射镜双程放大系数 γ . 可以看出, 结果与前文理论预估的基本一致. 两路四靶 48 mm 的实验得到的 γ 略小, 一个可能的原因是此时已经进入增益饱和, 有效增益系数已经逐步变小. 与强度相类似, 增加反射镜双程放大之后, 输出能量也

有所增加. 对于两路四靶 48 mm 的情况, 输出能量从单程的 1.5 mJ, 增加到约 2.5 mJ.

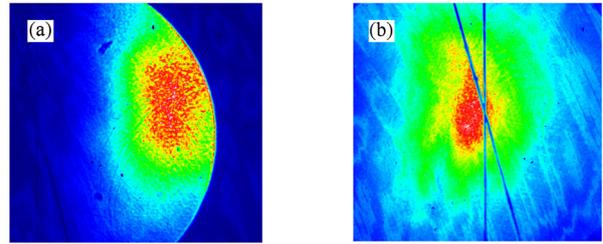


图 6 单路两靶 24 mm 对应的类氦锗 X 射线激光场图 (a) 不加反射镜; (b) 加反射镜双程放大

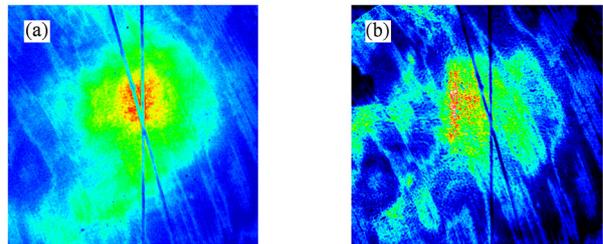


图 7 两路四靶 48 mm 对应的类氦锗 X 射线激光场图 (a) 不加反射镜; (b) 加反射镜双程放大

表 1 四发数据对应的强度及反射镜双程放大效果

长度/ mm	CCD 计数	本底 计数	滤片厚度 μm (Al)	滤片 衰减	强度	γ
24 单程	35000	3800	3.0	168	5.2×10^6	2.3
24 双程	12000	3000	4.2	1304	1.2×10^7	
48 单程	9500	2000	6.7	93230	7.0×10^8	2
48 双程	24000	9000	6.7	93230	1.4×10^9	

增加反射镜的另一个效果体现在产生的软 X 射线激光的截面光强分布形状方面. 无反射镜时, 光斑呈椭圆分布, 比较完整, 分布也相对比较均匀. 增加反射镜之后, 光斑形状比较复杂, 特别是两路四靶 48 mm 实验中, 光斑的强区在靶面切向呈带状分布. 表 2 给出了四发实验对应的法向和切向发散角的情况, 可以明显的看出, 增加反射镜双程放大后, 两个方向的分散角都明显变小, 当然这也可以认为是由于输出强度的增加带来的. 24 mm 实验中, 增加反射镜双程放大后, 两个方向的分散角减小情况基本一致; 而 48 mm 实验中, 增加反射镜双程放大后, 法向分散角减小明显 (约 58%), 而切向分散角则变化不大, 造成差异的一个可能原因是折射的影响. 由于在法向增益区中存在较大的电子密度梯度, 因此很大一部分光线会过早的偏折出增益

区而得不到有效放大,增益区中间部分的光束由于经过了充分的非线性增益放大,强度大大增加,远大于两侧的光束,导致随着输出光强的增大,光束发散角急剧减小,直至达到接近衍射极限.而在切向,由于不存在大的电子密度梯度,光束基本上是自由发散的,因此发散角通常随着输出强度增加而缓慢减小.在上世纪90年代,国内高功率激光联合实验室进行的反射镜双程放大实验研究中,由于当时只采用了平焦场光栅谱仪对法向的光束进行诊断,而对另一维切向没有测量,因此得到了近衍射极限的实验结果.实际上,只有法向发散角达到了近衍射极限,而切向发散角与衍射极限的结果还相距甚远.这与本轮实验的结果也是相一致的.

表2 四发数据对应的发散角与反射镜双程放大效果

长度/ mm	法向		切向			
	像素数	发散角 /mrad	效果	像素数	发散角 /mrad	效果
24 单程	~260	8.7		307	10.2	
24 双程	217	7.2	0.83	260	8.6	0.84
48 单程	198	6.5		217	7.2	
48 双程	114	3.8	0.58	200	6.7	0.93

图8是由实验数据得到的输出强度随靶长的变化关系.根据 Linford^[25]公式拟合得到小信号增益系数 $g \sim 3.7 \text{ cm}^{-1}$.从图中可以看出,在约40 mm处激光强度开始偏离指数增长区,进入线性增长阶段.此时,增益下降,输出趋于稳定,X射线激光的输出逐步进入饱和状态.

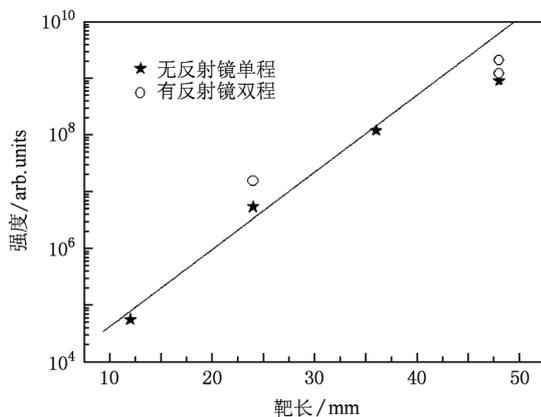


图8 根据场图测量结果获得的类氙锆软 X 射线激光增益曲线 (23.4 nm 反射镜),五角星是不加反射镜的数据,空心圆圈是加反射镜的数据

5 分析与讨论

在本实验中,采用的反射镜是中心波长为 23.4 nm 的 Mo/Si 多层膜反射元件,峰值反射率 30%,带宽约 2.5 nm.对于类氙锆软 X 射线激光来说,比较强的谱线包括 19.6, 23.2 和 23.6 nm 等,因此利用 23.4 nm 的多层膜元件进行场图测量,其中包含了 23.2 和 23.6 nm 的成分,所得到的结果是两条谱线的总效应.对于类氙锆 23.2 和 23.6 nm 谱线来说,都是 $J=2 \rightarrow 1$ 的跃迁,输出强度差不多.如图9是利用平焦场光栅谱仪测量的结果,图9(a)是实验记录图像,可以比较清晰分辨 19.6, 23.2, 23.6, 24.7, 28.6 nm 以及 17.0 nm 附近的 Al 滤片的吸收边.可以看出,其中 23.2 和 23.6 nm 的分布和强度几乎一致.图9(b)中更详细的给出了两条谱线对应的法向角分布情况,在误差范围内,基本一致.对所有像素强度累加,得到 $I_{23.2 \text{ nm}} = 2949$, $I_{23.6 \text{ nm}} = 3247$,对应比例 $I_{23.2 \text{ nm}} : I_{23.6 \text{ nm}} = 47.5\% : 52.5\%$.因此在一定近似条件下,可以认为两者所占的比重大致相当.即本文所得的场图测量结果中,23.2 和 23.6 nm 谱线的贡献大致各占一半.

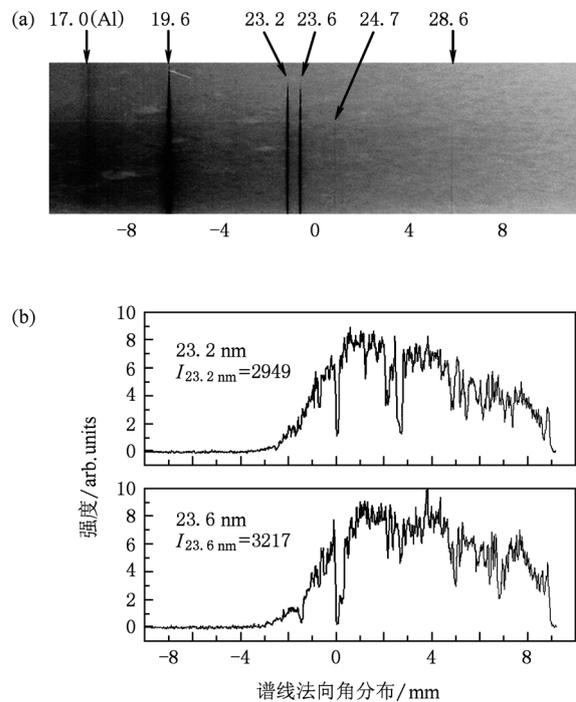


图9 类氙锆软 X 射线激光 23.2 和 23.6 nm 谱线的比较 (a) 实验图像;(b)法向角分布

增加反射镜能够提高类氙锆软 X 射线激光的

输出强度,这一点上文已描述的非常明白,但由此带来的一些问题则不能不重视,这些问题可能会严重的影响到今后开展的应用研究. 第一个问题是加了反射镜双程放大后,光束的分布产生了较大的变化,且均匀性也有所降低,这与一般的激光通过谐振腔来回反射后光束质量会得到改善的情形有所不同. 主要的原因是只使用了一块反射镜,这对于选模来说远远不够,实际的效果相当于是两段的 ASE,并且由于两次经过时的增益状态明显的不同,反而会带来更多的不确定性,从而造成输出光束光斑形状变化、均匀性下降和不稳定等方面的问题. 这对于作为以探针阴影方法来诊断等离子体等方面的应用研究是很不利的. 另一个问题是脉冲宽度的问题. 通常来说,1 ns 激光驱动产生的类氩锆软 X 射线激光的增益维持时间约为 800 ps. 对于单程的 X 射线激光,左端的种子光束需要经过约 80 ps (假定增益区长度 24 mm) 穿越到右侧,也就是说从 0 时刻到 720 ps 时刻产生的种子经过等离子体时都能够获得比较好的放大. 而对于反射镜双程放大的模式,从最右侧发出的种子光走完全程需要的时间

约 560 ps (假定增益区长度 24 mm,反射镜距离增益区左端 60 mm),也就是说 0 时刻发出的种子光,能够在两个增益区中很好的放大;而 240 ps 之后发出的种子光,就已经不能被全程的放大了. 整个过程的综合效果就是产生的软 X 射线激光脉冲宽度会短很多. 这一点对于配合条纹相机进行时间分辨的应用研究是不利的. 可见,对于软 X 射线激光的应用研究来说,增加反射镜双程放大未必是好事. 在对强度要求不是特别苛刻的情况下,单程已经饱和输出的激光探针应当是更好的选择.

6. 结 论

增加反射镜,能够提高纳秒激光驱动类氩锆软 X 射线激光的输出强度,但同时也带来了光束形状的变化、均匀性的下降和脉冲宽度的减小,这些变化对于基于纳秒量级软 X 射线激光探针的应用研究来说,可能会存在一定的问题. 具体影响如何将会在今后的研究中加以仔细考虑.

- [1] Trebes J E, Brown S B, Campbell E M, Matthews D L, Nilson D G, Stone G F, Whelan D A 1987 *Science* **238** 517
- [2] DiCicco D S, Kim D, Rosser R, Suckewer S 1992 *Opt. Lett.* **17** 157
- [3] Da Silva L B, Barbee T W, Jr, Cauble R, Celliers P, Ciarlo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Ressler D, Trebes J E, Wan A S, Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [4] Zeitoun Ph, Albert F, Jaegl'e P, Joyeux D, Boussoukaya M, Carillon A, Hubert S, Jamelot G, Klisnick A, Phalippou D, Lagron J C, Ros D, Sebban S, and Zeitoun-Fakiris A 1998 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **416** 189
- [5] Benware B R, Ozols A, Rocca J J, Artiukov I A, Kondratenko V V, Vinogradov A V 1999 *Opt. Lett.* **24** 1714
- [6] Smith R F, Dunn J, Nilsen J, Shlyaptsev V N, Moon S, Filevich J, Rocca J J, Marconi M C, Hunter J R, Barbee T W, Jr. 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 065004
- [7] Brizuela F, Vaschenko G, Brewer C, Grisham M, Menoni C, Marconi M, Rocca J, Chao W, Liddle J, Anderson E, Attwood D, Vinogradov A, Artiukov I, Pershyn Y, Kondratenko V 2005 *Opt. Express* **13** 3983
- [8] Wang C, Wang W, Sun J R, Fang Z H, Wu J, Fu S Z, Ma W X, Gu Y, Wang S J, Zhang G P, Zheng W D, Zhang T X, Peng H M, Shao P, Yi K, Lin Z Q, Wang Z S, Wang H C, Zhou B, Chen L Y, Jin C S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 202 (in Chinese) [王琛、王伟、孙今人、方智恒、吴江、傅思祖、马伟新、顾援、王世绩、张国平、郑无敌、张覃鑫、彭惠民、邵平、易葵、林尊琪、王占山、王洪昌、周斌、陈玲燕、金春水 2005 物理学报 **54** 202]
- [9] Qiao X M, Zheng W D, Zhang G P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5639 (in Chinese) [乔秀梅、郑无敌、张国平 2006 物理学报 **55** 5639]
- [10] Purvis M, Grava J, Filevich J, Marconi M C, Dunn J, Moon S J, Shlyaptsev V N, Jankowska E, Rocca J J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046402
- [11] Zheng W D, Zhang G P, Wang C, Sun J R, Fang Z H, Gu Y, Fu S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3984 (in Chinese) [郑无敌、张国平、王琛、孙今人、方智恒、顾援、傅思祖 2007 物理学报 **56** 3984]
- [12] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439
- [13] Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D, Qiao X M 2007 *Chin. Phys.* **16** 2433
- [14] Qiao X M, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 1370
- [15] Brewer C A, Brizuela F, Wachulak P, Martz D H, Chao W L, Anderson E H, Attwood D T, Vinogradov A V, Artyukov I A, Ponomareko A G, Kondratenko V V, Marconi M C, Rocca J J, Menoni C S 2008 *Opt. Lett.* **33** 518
- [16] Wachulak P, Grisham M, Heinbuch S, Martz D, Rockward W, Hill D, Rocca J J, Menoni C S, Anderson E, Marconi M 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** B104

- [17] Wang C, Zheng W D, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Qiao X M, Zhang G P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4767 (in Chinese) [王琛、郑无敌、方智恒、孙今人、王伟、熊俊、傅思祖、顾援、王世绩、乔秀梅、张国平 2010 物理学报 **59** 4767]
- [18] Koch J A, MacGowan B J, DaSilva L B, Matthews D L, Underwood J H, Batson P J, Mrowka S 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3291
- [19] DaSilva D L, MacGowan B J, Mrowka S, Koch J A, London R A, Matthews D L, Underwood J H 1993 *Opt. Lett.* **18** 1174
- [20] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, Ni Y L, Yu S Y, Fu S Z, Mao C S, Tao Z C, Chen W N, Lin Z Q, Fan D Y, Zhang G P, Sheng J T, Yang M L, Zhang T X, Shao Y F, Peng H M, He X T, Yu M 1991 *Chin. Phys. Lett.* **8** 618
- [21] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, Yu S Y, Fu S Z, Ni Y L, Wu J, Zhou Z L, Han G Q, Tao Z C, Lin Z Q, Wang S S, Chen W N, Fan D Y, Zhang G P, Sheng J T, Peng H M, Zhang T X, Shao Y F 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 360
- [22] Zhang G P, Sheng J T, Yang M L, Zhang T X, Shao Y F, Peng H M and He X T 1992 *High Power Laser and Particle Beams* **4** 521 (in Chinese) [张国平、盛家田、杨明伦、张覃鑫、邵云峰、彭惠民、贺贤士 1992 强激光与离子束 **4** 521]
- [23] He S T, He A, Chunyu Shutai, Zhang Q R, Gu Y Y, Ni Y L, Yu S Y, Zhou Z L 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 573 (in Chinese) [何绍堂、何安、淳于书泰、张启仁、顾元元、倪元龙、余松玉、周正良 1992 物理学报 **41** 573]
- He S T, Chunyu Shutai, Zhang Q R, He A, Shen H Z, Ni Y L, Yu S Y 1992 *Phys. Rev. A* **46** 1610
- [24] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, Zhou Z L, Ni Y L, Yu S Y, Fu S Z, Mao C S, Han G Q, Wan B G, Ji W B, Wu J, Zeng Y X 1993 *High Power Laser and Particle Beams* **5** 557 (in Chinese) [王世绩、顾援、周关林、周正良、倪元龙、余松玉、傅思祖、毛楚生、韩国强、万炳根、计魏波、吴江、曾一新 1993 强激光与离子束 **5** 557]
- [25] Linford G J, Peressini E R, Soody W L, Spaeth M L 1974 *Appl. Opt.* **13** 379

Output intensity of Ne-like Ge soft X-ray laser with double-pass amplification*

An Hong-Hai¹⁾ Wang Chen^{1)†} Fang Zhi-Heng¹⁾ Xiong Jun¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾
Wang Wei¹⁾ Fu Si-Zu¹⁾ Qiao Xiu-Mei²⁾ Zheng Wu-Di²⁾ Zhang Guo-Ping²⁾

1) (Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

2) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100080, China)

(Received 4 September 2010; revised manuscript received 22 December 2010)

Abstract

Ne-like germanium soft X-ray lasers driven by nanosecond laser have very good applications, due to their stable output and strong intensity. The double-pass amplification mode, with a multi-layer reflective mirror added is investigated. The estimate and the experiment show that the output intensity of Ne-like germanium soft X-ray laser is enhanced by double-pass amplification. For 24mm length of double-pass amplification, the total output intensity is enhanced by 2.3 times as against that with no mirror added. Meanwhile, this mode results in quality decline of soft X-ray laser beam. So this mode is not entirely beneficial to the applied study.

Keywords: soft X-ray laser, double-pass amplification with reflective mirror, gain saturation

PACS: 42.55Vc

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA8041014).

† Corresponding author. E-mail: wangch@mail.shenc.ac.cn