

10 kHz, 425.6 mJ 声光调 Q Nd:YAG 激光器

陈月健^{1,2}, 庞毓^{1,2}, 周唐建^{1,2}, 尚建力^{1,2}, 王君涛^{1,2}, 李密^{1,2,3}, 高清松^{1,2}, 王亚楠^{1,2*}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 报道了一种高重复频率、大单脉冲能量的全固态声光调 Q Nd:YAG 激光器。采用主振荡-功率放大(MOPA)结构,将具有热补偿结构的双棒串接谐振腔作为种子源,两个板条增益模块作为放大器。采用熔石英为声光介质,重复频率在 10~100 kHz 范围内可调。种子源在 10 kHz 重复频率下获得平均功率为 14 W 的线偏振脉冲激光输出,种子光经扩束整形后注入两级板条增益模块进行功率放大。当抽运功率为 22.7 kW 时,可获得平均功率为 4256 W 的激光输出,单脉冲能量为 425.6 mJ,激光脉宽为 133 ns,峰值功率为 3.2 MW,光束质量 β 为 3.8 倍衍射极限。此外,改变激光的重复频率时,激光输出功率和脉宽无明显变化。

关键词 激光器; 脉冲激光器; 声光调 Q 激光器; 大能量; Nd:YAG

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701005

Acousto-Optic Q-Switch Nd:YAG Laser with 10-kHz Repetition Rate and 425.6 mJ Pulse Energy

Chen Yuejian^{1,2}, Pang Yu^{1,2}, Zhou Tangjian^{1,2}, Shang Jianli^{1,2},
Wang Juntao^{1,2}, Li Mi^{1,2,3}, Gao Qingsong^{1,2}, Wang Yanan^{1,2*}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract This study demonstrates an all-solid-state acousto-optic Q-switch Nd:YAG laser with a high repetition rate and high pulse energy. A master oscillator power amplifier system with a thermal-compensation cavity of connecting two Nd:YAG rods in series and an amplifier containing a two-slab gain medium is selected for the experiment. Fused silica is used as the acousto-optic Q-switch crystal with an adjustable repetition rate of 10-100 kHz. At the repetition rate of 10 kHz, the linearly polarized laser with an output power of 14 W is injected into the two-slab gain medium for amplification after beam expanding and sharpening. When the pump power is 22.7 kW, a laser output power of 4256 W is obtained with a pulse energy, pulse width, and peak power of 425.6 mJ, 133 ns, and 3.2 MW, respectively. The laser beam quality β is 3.8 times of the diffraction limit. The output power and pulse width at different repetition rates are kept constant during the experiment.

Key words lasers; pulse lasers; acousto-optic Q-switch lasers; high energy; Nd:YAG

OCIS codes 140.3538; 140.3540

1 引 言

脉冲激光是将增益介质内存储的能量在极短时间内释放,其输出激光的峰值功率比连续激光提高了几个数量级。脉冲激光具有峰值功率高、脉冲时

间短等优点,被广泛应用于激光清洗、激光毛化、激光精细打孔和激光切割等工业加工领域^[1-5]。随着激光技术的不断发展和国内工业的转型升级,激光加工系统的集成程度不断提升,对系统中各关键部件,尤其是激光光源的技术性能提出了更高的要求。

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-02-18; 录用日期: 2019-03-25

* E-mail: 1366559104@qq.com

占市场份额较大的传统 CO₂ 激光器的商业化生产技术比较成熟,但其造价高、结构复杂、体积庞大且无法实现光纤输出的缺点限制了它在未来工业中的进一步发展。已快速抢占市场份额的光纤激光器由于其非线性效应和损伤阈值的限制无法获得更高的重复频率和更大的单脉冲能量。国内工业领域高重复频率、高功率的固体激光器主要依靠国外进口,极大限制了激光加工技术在我国现代工业中的应用。

目前,国内高重复频率、短脉冲的 Nd:YAG 激光器的平均功率均不超过 100 W,1000 W 量级输出功率的激光器更是鲜有报道。2007 年,冯永伟等^[6]设计了消除热退偏损耗的复合双调 Q 晶体谐振腔结构,在 1 kHz 重复频率下获得最大单脉冲能量为 26.2 mJ 的 1064 nm 激光输出。2009 年,杨文是等^[7]将双棒串接的 Nd:YAG (尺寸为 $\varphi 5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)晶体作为工作物质,在 1 kHz 重复频率下实现 65 W 平均功率的激光输出。2013 年,Li 等^[8]通过主振荡-功率放大(MOPA)的方法,即对种子源加 2 级预放大(板条增益介质的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$)和 2 级主放大(板条增益介质的尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$),实现了在 250 Hz 重复频率下单脉冲能量为 800 mJ 的 1064 nm 激光输出。2017 年,靳全伟等^[9]采用振荡级加 1 级预放大后分 2 级主放大,最后 2 级主放大通过偏振合束方式在 400 Hz 重复频率下获得单路平均功率为 285 W 的激光输出。

本文研制出一种高重复频率的声光调 Q Nd:YAG 激光器,在 10 kHz 重复频率下输出激光的平均功率高达 4256 W,单脉冲能量为 425.6 mJ,弥补了国内短脉冲激光器无法实现高重复频率下大单脉冲能量输出的劣势,为我国自主研发高重复频率、高光束质量、大脉冲能量的激光光源提供了参考,对推进短脉冲激光在工业中的深度应用具有十分重要的意义。

2 激光器结构设计

高平均功率、短脉冲激光器的实验装置如图 1 所示,主要包括双棒串接振荡器和板条放大器。振荡器基于两个侧面抽运的激光头,采用平凹腔型,高反镜(HR)的反射率大于 99%,输出镜(OC)选择具有最佳透过率的平凹镜。增益介质为两个直径为 3 mm Nd:YAG 圆棒,中心波长为 808 nm 半导体芯片抽运源对称分布在圆棒侧边。双棒之间插入石英旋光器以补偿热致双折射效应,系统采用声光调 Q 作为脉冲调制器件,布儒斯特角偏振片作为起偏器,以保证输出线偏振激光。为了减少反向回光放大对振荡级的影响,保证振荡器的输出状态稳定,在振荡级与放大级之间插入高功率法拉第隔离器。对振荡级输出激光进行扩束整形后,将其注入板条激光放大器。放大器级间采用 $4f$ (f 为焦距)成像系统进行级联传输,以提高光强均匀性,减少激光自由传输和衍射导致的损耗。

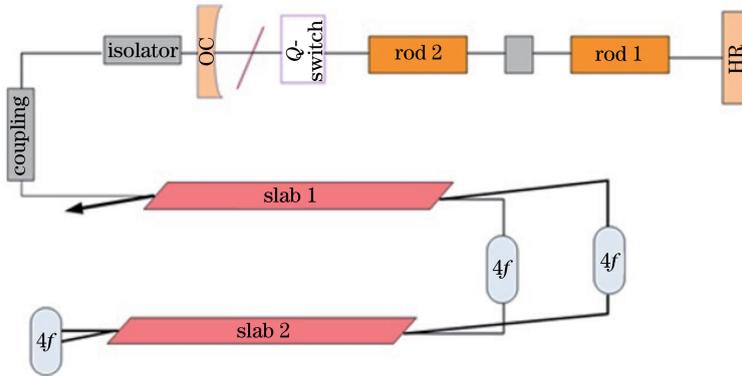


图 1 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of laser configuration

放大器部分采用端面抽运传导冷却的板条增益模块,结构如图 2 所示。板条增益介质的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,长度方向上中心 120 mm 范围内的介质为 Nd:YAG 晶体,两端 15 mm 为非掺杂 YAG,端面切角为 45° 。在这种增益介质构型中,只有板条厚度方向存在温度梯度,激

光在板条内部的光路为“之”字形(zigzag)光路,补偿了温度梯度造成的光学畸变,显著降低了热效应导致的热致像差,保证了种子光在经板条放大后的光束质量。单个抽运源采用 $2 \text{ line} \times 30 \text{ bar}$ 空间叠加结构的二极管激光器阵列(DLA),中心波长为 808 nm,其中一个 bar 条的功率为 100 W。在每个

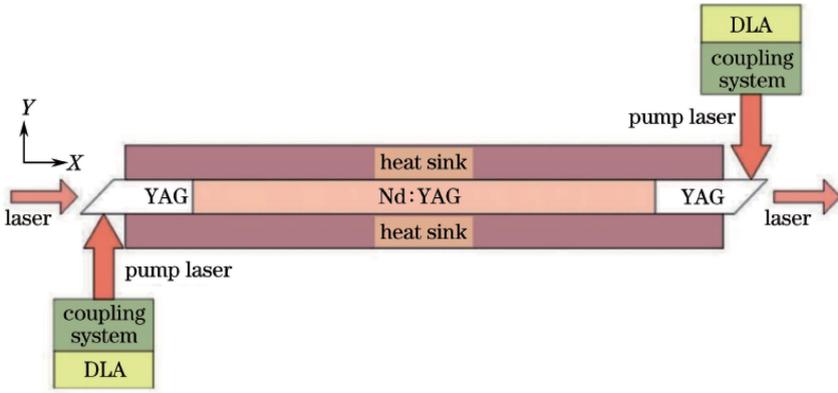


图 2 板条增益模块结构示意图

Fig. 2 Schematic of slab gain medium

板条中采用两个抽运源分别从两端抽运。抽运光经过光束整形以后沿端面 45° 楔角反射进入板条内部,并在掺杂区被吸收。两个微通道冷却器分别焊接在板条的两个大面上,以实现高效率的散热冷却。

对两个板条激光器进行双程放大设计,可以选

择先双程放大后串联或者先串联再双程放大这两种光路排布。根据板条长度内各点功率密度的计算公式^[1],采用多次迭代模拟计算了两种光路排布板条内部不同位置输出功率(P_{out}),结果分别如图 3 和图 4 所示,在模拟计算过程中没有考虑放大自发辐射(ASE)的影响。

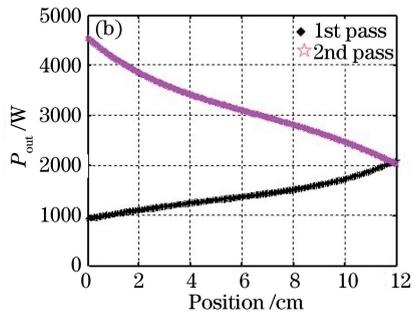
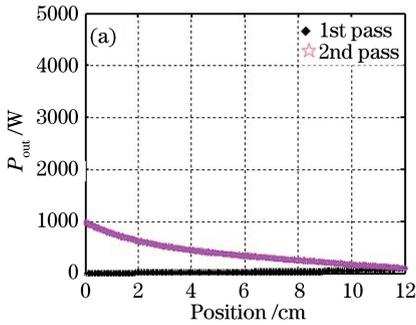


图 3 先双程放大后串接光路中两个板条内不同位置的功率分布。(a)板条 1;(b)板条 2

Fig. 3 Power distributions of two slabs at different positions for the case of amplifying for two pass and then connecting two slabs in series. (a) Slab 1; (b) slab 2

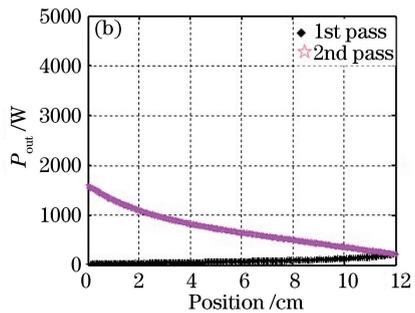
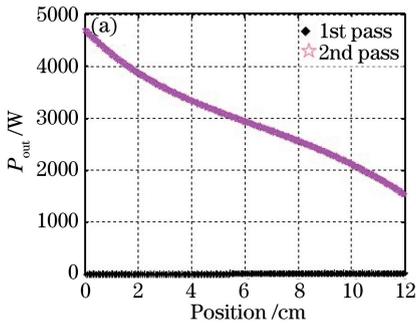


图 4 先串接后双程放大光路中两个板条内不同位置的功率分布。(a)板条 1;(b)板条 2

Fig. 4 Power distributions of two slabs at different positions for the case of connecting two slabs in series and then amplifying for two pass. (a) Slab 1; (b) slab 2

图 3 所示为先双程放大再串接光路中两个板条内不同位置的功率分布。图 3(a)所示为第一个板

条放大器双程放大时的激光功率,第一通放大后的输出功率为 208 W,第二通放大后的输出功率为

955 W。图 3(b)所示为第二个板条放大器双程放大时的激光功率,第一通放大后的输出功率为 2153 W,第二通放大后的输出功率为 4449 W。

图 4 所示为先串接再双程放大光路中两个板条内不同位置的功率分布。图 4(a)所示为第一个板条放大器双程放大时的激光功率,第一通放大后的输出功率为 215 W,第二通放大后的输出功率为 4593 W。图 4(b)所示为第二个板条放大器双程放大时的激光功率,第一通放大后的输出功率为 426 W,第二通放大后的输出功率为 1665 W。

对比两种光路的放大输出功率,在相同的抽运条件下,先串接再双程放大的功率更有优势。此外,在先双程放大再串接的第一个板条中,即图 3(a)中,由于提取效率低,ASE 严重,实际的提取效率和输出功率会更低,相应也会影响第二个放大器的效率和输出功率。

3 实验结果与分析

振荡器采用连续抽运方式,声光调 Q 开关在 10 kHz 重复频率下输出平均功率为 14 W 的线偏振激光,脉宽为 130 ns,光束质量因子 $M^2 \approx 5$ 。种子光经过两个板条放大器双通放大输出,放大器采用连续抽运方式。图 5 所示为激光放大输出功率曲线:在放大抽运光功率从 0 增加到 20 kW 的过程中,光-光效率不断增大。抽运功率大于 20 kW 后,光-光效率趋于稳定。当最大抽运功率为 22.7 kW 时,可得到平均功率为 4256 W 的激光输出,实验结果与理论计算值基本吻合。由于注入种子激光功率较小,远小于 Nd:YAG 增益介质的饱和提取通量,因此,如果增大注入种子光功率,就能进一步提高输出激光的平均功率。将声光调 Q 的重复频率从 10 kHz 增大到 50 kHz,单脉冲能量减小,但输出激光的平均功率并无明显变化。这主要是因为采用连续抽运方式,在这种高重复频率调 Q 下,增益介质的整体储能没有变化,所以输出功率没有明显变化。所使用的脉宽探测器是 Thorlabs 公司生产的 PDA10CF 型光电探测器。图 6 为激光器出光时的实物图,功率计上显示的是实时功率。

实验中监测了 4 kW 激光输出状态下脉宽随重复频率的变化情况,当重复频率分别为 10, 20, 30, 40, 50 kHz 时,脉宽分别为 133, 141, 149, 156, 164 ns,不同重复频率下放大输出激光的脉宽变化不明显。图 7 所示为使用 Tektronix 示波器采集重复频率为 10 kHz、输出平均功率为 4256 W 时激光

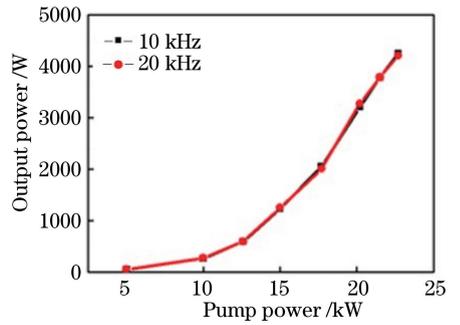


图 5 输出功率随抽运功率变化曲线

Fig. 5 Output power as a function of pump power

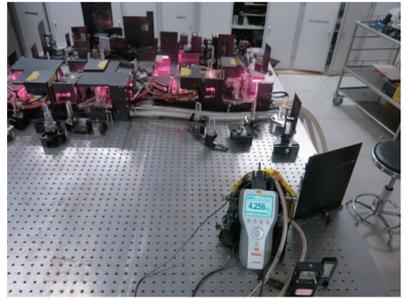


图 6 激光出光时的实物图

Fig. 6 Photo when laser system is running

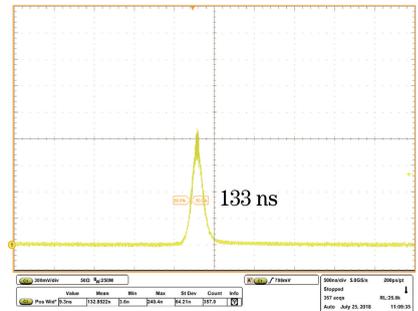


图 7 输出激光的脉宽

Fig. 7 Pulse width of output laser

的脉冲信号,其脉宽为 133 ns,此时单脉冲能量为 425.6 mJ,峰值功率为 3.2 MW。下一步实验将对振荡器进行优化,以进一步压缩脉宽,提高放大后的峰值功率。

为了解输出激光波前畸变空间特性,保证输出激光的光束质量,采用哈特曼波前传感器对输出激光波前进行实时测量。哈特曼波前传感器由缩束器、微透镜阵列、CCD 和图像采集处理系统构成,测量动态范围为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,测试精度为 $0.1 \mu\text{m}$,采样帧频为 30 frame/s。将板条输出的长条形光斑在 x 方向和 y 方向扩束成近方形光斑,经高反镜透射取样后进入哈特曼波前传感器和光束质量 β 测试仪。激光波前和远场光斑结果如图 8 所示,激光波前峰谷值为 $2.576 \mu\text{m}$,光束质量 β 为 3.8 倍衍射极限。

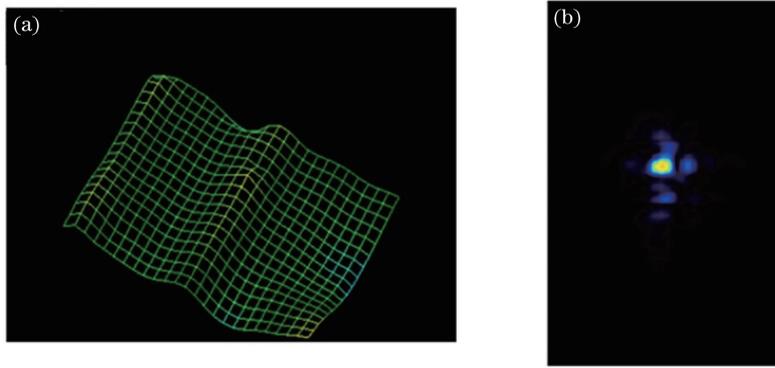


图 8 输出功率为 4256 W 时输出激光的波前畸变空间特性。(a)激光波前畸变；(b)远场光斑

Fig. 8 Space characteristics of wavefront distortion of output laser at output power of 4256 W.

(a) Distortion of wavefront; (b) far-field spot

4 结 论

本文采用主振荡-功率放大结构研制了一台全固态高重复频率大脉冲能量 Nd:YAG 激光器。通过声光调 Q 获得 14 W 高重复频率线偏激光注入板条放大,在抽运功率 22.7 kW,获得了 4256 W 激光平均功率输出,单脉冲能量为 425.6 mJ,峰值功率 3.2 MW,光束质量 β 为 3.8 倍衍射极限。此激光器可做到重复频率可调,单脉冲能量可变,满足不同的实际需求,为高端激光制造技术与装备的提升有着显著的促进作用。

参 考 文 献

[1] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Sun W, Jiang Z W, Cheng G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 84-85, 410-445.
Walter Koechner. 固体激光工程 [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 84-85, 410-445.

[2] Fang M G. Short pulsed laser and its applications [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(12): 1136-1138.
方鸣岗. 短脉冲激光及应用 [J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1136-1138.

[3] Jiang M H, Li Q, Lei H, *et al.* Study on producing non-tapered holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1003004.
姜梦华, 李强, 雷甸, 等. 高重复频率自准直脉冲 Nd:YAG 激光加工无锥度直孔研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003004.

[4] Yang X C, Wang Y, Ying Z L, *et al.* Microstructure and properties of high power laser welding of ship

steel plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 866-870.

杨洗陈, 王雨, 应朝龙, 等. 高功率激光焊接船板的组织性能 [J]. 中国激光, 2007, 34(6): 866-870.

[5] Zhao X. High-power pulsed laser technology and its application in the field of industrial [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(4): 141-143.

赵鑫. 高功率脉冲激光技术及其在工业领域的应用 [J]. 装备制造技术, 2013(4): 141-143.

[6] Feng Y W, Dai S T, Zhu X L, *et al.* 1 kHz electro-optic Q-switched Nd:YAG laser with complete compensation of thermally induced depolarization loss [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1190-1193.

冯永伟, 戴殊韬, 朱小磊, 等. 热退偏损耗完全补偿的千赫兹电光调 Q Nd:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1190-1193.

[7] Yang W S, Yu J C, Lü M C, *et al.* LD-pumped electro-optic Q-switching master oscillator lasers with pulse repetition rates 1 kHz [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 861-864.

杨文是, 于继承, 吕明春, 等. 千赫兹二极管抽运 Nd:YAG 激光器 [J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 861-864.

[8] Li S G, Ma X H, Li H H, *et al.* Laser-diode-pumped zigzag slab Nd:YAG master oscillator power amplifier [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 071402.

靳全伟, 庞毓, 蒋建锋, 等. 400 Hz 高光束质量高功率短脉冲激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 041001.

靳全伟, 庞毓, 蒋建锋, 等. 400 Hz 高光束质量高功率短脉冲激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 041001.