

# 10 Hz, 1.2 J 脉冲波形近方波的纳秒 Nd:YAG 激光器

汪 超<sup>1,2</sup>, 韦 辉<sup>1\*</sup>, 周 丽<sup>1</sup>, 郭江涛<sup>1,2</sup>, 王江峰<sup>1</sup>, 姜有恩<sup>1</sup>, 范 薇<sup>1</sup>, 李学春<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 搭建了一台中等重复频率、高峰值功率的 Nd:YAG 激光器。激光器主要包括三部分: 单纵模全光纤种子源、LD 抽运的 Nd:YAG 再生放大器和氙灯抽运的 Nd:YAG 功率放大器。该系统获得了平均功率为 12 W、重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 1.2 J、脉冲宽度为 3 ns 的激光输出, 工作波长为 1064 nm, 输出光束口径为 10 mm, 95% 的能量在 600  $\mu$ rad 范围内, 近场光强近平顶分布, 近场光强调制度小于 1.2, 时间波形近似方波, 能量稳定性均方根值小于 1.4%。

**关键词** 激光器; 高峰值功率; 激光放大器; 纳秒脉冲; 可调脉冲波形

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801008

## 10 Hz, 1.2 J Nanosecond Nd:YAG Laser with Flat-in-Time Pulse Shape

Wang Chao<sup>1,2</sup>, Wei Hui<sup>1</sup>, Zhou Li<sup>1</sup>, Guo Jiangtao<sup>1,2</sup>, Wang Jiangfeng<sup>1</sup>,  
Jiang Youen<sup>1</sup>, Fan Wei<sup>1</sup>, Li Xuechun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A high peak power Nd:YAG laser system with moderate repetition rate is demonstrated. The laser system contains three main components, the all-fiber-based seed, LD-pumped Nd:YAG regenerative amplifier and flashlamp-pumped two-pass Nd:YAG amplifier. The average power is 12 W, the repetition rate is 10 Hz, the single pulse energy of the laser system is up to 1.2 J, and the pulse width is 3 ns. With the wavelength of 1064 nm, the diameter of the output beam is 10 mm. More than 95% pulse energy is focused in the range of 600  $\mu$ rad. The beam intensity distribution is near top-hat in the near field and the intensity modulation is less than 1.2. The temporal pulse shape is square-pulse. The root mean square value of the pulse energy is less than 1.4%.

**Key words** lasers; high peak power; lase amplifier; nanosecond pulse; tunable pulse shape

**OCIS codes** 140.3280; 140.3295; 140.3538; 140.3580

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)的激光驱动器需要在数纳秒时间内输出数百万焦耳的激光能量用于驱动靶丸压缩和产生聚变点火。ICF 激光驱动器的光学元件需要承受极高功率的激光辐射,高通量激光辐照很容易造成大口径光学元件的损伤。大口径光学元件加工费用高,替换和维修光学元件需要重新调整光路。因此,光学元件的激光诱导损伤是激光驱动器运行效率降低、装置运行成本增加的主要因素之一,这一问题也成为 ICF

收稿日期: 2017-03-07; 收到修改稿日期: 2017-04-11

作者简介: 汪 超(1990—),男,博士研究生,主要从事重复频率固体激光放大器方面的研究。

E-mail: w15021970523@gmail.com

导师简介: 李学春(1972—),男,博士,研究员,主要从事惯性约束核聚变高功率激光驱动器方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: wei huicn@hotmail.com

激光驱动器的研究热点<sup>[1]</sup>。光学元件的激光诱导损伤主要与激光脉冲的能量、时间波形、激光波长、激光脉冲的辐照次数等因素有关<sup>[2-3]</sup>,因此,在研究光学元件的损伤机制、测试光学元件的损伤阈值时需要一台高功率(约  $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )、脉冲时间波形近方波、具有一定重复频率(10~100 Hz)的激光器。

为了获得纳秒级、高峰值功率、波形近方波的激光脉冲,通常使用主动振荡功率放大(MOPA)结构。2007年,美国劳伦斯利弗莫尔实验室使用 MOPA 系统,实现了重复频率为 300 Hz、单脉冲能量最高为 130 mJ、脉宽为 350~600 ps 可调、近场近平顶分布的激光输出,其激光器包括全光纤种子源、Nd:YAG 再生放大器和 Nd:YAG 四程放大器<sup>[4]</sup>。2014年,汪超等<sup>[5]</sup>使用类似结构,采取激光二极管作为抽运源,实现了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 112 mJ、脉冲宽度为 500 ps~2 ns 可调的激光输出。在大能量激光系统方面,2014年,Peng 等<sup>[6]</sup>搭建了多功能 10 J 级激光系统,实现了单脉冲能量为 10.3 J 的激光输出,增益介质为氙灯抽运的钕玻璃,受限于钕玻璃极低的导热率,系统采取单发工作模式。这两套激光系统极大地支撑了光学元件损伤问题的研究,但仍缺少一台具有中等重复频率的焦耳级激光系统。

本文搭建了一套基于 MOPA 结构的 Nd:YAG 激光系统。系统主要包括三部分:全光纤种子源、激光二极管抽运的 Nd:YAG 再生放大器和氙灯抽运的 Nd:YAG 功率放大器。激光系统获得了平均功率为 12 W、峰值功率为 400 MW、重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 1.2 J、脉冲宽度为 3 ns 的激光输出,输出光束有效口径为 10.53 mm,超过 95% 的能量在  $600 \mu\text{rad}$  范围内,近场光强近平顶分布,光强调制度小于 1.2,能量稳定性均方根(RMS)值优于 1.4%。通过控制注入种子光的脉冲波形,预补偿放大器中增益饱和引起的波形畸变,最终获得了时间波形近似方波的激光输出。在光学元件损伤特性研究和损伤阈值测试中,这套激光系统将会发挥重要作用。

## 2 基本原理及实验装置

本系统需要实现以下几个目标:较高的输出频率(10 Hz)、较大的脉冲能量输出(大于 1 J)、脉冲时间波形近视方波、近场光斑近平顶分布以及输出光束波前近似平面波(利于提高后期倍频及三倍频效率),同时还需兼顾稳定性和提取效率。因此本系统主要面临三个挑战:1)增益介质中的热效应;2)增益饱和引起的时间波形畸变;3)放大过程中光束质量的劣化。

氙灯抽运的大能量重复频率激光放大器面临的首要问题是热效应。本系统使用 Nd:YAG 作为激光增益介质,Nd:YAG 的激光波长为 1064 nm,接近 ICF 激光驱动器的基频波长(1053 nm),可以用于研究 ICF 系统中激光诱导损伤;Nd:YAG 具有较大的受激发射截面有助于提取能量,同时 Nd:YAG 具有较大的热导率、较高的机械强度,有利于在重复频率下工作。大能量的激光系统中,增益介质中的增益饱和效应会造成显著的波形畸变,为了获得时间波形近方波的激光脉冲输出,激光系统使用 MOPA 结构,振荡器使用基于 ICF 激光驱动器前端技术的全光纤种子源<sup>[7]</sup>,种子源可以产生具有任意波形的纳秒级种子光脉冲,输出能量为 1 nJ。为了实现从纳焦耳到焦耳级的高增益放大,激光系统使用两级放大器,再生放大器作为第一级放大器,实现纳焦耳到毫焦耳的放大;氙灯抽运的功率放大器作为第二级放大器,实现毫焦耳到焦耳级的放大。再生放大器工作在深度饱和区,获得高增益的同时提高了系统输出能量的稳定性;功率放大器中使用双程放大结构,增益介质饱和深度较大,在实现高增益的同时,兼顾了能量稳定性和提取效率。为了实现较高的近场光斑近平顶分布,功率放大器中使用光斑近场整形技术和 4F 像传递系统。

实验中的激光系统结构如图 1 所示。系统包括三部分:全光纤种子源、再生放大器和氙灯抽运的功率放大器。全光纤种子源具有脉冲时间波形整形能力,输出功率为 1 nJ 的种子激光脉冲,注入到再生放大器中,种子激光经过再生放大器放大后能量达到 3 mJ,再注入到双程放大器中,最终输出功率为 1.2 J 的激光脉冲。

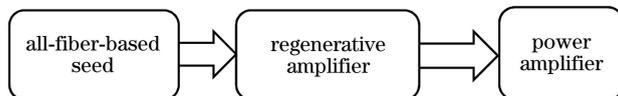


图 1 激光系统结构图

Fig. 1 Structure of the laser system

### 2.1 全光纤种子源

种子源采用基于 ICF 激光驱动器前端技术的全光纤结构。振荡器是一台分布反馈式光纤激光器,输出功率为 10 mW 的单纵模连续激光,激光波长精确调谐到 1064.375 nm。为了实现时间波形可定制的功能,同时增加种子光的信噪比,种子源同时使用了声光调制和电光调制技术。连续光首先经过声光斩波器,整形形成 200 ns 的平顶光脉冲;然后经过双级电光幅度调制器,第一级电光调制为 10 ns 量级的门信号,第二级为定制波形的电信号,用于实现种子光的特定波形。第二级的电信号可以通过多种方案实现,例如任意波形发生器、孔径耦合带状线波导技术等,本系统中使用成本较低的孔径耦合带状线波导技术<sup>[7]</sup>。孔径耦合带状线波导电脉冲整形原理如图 2 所示,整个装置为四层微波薄板结构,第一层薄板下方为屏蔽层,上方有一条窄的金属电极,第二层为开了一个线状孔径的金属屏蔽层,第三层为一条电极,第四层为屏蔽层。工作时一个快前沿、窄脉宽(约为 10 ps)的电脉冲从 port1 入射,由于线状孔径的存在,当电脉冲在电极 1 上传播时会发生电磁泄漏,电极 1 与电极 2 发生耦合作用,每一点处的电磁泄漏量与每一点处的孔径宽度相关,最后耦合的电脉冲从 port4 输出。输出电脉冲的脉冲宽度与孔径长度有关,脉冲波形与孔径形状相关,通过设计合适的孔径可以得到满足需求的整形电脉冲。实验中种子源最终输出种子光能量为 1 nJ、脉冲宽度为 3 ns、重复频率为 10 Hz。

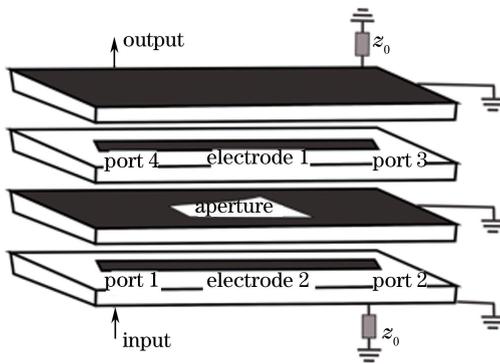


图 2 孔径耦合带状线电脉冲整形原理图

Fig. 2 Configuration of electrical pulse shaping based on aperture-coupled striplines

### 2.2 再生放大器

系统中使用的再生放大器如图 3 所示<sup>[8]</sup>,再生放大器腔长为 4 m,支持放大脉宽为 10 ns 的激光脉冲。图中 seed 为种子源注入端, $L_1$  为非球面透镜( $f=8\text{mm}$ ),用于准直光纤注入的种子光,TFP 为薄膜偏振片,FR 为法拉第旋光器, $\lambda/2$  为半波片,HR 为反射镜,AMP 为二极管激光器抽运激光头, $L_2$  为透镜( $f=2000\text{mm}$ ), $\lambda/4$  为四分之一波片,T 为限模小孔(口径为 4 mm),PC 为电光开关(fast-pulse 5046-ER, Fastpulse Technology 公司,美国),四分之一波电压为 5.1 kV,电压上升沿为 10 ns。激光头使用激光二极管抽运以提高抽运稳定性,峰值抽运功率为 800 W,脉宽为 230  $\mu\text{s}$ 。种子光由单纵模光纤输出,被  $L_1$  扩束后,经过两级磁光隔离,由 TFP3 反射注入腔内,电光开关的门宽为 1076 ns,种子光在腔内放大 40 个来回后,增益介质完全饱和,由 TFP3 反射出再生腔,经过一级磁光隔离器后输出。再生放大器输出能量为 3 mJ,重复频率为 10 Hz。

### 2.3 功率放大器

功率放大器的光路如图 4 所示,放大器使用双程放大器结构,其中  $M_1$  和  $M_2$  为  $45^\circ$  全反射镜, $M_3$  为  $0^\circ$  全反射镜; $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  为透镜,焦距分别为 100,1000,400,400 mm;AMP1 和 AMP2 为氙灯抽运的激光头;T 为锯齿光阑;PBS 为偏振分光棱镜;SP 为真空滤波器,小孔尺寸为 2 mm;R 为  $90^\circ$  石英旋光器; $\lambda/4$  为四分之一波片。种子光脉冲从再生放大器输出后,首先经过伽利略扩束系统  $L_1$  和  $L_2$  扩束,然后经过锯齿光阑整形,能量降为 1.1 mJ,此时种子光脉冲为 p 偏振态,从 PBS 中透过,注入到双程放大器中被放大,种子光被  $M_3$  反射后,两次经过  $\lambda/4$ ,偏振态旋转  $90^\circ$  变为 s 态,被 PBS 反射输出。种子光分别被 AMP1 和 AMP2 放大两次,输出能量达到 1.2 J。

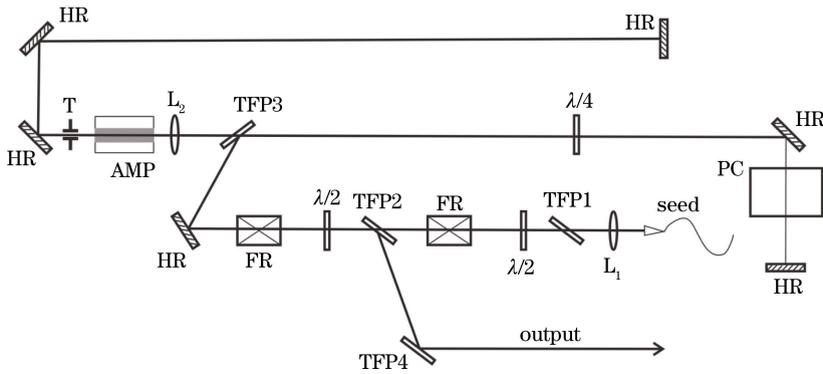


图 3 再生放大器光路图

Fig. 3 Regenerative amplification optical layout

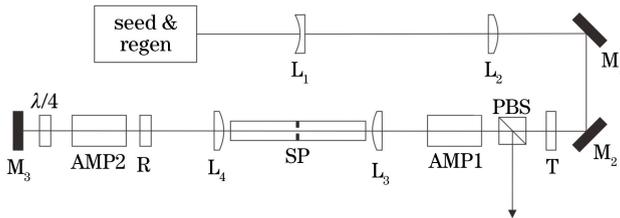


图 4 双程放大器光路排布示意图

Fig. 4 Double-pass amplification optical layout

输出激光脉冲的近场光强分布主要与三个因素相关：种子光的光强分布、增益介质中的增益分布和衍射传输产生的光强调制。为了获得近场光强近平顶分布的激光输出，注入种子光扩束后，首先经过锯齿光阑 T，被整形成一个光强近平顶分布的圆形光斑，锯齿光阑的外径为 11 mm、内径为 10 mm、齿高为 0.5 mm，一共 201 齿。使用锯齿光阑可以降低激光传输过程中由于硬边衍射产生的强度调制，在近场上获得平滑的光强分布。为了在激光棒的横截面上获得均匀的增益分布，放大器中的激光头使用双灯抽运和漫反射聚光腔。激光棒的尺寸为  $\Phi 12.7 \times 110$  mm，氙灯的直径为 9 mm，放电弧长为 100 mm，单根灯的人灯能量为 30 J。激光棒和氙灯之间插入掺钐的玻璃吸收体，用于吸收氙灯光谱中 1064 nm 的成分。由于使用双灯抽运，增益介质中水平方向和竖直方向的储能分布略有差异，放大器中的两个激光头正交放置以减小储能分布不均匀的影响。为了抑制衍射传输产生的光强调制，维持注入种子光的光束质量，双程放大器使用 4F 像传递系统 ( $L_3$  &  $L_4$ )。锯齿光阑作为初始物面，与  $M_3$  和输出像面相互满足物像关系。为了避免焦点处的空气击穿， $L_3$  和  $L_4$  之间使用真空管道。

在氙灯抽运的重复频率激光放大器中，增益介质具有明显的热效应，热效应主要有两方面的影响：热透镜和热致双折射<sup>[9]</sup>。 $L_3$  和  $L_4$  之间的距离略小于 2 倍焦距，用于补偿激光棒的热透镜。热致双折射会破坏线偏光的偏振态，在双程放大输出时一部分激光会从 PBS 透射，从而增加了系统损耗，降低输出激光的脉冲能量，同时热退偏造成的损耗不均匀，不均匀的损耗会对输出光斑的近场光强产生调制，降低光束质量；另一方面，透射光反向通过扩束系统会聚焦，在大能量激光系统中，这会增加后向光学元件的损伤风险。在两个激光头之间插入 90° 石英旋光器可以补偿热致双折射，补偿效果与光路的调节精度密切相关，在实验中需要仔细调节两个激光头的位置，从而实现最佳补偿。

功率放大器具有较高增益，实验中单个激光头的单程小信号增益为 9，系统中面临着严重的放大自发辐射 (ASE) 和自激振荡。高增益情况下 ASE 和自激振荡都会显著降低增益介质中的储能、降低输出激光的信噪比，对于长径比较大的激光棒，系统中的 ASE 以轴向为主，为了降低两个激光头之间的 ASE 的相互影响，在 4F 系统的焦点处放置一个 2 mm 的小孔，用于减小 ASE 的有效空间角，从而降低 ASE 对储能的影响。单个激光头的单程小信号增益为 9，双程放大结构中系统的小信号增益约为 6400 倍，光学元件表面的抗反射膜的残余反射率约为 0.2%，残余反射产生的正反馈的小信号增益约为 13 倍，这极易产生自激振荡。实验

中发现  $L_1$ 、 $L_2$ 、PBS、 $L_3$  的残余反射容易产生自激振荡,为了抑制自激振荡,系统中的透射元件倾斜  $2^\circ$  放置,激光棒带有  $2^\circ$  楔角。同时空间滤波器中的 2 mm 小孔也有助于阻断自激振荡的反馈路径。

在双程放大结构中,存在较多的光学面,同时系统输出能量较高,残余反射光产生的鬼像可能会聚在光学元件上,造成光学元件的损伤;另外残余反射光可能与主光斑叠加,会增大近场光强调制度,同时也会扰乱激光脉冲的时间波形,降低光束质量。为了减小残余反射的影响, $L_3$  和  $L_4$  的曲面朝向焦点方向,同时其他光学元件例如 AMP1、AMP2 和石英旋光器尽量远离透镜,同时透射元件倾斜放置使得残余反射光偏离主光路。

### 3 实验结果及讨论

放大器的输出脉冲能量为 1.2 J,重复频率为 10 Hz,平均功率为 12 W,总的抽运功率为 1200 W(电功率),电光效率为 1%。实验中测量了光斑在输出像面上的光强分布,如图 5 所示,图中两条实线为测量值,分别表示水平方向和竖直方向光斑中心光强分布;使用二维超高斯曲面拟合光斑的强度分布,图 5 中虚线表示拟合结果,为相同口径平面波的远场环围能量。超高斯函数具有下列形式:

$$f(x, y) = A \exp \left\{ -2 \left[ \frac{(x - x_0)^2}{r_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{r_y^2} \right]^N \right\}, \quad (1)$$

式中  $f(x, y)$  表示光强分布,  $A$  为常系数,  $x_0$  和  $y_0$  为光斑的中心位置;  $r_x$  和  $r_y$  表示光斑水平方向和竖直方向的半径,其值分别为 5.26, 5.27 mm;  $N$  为超高斯函数的阶数,值为 14。锯齿光阑大小为 11 mm,定义光斑有效口径为  $r_x + r_y$ ,则光斑有效口径为 10.53 mm(光强下降到中心强度的  $e^{-2}$ )。定义光斑的近场光强调制度为有效口径内光强最大值与平均值之比,实验中测得的近场光强调制度小于 1.2。测量结果表明,使用 4F 像传递系统和锯齿光阑有效抑制了衍射产生的强度调制;两个双灯抽运的激光头正交放置,补偿了抽运的不均匀性,输出光斑近场光强分布均匀,光斑边缘锐利。

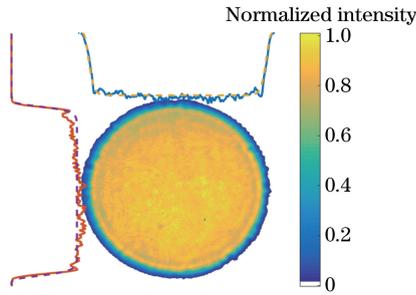


图 5 输出近场光强分布

Fig. 5 Intensity distribution in the near field

实验中测量了光斑的远场能量分布,焦距为 2000 mm 的透镜将光斑聚焦,CCD 记录焦点处光斑的强度分布,CCD 的分辨率为  $12 \mu\text{m}$ ,如图 6(a)所示。定义远场的环围能量分布为距离焦点中心距离  $r$  范围内的能量占总能量的百分比,实验中测量的环围能量分布如图 6(b)所示,实线表示实验测量值,虚线表示理想平面波情况下相同口径、相同阶数的超高斯光束的远场环围能量分布。结果表明,超过 95% 的能量在  $600 \mu\text{rad}$  范围内,相当于 3 倍衍射极限。光斑的远场能量分布可以反映输出光斑的波前信息,双程放大器使用高斯光束扩束后中间的平顶部分作为种子光,波前分布接近于平面波,理想情况下,远场图案类似于圆孔在平面波照明时的夫琅禾费衍射图案,但实际情况中光斑的波前还受光学元件的面形、激光棒的光学质量、激光棒的抽运均匀性等因素的影响,因此,实际测量远场图案中出现了不规则的边带。

实验中使用干涉仪测量了放大器中激光棒的透射波前,两根激光棒透射波前的峰谷值在 0.3~0.4 个波长之间(633 nm,单程)。在双程放大器中将两个激光头移出光路,无增益介质时光束远场光斑中的不规则边带消失。因此,本系统中激光棒的透射波前是影响光束质量的首要因素,为了进一步提高系统的光束质量需要使用更高标准的增益介质。

获得时间波形为方波的激光脉冲是本系统的主要目标之一,将全光纤种子源中产生方波的种子光注入

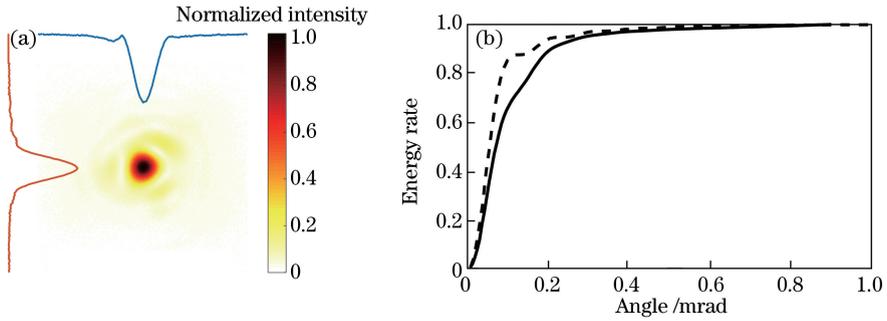


图 6 (a)光斑远场能量分布;(b)光束远场包围能量分布

Fig. 6 (a) Intensity distribution of light spot in the far field; (b) surrounding energy distribution of far field beam

到系统中,用以测量各级放大器引入的波形畸变。测量的时间波形如图 7(a)所示,图中各曲线分别表示种子光的时间波形、再生放大器的输出波形以及双程放大器的输出波形。通常使用方波扭曲(脉冲前沿幅度与脉冲后沿幅度的比值)衡量系统引入的时间波形畸变,从测量结果可以看出,增益饱和导致的波形畸变主要发生在双程放大器中,系统的方波扭曲达到 7.1:1。这是由于 Nd:YAG 具有较大受激发射截面,饱和通量较低,当激光脉冲通过增益介质时,脉冲前沿获得的增益大于脉冲后沿,增益饱和导致的时间波形畸变十分明显。改变光纤种子源的输出脉冲的时间波形可以预补偿放大系统中引入的波形畸变,预补偿后输出的时间波形如图 7(b)所示,双程放大器的输出波形近似方波。

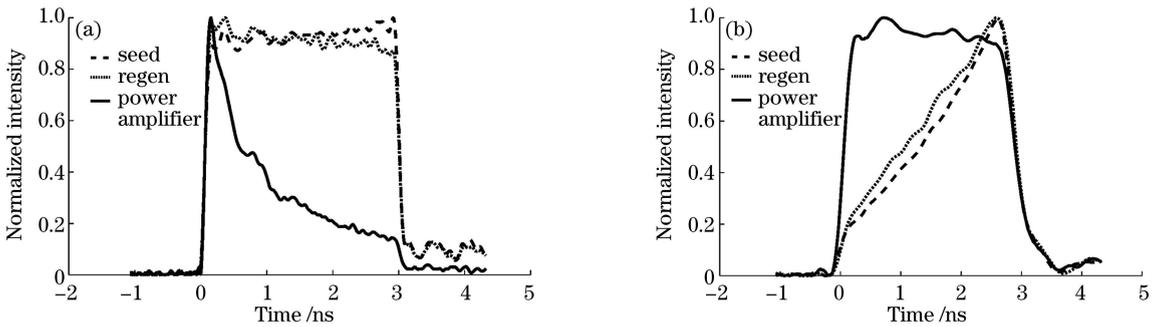


图 7 输出脉冲时间波形。(a)方波注入时的时间波形;(b)预补偿时的时间波形

Fig. 7 Temporal profile of the pulse. (a) Temporal shape Injected by the square-pulse;

(b) temporal shape after pre-compensation

实验中测量了系统输出能量的稳定性如图 8 所示,表示 30 min 内系统的输出能量随时间的变化,输出能量的 RMS 小于 1.4%。激光系统中再生放大器工作在深度饱和状态,输出能量稳定;同时功率放大器使用双程放大结构,增益介质的饱和深度大,因此系统总体输出脉冲能量稳定。

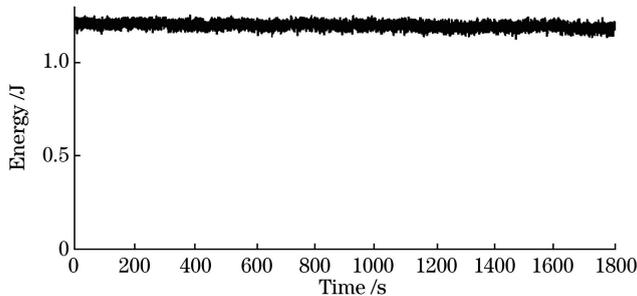


图 8 输出能量随时间变化

Fig. 8 Output energy versus time

## 4 结 论

报道了一台基于 MOPA 结构激光系统,该系统使用全光纤种子源、再生放大器、氙灯抽运的 Nd:YAG

双程放大器,实现了重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 1.2 J、脉冲宽度为 3 ns 的激光输出。通过预补偿技术,实现了方波脉冲的输出。输出激光的有效光束口径 10.53 mm,近场光强近平顶分布,光强调制度小于 1.2,95% 的能量在 600  $\mu$ rad 范围内,相当于 3 倍衍射极限。系统的能量稳定性优于 1.4%。具有上述特征的激光系统将在光学元件的损伤研究中发挥重要作用。在接下来的工作中,将再增加一级放大器,将激光器的输出能力提高到 10 Hz、10 J 量级,同时开展频率转换实验,拓展系统的应用范围。

## 参 考 文 献

- [1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [2] Bliss E S. Pulse duration dependence of laser damage mechanisms[J]. Opto-Electronics, 1971, 3(2): 99-108.
- [3] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, *et al.* Laser-induced damage in dielectric with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(12): 2248-2251.
- [4] Honig J, Halpin J, Browning D, *et al.* Diode-pumped Nd:YAG laser with 38 W average power and user-selectable, flat-in-time subnanosecond pulses[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3269-3275.
- [5] Wang Chao, Wei Hui, Wang Jiangfeng, *et al.* Laser diode pumped Nd:YAG laser with high repetition and high average power[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 224204.  
汪超, 韦辉, 王江峰, 等. 激光二极管抽运的高重频高平均功率 Nd:YAG 激光器[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 224204.
- [6] Peng Y J, Wang J F, Zhang Z X, *et al.* Multifunctional high-performance 10 J level laser system[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(4): 041402.
- [7] Wang Yanhai, Wang Jiangfeng, Li Xuechun. Laser pulse shaping and modification techniques in front-end of high-power laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 477-481.  
王艳海, 王江峰, 李学春. 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 477-481.
- [8] Zhang Ruofan, Wei Hui, Wang Jiangfeng, *et al.* High stability laser diode side-pumped Nd:YAG 300 Hz regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002014.  
张若凡, 韦辉, 王江峰, 等. 高稳定性半导体激光侧面抽运 Nd:YAG 300 Hz 再生放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002014.
- [9] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 370-374.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 370-374.