

基于标准具选模的单纵模声光调Q Nd:YVO₄激光器

李银栋 陈义夫 孙佳宁 满朝阳 安嘉硕 颜秉政 白振旭 吕志伟 王雨雷

Single-longitudinal-mode acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser using Fabry-Perot etalon

LI Yindong, CHEN Yifu, SUN Jianing, MAN Zhaoyang, AN Jiashuo, YAN Bingzheng, BAI Zhenxu, LYU Zhiwei, WANG Yulei

引用本文:

李银栋, 陈义夫, 孙佳宁, 等. 基于标准具选模的单纵模声光调Q Nd:YVO₄激光器[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1307-1313. DOI: 10.5768/JAO202445.0607004

LI Yindong, CHEN Yifu, SUN Jianing, et al. Single-longitudinal-mode acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser using Fabry-Perot etalon[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1307-1313. DOI: 10.5768/JAO202445.0607004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Nd:YAG调Q激光器下能级寿命对激光脉冲性能的影响

Influence of energy level lifetime of Nd:YAG Q-switched laser on laser pulse performance

应用光学. 2023, 44(6): 1236-1243 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610010>

面阵像元细分用于法布里珀罗标准具间隔测量

Virtual plane pixel subdivision for measuring interval of F-P etalon

应用光学. 2019, 40(1): 99-104 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103004>

变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析

Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer

应用光学. 2021, 42(3): 494-498 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302007>

半外腔Nd:YAG和Nd:YVO₄微片固体激光器的腔调谐特性研究

Characteristics of cavity tuning of half-external cavity Nd:YAG and Nd:YVO₄ microchip solid-state lasers

应用光学. 2023, 44(2): 437-443 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207002>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129-1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

基于FP微阵列的压缩感知光谱重建研究

Research on compressed sensing spectral reconstruction based on Fabry-Perot micro-array

应用光学. 2021, 42(3): 436-442 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301010>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1307-07

基于标准具选模的单纵模声光调 Q Nd:YVO₄激光器

李银栋^{1,2}, 陈义夫^{1,2}, 孙佳宁^{1,2}, 满朝阳^{1,2}, 安嘉硕^{1,2}, 颜秉政^{1,2},
白振旭^{1,2}, 吕志伟^{1,2}, 王雨雷^{1,2}

(1. 河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401; 2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401)

摘要: 单纵模激光器具有输出光束质量好、光谱线宽窄、频率稳定、结构紧凑等优点, 在相干光通信、激光雷达、非线性光学、引力波探测和高精度光谱测量等领域有广泛的应用。本研究基于短腔方案, 结合标准具选模方法, 设计了腔长为 90 mm 的激光二极管单端泵浦单纵模声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器。通过对腔内纵模模式进行理论分析, 选择插入一个厚度为 5 mm、反射率为 90% 的法布里-珀罗标准具, 实现了重复频率 1 Hz~10 Hz 可调、脉冲宽度为 10 ns、单脉冲能量为 133 μ J、能量不稳定性为 3.39% 的单纵模激光输出。通过对输出的单纵模激光进行两级放大, 获得了 40 mJ 的单脉冲能量输出。

关键词: 激光技术; 单纵模; 法布里-珀罗标准具; 短腔; 声光调 Q

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0607004

Single-longitudinal-mode acousto-optic Q -switched Nd:YVO₄ laser using Fabry-Perot etalon

LI Yindong^{1,2}, CHEN Yifu^{1,2}, SUN Jianing^{1,2}, MAN Zhaoyang^{1,2}, AN Jiashuo^{1,2}, YAN Bingzheng^{1,2},
BAI Zhenxu^{1,2}, LYU Zhiwei^{1,2}, WANG Yulei^{1,2}

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China)

Abstract: Single-longitudinal-mode (SLM) lasers, characterized by their superior output laser beam quality, narrow linewidth, stable frequency, and compact size, find extensive applications in coherent optical communication, lidar, nonlinear optics, gravitational wave detection, and high-precision spectral measurement. A short cavity scheme in conjunction with Fabry-Perot etalon mode selection was employed, and a theoretical analysis of the longitudinal mode within the cavity was carried out. A laser diode single end-pumped acousto-optic Q -switched Nd:YVO₄ laser with a cavity length of 90 mm was involved, into which a 5 mm thick Fabry-Perot etalon with a reflectivity of 90% was inserted. A SLM laser output was realized with an adjustable repetition frequency of 1 Hz~10 Hz, a pulse duration of 10 ns, a single pulse energy of 133 μ J, and an energy instability of 3.39%. The output SLM laser was further amplified by two stages, and a single-pulse energy output of 40 mJ was obtained.

Key words: laser technology; single-longitudinal-mode; Fabry-Perot etalon; short cavity; acoustic-optical Q -switched

收稿日期: 2023-11-03; 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62075056, 61927815); 天津市自然科学基金 (20JCZDJC00430, 22JCYBJC01100); 河北省自然科学基金 (F2023202063)

作者简介: 李银栋 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事端面泵浦固体激光器研究。E-mail: 1377544922@qq.com

通信作者: 王雨雷 (1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率激光技术与非线性光学研究。E-mail: wyl@hebut.edu.cn

引言

单纵模激光通常指激光器谐振腔内只有单一纵模或单一频率进行振荡,其特点是光谱宽度窄,对于固态激光器,其光谱线宽通常为兆赫兹甚至赫兹量级,这意味着其相干长度可达数万公里^[1-3]。近年来,单纵模激光光源在非线性光学、测风雷达、相干光通信、激光测距等领域应用广泛^[4-6]。尤其是在相干光通信领域,使用短脉冲单纵模激光光源作为载波信号,其线宽窄、相干长度长的特点提高了频谱利用率,增大了中继距离。此外,在激光测距领域中,单纵模激光能够降低噪声干扰,通过减小激光线宽可以降低测量偏差,同时,增大脉冲持续时间会提高测距精度^[7-10]。

在高功率放大系统中,同步重复频率通常采用主动调 Q 激光器,但是主动调 Q 本身没有纵模选择特性,因此输出光通常为多纵模。在主动调 Q 激光系统中,由于增益介质的带宽较宽和空间烧孔效应,靠近中心频率的相邻纵向模式可以获得足够的增益并引起模式竞争,而模式竞争会导致多个纵向模式的输出和功率波动。为了实现稳定的单纵模运转,固体激光器利用振荡器直接获得单纵模运转的主要方法包括:扭摆腔法、环形腔法、标准具法、短腔法和种子注入法等^[11-16],此外也可通过引入非线性光学损耗的方式实现单纵模运转,如二阶和三阶非线性光学效应等^[17-21]。

扭摆腔对晶体选择要求较高,环形腔与种子注入激光器的结构相对较复杂。2020年,JIN L等人介绍了一种调 Q SLM Pr: YLF激光器^[22],该激光器采用预激光调 Q 技术与Fabry-Perot标准具相结合的方法,在639.5 nm可见光波段处实现了直接振荡,获得了重复频率为10 kHz、光谱线宽为33 MHz的激光输出。JIN D等人介绍了一种双调 Q SLM Nd: YAG激光器,其模式选择由扭摆腔技术和谐振腔反射器实现,当可饱和吸收体初始透过率 T_0 为6.2%时,激光输出实现了96.2%的单纵模率和0.64的对称因子^[23]。因此可以得出结论,主动调 Q 系统的纵向模式选择需要额外插入模式选择元件。但插入标准具带来的损耗需要更高的泵浦功率以实现激光输出,从而导致更强的热效应,不利于系统稳定性。2023年,CHEN Y F等研究了一种重复频率可调的SLM纳秒脉冲激光器^[24],该激光器结合了短腔法的模式选择和主动调 Q 开关方案,实现了重复频率在1 Hz ~ 1 kHz范围内,单脉

冲能量为76 μ J、脉冲宽度为10 ns、能量不稳定性低于1.7%、光束质量因子小于1.03的接近衍射极限的单纵模输出。相比于电光或无源调 Q 激光器,这种结构简单紧凑的重复频率可调SLM激光器具有更广泛的应用范围。短腔法通过缩短腔长进行纵向模式选择,减少了谐振腔中可以振荡的模式数,简化了谐振腔的设计,同时提供了良好的模式选择能力^[25-26]。短腔法通常用于微片激光器^[27-29],但由于增益介质尺寸小,导致微片激光器的输出能量较低,且通常采用被动调 Q 的方式获得短脉冲,因此输出的激光脉冲具有时序不稳定性,难以与放大级同步。此外,采取短腔法只能抑制一部分纵模谐振,少纵模输出状态仍然不可避免。因此本文采用主动调 Q 与在短腔中插入标准具来进行激光的选模,该方案相较于环形腔和种子注入激光器,具有小型化、成本低等优点。

本研究采用短腔结合标准具的方法在声光调 Q Nd:YVO₄激光器中进行模式选择。通过对腔内纵模模式进行仿真,分析了90 mm腔长下的腔内纵模间隔,选用厚度为5 mm、反射率为90%的标准具,使得在自由光谱范围内只有单一的纵模具有较低的损耗,对其他纵模引入了较高损耗,从而使多纵模振荡现象被抑制,保证了激光器的单纵模运转。进一步地,将单纵模运转的激光器作为种子源,使其通过两级放大器,获得了单脉冲能量为40 mJ的激光输出。

1 理论分析与仿真

在腔内插入标准具,由于多光束干涉效应,谐振腔具有与频率有关的选择性耗能,损耗小的纵模形成振荡,损耗大的纵模则被抑制^[1,12]。由于多光束干涉,只有某些特定频率的光可以透过标准具,同时标准具为其他频率的振荡光引入了较大的损耗。标准具透射率峰对应的频率为

$$\nu_j = j \frac{c}{2\mu d \cos\theta} \quad (1)$$

式中: j 为正整数; c 为光速; μ 为标准具介质折射率; d 为标准具长度; θ 为标准具内光线与法线的夹角。相邻透射率峰的频率间隔为

$$\Delta\nu_j = \frac{c}{2\mu d \cos\theta} \quad (2)$$

透射谱线宽度为

$$\delta\nu = \frac{c}{2\pi\mu d} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \quad (3)$$

式中 R 为标准具的反射率。若调整 θ 角, 使 $\nu_j = \nu_q$ (ν_q 为第 q 个纵模的频率), L 为光程, 且有:

$$\Delta\nu_j > \Delta\nu_{\text{osc}} \quad (4)$$

$$\delta\nu < \Delta\nu_q = \frac{c}{2L} \quad (5)$$

即纵模间隔 $\Delta\nu_j$ 大于振荡带宽 $\Delta\nu_{\text{osc}}$, 则可获得单纵模输出。由式(2)~式(5)可求出所需标准具的长度 d 及镜面反射率 R 。计算得出 d 为 5 mm、 R 为 90% 的标准具满足实验所需, 可以进行仿真模拟。

通过仿真获得标准具的透射光谱范围与纵模间隔的关系, 挑选出参数合适的标准具, 令透射光谱范围小于纵模间隔, 在理论上可以筛选出单纵模。图 1 中实线代表腔长 90 mm、输出耦合镜透过率为 20% 的谐振腔内振荡纵模; 虚线代表反射率 R 为 90%、厚度 d 为 5 mm、材料为熔石英的标准具(折射率 n 为 1.45)透射光谱范围的仿真结果。显然, 标准具的透射光谱范围小于纵模间隔, 且透射光谱与纵模中心频率相对应, 因此可以筛选出单纵模。腔内纵模强度之所以相同, 且最低位于 0.4 附近, 是由于仿真采用的是无源腔(腔内没有增益介质), 同时腔输出镜存在透过率, 所以最低强度都不为 0。

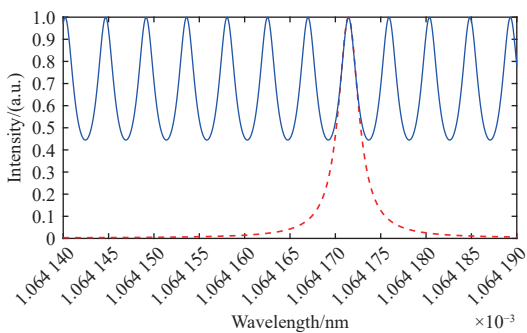


图 1 标准具参数与纵模间隔仿真

Fig. 1 Simulation of etalon parameters and longitudinal mode interval

2 实验结果分析

2.1 实验装置

实验装置结构如图 2 所示。该激光系统由激光二极管(LD)泵浦源、耦合光学器件、输入镜(IC)、Nd:YVO₄ 晶体、声光调 Q(AOQS)和输出镜(OC)组成。泵浦源是纤芯直径为 200 μm 、中心波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器, 最大输出功率为 25 W。增益晶体采用沿 a 轴切割的 Nd:YVO₄, 尺寸为 3×3×18 mm³, 掺杂浓度为 0.3%。

Nd:YVO₄ 用铝箔包裹, 使用水冷方式进行散热, 以减少由热效应引起的腔内模式不稳定。AOQS 由声光晶体、驱动模块和数字信号发生器组成, 典型的声光衍射效率为 85%。IC 为泵浦波长 808 nm 高透、输出波长 1 064 nm 高反的平镜镀膜, OC 也为平镜, 镀 1 064 nm 波长处透过率为 20% 的膜。2 个 F1 组成耦合透镜组, 倍率为 1:1。平-平腔用于实现最大腔内模式体积和高光束质量输出, 腔长为 90 mm。法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具厚度为 5 mm, 反射率为 90%, 插在声光模块和输出镜之间。通过调整标准具的倾斜角度可以改变透过谱线中心频率, 从而匹配谐振腔的主纵模波长, 实现单纵模输出。

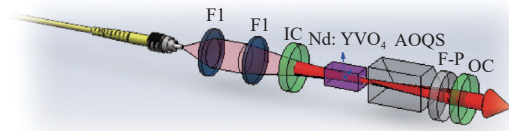


图 2 实验装置和光路图

Fig. 2 Experimental setup and optical path diagram

2.2 实验结果验证分析

图 3(a) 为谐振腔内不加标准具时采集到的波形, 脉宽为 7 ns, 其脉冲波形多纵模现象明显。对图 3(a) 中的波形进行傅里叶变换得到其频谱图 3(b)。可以看到图 3(b) 中有 3 个纵模, 并且纵模间隔为 1 GHz, 通过计算得出自由光谱范围(free spectrum range, FSR)与纵模间隔相当, 确定在不加标准具时腔内存在 3 个纵模振荡。与图 1 中腔内纵模情况相比, 短腔能抑制一部分纵模谐振, 但仍无法实现单纵模的运转。因此根据仿真所得参数, 在腔内插入上述参数的标准具, 并分析波形及频谱。图 3(c) 为加入标准具之后获得的单脉冲波形, 脉冲宽度为 10 ns, 与未加标准具相比, 脉冲宽度出现了一定的展宽。与图 3(a) 相比, 输出脉冲波形更加平滑, 且脉冲波形上没有出现多纵模的尖峰。对波形进行傅里叶变化得到其频谱图, 如图 3(d) 所示, 其频率在 2.5 GHz 处存在一个尖峰, 通过放大尖峰部分得到图 3(d) 的子图。如图 3(d) 子图中所示, 尖峰频域宽度与附近基频噪声相当, 同时计算出 FSR 为 1 GHz, 与图 3(d) 中的尖峰和纵模之间的间隔不符, 且频谱图 3(d) 中尖峰与图 3(b) 中的纵模频域宽度相差较多, 判定该尖峰为噪声, 因此分析所得波形为单纵模。波形呈近高斯形状, 拖尾现象是由于 AOQS 关闭缓慢和 Q 开关持续时间长造成的。

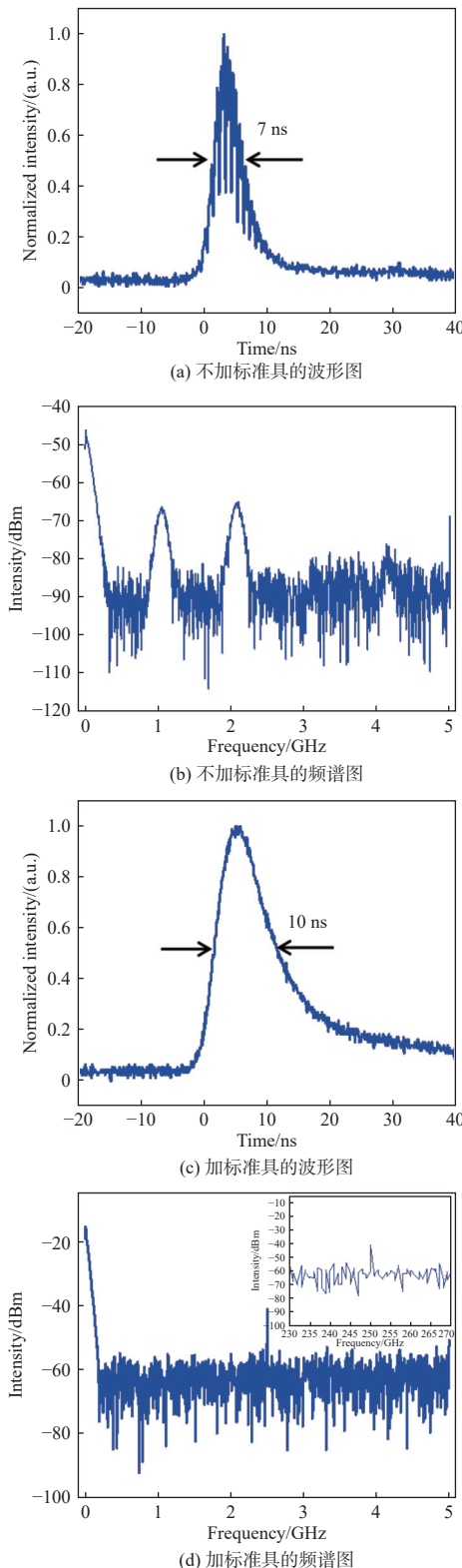


图3 5.2 W 泵浦功率时不同标准具下的波形图和频谱图
 Fig. 3 Waveform and spectrum diagrams under different etalons at 5.2 W pump power

图4展示了在不同泵浦功率下得到的脉冲波形图和对应的频谱图。图4(a)中泵浦功率由3.8 W增加到5.2 W, 波形均较平滑, 此时仍处于声光调

Q 的关断范围之内; 图4(b)为其对应的频谱图, 在频域波形上虽然有一些毛刺尖峰, 但与图3(d)中尖峰分析相同, 仍为基频噪声导致。当泵浦功率由3.8 W增加至5.2 W时, 输出单脉冲能量由55.2 μJ增加至133 μJ, 波形仍为单纵模。

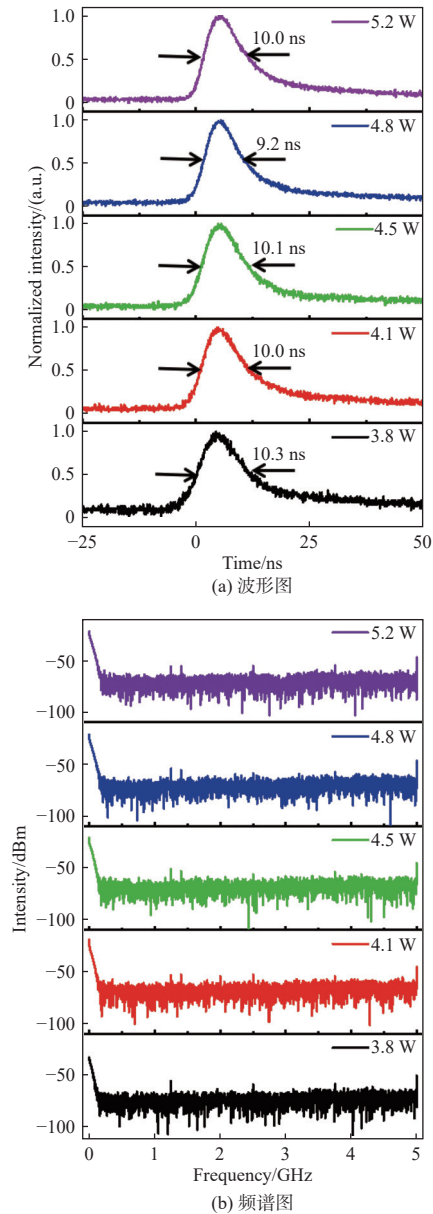


图4 不同泵浦功率下的波形图和频谱图
 Fig. 4 Waveform and spectrum diagrams under different pump powers

图5展示了种子光经过两级放大之后的波形和对应的频谱图, 放大方式为单灯放大, 放大晶体为直径8 mm、长度200 mm的Nd:YAG晶体, 放大电压均为950 V, 散热方式为水冷。图5(a)中的波形平滑, 无明显尖峰, 进行傅里叶变换之后得到图5(b), 与图3(d)中频谱类似, 在同一位置发现了

尖峰, 放大频谱之后发现为基频噪声, 且尖峰间隔与纵模间隔不符, 因此经过两级放大之后波形仍保持为单纵模。

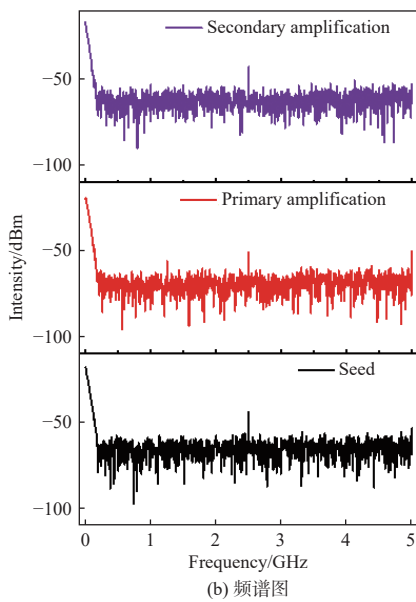
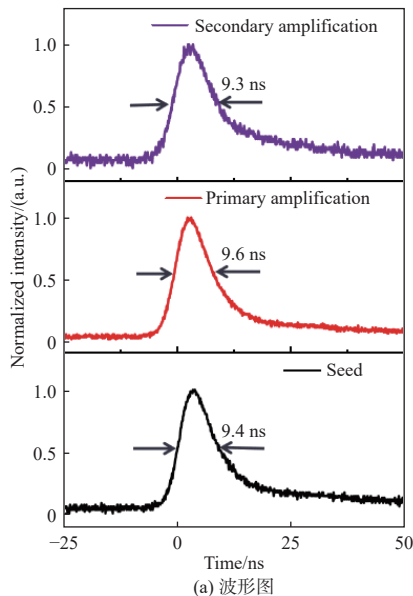


图5 两级放大之后的波形图和频谱图

Fig. 5 Waveform and spectrum diagrams after two-stage amplification

如图6所示, 无标准具时, 在5.2 W泵浦功率下, 通过能量计测得单脉冲能量为200 μJ , 计算出能量不稳定性为2.09%。能量不稳定性计算方法为: 对一段时间内的能量进行采样, 计算出标准差和平均值, 标准差与平均值的比值即为能量不稳定性。腔内插入标准具, 在不同泵浦功率下测得输出能量及2 min的能量不稳定性, 在泵浦功率为3.8 W时, 获得55.2 μJ 的单脉冲能量, 能量不稳定性

为9.7%; 提高泵浦功率至5.2 W时, 单脉冲能量为133 μJ , 能量不稳定性降低到3.39%。与不加标准具时相比能量稳定性下降, 但在较高功率下相对稳定。加入标准具导致能量稳定性下降的主要原因是: 标准具的引入导致腔内损耗变大, 能量损耗增大30%, 同时光斑形状产生轻度畸变。

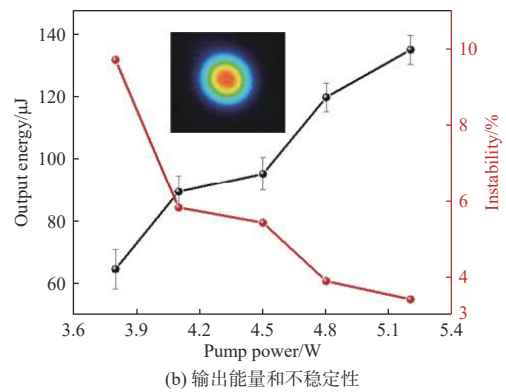
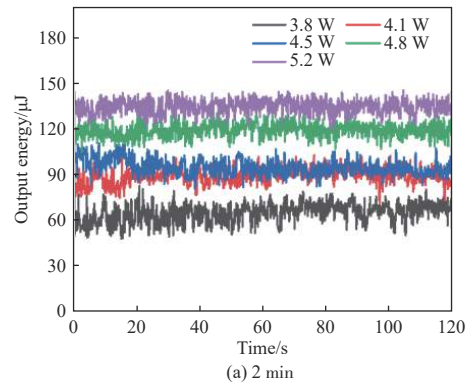


图6 不同泵浦功率下的能量抖动和不稳定性

Fig. 6 Energy jitter and instability under different pump powers

通过改变声光调制器频率, 实现了1 Hz~10 Hz频率可调的激光输出。图7为不同重复频率下输出的激光波形, 在重复频率1 Hz~10 Hz变化范围内, 激光波形均平滑且为单纵模, 脉冲宽度都接近10 ns。

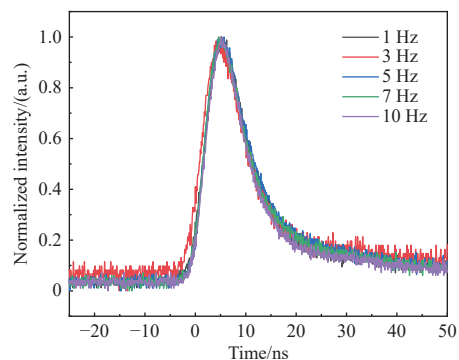


图7 不同重复频率下输出波形

Fig. 7 Output waveforms at different repetition rates

3 结论

本文介绍了一种基于短腔方案的 SLM 声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器,该激光器结合了短腔法、标准具选模法以及主动调 Q 方案。通过短腔方案能够抑制部分纵模的谐振,进一步插入标准具,在 1 Hz~10 Hz 的重复频率下获得了单脉冲能量为 133 μ J、能量不稳定性为 3.39%、脉冲宽度为 10 ns 左右的单纵模激光输出。结果表明,插入的标准具通过增加腔内损耗实现了单纵模输出,脉冲波形平滑,适用于之后的高能量激光放大输出,避免因多纵模产生的高峰值功率对仪器造成损坏。由于声光调 Q 的衍射效率有限,难以直接获得较高能量的激光输出,后续通过加入两级放大器对获得的单纵模激光进行放大,获得了能量为 40 mJ 的激光输出。与被动调 Q 相比,声光调 Q 可以与放大信号同步触发,因此更具可控性,应用范围更广泛。

参考文献:

- [1] BAI Z X, ZHAO Z G, TIAN M H, et al. A comprehensive review on the development and applications of narrow-linewidth lasers[J]. Microwave and Optical Technology Letters 2022, 64(12): 2244-2255.
- [2] 张宽收, 卢华东, 李渊骥, 等. 高功率低噪声全固态连续波单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 19-37.
ZHANG Kuanshou, LU Huadong, LI Yuanji, et al. Progress on high-power low-noise continuous-wave single-frequency all-solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 19-37.
- [3] 颜秉政, 穆西魁, 安嘉硕, 等. 2 μ m 单纵模全固态脉冲激光技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 1-17.
YAN Bingzheng, MU Xikui, AN Jiashuo, et al. Advances in 2 μ m single-longitudinal-mode all-solid-state pulsed lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(2): 1-17.
- [4] CHEN M H, HSIAO S C, SHEN K T, et al. Single longitudinal mode external cavity blue InGaN 9 diode laser[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 68-71.
- [5] 白振旭, 陈晖, 丁洁, 等. 基于空间光腔的高功率布里渊频率梳[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 195-199.
BAI Zhenxu, CHEN Hui, DING Jie, et al. High-power brillouin frequency comb based on free-space optical cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 195-199.
- [6] LEI Y, MAO A F, LI Y L, et al. Research on single longitudinal mode laser based on F-P etalon and Q -switched delay[J]. Optik, 2018, 167: 1-6.
- [7] 吴姿妍, 眭晓林, 刘波, 等. 本振调制型高重复频率远距离脉冲激光相干测距[J]. 中国激光, 2024, 51(6): 206-219.
WU Ziyang, SUI Xiaolin, LIU Bo, et al. High repetition frequency long-distance pulsed laser coherent ranging based on local oscillator modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(6): 206-219.
- [8] 朱涛, 党来杨, 李嘉丽, 等. 窄线宽激光器技术及进展[J]. 光子学报, 2022, 51(8): 55-75.
ZHU Tao, DANG Laiyang, LI Jiali, et al. Narrow linewidth laser technology and development[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8): 55-75.
- [9] 冯智宇, 成煜, 苑立波, 等. 波长可调谐窄线宽激光器的线宽特性[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 150-155.
FENG Zhiyu, CHENG Yu, YUAN Libo, et al. Linewidth characteristics of wavelength-tunable narrow linewidth lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 150-155.
- [10] 齐翔羽, 陈超, 曲轶, 等. 全频域下窄线宽激光器光谱线宽的分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(8): 2354-2359.
QI Xiangyu, CHEN Chao, QU Yi, et al. Complete frequency domain analysis for linewidth of narrow linewidth lasers[J]. Spectroscopy And Spectral Analysis, 2019, 39(8): 2354-2359.
- [11] 赵桂娟, 王雨雷, 陈彬, 等. LD 侧面泵浦被动调 Q 环形腔单纵模激光器[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 117-121.
ZHAO Guijuan, WANG Yulei, CHEN Bin, et al. LD side-pumped passively Q -switched ring cavity single-longitudinal-mode laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 117-121.
- [12] 李超, 王永杰, 李芳. 基于 F-P 温控标准具的高稳定性 FBG 波长解调系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 238-242.
LI Chao, WANG Yongjie, LI Fang. Highly stable FBG wavelength demodulation system based on F-P etalon with temperature control module[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 238-242.
- [13] 孙静玮, 余洋, 王凯鑫, 等. 环形腔单频激光振荡及功率放大系统研究[J]. 光子学报, 2023, 52(9): 37-44.

- SUN Jingwei, YU Yang, WANG Kaixin, et al. Single-frequency ring laser oscillation and power amplification system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(9): 37-44.
- [14] 魏娇, 靳丕钰, 苏静, 等. 全固态单频连续波宽调谐钛宝石激光器研究进展[J]. *光电技术应用*, 2023, 38(5): 19-29.
- WEI Jiao, JIN Pixian, SU Jing, et al. All-solid-state single-frequency continuous-wave wideband tunable Titanium sapphire laser[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2023, 38(5): 19-29.
- [15] 牛昌东, 戴瑞峰, 刘瑞科, 等. 固体激光器单纵模选择技术及应用[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(5): 38-47.
- NIU Changdong, DAI Ruifeng, LIU Ruike, et al. Single-longitudinal-mode selection technology and application of solid-state laser[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2020, 35(5): 38-47.
- [16] ZHANG X P, WANG Z H, LIU S, et al. Development of single-longitudinal-mode selection technology for solid-state lasers[J]. *International Journal of Optics*, 2021, 2021: 6667015-1-13.
- [17] MARTIN K I, CLARKSON W A, HANNA D C. Self-suppression of axial mode hopping by intracavity second-harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6): 375-377.
- [18] LU H D, SUN X J, WANG M H, et al. Single frequency Ti: sapphire laser with continuous frequency-tuning and low intensity noise by means of the additional intracavity nonlinear loss[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 1-8.
- [19] 李牧野, 杨学宗, 孙玉祥, 等. 单频连续波金刚石拉曼激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 54-64.
- LI Muye, YANG Xuezhong, SUN Yuxiang, et al. Single-frequency continuous-wave diamond Raman laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 54-64.
- [20] 金舵, 白振旭, 范文强, 等. 金刚石布里渊激光器实现 4 倍线宽窄化[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 301-304.
- JIN Duo, BAI Zhenxu, FAN Wenqiang, et al. Four times linewidth narrowing has been achieved in diamond Brillouin laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 301-304.
- [21] 郑浩, 赵臣, 张飞, 等. MgO: PPLN 中红外光参量振荡器的闲频光纵模特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(12): 32-37.
- ZHENG Hao, ZHAO Chen, ZHANG Fei, et al. Study on the longitudinal mode characteristic of idler wave in MgO: PPLN infrared optical parametric oscillator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(12): 32-37.
- [22] JIN L, DAI W C, YU Y J, et al. Single longitudinal mode Q-switched operation of Pr: YLF laser with pre-lase and fabry-perot etalon technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106294.
- [23] JIN D, BAI Z X, WANG Q Z, et al. Doubly Q-switched single longitudinal mode Nd:YAG laser with electro-optical modulator and Cr⁴⁺: YAG[J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125500.
- [24] CHEN Y F, BAI Z X, JIN D, et al. Repetition rate tunable single-longitudinal-mode acoustic-optical Q-switched nanosecond laser[J]. *Results in Physics*, 2023, 46: 106318.
- [25] JIN L, DAI W C, YU Y J, et al. Mode evolution mechanism of Pr³⁺: YLF single longitudinal mode laser[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(6): 111-112.
- [26] GAO Z H, ZHANG W X, YAN B X, et al. A tunable single-longitudinal-mode wedge Nd:YVO₄ laser with a YVO₄ wave-plate[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(11): 172-1-8.
- [27] 张舵. LD 泵浦 Nd: YAG 高重复率窄脉宽短腔激光器[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- ZHANG Duo. LD pumped Nd:YAG short cavity laser with high repetition rate and narrow pulse width[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [28] WANG X J, XU Z Y. Single-longitudinal-mode operation of a 1 watt combined actively and passively Q-switched Cr, Nd: YAG laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6693-6698.
- [29] 孙佳宁, 王雨雷, 张雨, 等. LD 端面泵浦 Er: Yb: glass/Co: MALO 晶体热效应分析[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(8): 140-151.
- SUN Jianing, WANG Yulei, ZHANG Yu, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped Er:Yb:glass/Co:MALO crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 140-151.