

高光束质量窄纳秒脉宽 Nd:YVO₄板条脉冲串激光器

宋越^{1,2,3}, 王志敏^{1,2*}, 杨熙航^{1,2,3}, 薄勇^{1,2}, 张丰丰^{1,2}, 张艺轩^{1,2}, 周子涵^{1,2,3}, 赵文成^{1,2}, 林延勇^{1,2},
付莉^{1,2}, 彭钦军^{1,2}

¹中国科学院理化技术研究所中国科学院固体激光重点实验室, 北京 100190;

²中国科学院理化技术研究所中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种高光束质量、窄纳秒脉宽、高重复频率脉冲串输出的电光调 Q 激光器。通过优化键合 Nd:YVO₄ 板条晶体掺杂区域的纵横比, 结合腔模的最佳设计, 限制腔内的高阶模式振荡, 获得了两方向相近的高光束质量激光输出。利用激光二极管侧面泵浦键合的 Nd:YVO₄ 板条晶体, 采用电光调 Q 技术, 研究了不同重复频率下 1064 nm 脉冲串激光的输出特性。在输出镜最佳透过率为 40%、子脉冲调 Q 重复频率为 80 kHz 的条件下, 获得了平均输出功率为 5.03 W、子脉冲能量为 0.50 mJ、子脉冲宽度为 5.9 ns 的脉冲串激光输出。在谐振腔内加入小孔光阑, 获得了平均输出功率为 2.56 W、子脉冲能量为 0.26 mJ、子脉冲宽度为 7.2 ns 的脉冲串激光输出, 对应的 *x* 和 *y* 方向的光束质量因子分别为 1.42 和 1.49。

关键词 激光器; 电光调 Q; 脉冲串; 高光束质量; 窄脉宽

中图分类号 TN248.1 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220974

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的高重复频率、窄脉宽、高光束质量紧凑型全固态激光器在激光测距、激光雷达探测、激光通信和工业加工等领域中有着重要的应用^[1-4], 重复频率达数十千赫兹的调 Q 脉冲激光器更是信息采集中高分辨率和高精度的有效保证^[5-9]。然而, 高功率泵浦下的常规脉冲激光器受到热效应的限制, 其输出的脉冲激光难以兼顾高单脉冲能量、高重复频率以及高光束质量等特性。几个单独或多通道脉冲激光器可以产生脉冲数有限的高能脉冲串激光, 但其系统结构复杂且成本高昂^[10-11]。一种实现脉冲激光间断式输出的脉冲串激光技术^[12-14]在一定程度上缓解了激光脉冲持续输出的热效应问题, 可同时实现高单脉冲能量和高重复频率。

常见的棒状固体激光器往往采用端面泵浦的方式, 不可避免地会引起晶体内热的不均匀分布, 进而导致输出脉冲激光的高平均功率和高光束质量无法兼顾^[15-19]。2016年, Pan等^[17]采用LD端面泵浦Nd:YVO₄棒状晶体, 当声光调Q频率为10 kHz时, 在1 ms的泵浦脉宽内获得了10个子脉冲, 单脉冲能量为4.4 mJ, 脉宽为9.4 ns, 光束质量因子(M^2)~1.5。2017年, Li等^[18]采

用LD端面泵浦YAG/Nd:YAG/Cr:YAG棒状复合晶体, 当被动调Q重复频率为86.3 kHz时, 在1 ms的泵浦时间内获得了86个子脉冲, 单脉冲能量为0.24 mJ, 脉宽为1.4 ns, 光束质量因子 M^2 ~2.93。2021年, 该团队利用LD端面泵浦YVO₄/Nd:YVO₄棒状晶体, 当声光调Q重复频率为500 kHz时, 在1 ms的泵浦脉冲持续时间内获得了500个子脉冲, 单脉冲能量为90 μJ, 子脉冲宽度为37.8 ns, 光束质量因子 M^2 =1.6^[19]。

Martin等^[20]在20世纪70年代年提出板条激光器的概念, 通过增大增益介质的冷却面积来减小晶体的温度差, 激光在温度梯度方向上沿之字形(Zig-Zag)路径传播, 可在一定程度上降低热效应对激光输出的影响, 从而提高晶体的利用率和输出功率。然而, 由于板条状增益介质不对称的外形结构, 其输出激光在截面上往往呈椭圆或长条状, 两方向上的光束质量相差较大, 这在很大程度上限制了它们的应用。通过优化增益介质结构、泵浦结构和冷却方法等, 可以提升板条激光器的光束质量^[15]。在增益介质方面, 通过改变增益介质的几何形状来优化激光在其中的传输路径, 通过设计外形尺寸来限制激光高阶模式的产生, 通过优化材料配置来提高吸收效率和转换效率等, 可以减少热效应对输出激光的影响^[21]。2008年, 李小莉等^[7]采用LD部分

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-08-05; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61535013, 11504389)、国家重点科学仪器装备发展项目(2012YQ120048)、中国科学院科研仪器设备研制项目(GJJSTD20200007)

通信作者: *wangzmok@163.com

端面泵浦 Nd:YVO₄ 板条晶体, 当电光调 Q 频率为 1 kHz 时, 在 200 μs 的泵浦脉冲持续时间内仅获得 1 个子脉冲, 单脉冲能量为 4.6 mJ, 脉宽为 4.5 ns, 然而文中未提到激光的光束质量。板条状激光增益介质由于其优异的散热能力, 常被用在脉冲串激光器的放大系统中, 在提高脉冲能量的同时保持高光束质量^[22-25]。2016 年, Chard 等^[25]报道了一种 Z-型 Nd:YAG 板条两级放大器, 利用该放大器放大脉宽为 10 ps、重复频率为 100 kHz 的种子激光, 当每个脉冲串内包含 10 个子脉冲时, 获得了 0.11 mJ 的单脉冲能量, 光束质量因子 $M^2 < 1.4$, 然而该放大器具有复杂的结构和庞大的体积。

本文提出一种结构紧凑、稳定性好的脉冲串板条激光器: 通过对板条增益介质的纵横比进行优化设计, 实现了激光在介质中的周期性传输; 通过限制晶体掺杂区域的范围, 并结合谐振腔腔型设计, 抑制了部分高阶模式的振荡, 达到优化光斑尺寸、提高光束质量的目的。实验中采用电光调 Q 技术进行窄脉宽、高重复频率、高光束质量的脉冲串激光技术研究, 当调 Q 重复频率为 80 kHz 时, 在 1 ms 的脉冲持续时间内获得了 80 个子脉冲, 脉冲串的平均输出功率为 2.56 W, 子脉冲能量为 0.26 mJ, 子脉冲宽度为 7.2 ns, 光束质量因子 $M^2 < 1.5$ 。

2 实验装置与原理分析

实验中选用受激发射截面大、上能级寿命短的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质, 这有利于高重复频率激光运转。所用板条晶体为 YVO₄/Nd:YVO₄/YVO₄ 键合晶体, 晶体结构如图 1 所示。当激光垂直于晶体出光端面传输时, 对于厚度为 t 、端面切割角为 θ 的板条晶体, 掺杂区域宽度 w_1 与晶体厚度 t 之间满足的几何关系为

$$w_1 = \frac{t}{\sin \theta} \quad (1)$$

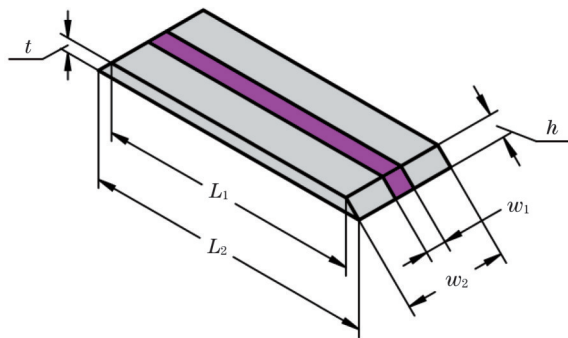


图 1 Nd:YVO₄ 板条晶体几何结构示意图

Fig. 1 Geometric structure diagram of Nd:YVO₄ slab crystal

晶体大面长度 L_2 满足

$$L_2 = 2(n+1)t \cdot \tan \theta, \quad (2)$$

式中: $n=1, 2, \dots$ 。实验中所用板条晶体的两端面切割角 θ 为 45°, 厚度 t 为 0.71 mm, 则有 $w_1=h=1.0$ mm, 由 h 和 w_1 组成的出光面为正方形, 从结构上限制两方向

激光光束的尺寸, 使之近似相等, 从而获得近似方形或圆形的激光输出。晶体大面长度 L_2 为 12.78 mm, 满足式 (2), 则从晶体一端端面中心垂直入射的激光可从另一端面中心垂直出射。

Nd:YVO₄ 晶体沿 a 轴切割, 掺杂 Nd³⁺ 的原子数分数为 2%, 掺杂区域两侧分别键合有 2 mm 宽的非掺杂 YVO₄ 晶体, 目的是增加板条晶体的散热面积和约束泵浦区域。键合后板条晶体总宽度 w_2 为 5 mm。板条晶体上大面的边长 L_1 为 11.36 mm, w_2 与 L_1 组成的大面为泵浦光入射面, 表面镀有 808 nm 增透膜。 w_2 与 L_2 组成的下大面为镀金焊接面, 该焊接面上先镀 808 nm 和 1064 nm 高反膜, 再镀保护膜和金, 最后将该镀金面焊接在通水冷却的紫铜热沉上, 水冷温度设置为 20 °C。晶体两出光端面均镀有 1064 nm 的 0° 增透膜, 透射率大于 99.8%。

实验光路图如图 2 所示。选择泵浦频率为 125 Hz、泵浦脉宽为 1 ms、最大平均输出功率为 18 W 的单巴条 LD 作为泵浦源。LD 输出光束被快轴和慢轴准直镜准直为细长而均匀的光束。对于快轴光束, 准直后的发散角为 0.6°。对于慢轴光束, 准直后的发散角为 5°, 需再利用焦距为 75 mm 的柱透镜 (CL) 整形。在 CL 后放置一片半波片 (HWP), 用来调节泵浦光束的偏振方向, 使之与晶体吸收最大的偏振方向平行。采用刀口法^[26]测量得到入射到晶体大面的光斑尺寸约为 0.67 mm × 10.00 mm。平-平谐振腔由全反镜 (RM) 和输出耦合镜 (OC) 组成, RM 和 OC 间的几何腔长约为 110 mm。其中 RM 表面镀有 1064 nm 的 0° 高反膜, 三种输出耦合镜在波长 1064 nm 处的 0° 透射率分别为 40%、50% 和 60%。

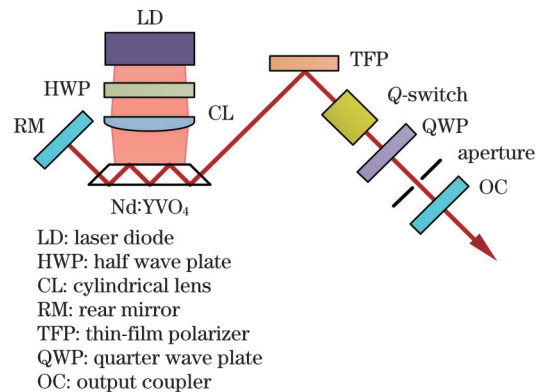


图 2 LD 侧面泵浦 Nd:YVO₄ 板条脉冲串激光器原理图

Fig. 2 Schematic of LD side-pumped Nd:YVO₄ slab burst-mode laser

为了获得窄脉宽高重复频率的激光输出, 选择具有抗损伤阈值高、消光比高、压电效应小等优点的偏硼酸钡 (BBO) 晶体作为电光 Q 开关, 用其制作成的普克尔盒长度为 32 mm, 通光孔径为 4 mm, 在光路中的插入损耗小于 2%。在谐振腔内插入偏振片 (TFP) 和四分之一波片 (QWP) 来实现偏振调 Q 脉冲输出。采用

升压调 Q 的方式,未对调 Q 晶体施加电压时,激光晶体产生的 s 偏振光被 TFP 反射,经过调 Q 晶体和 QWP (快轴与 s 偏振光和 p 偏振光均呈 45° 夹角)后到达 OC,经 OC 部分反射后再次经过 QWP 和调 Q 晶体,偏振态旋转 90° 变成 p 偏振光,由 TFP 全部透出,此时腔内 Q 值低,损耗高,无法形成激光振荡。对调 Q 晶体施加 $\lambda/4$ 电压(λ 为波长)后,s 偏振光经过调 Q 晶体和 QWP 后偏振态旋转 90°,变为 p 偏振光,经 OC 部分反射再次经过 QWP 和调 Q 晶体后,偏振态再次旋转 90° 回到初始状态,即变为 s 偏振光,此时谐振腔为高 Q 值状态,腔内可以形成激光振荡,输出调 Q 脉冲激光。

3 实验结果与分析

实验中所用泵浦源采用微通道水冷方式进行温度调节。当水冷温度为 35 °C 时,LD 的中心波长位于 806.7 nm 处,谱线宽度小于 3 nm。通过测量泵浦光在未镀膜 Nd:YVO₄ 板条晶体中的单程透过率,结合菲涅耳公式^[27]计算得到 Nd:YVO₄ 晶体的吸收系数约为 15 cm⁻¹,因此可得镀膜后晶体对泵浦光的双程吸收率约为 88.1%。采用非稳腔法^[28]测量 Nd:YVO₄ 晶体的热焦距,当泵浦平均功率分别为 14 W 和 17 W 时,Nd:YVO₄ 板条晶体吸收的泵浦功率分别约为 12.3 W 和 15.0 W,热焦距分别约为 400 mm 和 360 mm。结合晶体热焦距的变化优化谐振腔的长度,并将谐振腔内各光学元件调至共轴,提高泵浦光束和腔内模式的重叠效率。在谐振腔几何腔长为 110 mm 的条件下,采用 ABCD 矩阵计算得到热焦距为 360 mm 时腔镜 RM 到输出镜 OC 之间不同位置处的腔模半径,如图 3 所示。在吸收泵浦功率为 12.3 W 的条件下,计算得到板条晶体中心处的腔模半径约为 0.272 mm,与整形后的泵浦光束匹配较好。在腔内不加小孔光阑的情况下,在 80 kHz 的调 Q 重复频率下,采用功率计测量得到 OC 透过率分别为 40%、50% 和 60% 时脉冲串激光的阈值功率分别为 0.43、0.54、0.66 W。根据 Findlay-Clay 公式^[29]计算得到相对于泵浦功率的谐振腔往返损

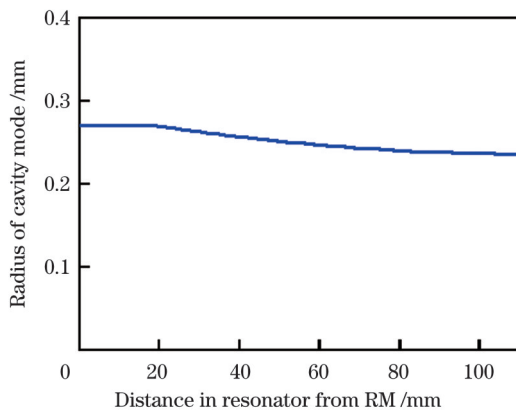


图 3 谐振腔内不同位置处的腔模半径

Fig. 3 Cavity mode radii in resonator at different positions

耗和泵浦耦合系数分别为 0.2682 和 0.1118 W⁻¹,此时对应的最佳 OC 透过率约为 40%。因此,以下实验均选用透过率为 40% 的耦合输出镜。

不同调 Q 重复频率下脉冲串激光的平均输出功率如图 4 所示。可见平均输出功率随着调 Q 重复频率的增加而增大,且未观察到明显的饱和趋势。在泵浦功率为 17 W 的条件下,当调 Q 重复频率为 80 kHz 时,获得了 5.03 W 的最大平均输出功率。此时每个脉冲串包含 80 个子脉冲,子脉冲单脉冲能量为 0.50 mJ,子脉冲宽度为 5.9 ns。利用光束质量分析仪测得该输出功率下 x 方向的光束质量因子 (M_x^2) 和 y 方向的光束质量因子 (M_y^2) 分别为 2.67 和 2.43,其光束强度的二维分布如图 4 的插图所示。可见两方向上的光束质量相近,但存在一定的高阶模式振荡,并伴随有杂散光,导致输出脉冲激光的光斑畸变,光束质量进而变差。

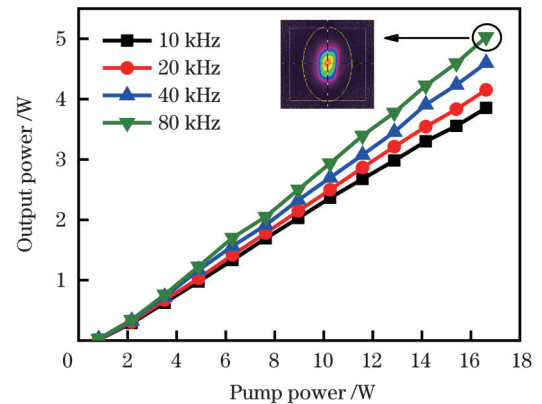


图 4 调 Q 脉冲串激光的输入-输出功率特性,插图为光束强度二维分布图

Fig. 4 Input-output power characteristics of Q-switched burst-mode laser with two-dimensional distribution of beam intensity shown in inset

根据图 3 可知,靠近输出镜 OC 处的基横模半径约为 0.240 mm,将通光孔径为 1 mm 的小孔光阑放置在腔内靠近 OC 处,可以滤除杂散光并抑制部分高阶模式的振荡,从而提高激光光束质量。加入小孔光阑后在不同调 Q 重复频率下激光的平均输出功率随泵浦功率的变化如图 5 所示。随着泵浦功率的增加,激光晶体的热效应逐渐加重,导致激光畸变加重,更多高阶模式超出小孔光阑的通光范围而无法振荡,进而使得激光脉冲的平均输出功率明显下降,且出现饱和趋势。在泵浦功率为 14 W 的条件下,计算得到板条晶体中心处的腔模半径约为 0.277 mm。当调 Q 重复频率分别为 10、20、40、80 kHz 时,平均输出功率分别为 1.03、1.35、1.86、2.56 W。当平均输出功率为 2.56 W 时,测得 x 和 y 方向的光束质量因子分别为 1.42 和 1.49,对应 x 和 y 方向的光束束腰直径分别为 0.48 mm 和 0.46 mm,发散角分别为 3.98 mrad 和 4.38 mrad,如图 6 所示。图 6 左下角和右下角的插图分别为该光束

的二维和三维强度分布。

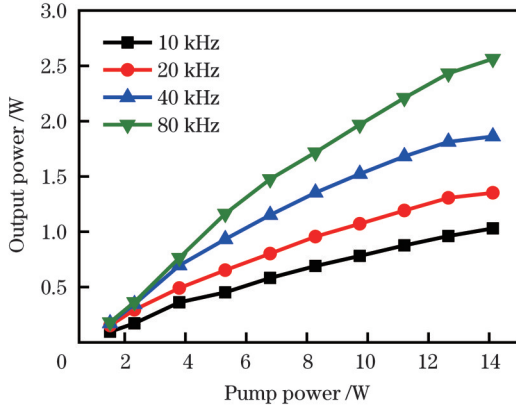


图 5 加入小孔光阑后调 Q 脉冲串激光的输入-输出功率特性
Fig. 5 Input-output power characteristics of Q-switched burst-mode laser after adding aperture diaphragm

采用光电探测器和示波器测量输出的脉冲波形。图 7(a)~(d)展示了不同调 Q 重复频率下脉冲串内的子脉冲个数。当子脉冲调 Q 重复频率分别为 10、20、40、80 kHz 时,每个脉冲串分别包含 10、20、40 和 80 个子脉冲。脉冲串的重复频率为 125 Hz,典型的脉冲序

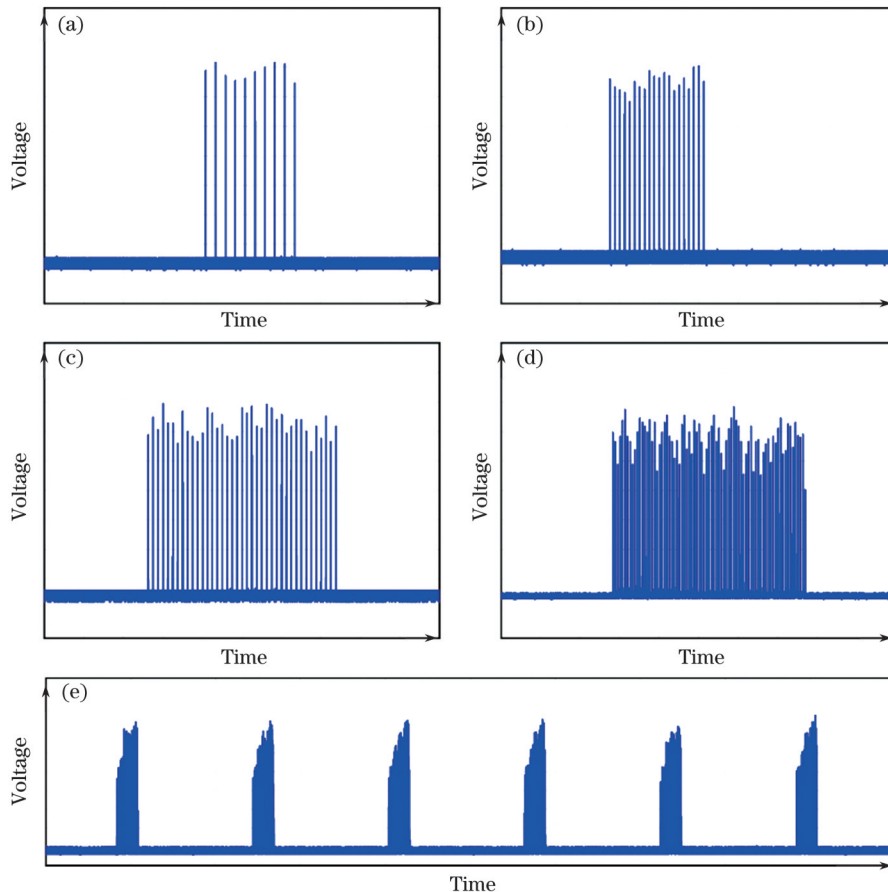


图 7 不同调 Q 重复频率下脉冲串激光的输出波形(泵浦重复频率为 125 Hz,泵浦脉宽为 1 ms)。(a) 10 kHz;(b) 20 kHz;
(c) 40 kHz;(d) 80 kHz;(e) 125 Hz

Fig. 7 Output waveform profiles of burst-mode laser under different Q-switched repetition frequencies (pump repetition frequency of 125 Hz and pump pulse width of 1 ms). (a) 10 kHz; (b) 20 kHz; (c) 40 kHz; (d) 80 kHz; (e) 125 Hz

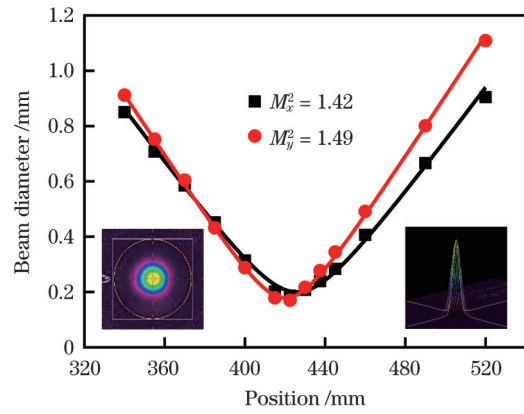


图 6 平均输出功率为 2.56 W 时的光束质量,插图为光束强度的二维(左)和三维(右)分布图

Fig. 6 Beam quality at average output power of 2.56 W with two-dimensional (left) and three-dimensional (right) distributions of beam intensity shown in inset

列如图 7(e)所示。在最大泵浦功率下,子脉冲宽度随调 Q 重复频率的变化如图 8 所示。当子脉冲调 Q 重复频率分别为 10、20、40、80 kHz 时,对应的子脉冲宽度分别为 5.5、5.9、6.4、7.2 ns。图 8 的插图展示了不同调 Q 重复频率下子脉冲的波形,对应的子脉冲单脉冲能

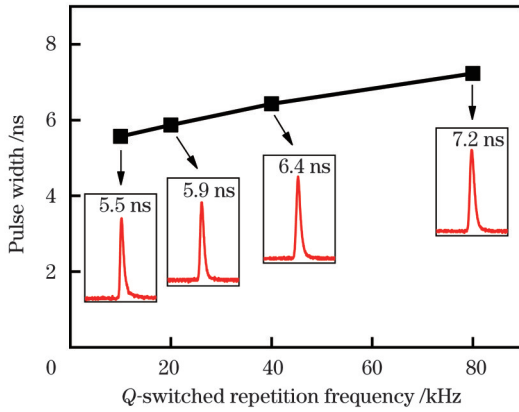


图 8 子脉冲宽度随调 Q 重复频率的变化, 插图为子脉冲波形
Fig. 8 Sub-pulse width versus Q-switched repetition frequency with sub-pulse waveforms shown in inset

量分别为 0.82、0.54、0.37、0.26 mJ。采用光谱分析仪 (分辨率为 0.7 nm) 测得脉冲串激光的中心波长位于 1064 nm 处, 光谱分析仪软件给出的光谱半峰全宽约为 1.5 nm, 如图 9 所示, 更准确的测量需要更高精度的光谱分析仪。

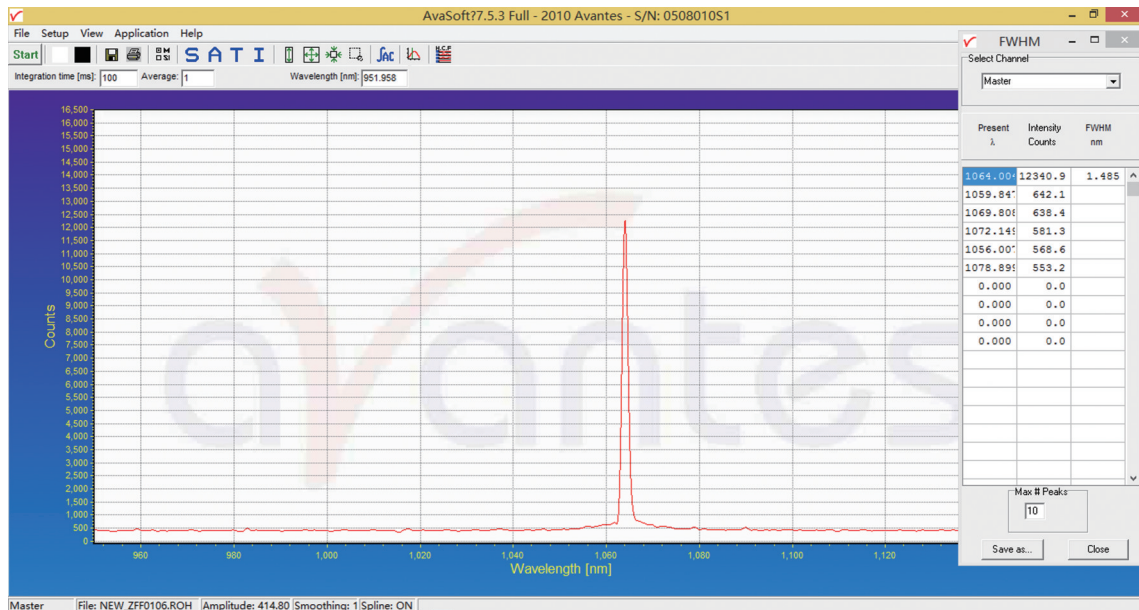


图 9 脉冲串激光的输出波长
Fig. 9 Output wavelength of burst-mode laser

4 结 论

对高增益 Nd:YVO₄ 板条晶体纵横比进行了优化设计, 限制了掺杂区域内高阶模式的产生, 使得宽度和厚度方向的光束质量近似相等。采用 LD 侧面连续泵浦以及电光调 Q 技术, 获得了高重复频率、窄纳秒脉宽、高光束质量的 1064 nm 脉冲串激光输出。在输出镜最佳透过率为 40% 的条件下, 当泵浦功率为 17 W、子脉冲调 Q 重复频率为 80 kHz 时, 获得了平均功率为 5.03 W 的 1064 nm 脉冲串激光输出, *x* 和 *y* 方向的光束质量因子分别为 2.67 和 2.43。通过在腔内加入小孔光阑来滤除杂散光并抑制部分高阶模式的振荡, 当泵浦功率为 14 W 时, 获得了平均功率为 2.56 W、子脉冲宽度为 7.2 ns 的脉冲串激光输出, *x* 和 *y* 方向的光束质量因子分别为 1.42 和 1.49。这种通过优化设计板条晶体的纵横比来约束光斑并提高脉冲串激光光束质量的方式为高能量、高重复频率、高光束质量脉冲串激光器的设计提供了新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] 李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310001.
Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research on space-borne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310001.
- [2] 张可欣, 王凯鑫, 高春清. LD 泵浦 Er, Yb:glass 板条多程放大器设计及其热效应分析[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0514001.
Zhang K X, Wang K X, Gao C Q. Design and thermal effect analysis of LD pumped Er, Yb: glass slab multi-pass amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0514001.
- [3] 刘琪, 孟俊清, 祖继锋, 等. 适于空间应用的高重复频率窄脉冲电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601005.
- [4] Zayhowski J J, Wilson A L. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG passively Q-switched microchip lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(12): 1588-1593.
- [5] Černý P, Jelínková H, Zverev P G, et al. Solid state lasers with Raman frequency conversion[J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(2): 113-143.
- [6] Du K M, Li D J, Zhang H L, et al. Electro-optically Q-switched Nd: YVO₄ slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 87-89.
- [7] 李小莉, 邵杰, 臧华国, 等. 高重复率窄脉宽 Nd:YVO₄ 板条激光器[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 206-210.

- Li X L, Shao J, Zang H G, et al. High repetition rate short pulse width Nd:YVO₄ slab laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 206-210.
- [8] 赵鹏, 陈檬, 禹伶洁, 等. 百千赫兹皮秒再生放大器的输出特性[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061403.
Zhao P, Chen M, Yu L J, et al. Output characteristics of few hundreds kHz picosecond regenerative amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061403.
- [9] Gao Q, Zhang H L, Fayyaz J. Laser diode partially end-pumped electro-optically Q-switched Yb: YAG slab laser[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111405.
- [10] Kaminski C F, Bai X S, Hult J, et al. Flame growth and wrinkling in a turbulent flow[J]. Applied Physics B, 2000, 71(5): 711-716.
- [11] Balachandran R, Dowling A P, Mastorakos E. Non-linear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations of two frequencies[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2008, 80(4): 455-487.
- [12] Slipchenko M N, Miller J D, Roy S, et al. All-diode-pumped quasi-continuous burst-mode laser for extended high-speed planar imaging[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 681-689.
- [13] 段加林, 李旭东, 武文涛, 等. LD 泵浦 Nd:YAG 1.06 μm 脉冲串激光及放大研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0105003.
Duan J L, Li X D, Wu W T, et al. Research on LD pumped 1.06 μm burst-mode laser and the amplification systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0105003.
- [14] Lempert W, Wu P F, Miles R, et al. Pulse-burst laser system for high-speed flow diagnostics[C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 15-18, 1996, Reno, NV, USA. Virginia: AIAA Press, 1996: 179.
- [15] 闫钰锋, 于洋, 白素平, 等. 板条激光器光束质量控制技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 767-782.
Yan Y F, Yu Y, Bai S P, et al. Progress on beam quality control technology of slab lasers[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 767-782.
- [16] 李隆, 牛娟, 张春玲, 等. 连续 LD 端面泵浦 YAG/Yb: YAG 复合晶体温度场分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1314002.
Li L, Niu J, Zhang C L, et al. Temperature field of continuous LD end-pumped YAG/Yb: YAG composite crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1314002.
- [17] Pan H, Yan R P, Fa X, et al. High-peak-power, high-repetition-rate LD end-pumped Nd: YVO₄ burst mode laser[J]. Optical Review, 2016, 23(3): 386-390.
- [18] Li X D, Zhou Y P, Yan R P, et al. A compact YAG/Nd: YAG/Cr: YAG passively Q-switched pulse burst laser pumped by 885 nm laser diode[J]. Journal of Russian Laser Research, 2017, 38(4): 387-391.
- [19] Li X D, Xu H B, Yan R P, et al. Burst-mode YVO₄/Nd: YVO₄ laser oscillator with pulse repetition rate up to 500 kHz[J]. Optik, 2021, 228: 165789.
- [20] Martin W S, Chernoch J P. Multiple internal reflection face-pumped laser: US3633126[P]. 1972-01-04.
- [21] 陈巧, 葛文琦, 边圣伟, 等. 侧面折返泵浦多边形 Nd: YAG 薄片的热效应研究[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2101002.
Chen Q, Ge W Q, Bian S W, et al. Research on the thermal effect of laser diode-array side-zigzag-pumped polygonal Nd: YAG thin disk[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2101002.
- [22] 王亚楠, 周唐建, 尚建力, 等. 7.13 kW、2 倍衍射极限输出的 Yb 板条激光放大器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1114007.
Wang Y N, Zhou T J, Shang J L, et al. Yb slab laser amplifier with a laser output of 7.13 kW, 2 times diffraction limit[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1114007.
- [23] Treichel R, Hoffmann H D, Luttmann J, et al. Highly-efficient, frequency-tripled Nd: YAG laser for spaceborne LIDARs[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10566: 1056610.
- [24] Mao Y F, Zhang H L, Hao X L, et al. 8.4 mJ, 10 kHz, 3.6 ns, Nd: YVO₄ slab amplifier[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11017-11022.
- [25] Chard S P, Ramirez-Corral C Y, Bass M, et al. 100 W class green 10 ps 280 μJ laser with $M^2 < 1.4$ using Z-slab amplifier[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9726: 97261S.
- [26] 陆璇辉, 陈许敏, 张蕾, 等. 刀口法测量高斯光束光斑尺寸的新认识[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 186-187.
Lu X H, Chen X M, Zhang L, et al. re-cognition of knife-edge method measuring the spot size of Gaussian beam[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(3): 186-187.
- [27] 梁铨廷. 物理光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
Liang Q T. Physical optics[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [28] Liu J H, Lu J R, Lü J H, et al. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers by a simple direct approach[J]. Chinese Physics Letters, 1999, 16(3): 181-183.
- [29] Findlay D, Clay R A. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. Physics Letters, 1966, 20(3): 277-278.

Nd:YVO₄ Slab Burst-mode Laser with High Beam Quality and Short Nanosecond Pulse Width

Song Yue^{1,2,3}, Wang Zhimin^{1,2*}, Yang Xihang^{1,2,3}, Bo Yong^{1,2}, Zhang Fengfeng^{1,2}, Zhang Yixuan^{1,2}, Zhou Zihan^{1,2,3}, Zhao Wencheng^{1,2}, Lin Yanyong^{1,2}, Fu Li^{1,2}, Peng Qinjun^{1,2}

¹Key Laboratory of Solid-State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²Key Laboratory of Functional Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Laser-diode-pumped compact all-solid-state lasers with a high repetition frequency, short pulse width, and high beam quality have a wide application range in laser ranging, LIDAR detection, laser communication, and industrial processing. However, the thermal effect of solid-state lasers under high-power pumping is a crucial factor limiting the combination of the high single-pulse energy, high repetition frequency, and high beam quality characteristics of pulsed lasers. The burst-mode laser technology produces

laser pulses in an intermittent mode, which alleviates the thermal effect of the continuous output of pulsed lasers to a certain extent. Common rod solid-state lasers are often end-pumped, which inevitably causes uneven heat distribution in the crystal. The slab laser reduces the temperature difference of the crystal by increasing the cooling area of the gain medium and makes the laser propagate along the zig-zag shape in the direction of the temperature gradient, which can reduce the thermal effect on the laser output to a certain extent. However, owing to the asymmetric shape of the slab gain medium, the output laser pulse is often elliptical or elongated in cross-section, resulting in a large difference in the beam quality in the x and y directions. In this study, beginning with the structure of the slab gain medium, we optimize the design of the gain medium size and aspect ratio and limit the range of the crystal doping region to reduce the thermal effect and optimize the laser spot. We hope that this method, which improves the beam quality of burst-mode lasers by optimizing the crystal structure of slabs, can also promote the development of high-energy, higher-repetition-frequency, and high-beam-quality burst-mode lasers.

Methods In this study, Nd:YVO₄ crystals with large stimulated emission cross-sections and short upper-energy-level lifetimes are side-pumped by an laser diode (LD), and both sides of the doped region are bonded with non-doped YVO₄ crystals to increase the heat dissipation area and constrain the pumping region, which facilitates heat dissipation and achieves high-repetition-frequency laser operation. By designing the crystal doping area aspect ratio to obtain a square beam exit surface, transmitting the laser pulse along the zig-zag shape in the doped region, and emitting the laser pulse perpendicular to the crystal end surface, the cavity mode optimization design is combined to limit and optimize the beam quality of the laser in the thickness and width directions to make both similar. In addition, the mode-selective effect of the small-aperture diaphragm is combined to further optimize the beam quality and obtain a pulse laser with the similar beam quality in the x and y directions. Electro-optical Q -switching technology is used to achieve a high repetition frequency and short pulse width output, and the transmittance of the output coupling mirror is optimized to obtain high-power burst-mode lasers.

Results and Discussions Under the condition that the optimal transmittance of the output coupling mirror is 40% and the sub-pulse Q -switched repetition frequency is 80 kHz, a 1064-nm burst-mode laser with the highest average power of 5.03 W is obtained, with beam quality factor (M^2) values of 2.67 and 2.43 in the x and y directions, respectively (Fig. 4). It can be seen that the beam qualities are similar in both directions, but there are certain higher-order-mode oscillations accompanied by stray light. By adding a small-aperture diaphragm with a diameter of 1 mm in the cavity to filter out stray light and suppress some of the higher-order-mode oscillations, a burst-mode laser with an average power of 2.56 W and a sub-pulse width of 7.2 ns is obtained (Fig. 5), and the M^2 values in the x and y directions are 1.42 and 1.49, respectively (Fig. 6). This indicates that a high-energy, high-frequency, high-beam-quality burst-mode laser with similar beam quality in the x - and y -directions is realized in this study. In addition, this study measures the output waveforms of the burst-mode lasers at different sub-pulse repetition frequencies (Fig. 7) and the variation in sub-pulse width with Q -switched frequency at maximum pumping power (Fig. 8).

Conclusions By optimizing the aspect ratio of the high-gain Nd:YVO₄ slab crystal to limit the generation of higher-order modes in the doping region and constraining the M^2 values in the width and thickness directions to be approximately equal, a 1064-nm burst-mode laser with a high repetition frequency, short nanosecond pulse width, and high beam quality is obtained using LD-side quasi-continuous pumping and electro-optical Q -switching techniques. With the optimal transmittance of the output coupling mirror at 40%, the 1064-nm pulsed laser is obtained with an average power of 5.03 W and a sub-pulse Q -switched repetition frequency of 80 kHz, and the M^2 values in the x and y directions are 2.67 and 2.43, respectively. By adding a small-aperture diaphragm in the cavity to filter out stray light and suppress the oscillation of some higher-order modes, a burst-mode laser with an average power of 2.56 W and a sub-pulse width of 7.2 ns is obtained. The M^2 values in the x and y directions are 1.42 and 1.49, respectively. This approach provides a new research idea for the design of high-energy, high-frequency, and high-beam-quality burst-mode lasers.

Key words lasers; electro-optical Q -switching; burst mode; high beam quality; short pulse width