

500 kHz 波长锁定 878.6 nm LD 双端泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器

范灏然¹, 于永吉¹, 朱 贺², 邢 爽¹, 王宇恒¹, 金光勇¹

- (1. 长春理工大学 理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春高新技术产业开发区管委会, 吉林 长春 130012)

摘 要: 报道了一种由波长锁定 878.6 nm LD 双端抽运 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器, 重复频率在 500 kHz 时具有稳定的 1 064 nm 脉冲激光输出。在重频为 100 kHz, 晶体吸收功率 58 W 时, 获得 18.2 W 的 1 064 nm 激光输出, 光-光转换效率为 31.3%, 脉宽为 15.2 ns; 在重频为 500 kHz、晶体吸收功率 58 W 时, 获得 26.1 W 的 1 064 nm 激光输出, 光-光转换效率为 45%, 脉宽为 44.2 ns, 重频在 100~500 kHz 下具有稳定的脉冲输出, 光束质量较传统模式下有明显提高, 并且转换效率也有提升。实验表明: 利用波长锁定 878.6 nm 激光二极管直接泵浦的方式, 有利于降低晶体热效应、提高光束质量, 提高光-光转换效率, 获得窄脉宽的脉冲激光输出, 并且在一定的温度变化范围内具有极好的温度稳定性。

关键词: 波长锁定 878.6 nm 双端泵浦; Nd:YVO₄ 晶体; 低热效应; 500 kHz

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0606001

500 kHz A-O Q-switched Nd:YVO₄ laser pumped by dual-end wave-locked 878.6 nm laser diode

Fan Haoran¹, Yu Yongji¹, Zhu He², Xing Shuang¹, Wang Yuheng¹, Jin Guangyong¹

- (1. Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun High-tech Industry Development Zone Management Committee, Changchun 130012, China)

Abstract: A dual-end-pumped acousto-optics Q-switched Nd:YVO₄ laser pumped by a wave-locked 878.6 nm laser diode can stable work at a repetition of 500 kHz at 1 064 nm. At the repetition frequency of 100 kHz, an output power of 18.2 W at 1 064 nm for an absorbed pump power of 58 W, corresponding to an optical to optical efficiency of 31.3%, the pulse width was 15.2 ns. At the repetition frequency of 500 kHz, an output power of 26.1 W at 1 064 nm for an absorbed pump power of 58 W, corresponding to an optical to optical efficiency of 45%, the pulse width was 44.2 ns, the stable working range extended from 100 to 500 kHz, and the beam quality was significantly improved compared with the traditional

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61505013); 吉林省科技厅自然科学基金(20160101331JC); 吉林省科技厅人才团队(20170519007JH); 吉林省科技厅青年基金(20150520103JH); 吉林省科技厅重点科技攻关(20170204046GX)

作者简介: 范灏然(1991-), 男, 硕士生, 主要从事全固态激光器方面的研究。Email: 619862788@qq.com

导师简介: 金光勇(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光物质相互作用和全固态激光器方面的研究。Email: jgycom@163.com

通讯作者: 于永吉(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事固体激光及其非线性频率变换方面的研究。Email: 36880280@qq.com

mode, and the transfer efficiency was also improved. The experiment shows that taking advantage of direct pumping by wave-locked 878.6 nm laser diode is helpful to reduce the heat effect of crystals, improve beam quality and optical to optical efficiency, and get more narrow pulse width laser output, and it has excellent temperature in a certain range.

Key words: dual-end pumped wave-locked 878.6 nm; Nd:YVO₄ crystal; low thermal effect; 500 kHz

0 引言

高重频声光调 Q 激光器因其较好的脉冲稳定性和较高的输出功率,在激光测距、激光雷达探测等方面和军事领域具有广泛应用^[1-3]。然而传统 808 nm 泵浦声光调 Q 激光器中严重的热效应是输出激光光束质量恶化的根源,并导致输出激光脉宽增大,不利于高重频激光器的应用。如何有效地减少抽运过程和激光发射过程中激光介质内产生的热量、提高激光器的转换效率、提高输出激光光束质量、降低激光的脉宽,是全固体高重频激光研究过程中所面临的主要难题之一^[4-6]。为了从根本上解决激光器的热效应问题,近年来提出了一种共振抽运技术,采用共振抽运技术在降低激光器热效应方面具有很好的效果^[7-8]。

近年来针对不同泵浦波长下高重频激光器的研究也有较多报道。2009 年, Xavier Helen 等人对比分析了重频在 10~20 kHz 下 808 nm 泵浦和 914 nm 泵浦声光调 Q 激光器的热效应和输出特性, 914 nm 泵浦相对于传统 808 nm 泵浦在降低热效应方面具有明显的优势,并且具有稳定的脉冲输出^[9]。同年,清华大学闫兴鹏在 808 nm 泵浦下利用双 Nd:YVO₄ 晶体实现重频 650 kHz 下 73.2 W 的 1 064 nm 激光输出,重频在 80~650 kHz 下,脉宽由 17.5 ns 增加到 80 ns^[10]。2011 年, 洪海龙等人利用 888 nm 激光二极管,在泵浦功率 110 W、重频 200 kHz 时,获得了 57 W 的 1 064 nm 激光输出,光-光转换效率为 51.8%,脉宽为 50 ns,重频在 30~250 kHz 下,激光器具有稳定的脉冲输出,并且光束质量 $M^2 < 1.30$ ^[11]。2016 年,清华大学柳强等人报道了波长锁定 878.6 nm 泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器,在 MOPA 结构中,重频 100 kHz 时,最大输出功率为 120.8 W,光-光转换效率为 47%^[12]。

由上述研究结果可知,在传统 808 nm 泵浦下脉

冲激光器可实现 500 kHz 以上高重频运转,但严重的热效应导致输出激光的脉宽较大。与传统抽运方式相比,共振泵浦技术的确可以大大降低激光生产过程中放出的热量,是一种从根本上解决全固态激光器热效应的有效方案,但上述研究中所达到的重复频率较低,不能达到 200 kHz 以上稳定的脉冲输出。因此,文中在波长锁定 878.6 nm 双端泵浦方式下,对比 808 nm 传统泵浦在热效应方面的优势,研究高重频声光调 Q 激光器的输出特性。通过模拟激光器热效应,合理设计谐振腔,使用实验室自行改造后的声光调 Q 开关信号发生器,通过调节 TTL 电平的触发时间,使激光器在重频 500 kHz 下,仍具有稳定的脉冲输出,相比于传统 808 nm 泵浦,在高重频状态下具有高光束质量和窄脉宽等优势。

1 理论与模拟

在传统 808 nm 泵浦 Nd:YVO₄ 四能级系统中, Nd³⁺ 吸收泵浦光子后从基态 $^4I_{9/2}$ 跃迁至激发态 $^4F_{5/2}$, 随后弛豫到激光上能级 $^4F_{3/2}$, 在这一过程中, $^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$ 的热弛豫过程增加了泵浦光子与激光光子之间的量子亏损,降低了泵浦能量的转换效率,增加了热负载。而采用波长锁定 878.6 nm 直接泵浦方式,将 Nd³⁺ 从基态直接抽运到激光上能级 $^4F_{3/2}$, 降低了量子亏损,减少了热量的产生,有效提高了量子效率。

对于激光器 Nd:YVO₄ 激光晶体,利用 LASCAD 软件进行模拟。通过软件对比波长锁定 878.6 nm 和 808 nm 泵浦下晶体热负载、温度以及热应力分布,如图 1 所示,模拟参数如表 1 所示。

从模拟结果可以看出,波长锁定 878.6 nm 直接泵浦相对于 808 nm 传统泵浦,晶体中的最高局部热负载从 7.1 W/mm³ 下降至 4.1 W/mm³,端面的最高温度从 430 K 降至 398 K,而最大热应力从 134.4 N/mm² 降至 75.9 N/mm², 波长锁定 878.6 nm 泵浦下晶体中

的温度分布更均匀,而 808 nm 泵浦下晶体中的热负载主要集中在晶体端面,易导致晶体发生热破裂。采用波长锁定 878.6 nm 直接泵浦方式可显著地降低激光晶体中的热负载,减轻热效应对于激光器的影响,为实现高重频、窄脉宽声光调 Q 激光器提供一种有效的方式。

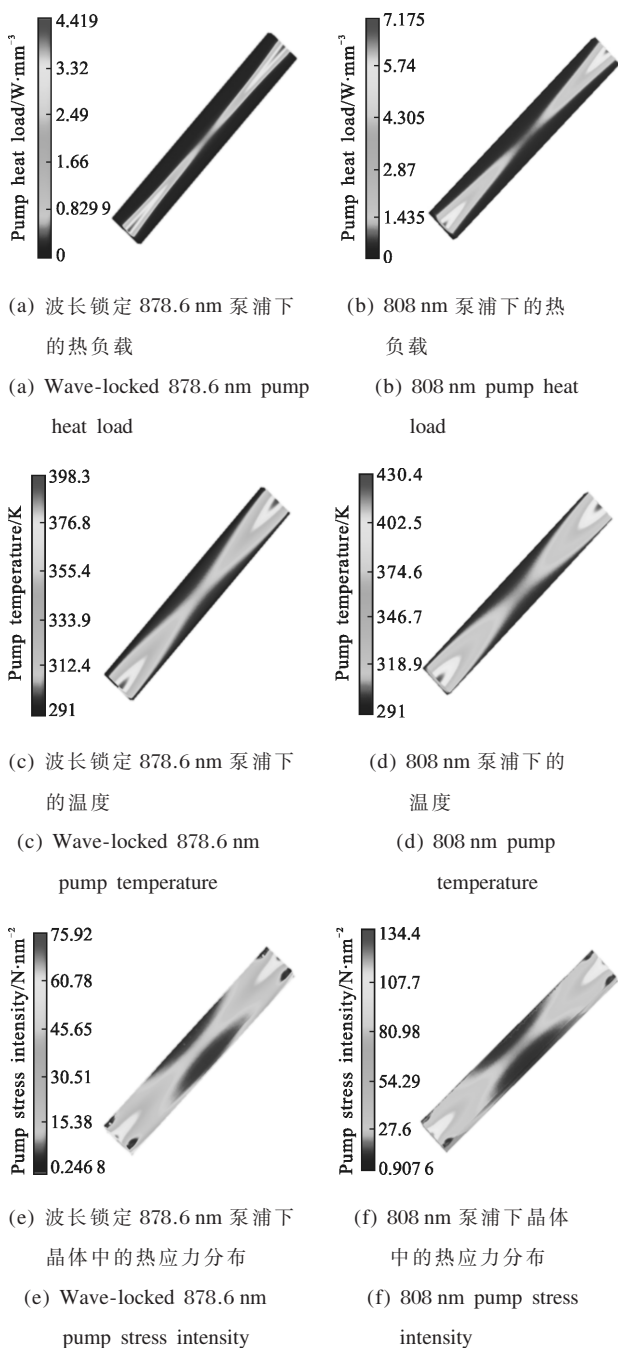


图 1 波长锁定 878.6 nm 和 808 nm 泵浦下晶体中的热负载、温度以及热应力分布

Fig.1 Heat load, temperature and stress intensity in crystal at wave-locked 878.6 nm and 808 nm

表 1 LASCAD 模拟参数

Tab.1 Simulation parameters of LASCAD

Parameters	Wave-locked 878.6 nm pump	808 nm pump
Pumping power/W	58	58
Pumping radius/mm	0.7	0.7
Stimulated emission cross section/cm ²	12.0×10 ⁻¹⁹	12.0×10 ⁻¹⁹
Lasing wavelength/nm	1 064	1 064
Fluorescent lifetime/μs	100	100
Boundary temperature/K	291	291
Absorption coefficient/cm ⁻¹	0.4	0.6
Thermo-optical coefficient/K	$d_{nc}/dT=2.9\times 10^{-6}$	$d_{nc}/dT=2.9\times 10^{-6}$
Thermal conductivity coefficient/W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹	0.066	0.066
Thermal expansion coefficient/K	11.37×10 ⁻⁶	11.37×10 ⁻⁶
Absorbed-pump-power-heat conversion efficiency	30%	50%
Poisson ratio	0.3	0.3
Dimension of the crystal	3×3×20	3×3×20

在 LD 端面泵浦条件下,棒状晶体内各处的温度和热应力不相同,这导致晶体内各处折射率不同形成热透镜效应。大功率下,晶体的热焦距可以表示为:

$$f = \frac{\pi \omega_p^2 K_c}{P_{ph} \frac{dn}{dT}} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

式中: P_{ph} 为泵浦光在晶体中热沉积的功率; K_c 为热传导率; ω_p 为平均泵浦光斑直径; dn/dT 为晶体折射率随温度的变化率; α 为晶体吸收系数,晶体长度 $L=20$ mm。图 2 是利用 Matlab 软件模拟的不同泵浦

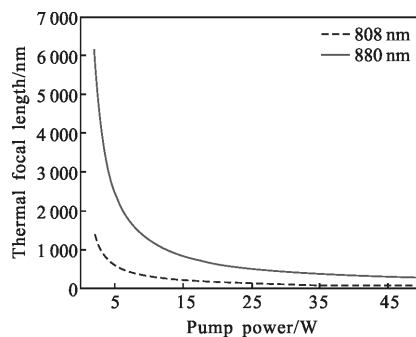


图 2 不同泵浦波长下激光晶体热透镜焦距随泵浦功率变化曲线
Fig.2 Focal length of the crystal thermal lens with the pump power curve at different pump wave

波长下, 激光晶体热透镜焦距与泵浦功率之间的关系, 模拟参数同 LASCAD 模拟参数。从模拟结果可以看出, 晶体的热效应随泵浦功率增加而变得严重, 相应的等效热焦距也越短。与此同时, 在相同的吸收泵浦功率下, 808 nm 泵浦晶体的热透镜焦距更短, 热效应更为严重。

根据调 Q 激光器的四能级速率方程可以推导出, 脉冲宽带的表达式为:

$$\Delta t = \frac{E}{P_{out(p)}} = \tau_c \frac{\Delta n - \Delta n_f}{\Delta n_f - \Delta n_f [\ln(\Delta n_f / \Delta n_f) + 1]} \quad (2)$$

图 3 为两种泵浦波长下脉宽随重频的变化规律, 由曲线可以看出, 脉宽随重频的增加而逐渐变宽, 并且相同重频下波长锁定 878.6 nm 泵浦的输出激光脉宽更窄, 理论上更有利于获得窄脉宽输出。

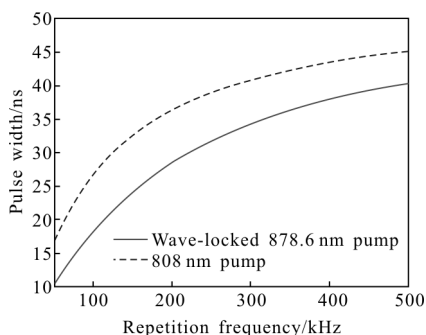


图 3 脉冲宽度随重复频率变化曲线

Fig.3 Pulse width varies with frequency curve

2 实验装置

波长锁定 878.6 nm 双端泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器实验装置如图 4 所示。两台抽运源均为 nlight 公司生产的 P10 光纤束耦合输出的大功率半导体激光器系统, 输出激光波长为 878.6 nm, 输出光束数值孔径 N.A.=0.17, 最大输出功率为 75 W, 波长锁定 878.6 nm 泵浦相对于 880 nm 泵浦激光器, 其在 10~40 °C 的温度变化范围内, 输出功率波动小, 具有很好的输出稳定性, 因此波长锁定 878.6 nm 泵浦源相对于 880 nm 泵浦激光器温度控制要求较低, 利于实现稳定的功率输出。耦合系统为两个 1:2 的耦合系统。谐振腔采用平-平腔, 腔长约为 245 mm。平面镜 M1 对 1 064 nm 高反。平面镜 M2 为对 1 064 nm 透过率 60% 的输出耦合镜。两个 45° 镜双面镀有 878.6 nm 增透膜, 靠近激光晶体一面镀有 1 064 nm

高反膜。激光晶体 Nd:YVO₄ 的掺杂浓度为 0.5 at.%, 尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm, 两个端面镀有 878.6 nm 和 1 064 nm 增透膜。晶体侧面用铝箔包裹置于紫铜块内, 并用莱伯泰科 SHP-50 水冷机冷却控温在 18 °C。

腔内的稳定性可以通过 ABCD 矩阵理论来计算, 由此写出腔内介质的变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-l_2/f & l_1+l_2-l_1 \cdot l_2 \cdot f \\ -1/f & 1-l_1/f \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$ 为薄透镜的传输矩阵。谐振腔的 g 参数可以表示成:

$$g_1 = A - \frac{B}{R_1} = 1 - \frac{l_1+l_2}{R_1} + \left(\frac{l_1 \cdot l_2}{R_1} - l_2 \right) \cdot \frac{1}{f}$$

$$g_2 = A - \frac{B}{R_2} = 1 - \frac{l_1+l_2}{R_2} + \left(\frac{l_1 \cdot l_2}{R_2} - l_2 \right) \cdot \frac{1}{f} \quad (4)$$

对于平平腔来说 $R_1 = \infty, R_2 = \infty$, 设 $l_1 = 0$, 则由谐振腔的稳定性条件 $0 < g_1 g_2 < 1$ 可知, 当 $l_2 < f$ 时谐振腔处于稳区。通过之前的理论模拟能够得出在 60 W 吸收泵浦功率下, 晶体热透镜焦距为 193.9 mm, 由于谐振腔内要插入调 Q 晶体, 腔长不宜太短, 因此腔长选定 220 mm, 泵浦光和腔模之间可以维持较好的模式匹配, 保证高功率条件下获得 TEM₀₀ 输出。

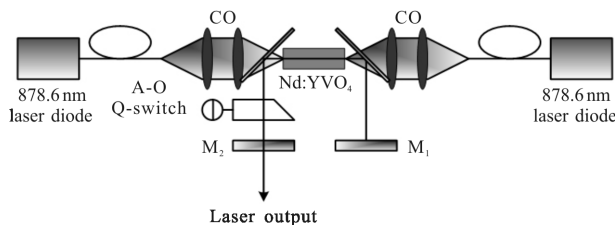


图 4 波长锁定 878.6 nm 双端泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 激光器实验装置

Fig.4 Experimental facility of dual-end-pumped A-O Q-switched pumped by wave-locked 878.6 nm

上述实验装置采用声光 Q 开关元件, 其作用长度为 33 mm, 两端镀有 1 064 nm 增透膜, 衍射损耗大于等于 85%, 调制重复频率在 1~500 kHz 可调, 由中心频率为 40.68 MHz, 电功率为 20 W 驱动电源驱动, 电脉冲上升时间为 100 ns, 下降时间为 50 ns。声光调 Q 元件靠近 Nd:YVO₄ 晶体放置, 并采用风冷系统控温。

3 实验结果及分析

图 5 给出了实验在连续状态下输出功率随吸收泵浦功率的变化关系,当双端注入电流均为 5 A,用量程 150 W 的 L30A-V1 SENSOR, RoHS 激光功率计测量输出脉冲激光的平均功率 P_{av} 。晶体吸收功率为 58 W,得到输出功率为 26.4 W,光-光转换效率为 45.5%。

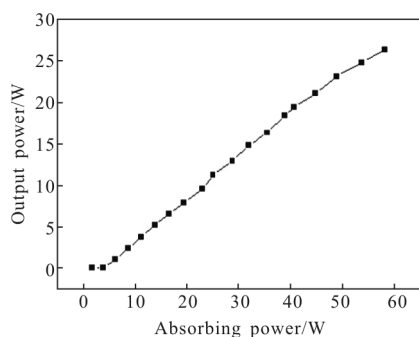


图 5 连续状态下输出功率随吸收功率变化关系

Fig.5 Output power varies with absorbing power curve

放入声光 Q 开关后,将重频设定在 100~500 kHz,并将 TTL 高电平持续时间设定为 0.8 μ s,实验中在满足腔长为 245 mm 及输出镜透过率为 60% 的情况下,结合理论模拟分析,研究波长锁定 878.6 nm 直接泵浦在不同重频下对最高输出功率的影响,图 6 为

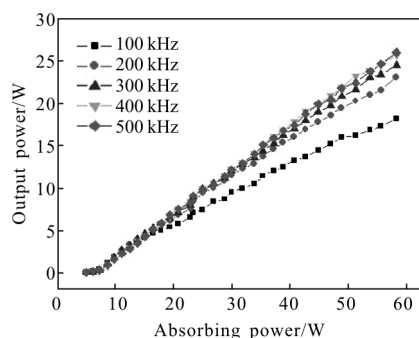


图 6 重频在 100~500 kHz 时,波长锁定 878.6 nm 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器输出功率随泵浦吸收功率的变化

Fig.6 At the repetition from 100~500kHz, output power varies with absorbing power curve pumped by wave-locked 878.6 nm

重频在 100~500 kHz 时,波长锁定 878.6 nm 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器最高输出功率随重复频率的变化。在重频为 100 kHz、双端泵浦总吸收功率 58 W 时,获得

18.2 W 的 1 064 nm 激光输出,光-光转换效率为 31.3%;在重频为 500 kHz、泵浦功率 58 W 时,获得 26.1 W 的 1 064 nm 激光输出,光-光转换效率为 45%。重频在 100~500 kHz 时,激光器具有稳定的功率输出,500 kHz 时达到最高输出功率 26.1 W,据笔者所知,这是目前利用 880 nm 波段作为抽运源的端面泵浦激光器获得稳定输出条件下所能达到的最高重复频率。用 DPO3000 系列示波器和 Thorlabs 公司 DET01CFC 型号脉宽探头器测量激光脉冲信号,图 7 为重频 500 kHz 时波长锁定 878.6 nm 泵浦下降沿触发 Q 开关的控制电平与射频时序关系对应的波形。

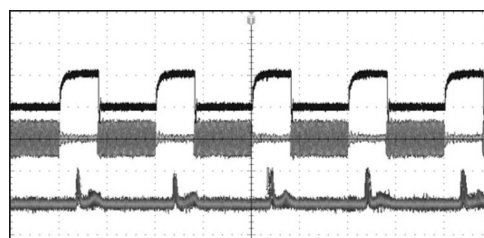
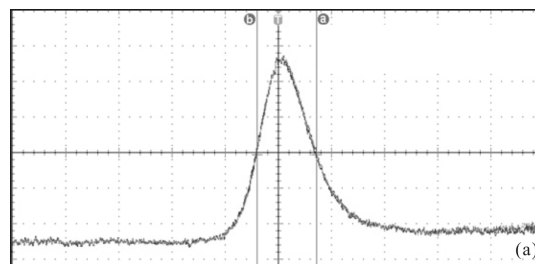


图 7 重频 500 kHz 时波长锁定 878.6 nm 泵浦下降沿触发 Q 开关的控制电平与射频时序关系对应的波形

Fig.7 At a repetition of 500 kHz, the waveform of Q-switched control level with radio frequency sequence at wave-locked 878.6 nm pumped

在其他条件不变的情况下,将波长锁定 878.6 nm 抽运源换成 808 nm 抽运源,以对比波长锁定 878.6 nm 泵浦和 808 nm 传统泵浦对输出激光光束质量和脉宽的影响。在 878.6 nm 直接泵浦实验中,重频 100~500 kHz 吸收总泵浦功率 58 W 时,脉宽由 15.23 ns 增加到 44.15 ns。而在传统 808 nm 泵浦实验中,重频 100~500 kHz、泵浦功率 58 W 时,脉宽由 24.43 ns 增加到 52.44 ns。图 8 分别为重频 100~500 kHz 时波长锁定 878.6 nm 直接泵浦和 808 nm 传统泵浦下的脉宽图。



	Value	Mean	Min	Max	Std dev
+Width	44.15 ns	44.15 ns	44.15 ns	44.15 ns	0.000

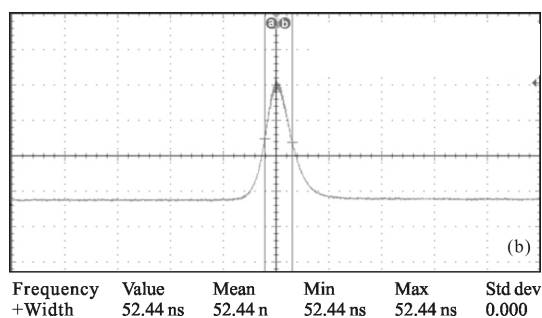


图 8 重频 500 kHz 时波长锁定 878.6 nm 直接泵浦和 808 nm 传统泵浦下的脉宽图

Fig.8 At the repetition of 500 kHz, the pulse width of wave-locked 878.6 nm direct pump and 808 nm traditional pump

如图 9 为重频 500 kHz 最大抽运功率条件下波长锁定 878.6 nm 泵浦和 808 nm 泵浦输出激光的光强分布。从两图对比可以看出,808 nm 泵浦抽运情况下,光斑能量分布不是很均匀,而波长锁定 878.6 nm 泵浦下,其光斑分布对称性良好,光束质量具有一定提高。通过 Thorlabs 公司的 BC106-VIS 光束质量分析仪测量输出光斑的光束质量因子,波长锁定 878.6 nm 泵浦和 808 nm 泵浦下输出激光的光束质量因子分别为 $M^2=1.55$ 和 $M^2=2.92$ 。

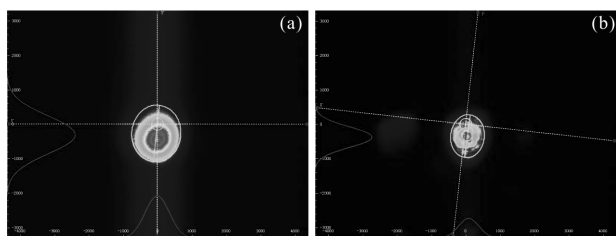


图 9 重频 500 kHz 最大抽运功率条件下波长锁定 878.6 nm 泵浦和 808 nm 泵浦输出激光的光强分布

Fig.9 At the most pump power, the light distribution of wave-locked 878.6 nm and 808 nm pumped at a repetition of 500 kHz

从实验所测得数据可以看出,波长锁定 878.6 nm 泵浦和 808 nm 泵浦下,在重频 500 kHz 时激光器均具有稳定的脉冲输出,但在相同的重频下,前者光束质量更好并且输出激光的脉宽更窄。结合理论模拟分析,在传统 808 nm 泵浦下,激光晶体中严重的热效应使光束质量恶化,并限制了激光的输出能力,导致脉宽增大,利用波长锁定 878.6 nm 泵浦可以有效降低晶体的热效应,改善输出激光的光束质量,获得更窄脉宽的 1.06 μm 激光。

4 结论

文中提出了一种波长锁定 878.6 nm 直接泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 技术,可以有效地降低晶体的热效应,使用实验室自行改造后的声光 Q 开关信号发生器调节 TTL 电平的触发时间,获得 500 kHz 高重频、高光束质量、窄脉宽的脉冲激光输出。在重频为 100 kHz,晶体吸收功率 58 W 时,获得 24.2 W 的 1064 nm 激光输出,光-光转换效率为 41.7%,脉宽为 15.2 ns;在重频为 500 kHz、晶体吸收功率 58 W 时,获得 26.1 W 的 1064 nm 激光输出,光-光转换效率为 45%,脉宽为 44.2 ns,重频在 100~500 kHz 下具有稳定的脉冲输出。对传统 808 nm 泵浦下,进行类似的实验研究,发现在传统 808 nm 泵浦下,在重频同时脉宽明显大于前者,并且光束质量较差,这是由于 808 nm 泵浦严重的热效应所致。因此,利用波长锁定 878.6 nm 直接泵浦 Nd:YVO₄ 声光调 Q 技术可以降低晶体热效应,获得高重频、高光束质量、窄脉宽的脉冲激光输出,为高重频激光器的实际应用提供了一种行之有效的方式。

参考文献:

[1] Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli, et al. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-Switch[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1654-1659. (in Chinese)
朱小磊, 唐昊, 李小莉, 等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1654-1659.

[2] Li Bin, Ding Xin, Sun Bing, et al. A 28.2 W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1 064 nm [J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(21): 152-156. (in Chinese)
李斌, 丁欣, 孙冰, 等. 28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1 064 nm 激光器 [J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 152-156.

[3] Zhang Jian, Yu Yongji, Jiang Chengrao, et al. Experiment comparison of acousto-optical Q-switching and RTP electro-optical Q-switching of high repetition frequency Nd:YVO₄ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205002. (in Chinese)
张健, 于永吉, 姜承尧, 等. 高重频 Nd:YVO₄ 声光调 Q 与 RTP 电光调 Q 激光器实验对比分析[J]. *红外与激光工程*,

- 2017, 46(2): 0205002.
- [4] Liu Q X. Analysis on thermal effect of laser-diode array end-pumped composite rod laser by finite element method [J]. *Physics*, 2010, 59(12): 8535–8541.
- [5] Liu J, Wang Z, Li H, et al. Stable, 12 W, continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ green laser polarized and dual-end pumped at 880 nm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6777–6782.
- [6] Wang Bin, Sun Hongtao, Yu Yongji, et al. High power acousto-optic Q-switched master oscillator power amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1205003. (in Chinese)
王彬, 孙洪涛, 于永吉, 等. 高功率声光调 Q 主振荡功率放大器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1205003.
- [7] Ding Xin, Yin Sujia, Shi Chunpeng, et al. High efficiency 1 342 nm Nd:YVO₄ laser in-band pumped at 914 nm[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14315–14320.
- [8] Lin H, Li J, Liang X. 105 W, <10 ps, TEM(00) laser output based on an in-band pumped Nd:YVO₄ innoslab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2634.
- [9] Délen X, Balembois F, Musset O, et al. Characteristics of laser operation at 1 064 nm in Nd:YVO₄ under diode pumping at 808 and 914 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(1): 52.
- [10] Yan X, Liu Q, Fu X, et al. High repetition rate dual-rod acousto-optics Q-switched composite Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21956.
- [11] Hong H, Huang L, Liu Q, et al. Compact high-power, TEM (00) acousto-optics Q-switched Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 323.
- [12] Liu Q, Nie M, Lu F, et al. High-power, wavelength-locked 878.6 nm in-band pumped, acoustic-optically Q-Switched Nd:YVO₄ MOPA laser with TEM00 mode [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(4): 1–9.