

1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统

陆云峰 王毅 刘斌 张翔 王春华 叶志斌 刘崇 项震 陈军

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 高峰值功率、高稳定性以及优越光束质量的激光光源是材料加工与处理的理想选择。利用重复频率为 120 kHz、脉宽为 220 ps、平均功率为 26 μ W 的种子光源, 经过光纤和固体组成的混合放大系统, 最终得到平均功率为 39.2 W 的激光输出, 峰值功率达到 1.5 MW。预放大器由两级光纤放大器组成, 功率放大器为四级端面抽运的 Nd:YVO₄ 固体放大器, 通过控制晶体掺杂浓度、晶体温度以及抽运光束直径, 并且调节各个放大级中的填充因子, 最终得到输出光束的光束质量因子为 $M^2=1.3$ 。

关键词 激光器; 脉冲激光器; 高峰值功率; 光纤激光和固体激光混合放大器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202009

1.5 MW Peak Power, Fiber-Solid Hybrid Amplification MOPA Lasers

Lu Yunfeng Wang Yi Liu Bin Zhang Xiang Wang Chunhua Ye Zhibin

Liu Chong Xiang Zhen Chen Jun

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract High peak power, high stability laser beams with excellent beam quality are ideal choices for material manufacturing and processing. A semiconductor laser with repetition frequency of 120 kHz, pulse width of 220 ps, average power of 26 μ W is used as seed source. The pre-amplifier consists of two fiber amplifiers. The power amplifier consists of four stages end-pumped Nd:YVO₄ solid amplifiers. The average power of final laser output is up to 39.2 W with peak power of 1.5 MW. By optimizing the crystal doping concentration, crystal temperature, the pump beam diameter and beam filling factor in each solid amplifier, the output beam with M^2 factor of 1.3 is achieved.

Key words laser; pulsed laser; high peak power; fiber-solid hybrid amplifier

OCIS codes 140.3538; 140.3280; 140.3570

1 引言

高光束质量高峰值功率的脉冲激光是在科研和工业领域有着极其广泛和重要的应用^[1-2]。目前国内激光加工行业常用激光光源的峰值功率大约在几十千瓦到百千瓦量级, 进一步提高光源的峰值功率成为一个科研难点。光纤激光器的优点在于光束质量好, 并且通过锁模技术可以获得很窄的脉冲宽度, 缺点在于提高峰值功率时光纤极易损坏^[3-4]。固体激光器可以承受非常高的峰值功率, 但是固体激光器输出的脉冲宽度一般为十几到几十纳秒, 直接获得亚纳秒甚至皮秒脉冲比较复杂, 很难通过缩短脉冲宽度来提高激光脉冲的峰值功率^[5-9]。

收稿日期: 2014-08-01; 收到修改稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金(U1230101)、中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(2014HEL04)

作者简介: 陆云峰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: lyf_snlcl@126.com

导师简介: 项震(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事固体激光与光学检测方面的研究。

E-mail: xiangzhen@zju.edu.cn(通信联系人)

结合上述两种激光器优势的光纤和固体混合的激光放大器,可以通过对光束质量的有效控制获得高功率高光束质量的激光放大系统。2012年Chen等^[10]报道了将脉宽为3~15 ns,重复频率为400 kHz,平均功率为300 mW的光纤输出种子光经过光纤和三级Nd:YVO₄固体放大后得到平均功率为120 W的激光输出的实验结果,并且通过调节放大级中的填充因子最后得到光束质量为 $M^2=1.30$ 。Délien等^[11]报道了将脉宽为22 ps,重复频率为200 kHz,平均功率为50 mW的光纤输出种子光经过一级单端Nd:YVO₄放大后得到平均功率为10 W的实验结果,峰值功率达到2.3 MW,增益系数为45 dB,该文分析了单级放大过程中各项参数对放大结果的影响,但是没有涉及到光束质量的控制。

2013年本研究小组报道了利用光纤激光器和固体激光放大器混合放大装置输出重复频率为100 MHz、脉宽为1 ns、平均功率为32.9 W,峰值功率为0.3 kW的实验结果^[12]。为了获得高峰值功率的输出,此次实验中采用了重复频率为120 kHz、脉宽为220 ps的种子光源,经过两级光纤预放大器和四级端面抽运Nd:YVO₄固体放大器,最终得到平均功率为39.2 W的激光输出,峰值功率达到1.5 MW。通过调节晶体的掺杂浓度和抽运光直径大小,并且通过调节各放大级中的填充因子,最终得到输出光束的光束质量为 $M^2=1.3$ 。

2 实验装置和步骤

光纤-固体混合放大激光器主振荡器功率放大器(MOPA)实验装置如图1所示,种子激光器经过两级光纤放大器进行功率预放大后,进入固体放大器进行功率放大。脉冲种子激光器为直接电流调制的半导体激光器,中心波长为1064 nm,单模光纤耦合输出,光束质量因子 $M^2<1.05$,脉宽和重复频率可以通过调制信号进行调谐,脉宽在200 ps~2 ns范围内可调,脉冲重复频率在50~500 kHz范围内可调,输出脉冲的峰值功率为1 W,平均功率随调制占空比的不同而改变。实验中使用的激光参数为:脉宽为220 ps(脉冲波形如图1中插图所示),脉冲重复频率为120 kHz,平均功率为26 μW。

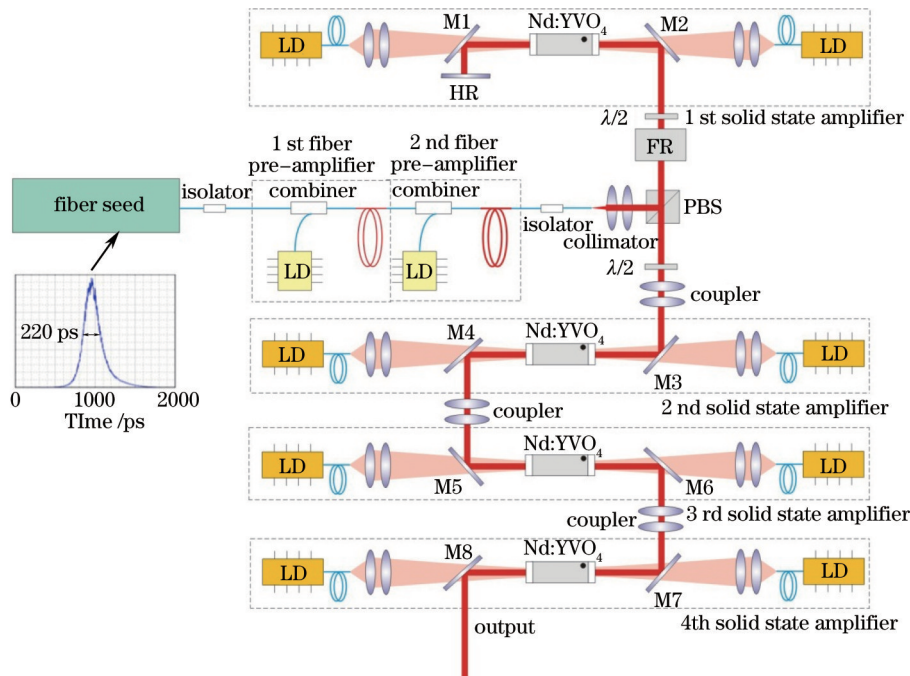


图1 高峰值功率光纤-固体混合放大激光器装置图

Fig.1 Experimental setup of the high peak power fiber-solid hybrid amplification MOPA laser

经过单模保偏光纤的耦合,调制激光通过光纤隔离器进入光纤预放大器。光纤预放大器由两级组成,其中一级预放中单模光纤的长度为1.5 m,芯径为6 μm,包层为125 μm,数值孔径(NA)为0.110,抽运光功率为600 mW。一级预放后的脉冲激光经过隔离器和合束器后进入光纤二级预放,二级预放使用的是双包层光纤,长度为2.5 m,芯径为10 μm,包层为125 μm,NA为0.075,采用975 nm波长的LD模块抽运,抽运功率为3.5 W。经过光纤二级预放大器后的输出平均功率可以达到21 mW,峰值功率为808 W。

放大系统采用四级端面抽运 Nd:YVO₄激光放大器,放大方式为行波放大,放大器级间未加隔离器。激光放大器中的增益介质采用 *a* 向切割的 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体,晶体尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm。Nd:YVO₄ 晶体是一种有效的四能级激光增益介质,抽运光中心波长在 808 nm 左右,输出激光的中心波长为 1064 nm,受激发射截面很大 ($\sigma_{21} = 25 \times 10^{-23} \text{ m}^2$),是 Nd:YAG 晶体的 5 倍。晶体的两端均镀 1064 nm 和 808 nm 高透膜,透射率分别为 99.9% 和 98%。将晶体包裹 0.1 mm 厚的铝箔后放在铜热沉中并通过 20 °C 恒温水冷却,将晶体光轴垂直于纸面摆放,此时晶体对 s 偏振光有放大效果。光路中的双色镜 M1~M8 镀有对 808 nm 高透和 1064 nm 高反的介质膜,对 808 nm 的反射率为 0.5%,对 1064 nm 的反射率为 99.9%。

固体放大器的抽运源采用德国 DILAS 公司 50W 光纤耦合输出的半导体激光模块,光强分布为高阶超高斯分布,输出激光的中心波长为 808 nm,通过调整温控设备的温度可以调节中心波长,以达到与晶体吸收峰的有效匹配。光纤端面直径为 400 μm ,NA 为 0.22,通过调节耦合透镜组将抽运光从晶体两端面耦合进晶体中,束腰位置落在晶体内部大约距晶体端面 4 mm 处,在各级放大器中根据实验结果选择合理的束腰大小。

由光纤预放大器输出的激光功率为 21 mW,功率较小,对于固体放大器而言属于小信号,所以即使增益系数很高也不能充分地利用激光增益介质中的反转粒子数。为了解决这一问题,第一级固体放大器采用双通放大的方法来充分利用增益介质中的反转粒子数。采用由两片透镜组合成的耦合透镜将输出信号光束耦合进入晶体,为了控制放大后的光束质量,需要选择合理的光束填充因子(信号光与抽运光直径的比例)。光路中的偏振分束棱镜(PBS)、法拉第旋光器(FR)和 1/2 波片是双通放大过程必不可少的器件,双通放大的具体过程为:光纤输出 s 偏振光,经过 PBS 反射后进入法拉第旋光器,变为 45° 偏振,再经过 1/2 波片使其转回 s 偏振,通过晶体后功率被放大,第一级放大级双端总抽运功率为 30 W 左右,由于晶体内部的热梯度分布会使得晶体产生透镜效应,光束经过热透镜后会聚,将 1064 nm 高反镜放置在光束焦点处,这样光束经过高反镜后原路返到晶体里面并再次放大。双通放大后的光束经过 1/2 波片和法拉第旋光器后变为 p 偏振,经过 PBS 后透射出去,再经过一个 1/2 波片使其转回 s 偏振,进入后续固体放大器。后续三级固体放大器的结构与第一级类似,采用由两片透镜组合成的耦合透镜组将光束耦合进入晶体,使得信号光束腰落在激光增益介质中心,后续三级固体放大器中每级双端总抽运功率均为 60 W 左右。

3 实验结果及分析

为了研究获取更高的增益以及优越的光束质量,对实验装置中一些变量进行了控制来进行研究,包括抽运光斑直径在晶体中的大小、冷却水的温度、晶体掺杂浓度以及信号光在晶体中的填充大小^[13-15]。实验中光束功率用 OPHIR 公司的 Nova II 型号功率计测量,光束质量的测量是将光束衰减后用 OPHIR 公司 BG-USB-SP620 激光光斑分析仪测量光斑在不同位置的光斑直径,并用双曲线拟合后得出。

图 2(a)给出了第一级固体放大器在抽运直径 D_{pump} 分别为 400、600 和 800 μm 情况下,双通放大后输出功率随着抽运功率的关系图。晶体都采用原子数分数为 0.2% 的掺杂浓度,冷却水温度为 20 °C,信号光的填充因子都为 87%。可以看到随着抽运直径的减小,信号光功率增长很明显。但是随着抽运直径的减小,晶体中抽运光功率密度增加,从而必将导致晶体中热效应的显著增强,如果散热不好会造成严重波前畸变从而影响光束质量,严重时会导致功率密度过大造成晶体的损坏,所以在小功率抽运情况下可以选择小的抽运直径,可以同时达到功率增长和保证光束质量的效果,大功率抽运下不宜选择太小以防止造成晶体损坏。

图 2(b)给出了第二级固体放大器在不同输入功率 P_{in} 下,输出功率随晶体冷却水的温度变化关系,其中抽运直径 D_{pump} 为 800 μm ,晶体采用原子数分数为 0.2% 的掺杂浓度,信号光的填充因子为 87%。图中横坐标为冷却水的温度,纵坐标为实际输出功率与水温为 10 °C 时输出功率的比值。可以看到冷却水的温度越高,晶体散热性越差,输出功率越低,这种影响在输入功率不高的时候更为明显。但是由于温度在低于 20 °C 时会导致热沉上结露,可能会对晶体表面造成一些损坏,所以热沉的温度采用 20 °C。

图 2(c)对比了在第一级固体放大器中使用两种不同掺杂浓度的晶体(原子数分数为 0.3% 和 0.2%)对双通放大后功率的影响,其中抽运直径 D_{pump} 为 400 μm ,冷却水温度为 20 °C,填充因子为 87%。可以看到相同情况下,低掺杂浓度的晶体的放大效果比高掺杂浓度晶体更好,其原因是低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体可以在抽

运功率很高的情况下减小温度梯度差,增强晶体的散热性能。同时,温度梯度小的另一个优点是可以防止晶体由于热应力产生的应力造成的不可逆转的损坏。因此如果在抽运直径比较小,热效应比较严重的情况下采用低掺杂浓度的晶体是一种更好的选择。

图 2(d)给出了在第一级固体放大器中,输出功率和 M^2 因子分别与光束填充因子的关系。其中抽运直径 D_{pump} 为 $400\ \mu\text{m}$,晶体采用原子数分数为 0.2% 的掺杂浓度,冷却水温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 。可以看出随着填充因子的增加,输出功率在不断增加,但是光束质量在不断变差,其原因是随着填充因子的增加,抽运光的利用率变高,从而导致输出功率的增加,但是由于信号光直径的增加导致光束通过后的球差增大,所以会导致光束质量变差。可以从图中看出 80%~90% 的填充比是比较合适的,可以在有效放大光束功率的同时获得较好的光束质量。

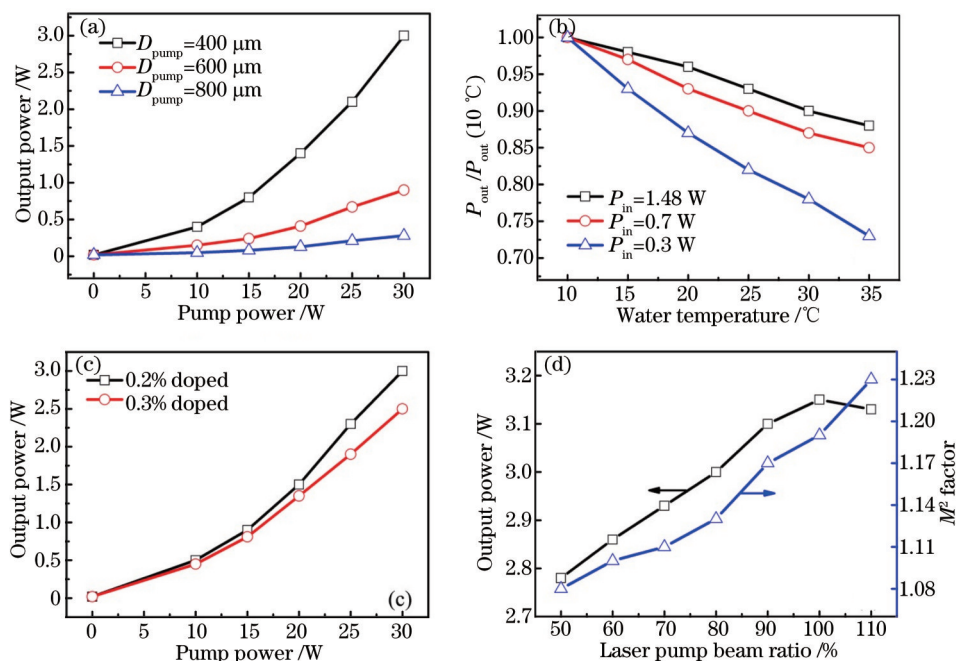


图 2 不同因素对输出功率以及光束质量的影响。(a) 不同抽运直径下输出功率和抽运功率的关系; (b) 输出功率和冷却水温度的关系; (c) 不同掺杂浓度下输出功率和抽运功率的关系; (d) 输出功率、输出光束质量因子和填充比的关系

Fig.2 Influences of different experimental parameters on the output power and beam quality. (a) Output power as a function of pump power with different pump diameters; (b) output power as a function of water temperature with different input powers; (c) output power as a function of pump power with different doping concentrations; (d) output power and M^2 factor as functions of beam filling factor

通过对以上实验结果的分析,考虑到第一级固体放大器的输入信号功率较小,为了更充分地利用抽运光功率,选取的抽运光斑直径 $400\ \mu\text{m}$,双端抽运总功率为 $30\ \text{W}$,并采用双通放大方式,后续三级放大器均采用单通放大,抽运光斑直径为 $800\ \mu\text{m}$,双端总抽运功率为 $60\ \text{W}$ 左右。所有放大器都采用原子数分数为 0.2% 的掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体,冷却水温采用 $20\ ^\circ\text{C}$ 。同时选取 87% 的填充比来保持良好的光束质量和放大效果。

固体放大器中每级的输出光功率随抽运光功率的关系如图 3 所示,图中的横坐标为每级放大级两端输入的总抽运功率,纵坐标为放大后信号光功率。内嵌图为在最高抽运功率(如图箭头)时测得的光束质量因子 M^2 以及光斑形状。信号光通过第一级双通放大后功率增加效果很明显,小信号增益非常大,功率增长几乎按指数上升。当两端抽运功率为 $30\ \text{W}$ 时,光束功率已经从 $20\ \text{mW}$ 上升到 $3\ \text{W}$,增益达到 $21.7\ \text{dB}$ 。合理的光束填充因子也使得光束质量在双通之后没有剧烈地恶化,功率放大至 $3\ \text{W}$ 时光束质量为 $M_x^2 = 1.13$ 和 $M_y^2 = 1.11$ 。光束进入第二级放大之后增益系数开始降低,此时单通放大已经基本能将增益介质中的反转粒子数充分利用,所以此时未采用双通放大方式,并且将抽运光直径调整为 $800\ \mu\text{m}$ 。当第二级放大级中的双端抽运功率达到 $60\ \text{W}$ 时信号光功率增加至 $12.27\ \text{W}$,输出的光束质量为 $M_x^2 = 1.23$, $M_y^2 = 1.22$ 。光束进入第三级放大时的增益已经是饱和增益,随着抽运功率的上升,信号光输出基本按线性增长,当抽运功率为 $60\ \text{W}$ 时,输出功率为 $22\ \text{W}$,输出的光束质量为 $M_x^2 = 1.24$, $M_y^2 = 1.20$ 。光束经过第四级放大后,当抽运功率为

60 W 时,信号光的输出功率为 39.2 W。此时的光束质量为 $M_x^2 = 1.35$, $M_y^2 = 1.30$ 。从实验结果可以看出,通过合理地调节信号光在晶体中的填充因子可以有效地控制光束质量的恶化程度。放大过程并不会改变信号光的重复频率和脉宽,最终输出的平均功率为 39.2 W 时光束的峰值功率达到 1.5 MW。

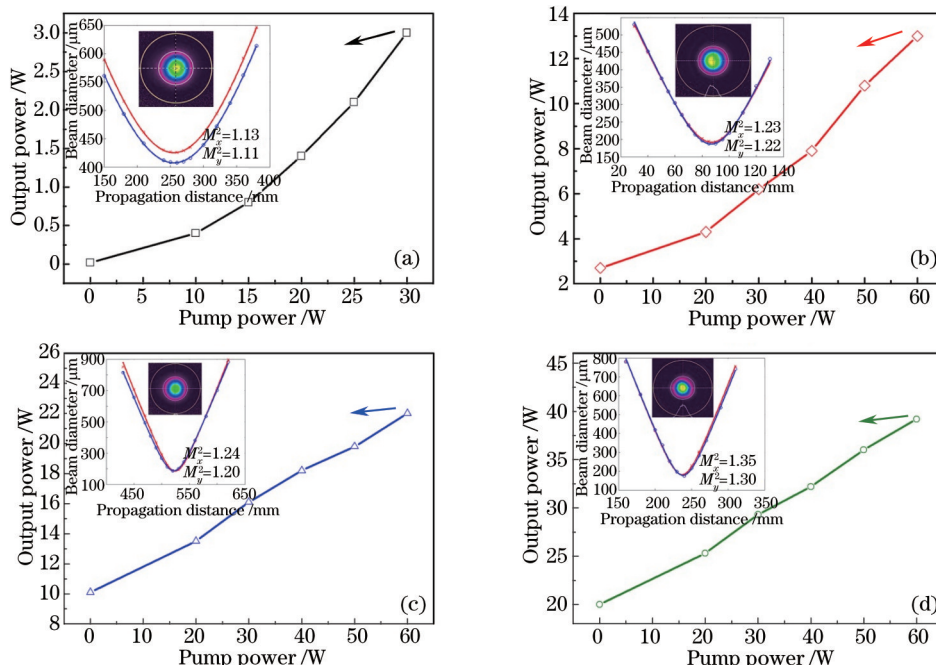


图3 每级放大后信号光的功率增长及放大后光束质量。(a) 第一级放大级; (b) 第二级放大级; (c) 第三级放大级; (d) 第四级放大级

Fig.3 Output power and beam quality in each solid-state amplifier. (a) 1st amplifier stage; (b) 2nd amplifier stage; (c) 3rd amplifier stage; (d) 4th amplifier stage

放大器输出的激光经过衰减后用光电接收器(New Focus 公司 Fiber Optic Photoreceivers 1554-A)接收,检测其重复频率和脉宽,示波器(TEKTRONIX 公司 DPO70604C)测量得到的脉冲波形如图 4(a)所示。脉冲信号波形稳定,与输入信号脉冲波形基本一致,脉宽为 220 ps。输出光束的功率用 OPHIR 公司的 Nova II 型号功率计测量,测试时长为 600 s,功率稳定性测试如图 4(b)所示,最后得到光束输出平均功率为 39.2 W,功率不稳定性的标准差值为 1%。

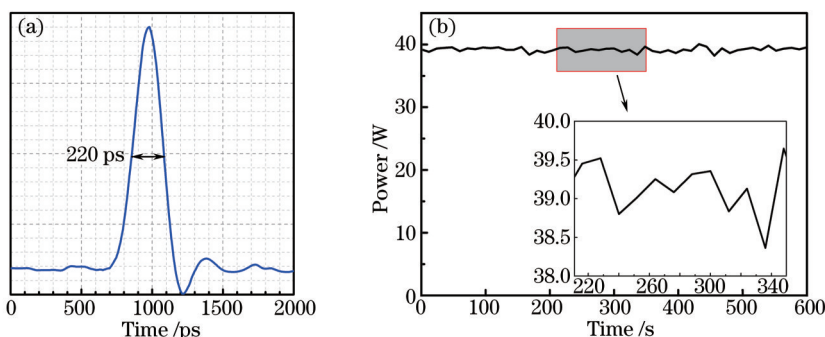


图4 (a) 输出光束的脉冲性能; (b) 输出光束功率稳定性

Fig.4 (a) Pulse performance of output beam; (b) power stability of output beam

4 结 论

利用半导体激光器输出的脉冲光束作为种子源,经过两级光纤预放大器和四级端面抽运 Nd:YVO₄ 功率放大系统放大,最终得到平均功率为 39.2 W、重复频率 120 kHz,脉宽 220 ps 的激光输出,峰值功率达到 1.5 MW,光束质量因子 $M^2 = 1.33$ 。这种混合放大方式降低了光纤放大器的难度,同时保证了良好的光束质

量,验证了这种获得高峰值功率、高光束质量激光光束方法的可行性和可靠性。

参 考 文 献

- 1 Qiu Junlin. The beam quality of high power lasers and its influences on the laser processing[J]. Laser Technology, 1994, 18(2): 86-91.
丘军林. 高功率激光器的光束质量及其对激光加工的影响[J]. 激光技术, 1994, 18(2): 86-91.
- 2 Wang Jiachun. Development and expectation of laser welding technology[J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 48-54.
王家淳. 激光焊接技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2001, 25(1): 48-54.
- 3 K Nawatal, M Okidal, K Furuki, *et al.*. Sub-100 W picosecond output from a phase-conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 20816-20823.
- 4 K Nawatal, M Okidal, K Furuki, *et al.*. MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate Nd:YVO₄ bounce amplifier[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9123-9128.
- 5 Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping, *et al.*. LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 489-491.
杜晨林, 刘均海, 王正平, 等. LD抽运声光调Q高重复频率短脉宽Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 489-491.
- 6 Liu Xia, Du Songtao, Xue Yuhao, *et al.*. High repetition rate nanosecond pulse fiber amplifier based on China-made large-mode-area fiber[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1876-1879.
刘 侠, 杜松涛, 薛宇豪, 等. 基于国产大模场面积双包层光纤的高重复频率纳秒脉冲光纤放大器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1876-1879.
- 7 Mao Xiaojie, Mi Guojiang, Deng Mingfa, *et al.*. 200 kHz, 8 ns passively Q-switched high peak power Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 20-23.
毛小洁, 秘国江, 邓明发, 等. 200 kHz, 8 ns被动调Q高峰值功率Nd:YAG激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 20-23.
- 8 Xia Jie, Hu Haihua, He Jinglei. Passively Q-switched laser operation of composite Cr⁴⁺:YAG-Nd³⁺:YAG crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 754-756.
夏 洁, 胡海华, 何经雷. Cr⁴⁺:YAG-Nd³⁺:YAG复合型单晶光纤及其被动调Q激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 754-756.
- 9 Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Dependence of stimulated Brillouin scattering in pulsed fiber amplifier on signal linewidth, pulse duration, and repetition rate[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(11): 111402.
- 10 Chen Hailong, Liu Qiang, Wang Lu, *et al.*. Beam transformation in hybrid fiber-bulk amplifier system[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(11): 112703.
- 11 Délen Xavier, Balembois Francois, Georges Patrick. Design of a high gain single stage and single pass Nd:YVO₄ passive picosecond amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(9): 2339-2346.
- 12 Liu Chong, Zhang Xiang, Ye Zhibin, *et al.*. Single frequency laser with 100 MHz repetition rate and 1 ns pulse width using combined amplification[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402006.
刘 崇, 张 翔, 叶志斌, 等. 混合放大100 MHz高重复频率窄脉宽单频激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402006.
- 13 Zhao Zhigang, Pan Sunqiang, Xiang Zhen, *et al.*. Influences of spherical aberration on resonator's stable zones and fundamental mode output power scaling of solid state laser oscillators[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10605-10616.
- 14 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902001.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 50 W量级双端抽运Nd:YVO₄基模固体激光振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- 15 Xiang Zhen, Wang Dan, Li Tong, *et al.*. Numerical simulation and analysis for gain guiding effect in master oscillator power amplifier lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502004.
项 震, 汪 丹, 李 通, 等. 主振荡功率放大器增益导引效应的数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502004.

栏目编辑: 胡 冰