

高性能 10 J 级四程预放大技术研究

彭宇杰^{1,2} 王江峰¹ 卢兴华¹ 范薇¹ 李学春¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种新型的高功率激光装置的预放大系统结构,采用钕玻璃再生放大结合离轴四程放大的技术途径,研究了四程放大中寄生振荡和笔形光束的产生机理和抑制措施。通过注入脉宽为 3 ns,单脉冲能量小于 1 nJ 的 1053 nm 单纵模种子激光,可以获得 10.3 J 的近衍射极限输出,总增益大于 10^{10} ,能量稳定性为 2%,输出激光为近平顶分布,近场填充因子为 71%,近场调制度约为 1.4,91% 的焦斑能量能聚焦于 2 倍衍射极限内。实验结果和输出性能完全满足激光装置预放大系统的性能要求,验证了多程放大技术在高功率激光装置预放大系统中应用的可行性。

关键词 激光器;高功率激光;预放大器;再生放大;四程放大;寄生振荡

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902003

High Performance 10 J Level Four-Pass Pre-Amplifier Research

Peng Yujie^{1,2} Wang Jiangfeng¹ Lu Xinghua¹ Fan Wei¹ Li Xuechun¹

(¹ Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new laser amplifier structure based on Nd:glass regenerative amplifier and off-axis four-pass amplifier is designed for high power laser facilities. The parasitic oscillation and pencil beam of the four pass amplifier are studied and a method is introduced to suppress them. By injecting a 1053 nm single longitudinal mode laser pulse with pulse duration of 3 ns and pulse energy of 1 nJ, a 10.3 J amplified pulse with a 2% shot-to-shot energy stability is obtained. The total gain of the amplifier system is over 10^{10} . The output laser beam is a flat top profile with a 71% near field fill factor and modulation of 1.4 and 91% pulse energy can be focused into 2 times of diffraction limits. The experimental results and output performance of the amplifier system fully meet the requirements of the pre-amplifier of high power laser facilities, which shows that multi-pass amplifier can be used in high power laser facilities.

Key words lasers; high power laser; pre-amplifier; regenerative amplifying; four-pass amplifying; parasitic oscillation

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.3580

1 引言

受控热核聚变是人类探索新能源的重要课题。在惯性约束聚变(ICF)的驱动源中,高功率激光驱动器是目前较为理想、成熟的一种驱动器,已经成为 ICF 领域的主攻方向与研究热点^[1-2]。高功率激光装置常采用主振荡器-功率放大器(MOPA)结构,其优

势在于整个系统输出激光的光谱、脉冲波形等特性由种子源决定,而输出功率和能量大小则依赖于放大器增益特性。高功率激光装置通常由以下几个部分构成:前端系统、预放大系统、主放大系统、靶场与终端光学系统、激光测量与准直系统和激光能源系统。其中预放大系统作为连接种子源与主放大器的纽带,具

收稿日期: 2014-01-22; **收到修改稿日期**: 2014-03-31

作者简介: 彭宇杰(1988—),男,博士研究生,主要从事固体激光放大器方面的研究。E-mail: yjpeng@siom.ac.cn

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn(通信联系人)

有重要的研究意义。将前端种子源注入的纳焦耳级的激光脉冲放大至数焦耳量级,而且保持激光性能的优良性,是预放大系统的主要研究目标。

传统的预放大器采用多级放大的形式,每级放大器之间都要利用电光隔离器或磁光隔离器隔离反向激光脉冲。为了抑制B积分(限制高功率激光系统输出水平的重要因素)的过快增长,各级放大器之间都配有空间滤波器来滤除空间纹波等空间高频成分。这种多级放大链的结构复杂、体积庞大、成本高^[3-5]。为了保证预放大系统输出能力的同时简化,多程放大(MPA)的结构应运而生^[6-7]。而多程放大结构中由于腔结构的存在,过高的单程增益势必会导致自激振荡的产生。相对于同轴结构的多程放大器,离轴结构能够更好地抑制自激振荡,但是仍会存在部分残留反射激光放大形成笔形光束。笔形光束的功率密度很高,很容易引起光学元件的损伤,对其研究和抑制是四程放大器的研究重点。

本文开展了应用于高功率激光驱动器预放的四程放大技术研究,用衍射光学的方法从理论上分析了四程放大结构中笔形光束的产生过程,并提出了相应的抑制方法,实现了高性能的激光输出。

2 预放系统实验装置

预放系统由两部分组成:钕玻璃再生放大器和钕玻璃四程放大器。钕玻璃再生放大器的结构如图1所示^[8-9]。从前端系统输出的种子激光经过非球面透镜L1准直之后,经过由薄膜偏振片(TFP)、1/2波片(HWP)和法拉第旋光器(FR)组成的隔离器后,通过透镜L2实现与再生腔模式的匹配。再生腔是一个折叠稳定腔结构,由两个凹面反射腔镜、

电光开关、1/4波片(QWP)、腔透镜L3、折叠镜(HR)和激光头构成。再生腔的腔模式经过合理优化设计,使电光开关处的模场直径最大,保证电光晶体不会因为过高的功率密度而损坏,激光头位于腔模式束腰位置处,避免过大的光斑在小口径的激光头处产生硬边衍射。激光脉冲以s偏振进入再生腔,两次经过腔1/4波片之后变为p偏振,此时电光开关加至1/4波电压,与腔1/4波片的作用抵消,保证激光在腔内的循环放大。随着激光在腔内放大程数的增加,激光脉冲的能量不断增大,由于粒子反转数下降和增益饱和效应,激光脉冲的增益随之减小。当增益下降到与腔损耗相当时,再生放大器的输出达到最大。激光头由一个半导体激光器(LD)抽运的N3122钕玻璃棒构成,钕玻璃棒的尺寸为 $\Phi 4\text{ mm} \times 65\text{ mm}$,有效长度为30 mm,LD抽运频率为1 Hz,综合考虑抽运能量和能量存储效率,LD抽运时间宽度设定为450 μs 。在激光头的小信号增益为1.7左右时,激光脉冲大约在第50圈时达到最大输出,此时再生放大器能输出能量约为12 mJ。由于再生放大器工作于饱和区,输出激光能量完全由增益介质储能与腔损耗决定,在注入种子光能量变化30%的情况下,再生放大器的输出能量都不会发生明显变化。经过长时间的腔结构设计、机械结构稳定性设计和空气洁净度控制,该再生放大器的稳定性和可靠性已经得到大幅度提升,长期稳定性(2 h左右)优于0.5%[均方根(RMS)值],能够正常工作1年而不需要开箱维护。该再生放大器样机已经成功用于神光II升级装置和神光II第九路装置,保证了装置的可靠稳定运转。

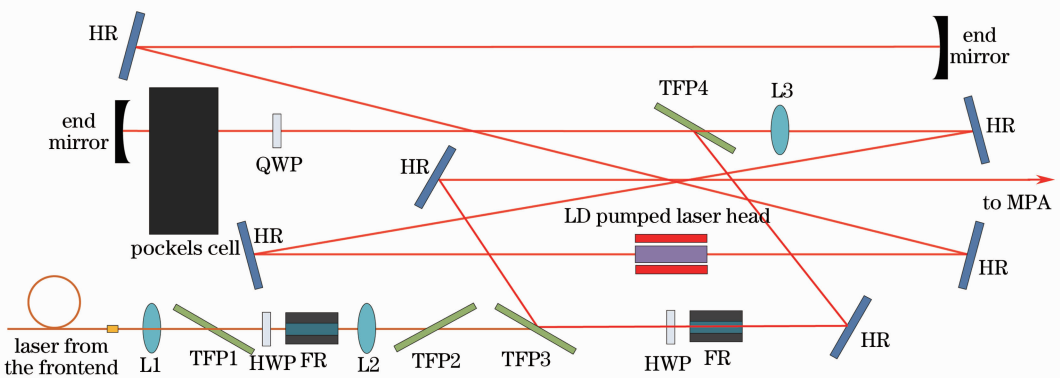


图1 钕玻璃再生放大器结构示意图

Fig.1 Schematic of the Nd:glass regenerative amplifier

再生放大器输出的激光脉冲能量为 12 mJ, 光斑为 3 mm 左右的高斯分布。1/2 波片和第一对薄膜偏振片组可以控制注入到四程放大器的能量。四程放大器结构示意图如图 2 所示。电光开关和第二对薄膜偏振片组可以消除主激光脉冲前后的预脉冲和后级脉冲, 使激光脉冲的对比度提升 10^4 以上。然后经过一个 10 倍的扩束器, 激光束被扩束至 $\Phi 30$ mm, 经过二元整形面板后, 激光脉冲被整形为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的平顶超高斯分布^[10]。整形后的激光脉冲经过法拉第旋光器和 1/2 波片后以 s 偏振进入四程放大器。四程放大器由腔薄膜偏振片、腔 1/4 波片、两个平面反射腔镜、两个空间滤波器和闪光灯抽运的激光头构成。四程放大器内部的光学元件布局设计综合考虑鬼像点的回避和像面的传递。

在腔 1/4 波片的作用下, 激光脉冲在四次经过激光头放大后经腔薄膜偏振片输出。激光头由一根 $\Phi 32\text{ mm} \times 360\text{ mm}$ 钨玻璃棒和 12 支环绕在其周围的氙灯构成, 可以提供大于 20 倍的单程小信号增益。为了抑制腔内的寄生振荡, 激光的四程路径呈角向分离。在空间滤波器的共焦点处, 各有一个小孔板 (P1 和 P2)。小孔板上各有四个小孔, 激光每程都穿过不同的小孔。四程放大器的光路设计符合像传递规律, 二元整形面板是像传递的起点 (I0), 经过空间滤波器 1 像传递至激光头的中心 (I1), 再经过空间滤波器 2 传递至腔镜 M1 上 (I2), 经反射后又重新传递至 I1, 然后传递至腔镜 M2 (I3), 在四程放大器内 I1、I2、I3 互为共轭物像关系, 两个空间滤波器内的小孔板 P1 和 P2 也互为物像关系。

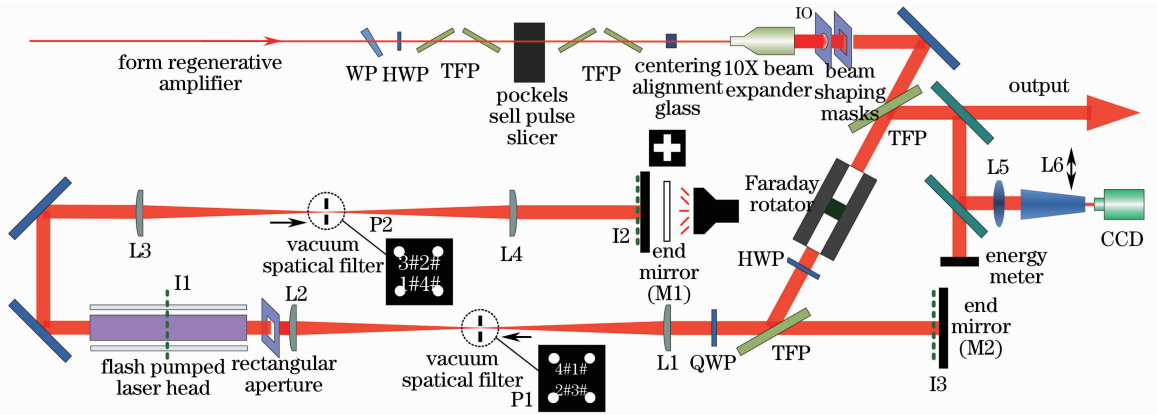


图 2 离轴四程放大器结构示意图

Fig. 2 Schematic of the off-axis four-pass amplifier

在激光的输出端, 采用一套近远场共用的成像系统对激光近远场进行准直与测量。当镜筒 L6 置于光路时, 电荷耦合器件 (CCD) 成为激光束的近场像传递面, 即与 I1、I2、I3 互为物像关系, 当镜筒 L6 移出光路时, 电荷耦合器件 (CCD) 成为激光束的远场像传递面, 即与小孔板 P1、P2 互为物像关系。在四程放大器的腔镜 M1 后面放置一个 940 nm 的

光二极管 (LED) 准直光源, 照亮紧贴 M1 放置的近场十字基准, 主激光和近场基准可以同时成像于 CCD 上, 利用该近场基准可以校准四程放大器的近场偏移。该 LED 光也可以照亮小孔板 P1 和 P2, 并将之成像于 CCD 上, 当 P1、P2 完全对准的时候可以看到完整的四个小孔, 如 3 所示, 同时可以校准四程放大器的远场偏离。

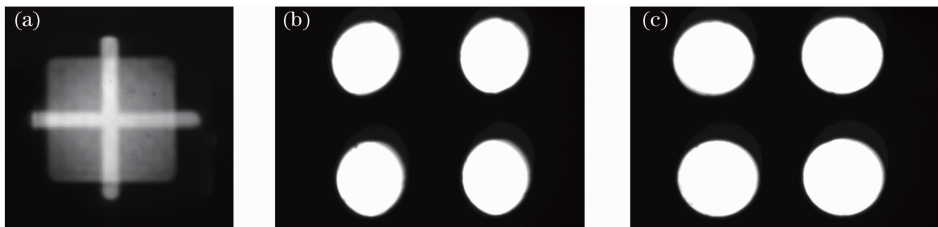


图 3 四程放大器近远场准直示意图。(a) 近场基准及近场对齐; (b) 远场小孔板未对齐; (c) 远场小孔板对齐

Fig. 3 Near field and far field alignments of the four-pass amplifier. (a) Near field reference and alignment; (b) two pinhole plates not aligned well; (c) two pinhole plates aligned perfect

3 多程放大器理论

钕玻璃介质是一个四能级激光系统,根据四能级系统的速率方程,可以推导出在脉冲放大时放大器的输出通量 E_{out} 为

$$E_{out} = E_s \ln \{ G_0 [\exp(E_{in}/E_s) - 1] + 1 \}, \quad (1)$$

式中 E_s 为饱和通量,由激光工作介质决定 $E_s = h\nu/\sigma$, h 为普朗克常量, ν 为光波频率, σ 为激光介质的受激发射截面, G_0 为放大器的第 0 程的增益, E_{in} 是输入通量。对于多程放大器,有如下的关系式:

$$E_{out,k} = E_s \ln \{ G_{k-1} [\exp(E_{in,k}/E_s) - 1] + 1 \}, \quad (2)$$

$$E_{in,k} = TE_{out,k-1}, \quad (3)$$

$$G_k = G_{k-1} \exp \left[-\frac{\rho(E_k/T - E_{k-1})}{E_s} \right], \quad (4)$$

式中 $E_{out,k}$ 是第 k 程的输出通量, $E_{in,k}$ 是第 k 程的输入通量, T 为放大器的单程透射率, G_k 为放大器的第 k 程的增益, ρ 为激光在增益介质中的增益恢复因子,当介质增益完全恢复时 $\rho = 1/2$,完全不恢复时 $\rho = 1$ 。

现作如下近似,假设多程放大器的单程透射率 $T=1$,激光在增益介质中相邻两程介质增益完全不恢复,即 $\rho=1$ 。在此近似下,第 k 程的输出通量可以由(5)式计算^[11]:

$$\exp(E_{out}/E_s) - 1 = \frac{G_0^k \exp[(k-1)E_{in}/E_s]}{\sum_{i=0}^{k-1} \{ G_0^{i+1} \exp[(k-i)E_{in}/E_s] \} + [1/\exp(E_{in}/E_s) - 1]}. \quad (5)$$

4 寄生振荡分析与抑制

在前面所描述的四程放大器结构中,由于放大器中有两个腔镜,而放大器工作在高增益状态下 ($G>20$),所以对放大器内寄生振荡的抑制显得尤为重要,否则残留反射形成的自激振荡提取大量的储能而大幅度降低放大器输出^[12]。另外由残留反射振荡形成的笔形光束会对光学元件造成不可恢复的损伤,下面将从这两个方面对寄生振荡进行分析。

尽管各光学元件的表面都镀有减反膜,但是不可避免地会存在一些残留反射。在激光腔内最易形

成寄生振荡的路径如图 4 所示。由于腔内 1/4 波片的作用,空间滤波器 1 的后透镜的表面微弱的残留反射在放大器中来回放大四次形成一个回路,在此回路中,激光脉冲获得的净增益 G_{net} 为

$$G_{net} = \frac{G_0^4 T_{4-pass} R_{glint}}{P_{contrast}}, \quad (6)$$

式中 G_0 为放大器正常工作状态下的单程小信号, T_{4-pass} 为四程放大器的总透射率, R_{glint} 为透镜 L2 的残留反射率, $P_{contrast}$ 为腔薄膜偏振片提供的偏振消光比。

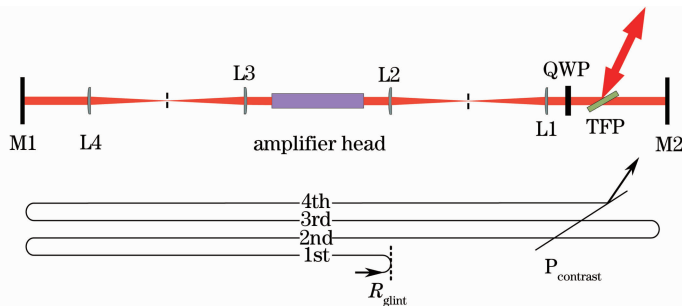


图 4 四程放大器寄生振荡路径示意图

Fig. 4 Schematic of parasitic oscillation path in the four-pass amplifier

为了保证该回路的激光不会形成寄生振荡,必须保证回路净增益 $G_{net} < 1$, 即 $G_0 < \sqrt[4]{\frac{P_{contrast}}{T_{4-pass} R_{glint}}}$, 过高的单程增益必将导致寄生振荡的发生。腔薄膜偏振片提供的两程偏振消光比为 1500, 四程放大器的总透射率测量值为 0.65, 透镜表面增透膜的残留反射为 0.5%。所以,为了保证放大器中不会形成

寄生振荡,放大器的单程小信号增益必须控制在 $G_0 < 26$ 范围内。实际上,由于放大器激光棒的径向不均匀抽运,激光棒的边缘增益会高于中心。在很靠近激光头的地方引入一个略大于主激光光斑的方孔光阑,可以有效地滤除由于激光头边缘高增益引起的寄生振荡。

采用衍射光学的方法可以对放大器内各元件表

面残留反射的放大效果进行数值模拟。图 5 所示为四程放大器的简化模型。在程序中输入放大器中各元件反射面的位置和面型信息,经过相关运算后,可

以得出四程放大器中的主要笔形光束的产生过程,如表 1 所示。

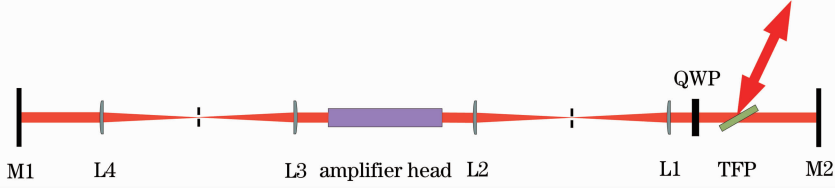


图 5 四程放大器简化示意图

Fig. 5 Simplified schematic of the four-pass amplifier

表 1 四程放大器中的主要笔形光束产生过程

Table 1 Significant pencil beam in the four-pass amplifier

Number of passes	Reflective surface	Pencil beam amplified times	Main beam amplified times	Pencil beam position in main beam (origin of coordinates is the center of the beam)
1st pass	L2	2	0	
	L4	3	1	
2nd pass	L3	3	1	
	L1	4	2	$X=0.1173 \text{ mm}, Y=-0.7429 \text{ mm}$
3rd pass	L2	0	2	
	L4	1	3	$X=-0.0013 \text{ mm}, Y=0 \text{ mm}$
4th pass	L3	1	3	$X=-0.5474 \text{ mm}, Y=-0.4692 \text{ mm}$
	L1	2	4	$X=-0.8602 \text{ mm}, Y=0 \text{ mm}$

经过模拟计算之后,可以得到输出激光的强度分布如图 6(a)所示。可以看出,如不采取措施,由于残留反射的影响,将会产生两个明显的笔形光束点。笔形光束快速增长至极高的功率密度,将会造成光学元件的损伤。根据此两个笔形光束点的位置可以追踪其产生情况,从表 1 可以看出,正是由于

L1(空间滤波器 1 的前透镜)的平面残留反射(第二程与第四程)造成剧烈的笔形光束。尝试将透镜 L1 倒置(凸面面向滤波小孔)并在保证像差的同时将其适当倾斜,得到的输出光束的强度分布如图 6(b)所示。由图 6 可以看出,采用此种措施,输出光斑内的笔形光束得到了很好的抑制。

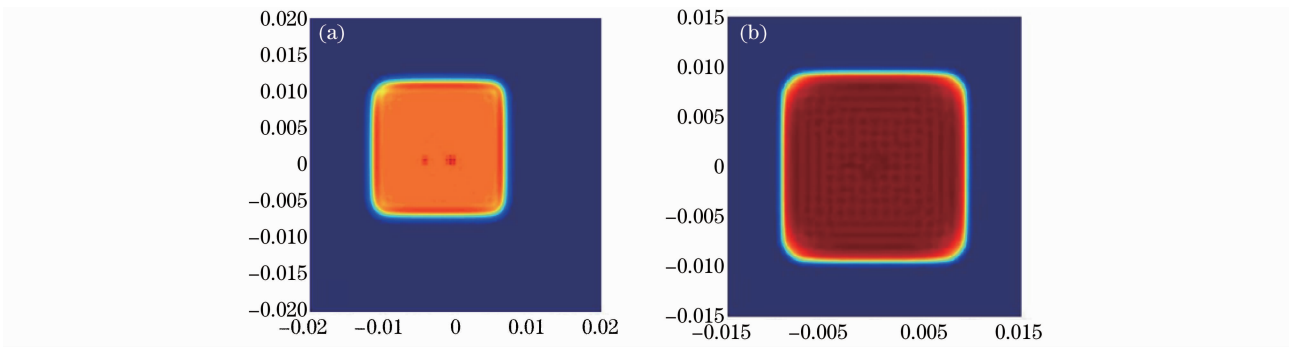


图 6 四程放大器输出光束强度分布。(a) L1 正置,有明显笔形光束;(b) L1 倒置,笔形光束得到抑制

Fig. 6 Intensity distribution of the four-pass amplifier. (a) Significant pencil beam when L1 forward placed; (b) no pencil beam when L1 backward placed

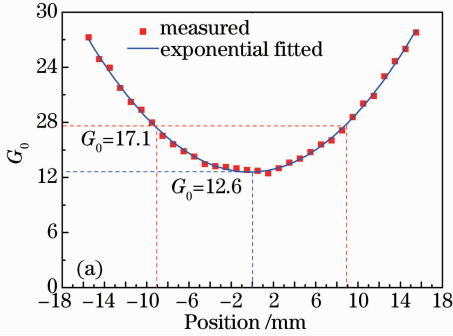
5 实验结果与讨论

预放大系统的光路调试完成之后,对该系统的输出能力与激光光束指标进行了测量,主要从能量提取能力、输出激光时间波形以及空间分布来分析。

如前面介绍的,预放系统中的四程放大使用的是掺杂浓度(质量分数)为 0.5% 的国产 N31 钕玻璃作为工作介质,采用 12 只氙灯抽运,三只灯串联为一个回路,充电电容为 80 μF ,氙灯工作点的爆炸系数为

0.2。为了保证系统获得足够的储能而不产生寄生振荡,氙灯的充电电压设置为 8.0 kV,这样可以为放大器提供 0.08 cm^{-1} 的小信号增益系数^[13]。在此抽运条件下,激光头的增益分布如图 7(a)所示。

可以看出由于钜玻璃无法被抽运至透明状态,激光头的增益中心和边缘处的增益由较大的差异,但是呈基本对称。对于 $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 的光斑,边



缘和中心的小信号增益倍数比值为 1.35。为了获得平顶的光斑分布,对整形面板的透射率分布进行了合理设计,如图 7(b)所示,边缘的透射率大约是中心透射率的 30% (约 $1/1.35^4$)。图 7(b)中左上方的插图是设计整形面板的透射光斑,右上方的插图是实际静态情况下测量得到的四程放大器的输出光斑。

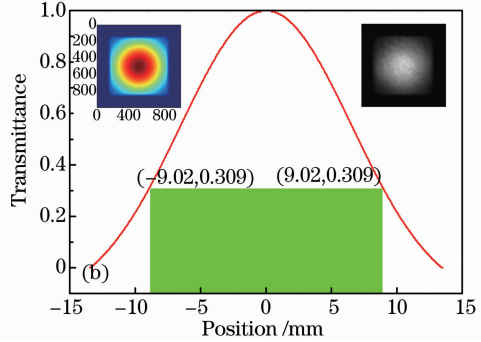


图 7 (a)激光头的小信号增益分布曲线和(b)整形面板设计透射率曲线

Fig. 7 (a) Small signal gain distribution in the amplifier head and (b) designed transmittance of the shaping masks

图 8 所示为再生放大器和四程放大器的输出近场光斑,再生放大器的输出近场为 $\Phi 3 \text{ mm}$ 的高斯分布,经过四程放大器放大之后的输出近场为近平顶分布。放大系统的输出光束采用科学 CCD(重庆港宇 GYD-SG1024B12GA/GFA)测量近场与远场分布。输出激光经过取样之后由透镜 L5 和透镜组 L6 成像到 CCD 上,见图 2,透镜组 L6 的移入和移出光路分别可以测量激光的近场和远场形貌。由图 8 可以看出,输出激光呈明显的平顶分布而没有明显的尖峰或笔形光束。激光近场中局部有一些细条纹以及圆环等,实验中发现是由于取样光路中光学元件

的膜层不均匀性、衰减片的不均匀性以及灰尘等原因造成的。通常用近场填充因子或者近场调制度来评价高功率激光光束的近场质量,近场填充因子反应了激光光束全口径内平均强度与峰值强度的比值,而近场调制度为其倒数,填充因子的计算公式为

$$F_F = \frac{\int I(x,y) dx dy}{I_{\max} A_{\text{beam}}}, \quad (7)$$

由此可以得到本系统输出光束的近场填充因子为 71%,近场调制度为 1.4。

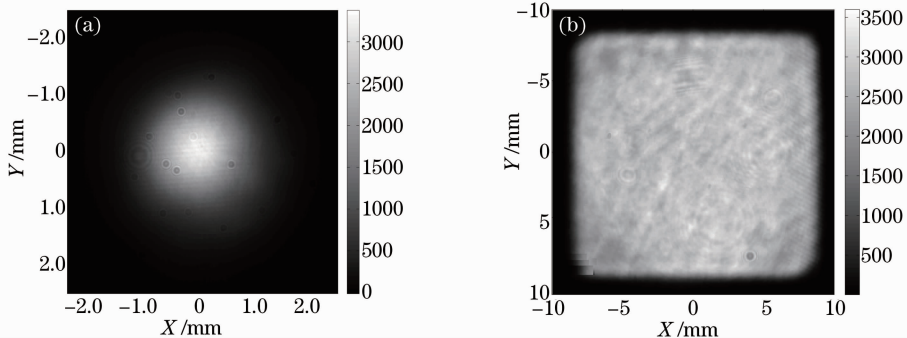


图 8 (a)再生放大器的输出近场和(b)四程放大器的输出近场

Fig. 8 Near field profile of the output laser beam of (a) the regenerative amplifier and (b) the four-pass amplifier

在四程放大系统中,所有光学元件的加工面型及装夹应力都得到了严格的控制,反射波前和透射波前畸变都控制在 0.1λ [峰谷(PV)值]以内,以保证输出光束的波前及远场分布。此外,还用哈特曼

传感器测量了激光头工作时的热致波前畸变恢复情况,测量光路结构如图 9(a)所示。图 9(b)给出了激光头放电工作后 10 min 内的透射波前畸变(PV 值),图中左下角的插图是激光头放电工作后 3 min

左右的波前图样, 右上角插图是 6 min 时的波前图样。可以看出, 激光头放电工作大约 5 min 之后, 其

波前畸变即可恢复至 0.1λ (PV 值) 以内。

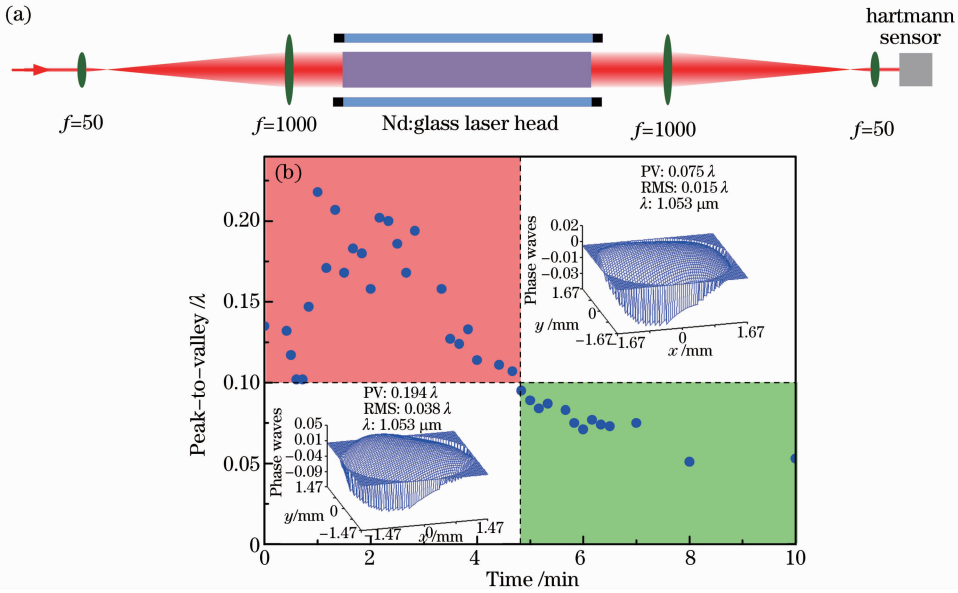


图 9 (a) 激光头热致波前畸变测量光路及 (b) 其恢复情况

Fig. 9 (a) Beam path of the wavefront distortion measuring; (b) measured wavefront distortion (peak-to-valley) after one shot along with the cooling time

将透镜组 L6 移出光路, 输出激光远场将成像在科学 CCD 上, 测量得到的远场分布如图 10 所示。可以看出输出激光焦斑明显呈现出主瓣与旁瓣分布, 与方形光束的夫琅禾费衍射图样非常相近。图 10 中的黑色曲线是实际的焦斑能量集中度, 红色曲线是理想方形光斑的焦斑能量集中度, 91% 的焦斑能量集中于 2 倍的衍射极限内, 说明输出光斑已经非常接近衍射极限。放大器系统的输出激光的光束质量能够很好地满足高功率激光装置预放的要求。

值吻合得非常好。由于增益饱和的原因, 随着注入能量的增加, 放大器逐渐进入饱和状态, 增益下降, 系统输出能量的增加越来越缓慢。在 1.0 mJ 左右的注入能量下, 系统可以获得大于 10 J 的输出。此时系统的输出通量密度已经达到 3 J/cm^2 , 为了保证光学元件膜层的安全以及系统的可靠性, 并没有继续增大注入能量, 而是使系统工作在 10 J 的输出水平。

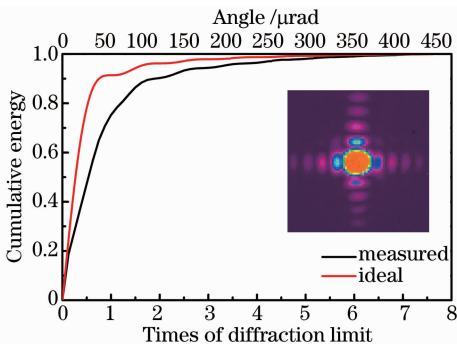


图 10 四程放大器输出远场及焦斑能量集中度曲线

Fig. 10 Far field profile of the output laser beam of the four-pass amplifier and the energy concentration rate curve of the focal spot

图 11 中的曲线是根据(5)式计算得到的理论输出能量, 红点是不同注入能量下的实际输出能量。可以看出, 四程放大器的实际输出能力与理论计算

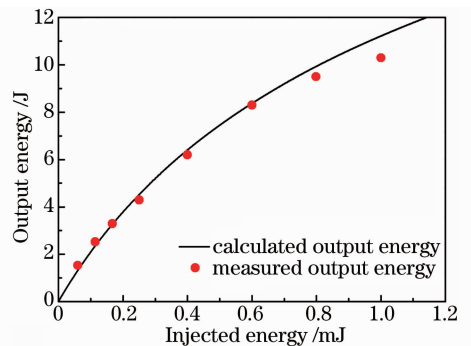


图 11 不同注入条件下的理论输出与实际输出
Fig. 11 Calculated and measured output energy plotted against injected energy

在 10 J 水平的输出能力下, 放大器连续工作 26 发次时的输出能量如图 12 所示。由于再生放大器优良的输出稳定性, 以及四程放大器激光头增益和光路损耗的控制, 放大系统获得了很好的输出稳定性, 约 2% (RMS), 能够很好地满足高功率激光装置对预放

大系统的能量稳定性要求。如果进一步提升四程放大器抽运系统的稳定性(即氙灯放电回路的电学稳定性),提高反射镜架机械稳定性,改善放大系统的运行环境,例如设计外罩使之工作在密闭环境中,减小气流、温度变化等环境变化对工作条件的影响,可以进一步地提升放大系统的输出能量稳定性^[14]。

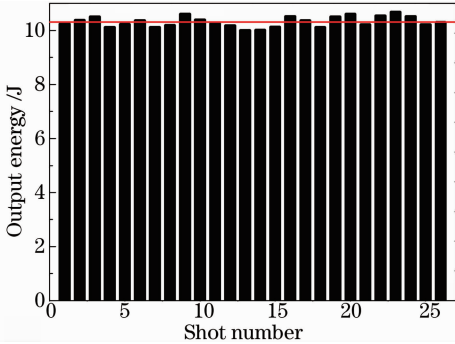


图 12 发次间输出能量稳定性

Fig. 12 Shot-to-shot output pulse energy fluctuation of the four-pass amplifier

放大系统的注入激光种子源是与神光 II 及神光 II 升级系统种子源类似的纳秒脉冲整形系统,该种子源采用孔径耦合微带线(ACSL)产生的电信号对激光脉冲进行强度调制,可以获得 0.1~10 ns 灵活可调的激光脉冲形状^[15]。放大系统对 3 ns 的激光脉冲进行放大,注入(蓝色)与输出(红色)的时间波形如图 13 所示。由于增益饱和的原因,输出脉冲的时间波形的前沿和后延发生了部分畸变,输出的激光脉冲时间波形基本呈平顶分布。图 13 中,脉冲后延处的小尖峰是由于测量光电管的固有特性造成的。由于纳秒整形系统中电子学器件带宽的限制,激光脉冲的前后沿都不是非常陡峭,采用更加高速电子学器件可以获得前后沿更加陡峭(约 100 ps)的激光脉冲形状。

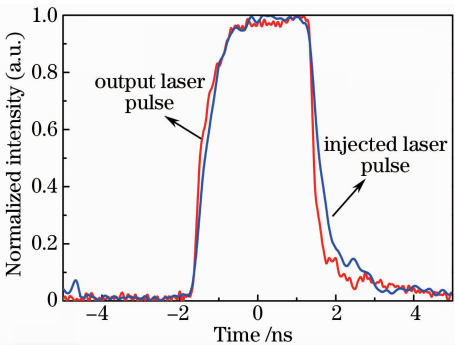


图 13 四程放大器输出时间波形

Fig. 13 Temporal waveform of the four-pass amplifier output laser pulse

6 结 论

提出了一种基于再生放大器结构和四程放大结构的激光放大系统,分析了四程放大器中的寄生振荡和笔形光束的产生机理和抑制方法。该放大器系统能将前端 1053 nm 脉宽 3 ns 的种子激光脉冲由 1 nJ 左右放大至 10 J 的能量水平,能量稳定性优于 2%,输出光束为 18 mm×18 mm 的平顶分布,没有明显尖峰或笔形光束的产生。光束质量接近衍射极限,近场填充因子为 71%(近场调制度为 1.4),远场 91%的能量集中于 2 倍衍射极限内,接近衍射极限输出。该放大系统的输出能量与光束质量能很好地满足高功率激光装置对预放大系统的需求,可以替代传统结构复杂的多级放大链式的预放大系统。

参 考 文 献

- 1 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- 2 J Ebrardt, J M Chaput. LMJ on its way to fusion[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(3): 032017.
- 3 W W Simmons, D R Speck, J T Hunt. Argus laser system: performance summary[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(7): 999-1005.
- 4 J T Hunt, D R Speck. Present and future performance of the Nova laser system[J]. *Opt Eng*, 1989, 28(4): 461-468.
- 5 Z Lin, X Deng, D Fan, *et al.*. SG-II laser elementary research and precision SG-II program[J]. *Fusion Eng Des*, 1999, 44(1): 61-66.
- 6 W H Lowdermilk, J E Murray. The multipass amplifier: theory and numerical analysis[J]. *J Appl Phys*, 1980, 51(5): 2436-2444.
- 7 B M Van Wouterghem, J R Murray, J H Campbell, *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd: glass laser for inertial confinement fusion[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(21): 4932-4953.
- 8 Wang Jiangfeng. Research on High Stable Nd: Glass Regenerative Amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 王江峰. 高稳定钕玻璃再生放大技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008.
- 9 Wang Xiaofa, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. High energy and high efficiency Nd: glass regenerative amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802002. 王小发, 樊仲维, 余锦, 等. 高能量高效率钕玻璃再生放大器[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802002.
- 10 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun, *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1959-1966. 谢杰, 范薇, 李学春, 等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1959-1966.
- 11 M Gong, Z Sui, Q Liu, *et al.*. Design of ultrahigh energy laser amplifier system with high storage energy extraction[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(3): 394-399.
- 12 B D Moran, C B Dane, J K Crane, *et al.*. Suppression of parasitics and pencil beams in the high-gain national ignition facility multipass preamplifier[C]. *SPIE*, 1998, 3264: 56-64.
- 13 Liu Tao, Zhou Shenlei, Zhang Panzheng, *et al.*. Optimization design of xenon flashlamp pumping in Nd glass slab amplifier based on simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*,

2014, 34(2): 0214002.

刘涛, 周申蕾, 张攀政, 等. 模拟退火算法优化设计钕玻璃放大器氙灯抽运[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0214002.

- 14 Zhang Panzheng, Lin Xianping, Pan Feng, *et al.*. Research of grounding of high power Nd:glass disk amplifier of SG II [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302004.

张攀政, 林贤平, 潘峰, 等. 神光 II 高功率钕玻璃片状放大器

接地实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302004.

- 15 Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(12): 1619-1622.

高云凯, 蒋运涛, 李学春. 基于孔径耦合带状线的激光脉冲整形系统[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1619-1622.

栏目编辑:何卓铭