

激光二极管抽运的高重频高平均功率 Nd : YAG激光器

汪超¹⁾²⁾ 韦辉^{1)†} 王江峰¹⁾ 姜有恩¹⁾ 范薇¹⁾ 李学春¹⁾

1)(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)

(2014年5月20日收到; 2014年6月23日收到修改稿)

搭建了一台高重复频率、高峰值功率、高平均功率的激光器. 激光器主要包括三部分: 单纵模光纤种子源、激光二极管阵列抽运的Nd : YAG再生放大器和四程放大器. 系统获得了平均功率11 W、重复频率100 Hz、脉冲能量112 mJ、脉宽500 ps—2 ns可调的激光输出, 工作波长1064 nm. 输出光束口径6.8 mm, 1.5倍衍射极限, 近场光强近平顶分布, 能量稳定性为0.72%.

关键词: 激光二极管抽运, 高重复频率, 高峰值功率, 高平均功率

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.63.224204

1 引言

高峰值功率(>100 MW)、高平均功率(>10 W)的激光器在激光加工、激光预处理等方面具有重要应用. 为了实现激光器的高峰值功率输出, 可以采用调Q技术、锁模技术、脉冲压缩技术以及MOPA (master-oscillator power amplifier)系统. 调Q激光器输出脉冲的脉宽通常为7—100 ns, 其最小脉宽取决于激光腔内脉冲的建立时间以及增益-损耗的比值^[1,2]. 被动锁模激光器输出的脉冲宽度通常为2—100 ps, 其脉冲宽度取决于增益介质的增益线宽^[3]. 为了获得500 ps—2 ns的高峰值功率激光脉冲, 通常使用MOPA系统, 通过控制注入种子脉冲的时间波形可以获得目标脉冲. 2007年, 美国劳伦斯·利弗莫尔实验室使用MOPA系统实现了重复频率300 Hz、单脉冲能量最高130 mJ、脉宽350—600 ps可调、近场近平顶分布的激光输出, 其激光器由全光纤种子源、再生放大器和四

程放大器组成^[4]. 2013年, 荷兰阿姆斯特丹自由大学激光实验室使用MOPA系统获得了重复频率300 Hz, 脉宽64 ps、单脉冲能量基频(1064 nm)输出130 mJ, 倍频(532 nm)输出75 mJ, 该激光器包括一台锁模激光器(种子源)、再生放大器和两级四程放大器^[5].

对于高平均功率的激光器, 传统的氙灯抽运方案, 激光头的热效应严重限制激光器的性能. 使用激光二极管(LD)作为抽运源, 抽运光谱与增益介质的吸收光谱匹配, 可以极大地减小激光头的热负载, 有利于提高激光头的工作频率, 同时也提高了激光器的总体电光转换效率. 我们搭建的激光系统主要包括三部分: 单纵模光纤种子源, 激光二极管阵列(LDA)抽运的Nd : YAG再生放大器和Nd : YAG四程放大器. 激光系统获得了平均功率11 W、峰值功率最高200 MW、重复频率100 Hz、单脉冲能量112 mJ、脉宽500 ps—2 ns可调的激光输出. 输出光束口径6.8 mm, 1.5倍衍射极限, 近场光强近平顶分布, 能量稳定性(RMS)为0.72%.

† 通讯作者. E-mail: weihiuicn@hotmail.com

2 实验装置

实验中的激光系统结构如图1. 系统包括三个主要部分, 分别是光纤种子源、再生放大器和四程放大器.

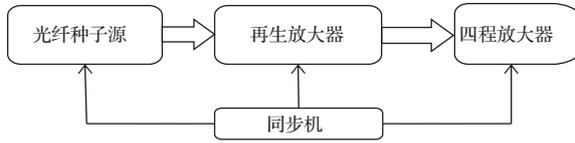


图1 激光系统结构图

2.1 种子源

单纵模光纤种子源基于孔径耦合带状线和集成波导电光调制技术进行激光脉冲整形, 可以输出具有高衬比度的任意整形激光脉冲, 系统的原理如图2所示. 激光脉冲时间波形由整形电脉冲决定, 整形电脉冲由孔径耦合带状线电脉冲整形器产生, 详见文献[6]. 改变孔径耦合带状线的长度和宽度即可改变种子源的时间波形, 最终种子源的输出为500 ps—2 ns脉宽可调的单纵模光脉冲, 波长为1064 nm, 单脉冲能量为1 nJ左右. 种子源、再生放大器和四程放大器的工作频率由一台同步机控制, 三者精确同步, 实验中工作频率为100 Hz.

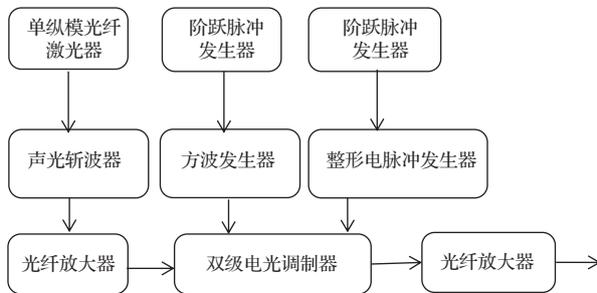


图2 激光脉冲整形系统原理图

2.2 再生放大器

系统中再生放大器如图3所示, 图中Amp为激光头, HR为全反镜, TFP为薄膜偏振片, L1为非球面透镜($f = 8\text{ mm}$), L2为透镜($f = 3000\text{ mm}$), PC为电光开关, Faraday为法拉第旋光器, $\lambda/2$ 为半波片, $\lambda/4$ 为四分之一波片, Seed为种子源注入端, T为小孔光阑, L3($f = -250\text{ mm}$)和L4($f = 1000\text{ mm}$)组成扩束器. 再生放大器采用线性平-平腔结构, 透镜L2和激光头位于再生腔中间, 构成稳定腔, 激光头处光束口径约为2 mm (光强的 $1/e^2$), 激光头使用激光二极管阵列(LDA)侧面抽运, 抽运电流30 A, 抽运光的峰值功率约为330 W, 中心波长808 nm, 抽运脉宽250 μs , 腔长3 m. 种子源提供的种子光通过光纤注入到再生放大器中, 调节非球面准直透镜L1后, 注入光的口径约为2 mm, 基本与再生腔模式匹配. 再生放大器输出重复频率100 Hz, 单脉冲能量1 mJ的光脉冲, 光-光效率为1.2%. 输出光脉冲经L3和L4扩束后, 为后续的四程放大器提供种子光.

2.3 四程放大器

四程放大器的光路如图4, 图中Amp1, Amp2为激光头, Vacuum telescope为真空滤波器, L1和L2为透镜($f = 500\text{ mm}$), TFP为薄膜偏振片, T为软边光阑, $\lambda/2$ 为半波片, HR为全反镜, Faraday为45°法拉第旋光器. 系统中使用两个由LDA侧面抽运的激光头, 每个激光头使用排列成正五边形的5组LDA抽运, 抽运电流为130 A, 总抽运光峰值功率约为10000 W, 中心波长805 nm, 抽运光的光谱宽度3 nm (半高全宽), 抽运脉宽250 μs . 激光棒直径10 mm, 长40 mm, 掺杂浓度为1%. 由再生放大器放大的种子光扩束后, 经过软边光阑T注入四程放大器.

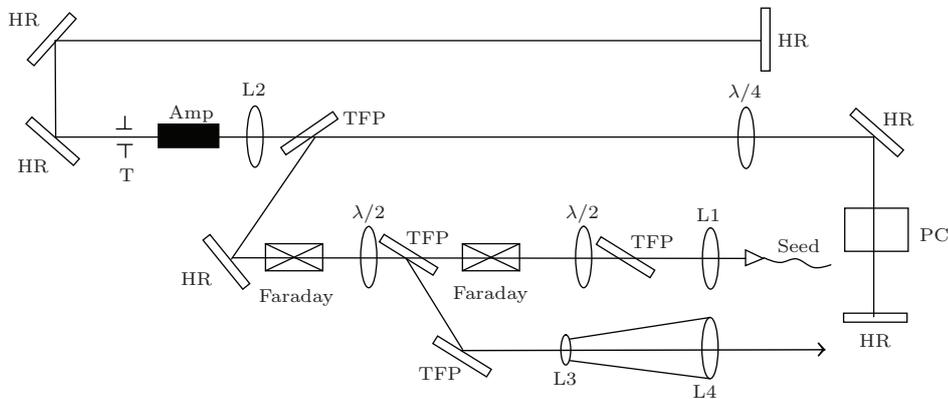


图3 再生放大器光路图

激光头工作在高重复频率(100 Hz)下,抽运功率高,激光棒的热效应严重^[7,8]. 实验中激光棒的热效应主要有两方面:热聚焦和热致双折射. 其中热致双折射导致的热退偏限制系统的最高增益,同时严重的退偏将引起自激振荡. 为了提高输出光束的光束质量,四程放大器使用了像传递,透镜L1和透镜L2构成4F系统,腔两端的全反镜HR1和HR2互为物像关系,软边光阑T和全反镜HR1也互为物像关系. 真空滤波器的小孔位于4F系统的焦点

上,用于提高光束质量,抑制自激振荡.

激光棒的热退偏由法拉第旋光器补偿^[9-11],腔内的法拉第旋光器在控制光脉冲的偏振的同时,也作为一个旋光器件,补偿了热退偏. 激光两次经过法拉第旋光器,偏振态旋转90°,径向偏振态和切向偏振态互换,使得第一程和第二程的热退偏互相补偿,第三程和第四程的热退偏互相补偿,从而使系统的热退偏得到一定程度的补偿,抑制了自激振荡.

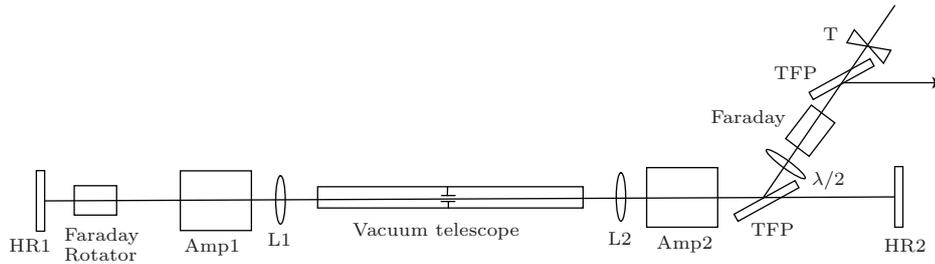


图4 四程放大器光路图

3 实验结果

四程放大器的输出脉冲能量为112 mJ,光效率为4.4%. 输出脉冲光经过充分衰减,耦合到超高速光电探测器(带宽 > 12 GHz)中,然后使用示波器(25 G采样率,带宽6 GHz的Tektronix示波器DPO70604B)测量脉冲波形. 图5为500 ps时激光器输出的时间波形. 从图中可以看出,经过再生放大器和四程放大器后,激光脉冲的时间波形发生畸变,前沿凸起,这是由于增益饱和效应,脉冲前沿的增益大于脉冲后沿的增益,从而造成前沿凸起.

我们也测量了2 ns时系统的输出波形,如图6.

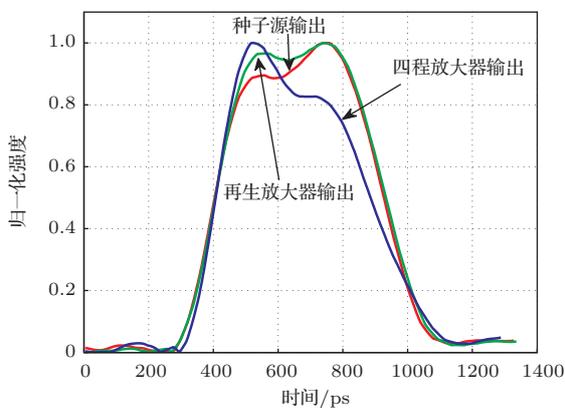


图5 (网刊彩色) 500 ps脉冲的时间波形

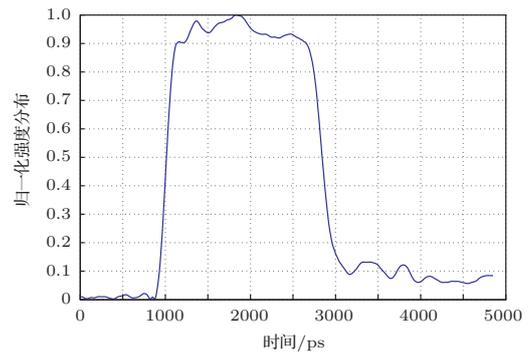


图6 2 ns时系统输出脉冲的时间波形

实验中测量了激光器输出能量的稳定性,如图7. 测量状态为脉宽500 ps,工作频率100 Hz,脉冲能量112 mJ,测试时间为1 h,系统的RMS为0.72%.

获得近场光强近平顶分布的激光脉冲是实验的一个主要目标. 实验中使用CCD测量光束的近场分布, CCD像素大小为14 μm,激光输出的近场如图8所示. 近平顶的光强近场分布通常使用超高斯函数表征. 超高斯函数具有以下形式:

$$f(x) = A e^{-2 \left[\frac{(x-x_0)^2}{\tau^2} \right]^n},$$

式中A是一个常数,τ表示函数的高斯半宽,X₀表示函数的中心位置,n表示超高斯函数的阶数. 图9(a), (b)分别是光斑水平中心线和竖直

中心线归一化光强曲线的拟合结果. 水平中心线的拟合结果为: $A_H = 0.870$, $\tau_H = 3.416$ mm, $n_H = 2.8$. 垂直中心线的拟合结果为: $A_V = 0.85$, $\tau_V = 3.346$ mm, $n_V = 3$. 定义光束的有效口径:

$$2\tau = 2 \times \frac{\tau_H + \tau_V}{2} = 6.752 \text{ mm}.$$

在整个输出光束口径中, 由于边缘光强下降, 有效输出口径为 6.8 mm. 定义光束的调制度为: (最大光强 - 最小光强)/平均光强(有效口径内). 实验中光束的调制度为 1.5.

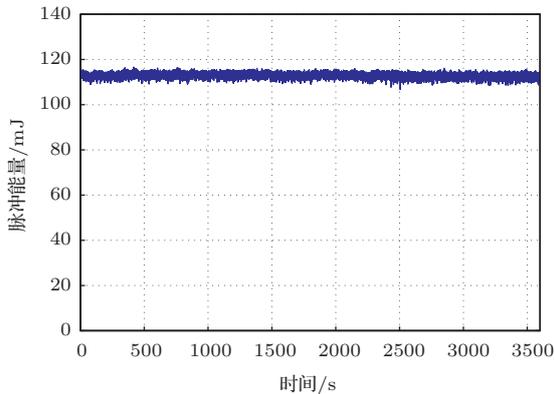


图7 一小时内输出脉冲的能量变化

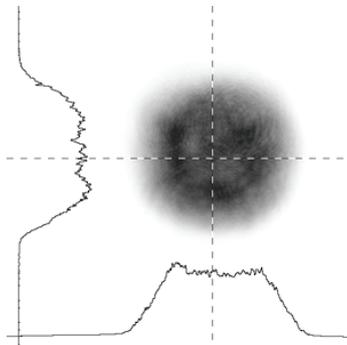


图8 光束的近场强度分布

实验中同样测量了光斑的远场分布, 如图 10, 实验中使用的 CCD 像素大小为 $4.4 \mu\text{m}$. 实验测得远场光斑的直径是 0.98 mm (光强下降到最高点的 e^{-2}), 为 1.5 倍衍射极限. 定义光斑的远场能量集中度为距离光斑中心距离 r 范围内的能量与光斑的总能量的比值. 实验中测量的远场能量集中度如图 11. 图 11 中实线表示实验测量结果, 虚线表示相同口径平面波的远场能量集中度. 在一倍衍射极限范围内光斑的能量为总能量的 78.42%.

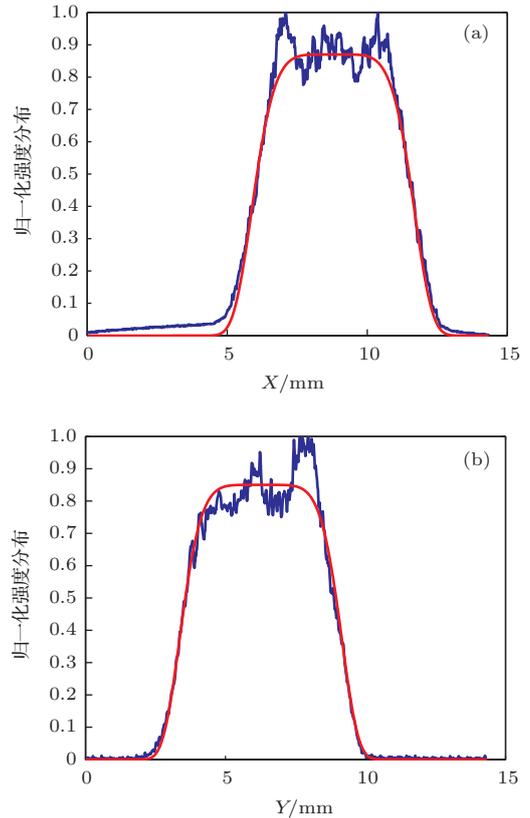


图9 光斑归一化光强分布的拟合曲线 (a) 水平中心线; (b) 竖直中心线

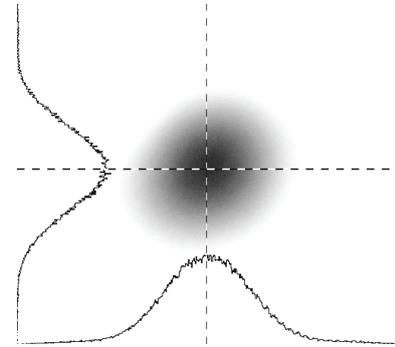


图10 光束的远场光强分布

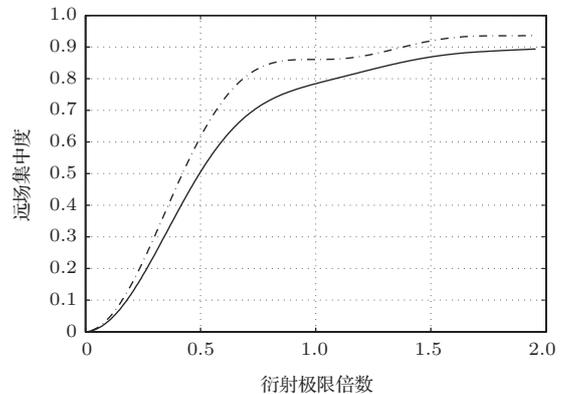


图11 远场能量集中度

4 结 论

采用MOPA系统结构,使用全光纤脉冲种子源、LD抽运的再生放大器和四程放大器搭建的激光器,实现了平均功率11 W、峰值功率最高200 MW、重复频率100 Hz、单脉冲能量112 mJ、脉宽500 ps—2 ns可调的稳定激光输出,激光输出的光束口径为6.8 mm,1.5倍衍射极限,RMS为0.72%,近场光强近平顶分布.

我们发现,该激光系统中主要存在两点不足:1)四程放大器中激光头增益分布的不均匀性;2)热退偏的不完全补偿.前者降低了脉冲的光束质量,后者限制了激光头的有效增益,降低了输出脉冲的能量.因此,在下一步的工作中将做以下改进:1)优化四程放大器中激光棒的掺杂浓度,改善增益分布的均匀性;2)改进四程放大器中激光头的设计,优化抽运结构,增加有效抽运长度,改善激光棒的冷却效果,降低热效应,进一步提高激光器的工作频率;3)探索使用石英旋光晶体补偿两个激光头的热退偏^[12],进一步提高激光器的单脉冲能量;4)实现激光器二倍频和三倍频输出,拓展该激光系统的使用范围.

参考文献

- [1] John J 1989 *IEEE J. Quantum Electron* **25** 214
- [2] Zayhowski J J, Kelley P L 1991 *IEEE J. Quantum Electron* **27** 2220
- [3] Koechner W (translated by Sun W, Jiang Z W, Cheng G X) 2002 *Solid-State Laser Engineering* (Beijing: Science Press) pp370–374 (in Chinese) [克希耐尔 W 著 (孙文, 江泽文, 程国祥 译) 2002 固体激光工程 (北京: 科学出版社) 第370—374页]
- [4] Honig J, Halpin J, Browning D, Crane J, Hackel R, Hennesian M, Peterson J, Ravizza D, Wennberg T, Rieger H, Marcianti J 2007 *Appl. Opt.* **46** 3269
- [5] Noom D W E, Witte S, Morgenweg J, Altmann R K, Eikema K S E 2013 *Opt. Lett.* **38** 3021
- [6] Wang Y H, Wang J F, Li X C 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 477 (in Chinese) [王艳海, 王江峰, 李学春 2007 光学学报 **27** 477]
- [7] Zhu H T, Lou Q H, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5221 (in Chinese) [朱洪涛, 楼祺洪, 漆云凤, 董景星, 魏运荣 2006 物理学报 **55** 5221]
- [8] He G Y, Guo J, Jiao Z X, Wang B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094217 (in Chinese) [何广源, 郭靖, 焦中兴, 王彪 2012 物理学报 **61** 094217]
- [9] Scott W C, Wit M D 1971 *Appl. Phys. Lett.* **18** 3
- [10] Lü Q, Kugler N, Weber H, Dong S, Müller N, Wittrock U 1996 *Opt. Quantum Electron* **28** 57
- [11] Kugler N, Dong S L, Lu Q, Weber H 1997 *Appl. Opt.* **36** 9359
- [12] Bo Y, Geng A C, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Li R N, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [薄勇, 耿爱丛, 毕勇, 孙志培, 杨晓东, 李瑞宁, 崔大复, 许祖彦 2006 物理学报 **55** 1171]

Laser diode pumped Nd:YAG laser with high repetition and high average power

Wang Chao¹⁾²⁾ Wei Hui^{1)†} Wang Jiang-Feng¹⁾ Jiang You-En¹⁾
Fan Wei¹⁾ Li Xue-Chun¹⁾

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*)

(Received 20 May 2014; revised manuscript received 23 June 2014)

Abstract

In our work we build a high repetition, high peak power and high average power laser which contains three main components: the fiber oscillator, the Nd : YAG regenerative amplifier, and the four-pass amplifier side-pumped by laser diode. The wavelength is 1064 nm. The laser operates at 100 Hz with pulse energies up to 112 mJ. And the average power is 11 W. The pulse width is tunable from 500 ps to 2 ns. The radius of the beam is 6.8 mm. The spatial profile of the beam presents nearly a top hat in the near field and $1.5\times$ diffraction-limited in the far field.

Keywords: diode-pumped, high repetition, high-peak power, high average power

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.60.Jf

DOI: [10.7498/aps.63.224204](https://doi.org/10.7498/aps.63.224204)

† Corresponding author. E-mail: weihuicn@hotmail.com