

425 mJ 高光束质量特殊取向 Nd:YAG 激光放大器

邹 岩, 姜梦华, 惠勇凌, 雷 旬, 李 强

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 基于主振荡功率放大结构,采用特殊取向 Nd:YAG 激光放大器,获得高脉冲能量、高光束质量的激光输出。激光放大结构包含种子源、预放大级和主放大级三部分。在主放大级中,采用串联放置的激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 棒状放大模块对种子光进行放大。为了获得高光束质量的输出光束,对不同切割方向 Nd:YAG 晶体棒的热退偏损耗进行了模拟。根据模拟结果,放大模块选择[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质。在重复频率为 200 Hz、脉宽为 25 ns、脉冲能量为 40 μ J、光束质量接近衍射极限的种子光注入条件下,获得了 425 mJ 脉冲能量输出,输出光光束质量因子为 1.37,功率稳定度为 0.81%。

关键词 激光器; Nd:YAG; 晶体取向; 热退偏损耗

中图分类号 TN2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901004

425 mJ High Beam Quality Specific Orientation Nd:YAG Laser Amplifier

Zou Yan, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Based on master-oscillator power amplifier structure, an laser output with high pulse energy and high beam quality is achieved using a specific orientation Nd:YAG laser amplifier. The laser amplifier includes three parts, a seed laser source, a pre-amplifier stage and a main-amplifier stage. In the main-amplifier stage, a laser diode side-pump Nd:YAG rod amplifiers is used for the amplification of the seed laser. In order to obtain a high beam quality output, the thermal depolarization losses for different cut Nd:YAG rods are simulated. According to the simulation results, the [100]-cut Nd:YAG rods are chosen as the active materials in the main-amplifier stage. Under the condition of repetition frequency of 200 Hz, pulse width of 25 ns, pulse energy of 40 μ J and a near diffraction limit seed laser injected, an output of 425 mJ pulse energy is gained with a beam quality factor of 1.37, and the output power stability of 0.81%.

Key words lasers; Nd:YAG; crystal orientation; thermally induced depolarization losses

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.3580

1 引 言

高重复频率、短脉宽、高脉冲能量、高光束质量的激光光源在激光测距^[1]、光电对抗^[2]、空间碎片测量^[3]、高温等离子体探测^[4]等方面有着广泛的用途。受增益介质热效应的影响,单级激光振荡器的输出一般难以同时满足脉冲能量和光束质量的需要。因此,在高平均功率应用中,采用主振荡功率放大(MOPA)结构是同时获得高脉冲能量和高光束质量输出光束的可行方案^[5]。

对于输出波长为 1064 nm 的激光放大器,掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)晶体因其增益高、荧光寿命长、热导率高和硬度大等特点,成为国内外研究人员常用的增益介质。在多种激光放大结构中,与 Zigzag 板条放

收稿日期: 2017-04-06; 收到修改稿日期: 2017-05-06

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 邹 岩(1984—),男,博士研究生,主要从事能量光电子技术与系统方面的研究。

E-mail: zouyanofcn@163.com

导师简介: 李 强(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大功率固体激光技术与加工系统方面的研究。

E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

大结构和 Innoslab 放大结构相比,侧面抽运 Nd:YAG 棒状放大结构因其结构简单可靠、易维护和成本低等优点而一直是人们研究的重点。侧面抽运 Nd:YAG 棒状放大器在高平均功率下工作时,表面冷却的 Nd:YAG 晶体内部会产生大量的热积累,形成热应力,使晶体棒的径向和切向折射率不同、出现热致双折射效应,从而造成输出光的热退偏。在激光束为线偏振光,并且存在偏振元件时,光束形状发生严重畸变,光束质量发生退化,激光器的运行效率降低。

为了降低热退偏对输出光的影响,研究人员一直尝试在光路中使用退偏补偿技术。常用的退偏补偿技术有两种:1) 在两个 Nd:YAG 棒状放大模块之间插入 90° 石英转镜,并配合使用 $4f$ 像传递系统^[5-8], 90° 石英转镜用来交换两棒之间径向和切向的偏振分量, $4f$ 像传递系统用来在彼此相对的主平面位置上成像,两者配合使用,使放大光的径向和切向偏振分量在晶体棒的每个位置都能获得相等的相位延迟,实现对热退偏的补偿;2) 在放大光路中使用受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜代替全反射镜^[9-11],放大光在相位共轭镜处进行反射时产生反相波前,由此实现在光束传输过程中对波前畸变的实时补偿。在实际应用中,以上两种热退偏补偿技术均存在一些不足。在 90° 石英转镜配合 $4f$ 像传递系统的退偏补偿技术中,当晶体棒出现明显的热退偏时,石英转镜、像传递透镜和晶体棒之间微小的调整误差都将导致热退偏无法得到充分补偿^[12]。在 SBS 相位共轭退偏补偿技术中所使用的介质有气体、液体和固体。气体介质的密度小, SBS 增益系数小,需要依靠增大气体压强来提高 SBS 增益^[13];液体介质在高重复频率工作时热积累严重,难以长时间使用^[14],另外,液体介质通常具有很高的毒性和很强的挥发性,不适合商业应用和野外使用^[15];固体介质的损伤阈值低,在高平均功率工作时容易造成永久损伤^[13-15]。

减小热退偏对光束质量影响的途径,可以从以下方面考虑:1) 热退偏产生之后,通过在光路中插入适当的光学元件去补偿;2) 减小热退偏损耗,降低热退偏对光束质量的劣化作用;3) 既减小热退偏损耗,又在热退偏产生之后进行补偿。实现第三种途径的关键是减小热退偏损耗。在常规的 Nd:YAG 棒状放大结构中, Nd:YAG 晶体棒的切割方向均为 $[111]$ 切割方向。2002 年, Shoji 等^[16]通过理论分析指出, Nd:YAG 晶体棒中热退偏的产生与晶体的切割方向有关,通过选择适当的晶体切割方向和振荡光偏振方向,可以大大减少热退偏损耗。

本文对 $[111]$ 切割方向和 $[100]$ 切割方向的 Nd:YAG 晶体棒热退偏情况进行了模拟,并选择 $[100]$ 切割方向的 Nd:YAG 晶体棒作为放大模块的增益介质,对重复频率为 200 Hz、脉宽为 25 ns、单脉冲能量为 40 μ J、光束质量接近衍射极限的种子光进行放大,获得了功率为 425 mJ 的脉冲能量输出,输出光光束质量因子 $M^2 = 1.37$,功率稳定度为 0.81%。

2 不同取向 Nd:YAG 晶体棒的热退偏分析

为了选出适当的晶体切割方向,对不同取向 Nd:YAG 晶体棒的热退偏情况进行了模拟。Nd:YAG 晶体为立方晶系,常温下,其光率体为球面;在受到应力作用后,晶体产生双折射,光率体变为椭球面。如图 1 所

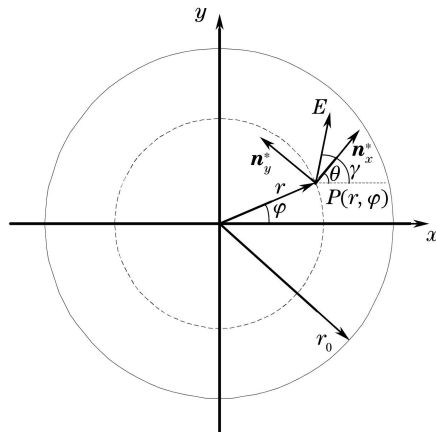


图1 Nd:YAG 晶体棒横截面内光率体的取向

Fig. 1 Orientation of the Nd:YAG rod in cross-section

示,定义晶体棒中某点 $P(r, \varphi)$ 的退偏振 D , 为退偏振后能量与最终线偏振输出能量的比值, 表示为^[16]

$$D = \sin^2 [2(\theta - \gamma)] \sin^2 \left[\frac{\alpha \eta P_{in} \Omega}{16\lambda(1-\nu)K} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \right], \quad (1)$$

式中 α 为晶体的热膨胀系数, η 为抽运光的生热比率, P_{in} 为抽运光功率, λ 为输出光波长, ν 为晶体泊松比, K 为晶体热导率, r_0 为晶体棒半径, θ 为 x 轴与双折射特征向量 \mathbf{n}_* 的夹角, γ 为 x 轴与入射光 E 偏振方向的夹角. Ω 为双折射参数, 对于[111]切割方向和[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒, Ω 分别表示为

$$\Omega = \frac{1}{3} n_0^3 (1 + \nu) (p_{11} - p_{12} + 4p_{44}), \quad (2)$$

$$\Omega = n_0^3 (1 + \nu) [(p_{11} - p_{12})^2 \cos^2(2\varphi) - 2p_{44}^2 \sin^2(2\varphi)]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中 p_{11} 、 p_{12} 、 p_{44} 为晶体的弹光系数.

在不同切割方向的 Nd:YAG 晶体中, θ 和 φ 的关系不同. 对于[111]切割方向和[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒, θ 和 φ 的关系分别为

$$\tan(2\theta) = \tan(2\varphi), \quad (4)$$

$$\tan(2\theta) = \frac{2p_{44}}{p_{11} - p_{12}} \tan(2\varphi). \quad (5)$$

利用(1)~(5)式, 代入参数 $\alpha = 5.25 \text{ cm}^{-1}$, $\eta = 0.24$, $\nu = 0.3$, $K = 13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $p_{11} = -0.0290$, $p_{12} = 0.0091$, $p_{44} = -0.0615$, 计算得到抽运功率为 150 W, 直径为 4 mm 的[111]切割方向晶体棒和[100]切割方向晶体棒的热退偏分布随入射光偏振方向的变化, 如图 2 所示.

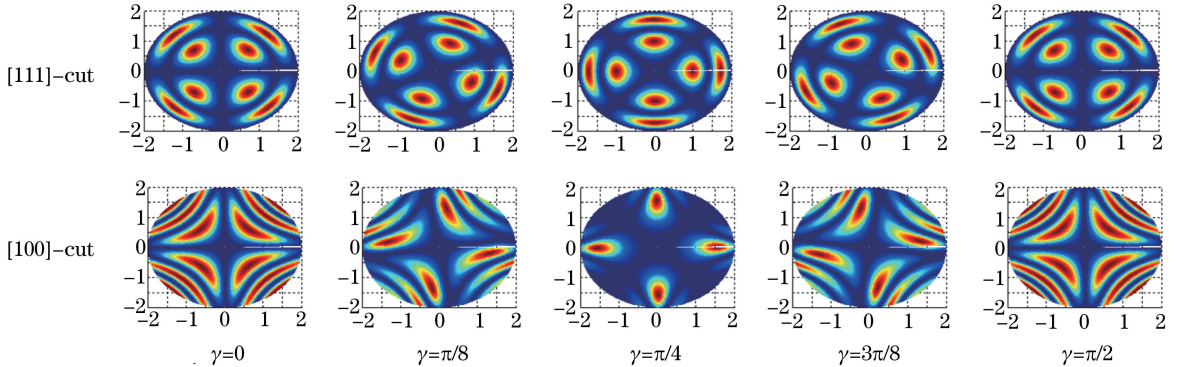


图 2 [111]切割方向和[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒端面不同入射光偏振角度下的热退偏分布图

Fig. 2 Thermal depolarization patterns of the cross section for the [111]-cut and [100]-cut Nd:YAG rods with different incident polarization angles

在图2中, 采用不同的颜色表示热退偏的强度, 蓝色表示热退偏强度最小值, 红色表示热退偏强度最大值. 在入射线偏振光偏振方向一定时, 热退偏强度呈不均匀分布, 形成消色线和等色线分布^[17-19], 其中同消色线依赖于晶体中的光轴取向, 等色线依赖于波法线的方向和晶体的厚度, 各点强度均为零的曲线族称为主同消色线和主等色线. 主同消色线表现为一个暗十字, 其两臂与线偏振光偏振方向平行.

对于[111]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒, 热退偏的整体大小不变, 热退偏分布随着振荡光的偏振方向进行周期性变化, 周期为 $\pi/2$. 因此, 在[111]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒中, 任意偏振方向的振荡光产生的热退偏损耗相同. 对于[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒, 热退偏的分布也按照周期 $\pi/2$ 变化, 当振荡光的偏振角度 γ 为 0 和 $\pi/2$ 时, 热退偏存在最大值, 当振荡光的偏振角度 $\gamma = \pi/4$ 时, 热退偏存在最小值, 且热退偏的最小值明显小于[111]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒的最小热退偏值. 该结果与文献[18]的探测光实验和文献[19]的自由振荡实验报道一致. 为了降低高功率棒状 Nd:YAG 激光放大器由于高抽运功率所导致的热致双折射效应对光束质量的退化和能量提取效率的影响, 最大程度地减小热退偏损耗, 采用[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒放大器. 当入射种子光的偏振方向沿晶体棒退偏最小的方向入射时, 可以实现比常规[111]切割方向 Nd:YAG 晶体棒更小的热退偏. 采用 90° 石英转镜进一步补偿热致双折射效应, 可简化系统结构, 不采用像传递系统而获得较好的补偿效果, 有利于获得高光束质量、高效率的激光放大输出.

3 放大器结构

放大器包含种子源、预放大级和主放大级三部分,如图 3 所示。种子源输出重复频率为 200 Hz、脉宽为 25 ns、脉冲能量为 40 μJ 、光束质量因子 $M^2 \approx 1.1$ 的种子光。预放大级采用掠入射 Nd:YVO₄ 板条放大模块和常规 Nd:YAG 棒状放大模块,将种子光能量放大到毫焦级。主放大级采用[100]切割方向 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质将毫焦级的脉冲继续放大直到最终输出。

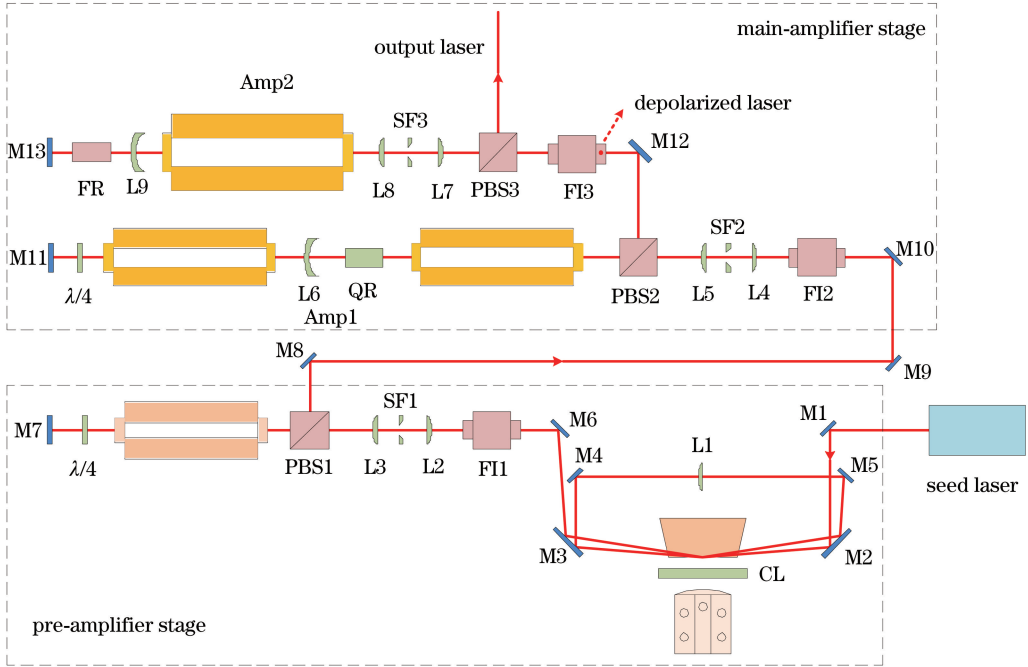


图 3 放大装置示意图

Fig. 3 Setup of the amplifier

预放大级的作用是在保持高光束质量的前提下提升单脉冲能量。在掠入射 Nd:YVO₄ 板条放大模块中,Nd:YVO₄ 板条沿 a 轴切割,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 1.0%,尺寸为 22 mm×5 mm×2 mm,两侧面切角为 13°。峰值功率为 500 W、抽运脉宽为 100 μs 、波长为 808 nm 的半导体巴条对板条晶体侧面抽运,抽运光经过焦距为 25 mm 的柱透镜沿快轴方向聚焦后,在晶体内形成约 1.5 mm 厚的增益区域。为了保证种子光和抽运光的模式匹配,经过光路优化,一通、二通放大光束分别以直径 0.49 mm、掠入射角 25°和直径 1.05 mm、掠入射角 34°进入板条晶体进行双通放大。之后,光束经过扩束比例为 1.5 倍的透镜组 L2~L3,扩束后以 1.8 mm 的直径进入常规 Nd:YAG 棒状放大模块。在常规 Nd:YAG 棒状放大模块中,晶体棒的尺寸为 $\Phi 3$ mm×67 mm,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.7%。脉宽为 250 μs 、重复频率为 200 Hz、峰值功率为 1200 W 的激光二极管(LD)抽运源对晶体棒侧面抽运。光束在常规 Nd:YAG 棒状放大模块中进行双通放大后从偏振分光棱镜 PBS1 输出。

主放大级由两个[100]切割方向的 Nd:YAG 棒状放大模块组成。从预放大级出射的放大光经过法拉第隔离器 FI2,进入扩束比例为 4 倍的透镜组 L4~L5,扩束后以 4.5 mm 的直径通过偏振分光棱镜 PBS2 进入第一级主放大模块 Amp1。Amp1 包括两个 Nd:YAG 晶体棒,晶体棒的尺寸为 $\Phi 5$ mm×110 mm,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.8%。每个晶体棒使用重复频率为 200 Hz,脉宽为 250 μs ,峰值功率为 1200 W 的 LD 抽运源对其侧面抽运。两棒之间插入焦距为 -900 mm 的负透镜 L6 和 90°石英转镜 QR 来补偿放大光的热透镜效应和热退偏。光束在 Amp1 中进行双通放大,之后进入扩束比例为 2.5 倍的透镜组 L7~L8,扩束后以 8 mm 的直径进入第二级主放大模块 Amp2。Amp2 中的 Nd:YAG 晶体棒尺寸为 $\Phi 10$ mm×188 mm,Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.7%。重复频率为 200 Hz,脉宽为 240 μs ,峰值功率为 13.5 kW 的 LD 抽运源对晶体棒侧面抽运。在全反射镜 M13 之前插入焦距为 -1000 mm 的负透镜 L9 和法拉第旋转器 FR 来补偿放大光的热透镜效应和热退偏。光束在 Amp2 中进行双通放大,最终从偏振分光棱镜 PBS3 输出。如图 2 所示,对于

[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒,其热退偏损耗与入射光的偏振方向有关。因此,在 Amp1 和 Amp2 中,调整晶体棒的角度,使得退偏最小的方向沿着种子光的偏振方向。透镜组 L2~L3,L4~L5,L7~L8 中,焦点附近的小孔光阑 SF1、SF2、SF3 用来滤除放大光束的高频部分。法拉第隔离器 FI1、FI2、FI3 用来防止后级的光束进入前级而影响前级输出。在没有种子光注入的情况下,所有放大模块在最高抽运功率工作时均没有出现放大的自发辐射。

4 实验结果和讨论

种子光和每级放大模块后放大光的脉冲能量如图 4 所示。经测量,预放大级、第一级主放大和第二级主放大后输出光的脉冲能量分别为 17.7,93,425 mJ。结合对应的抽运光能量,每级放大模块的光光转换效率分别为 6.85%,13.32%,10.69%。第二级主放大模块的光-光转换效率低于第一级主放大模块,其原因是第二级主放大模块中晶体棒的直径为 10 mm,放大光束的直径为 8 mm。如图 2 所示,对于[100]切割方向的 Nd:YAG 晶体棒,当振荡光的偏振角度 $\gamma = \pi/4$ 时,热退偏的最大值发生在晶体棒边缘处。适当减小光束的直径,可以减弱光束的热退偏,但同时也使得光束与增益区域的模式匹配下降,影响了光-光转换效率。在第二级主放大中,尝试使用 $\lambda/4$ 波片来构成双通光路。在相同的抽运功率下,最高输出 380 mJ,相比使用法拉第旋转器降低了 10.6%,证明在放大结构中使用法拉第旋转器构成双通光路比使用 $\lambda/4$ 波片可以更有效地补偿热退偏。令 PBS3 处放大光束的输出功率为 P_{out} ,FI3 处退偏振光束的输出功率为 P_{dep} ,则放大器的退偏损耗为 $\eta_{dep} = P_{dep}/(P_{out} + P_{dep})$ 。采用法拉第旋转器,在输出 425 mJ 时,放大器的退偏损耗 $\eta_{dep} < 1\%$,可以获得很好的热退偏补偿效果,与[111]切割晶体棒采用法拉第旋转器和成像补偿的结果相当^[20],但结构复杂性和成像补偿对调整精度的要求明显降低。

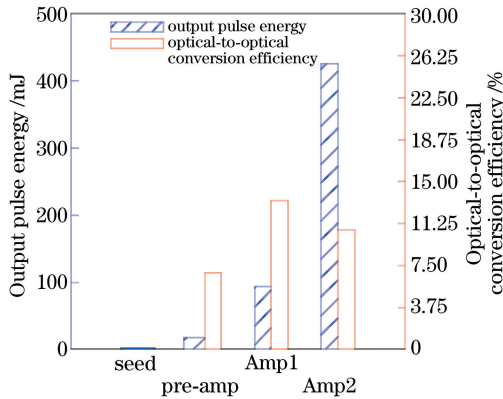


图 4 每级放大级后的输出脉冲能量和光-光转换效率

Fig. 4 Output pulse energy and optical-to-optical conversion efficiency for each amplifier stage

种子光、预放大级以及主放大级的输出光斑图样如图 5 所示。经测量,预放大级后的光斑光束质量因子 $M^2 \approx 1.20$,主放大级后的光斑光束质量因子 $M^2 \approx 1.37$ 。主放大级的光束质量比预放大级稍有退化,其原因可能是主放大级的抽运功率较高,工作物质的热积累比较严重,使用[100]切割方向的晶体棒减少了热退偏损耗,降低了热退偏对光束形状的畸变,减少了对光束质量的退化,提高了激光器效率。但是由于热透镜效应、抽运均匀性影响,光束质量仍有退化。

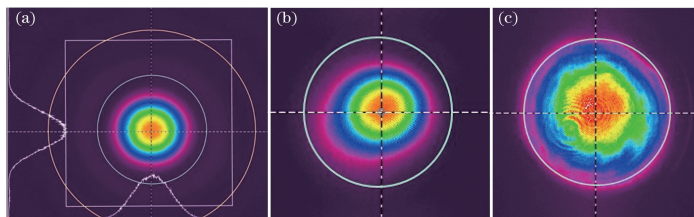


图 5 输出光斑图。(a)种子光;(b)预放大级;(c)主放大级

Fig. 5 Output light spot patterns. (a) Seed laser; (b) pre-amplifier stage; (c) main-amplifier stage

当放大器处于最高平均功率工作时,使用功率计测试放大器的工作稳定性,每隔 30 s 记录输出功率值,测试 1200 s,得到功率随时间变化的情况如图 6 所示,功率稳定度为 0.81%。

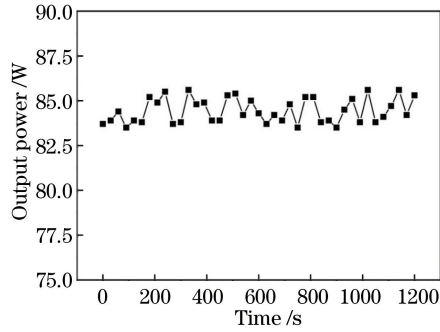


图 6 输出功率的稳定度

Fig. 6 Stability of output power

5 结 论

根据不同取向 Nd:YAG 晶体棒的热退偏模拟结果,基于 MOPA 结构,采用[100]切割方向 Nd:YAG 棒状放大模块作为主放大级,对重复频率为 200 Hz、脉宽为 25 ns、脉冲能量为 40 μ J、光束质量接近衍射极限的种子光进行放大,得到能量为 425 mJ、光束质量因子 $M^2=1.37$ 的脉冲输出,功率稳定度为 0.81%。如果进一步优化结构、提升输出功率,那么特殊取向 Nd:YAG 棒状放大器将具有更广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yang H, Meng J, Ma X, *et al.* Compact and high-energy diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG slab laser system for space application[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 121406.
- [2] Zohuri B. Directed energy weapons: physics of high energy lasers (HEL)[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 47-77.
- [3] Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, *et al.* The use of laser ranging to measure space debris[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(2): 212.
- [4] Serrano J, Moros J, Laserna J J. Sensing signatures mediated by chemical structure of molecular solids in laser-induced plasmas[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(5): 2794-2801.
- [5] Qi Y, Zhao Z, Liu C, *et al.* Beam quality management in multi-stage side-pumped Nd:YAG MOPA laser systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 220-225.
- [6] Yang X, Bo Y, Peng Q, *et al.* High-beam-quality, 5.1 J, 108 Hz diode-pumped Nd:YAG rod oscillator-amplifier laser system[J]. Optics Communications, 2006, 266(1): 39-43.
- [7] Hirano Y, Pavel N, Yamamoto S, *et al.* 100 W class diode-pumped Nd:YAG MOPA system with a double-stage relay-optics scheme[J]. Optics Communications, 1999, 170(4): 275-280.
- [8] Riesbeck T. Generation of tailored pulse trains for efficient material processing by a high power MOPA system with birefringence compensation[J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(3): 240-245.
- [9] Eichler H J, Haase A, Menzel R, *et al.* Depolarization treatment and optimization of high power double pass neodymium rod amplifiers with SBS mirror[J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1994, 3(4): 585.
- [10] Tsubakimoto K, Yoshida H, Miyana N. High-average-power green laser using Nd:YAG amplifier with stimulated Brillouin scattering phase-conjugate pulse-cleaning mirror[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12557-12564.
- [11] Qiu J, Tang X, Fan Z, *et al.* 200 Hz repetition frequency joule-level high beam quality Nd:YAG nanosecond laser[J]. Optics Communications, 2016, 368: 68-72.
- [12] Moshe I, Jackel S. Correction of thermally induced birefringence in double-rod laser resonators-comparison of various methods[J]. Optics Communications, 2002, 214(1): 315-325.
- [13] Hasi W L J, Guo X Y, Li X, *et al.* A new method to improve the loading capacity of stimulated Brillouin scattering phase-conjugating mirror[J]. Applied Physics B, 2010, 100(3): 577-580.

- [14] Guo Shaofeng, Lin Wenxiong, Lu Qisheng, *et al.* Experimental research on stimulated Brillouin scattering in fused silica glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2218-2222.
郭少锋, 林文雄, 陆启生, 等. 熔融石英玻璃受激布里渊散射效应实验研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2218-2222.
- [15] Wang Sha, Tong Lixin, Gao Qingsong, *et al.* LD pumped laser MOPA system with a phase conjugating mirror of a fused silicon rod[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1233-1236.
汪 莎, 童立新, 高清松, 等. 应用熔石英棒相位共轭镜的 LD 抽运激光 MOPA 系统[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(8): 1233-1236.
- [16] Shoji I, Taira T. Intrinsic reduction of the depolarization loss in solid-state lasers by use of a (110)-cut $Y_3Al_5O_{12}$ crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(17): 3048-3050.
- [17] Koechner W. *Solid-state laser engineering*[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [18] Puncken O, Tünnermann H, Morehead J J, *et al.* Intrinsic reduction of the depolarization in Nd:YAG crystals[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20461-20474.
- [19] Sun Z, Li Q, Jiang M, *et al.* Improvement of the linearly polarized output power in Nd:YAG laser with [100]-cut rod [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(s1): s11402.
- [20] Ostermeyer M, Klemz G, Kubina P, *et al.* Quasi-continuous-wave birefringence-compensated single- and double-rod Nd:YAG lasers[J]. *Applied Optics*, 2012, 41(36): 7573-7582.