

文章编号: 0258-7025(2002)07-0580-03

# 高放大倍率单频 Nd:YAG 激光系统

彭海波, 周寿桓, 赵 鸿, 姜东生  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

钱列加  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**提要** 采用主振荡放大(MOPA)单频 Nd:YAG 系统, 对  $1 \mu\text{J}$ ,  $22 \text{ ns}$  的单频脉冲激光种子, 经四级六次放大, 最终获得了大于  $100 \text{ mJ}$ , 近衍射极限的单频激光输出。

**关键词** MOPA, 单频, Nd:YAG 固体激光器, 高放大倍率

中图分类号 TN 248.1+3 文献标识码 A

## Single-longitudinal-mode, High Magnification Nd:YAG Amplifier

PENG Hai-bo<sup>1</sup>, ZHOU Shou-huan<sup>1</sup>, ZHAO Hong<sup>1</sup>, JIANG Dong-sheng<sup>1</sup>, QIAN Lie-jia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North China Research Institute of Optic-Electronic, Beijing 100015

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

**Abstract** The design and experiment results of MOPA single longitudinal mode Nd:YAG laser are introduced. The seeder laser with  $1 \mu\text{J}$ ,  $22 \text{ ns}$  is amplified for six times. More than  $100 \text{ mJ}$ , near diffraction-limited laser beam is obtained.

**Key words** MOPA, single-longitudinal-mode, Nd:YAG solid-state laser, high magnification

## 1 引言

宽带激光参量放大器用于飞秒啁啾脉冲激光放大(OPCPA)技术可大幅度提高输出功率和光束质量<sup>[1]</sup>。OPCPA的CPA部分对展宽纳秒啁啾脉冲进行放大,能够从放大器有效提取高能量。展宽的纳秒啁啾脉冲能量在  $1 \mu\text{J}$  左右,为了实现有效的光参量放大(OPA),微弱的纳秒啁啾脉冲必须先被预放大到百毫焦耳量级。为了验证OPCPA方案,我们对光参量啁啾放大(CPA)的预放大进行了研究。设计了一套放大系统,进行预放大实验模拟研究。在实验中,我们对系统的放大结构、放大倍率、光隔离措施等进行了优化,取得了较好的实验结果。

## 2 理论分析

由于种子激光的脉冲能量为微焦耳量级,最终需要获得  $100 \text{ mJ}$  量级的放大输出,根据激光放大理论,可以用小信号增益理论处理整个放大过程<sup>[2]</sup>。

系统总的放大倍数应为  $10^5$ ,考虑到光路中众多光学元件的表面反射、通过损耗以及在传输过程中的衍射损耗,将总放大倍率设定为  $10^6$ 。在小信号增益情况下,信号光单次通过 YAG 棒的单程增益表示为

$$G = \exp\left(\eta \frac{E_p}{A \cdot E_s}\right) \quad (1)$$

式中  $\eta$  为抽运脉冲能量转换为激光介质储能部分的效率,对于 Nd:YAG,  $\eta$  一般取  $2.7\%$ 。 $E_p$  为灯的抽运能量,取为  $15 \text{ J}$ 。 $A$  为放大介质的横截面积,取为  $0.385 \text{ cm}^2$ 。 $E_s$  为放大介质的饱和能量密度,取为  $0.45 \text{ J/cm}^2$ <sup>[3]</sup>。将以上数据代入公式(1)估算出 YAG 棒的单程增益为 10。由此知道需要经过 6 次放大总增益才能够达到  $10^6$ 。

## 3 实验装置及结果

系统由产生单频种子激光的调 Q Nd:YAG 激光振荡器和灯抽运的高倍率放大器及系统时间同步电

收稿日期 2001-04-23;收到修改稿日期 2001-06-17

作者简介 彭海波(1971—),男,工程师,博士,主要从事固体激光技术及非线性光学研究。E-mail: davidpeng@95777.com

子线路组成。

### 3.1 单频种子激光

获得单频的方法是使用微片激光器,即腔的长度短到足以只让少数几个纵模起振,通过 Cr,Nd:YAG 可饱和吸收体来实现调 Q,同时 Cr,Nd:YAG 可饱和吸收体中还存有一动态损耗光栅<sup>[4]</sup>,它对不同的纵模具有不同的损耗,只有损耗较小的纵模才能够起振。在微片谐振腔及动态损耗光栅的双重作用下能够获得 100% 几率的单频种子激光。抽运源采用 2 W 808 nm 二极管激光器。利用此系统获得了重复频率 100 Hz,脉宽 22 ns,单脉冲能量 1  $\mu$ J 的单频种子激光,线宽为 120 MHz<sup>[4]</sup>。利用高精度光束质量分析仪测得光束质量为  $M_x^2 = 1.16$ ,  $M_y^2 = 1.17$ 。

### 3.2 高倍率激光放大器

由以上理论分析可知,为了获得  $10^6$  倍的高放大倍率,需要经过 6 次放大。为了简化系统,可以采用 4 个放大器进行 6 次放大。实验装置如图 1 所示,微焦耳级的单频种子激光 1 先经扩束镜 2 扩束 5 倍,通过由偏振片 3 和 45°法拉第旋光器 4,二分之一波片 5,偏振片 6 组成的第一个单向光隔离器进入放大器 7( $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ),放大器 8( $\phi 7 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ )经过两次预放,然后通过四分之一波片 9,由凹面反射镜 10(曲率半径 10 m)反射,沿原光路返回,再次通过四分之一波片 9,放大器 8,放大器 7。由于两次通过四分之一波片,被放大的种子光的偏振方向转过 90°,种子光被偏振片 6 反射,通过 45°法拉第旋光器 11,被反射镜 12 反射,经过二分之一波片 13,进入布儒斯特角放置的放大器 14( $\phi 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ),放大器 15( $\phi 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ )进行主功率

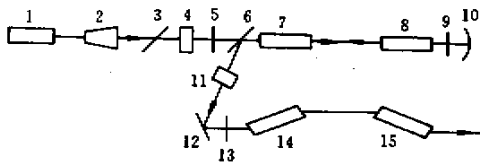


图 1 高倍率激光放大器实验装置

Fig.1 Experimental configuration of high magnification amplifier

1: single-longitudinal-mode seeder; 2: expander; 3: polarizer; 4: 45° Faraday rotators; 5:  $\lambda/2$  wave plate; 6: polarizer; 7: 1st amplifier; 8: 2nd amplifier; 9:  $\lambda/4$  wave plate; 10: reflection mirror; 11: 45° Faraday rotators; 12: reflection mirror; 13:  $\lambda/2$  wave plate; 14: 3rd amplifier; 15: 4th amplifier

放大。在这里,偏振片 6,45°法拉第旋光器 11,二分之一波片 13 组成第二个光隔离器,在预放大级和主放大级之间起光隔离作用,防止从放大器 3,放大器 4 后向传输的光进入预放大级,引起自激振荡,第一个光隔离器的作用是防止由于预放大级的逆向传播的种子光再次回到单频种子源,引起系统不稳定。

设计时充分考虑到此系统的高放大倍率(高达  $10^6$ ),加之 Nd:YAG 的高增益特性,在系统里采用了多级光隔离措施。

### 3.3 同步电子线路

单频种子激光器工作在 100 Hz,放大器工作在 1 Hz,因此使用独立的 100 Hz 信号源,一路驱动单频种子激光器,另一路经 100 分频到 1 Hz 用以驱动四路放大器。为了达到最佳放大效果,单频种子激光器与放大器之间延时精密可调。采用 15 MHz 晶振作为时间基准的延时电路来精确调节级间延时,延时精度为 66 ns。

### 3.4 实验结果

单频种子激光器输出的激光脉宽为 22.28 ns (图 2),单脉冲能量为 1  $\mu$ J,光束质量为  $M_x^2 = 1.16^{31}$ ,  $M_y^2 = 1.17$ 。

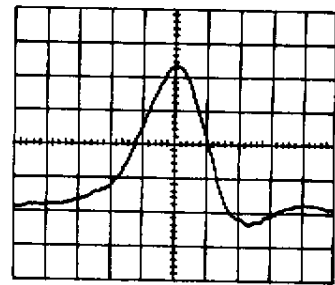


图 2 单频种子激光脉冲波形

Fig.2 Pulse shape of seeder laser

先用种子激光准直预放大器、主放大器以及各光隔离器,尤其是要将光隔离器的隔离消光比调节到较好状态。然后让预放大级与种子激光同步工作,在低抽运水平下对种子激光进行放大,让被预放的种子光回到偏振片 6 处,一方面用能量计检测被放大种子光的脉冲能量,调节级间延时找到最佳延时,另一方面在偏振片 3 处监测反射光的脉冲能量,调节四分之一波片找到最佳位置。然后增加放大器 7,放大器 8 的抽运能量,直到观察到自激振荡为止,反复调节第一级光隔离器的消光比及四分之一波片,直到预放大级的输出最大而又不出现自激振荡

为止。通常情况下能够获得大于 10 mJ 的脉冲能量。降低放大器 7, 放大器 8 的抽运能量到 15 J, 将放大器 7, 8 的各参数代入公式 (1), 计算出单程放大倍率为 10。但实际上在偏振片 6 处获得了 3 mJ 的脉冲能量, 这是因为经实际测量从第一个光隔离器耦合进预放大级的单脉冲能量只有 0.6  $\mu$ J, 其原因在于种子激光的偏振方向不是正好在水平方向, 而第一个光隔离器只允许水平方向偏振的光束最大值通过。另外, 预放大器 7, 8 的单程放大倍率为 8.4, 理论计算与实际的单程放大倍率的差别可能是由于实际的  $\eta$  值比 2.7% 小造成的。

将被预放大后的种子激光放入主放大级, 调节二分之一波片 (13) 使得经预放后的种子激光 100% 通过布儒斯特角放置的放大器 14 和 15, 同时小角度调节反射镜 10。主放大器的调节主要考虑尽量减小由于各光学元件的表面反射造成的反馈光回到预放大级, 当放大器 14 和 15 的抽运能量均为 30 J 时 (将主放大器的各参数代入公式 (1), 计算出单程小信号增益为 100 倍), 最终的输出能量为 100 mJ, 即实际的放大倍率为 30 倍。脉冲宽度为 21.49 ns (图 3), 放大后的激光光斑见图 4。在这里, 理论计算与实际的放大倍率的差别原因主要在于: 当四个

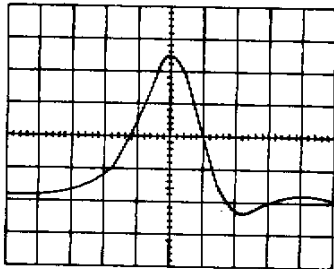


图 3 放大后的激光脉冲波形

Fig. 3 Pulse shape of laser amplified

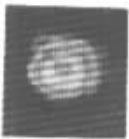


图 4 放大后的激光光斑

Fig. 4 Beam pattern of laser amplified

放大器同时工作时, 超辐射效应的级联作用会消耗一部分储能; 另一方面, 末级放大器工作在饱和状态。由此造成实际的放大倍率与小信号情况下的计算值有较大差别。

## 4 讨 论

系统设计时考虑到为了获得高放大倍率, 必然需要高消光比的光隔离措施, 两个 45° 法拉第旋光器的消光比均大于 35 dB, 系统总的消光比大于 70 dB。但是, 在实际调试过程中, 光隔离效果比预计的有较大差距。一方面的原因是偏振片的消光比不够高, 另一方面, 四分之一波片存在一定的制造误差, 使得种子光通过预放大级时退偏, 返回到前级, 当预放级与单频种子激光器间的隔离度不够高时, 在单频种子激光器与反射镜 10 之间极容易成腔, 产生自激振荡。解决的方法是一方面提高隔离措施, 另一方面将反射镜 10 调偏一微小角度, 抑制全反镜之间的自振。在调整主放大级时尽量减小各光学表面的反射光反馈回预放大级, 例如将 45° 法拉第旋光器、二分之一波片调偏一小角度。主放大器的 YAG 棒端面修磨成布儒斯特角, 呈布氏角放置, 预放大器的 YAG 棒修磨成小角度以尽量减小各光学表面的反馈光等。

受体积限制, 级间距离不够大, 没能加入像传递及空间滤波系统来进一步提高系统的光隔离度。最终的单脉冲输出能量的上限受制于系统总的光隔离度。因此, 为了获得更大能量的输出, 需进一步提高整个系统的光隔离措施。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Liejia, Han Shengsheng. Application of broad band OPA in fs PW pulse laser technic [ J ]. *Progress in High Power Laser Technol.* ( 强激光技术进展 ), 1999, ( 1 ): 33 ~ 38 ( in Chinese )
- 2 Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [ M ]. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Publication, 1996. 150 ~ 154
- 3 H. Weber. *Optical Resonator* [ M ]. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Publication, 1996. 235 ~ 240
- 4 Y. C. Chen, Shiqun Li, K. K. Lee *et al.*. Self-stabilized single-longitudinal-mode operation in a self-Q-switched Cr, Nd: YAG laser [ J ]. *Opt. Lett.*, 1993, **18** ( 17 ): 1418 ~ 1419