

引用本文: 厉泽荣, 胡森, 许蒙蒙, 等. 可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 58–62.

可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器

厉泽荣, 胡森*, 许蒙蒙, 王劭昆, 周雪芳, 毕美华

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对目前脉冲激光器产生突发脉冲功率低、装置复杂等问题, 设计一种可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器, 理论分析了腔内法布里–珀罗(F-P)结构的自锁模激光器的突发脉冲产生机理, 建立了自锁模突发脉冲激光器的理论模型。实验结果表明: 随着激光晶体长度的增加, 突发脉冲的脉宽变宽; 当激光晶体长度为 5 mm、泵浦光功率为 5.5 W 时, 获得了光束质量因子为 1.42 的突发脉冲, 突发脉冲的重复频率为 13.64 GHz, 最大平均输出功率 0.78 W, 对应的斜效率和光光转化率分别为 9.57% 和 8.73%。

关键词: 自锁模激光器; Nd:YVO₄; 突发脉冲; 纵模; 模式分布

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fully solid-state self-mode-locked burst pulse laser with tunable pulse width

LI Zerong, HU Miao*, XU Mengmeng, WANG Shaokun, ZHOU Xuefang, BI Meihua

(School of Communication Engineering, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A tunable pulse width all solid state self-locking mode burst pulse laser is designed to address the problems of low burst pulse power and complex device in current pulse lasers. The burst pulse generation mechanism of an intracavity Fabry-Perot (F-P) structure self-locking mode laser is theoretically analyzed, and a theoretical model of the self-locking mode burst pulse laser is established. The experimental results show that the pulse width of the burst pulse becomes wider as the length of the laser crystal increases. When the length of the laser crystal is 5 mm and the pump power is 5.5 W, a burst pulse with a beam quality factor of 1.42 is obtained. The repetition frequency of the burst pulse is 13.64 GHz, the maximum average output power is 0.78 W, and the corresponding slope efficiency and optical-to-optical conversion efficiency are 9.57% and 8.73%, respectively.

Key words: self mode-locked laser, Nd:YVO₄, burst, longitudinal mode, pattern distribution

0 引言

突发脉冲是指在短时间窗口内以非常高的重复频率生成脉冲串, 在空闲期内进行热弛豫, 然后再发射下一组脉冲串。这种突发脉冲激光器在空气动力学和燃烧学中具有广泛应用, 例如粒子图像测速 (PIV)、平面多普勒测速 (PDV)、平面激光诱导荧光以及相干

反斯托克斯喇曼分析等^[1-4]。近年来, 突发脉冲的时域特性产生机理的研究受到了广泛的关注。例如, 2010 年, ZHAO L M^[5]等人成功在光纤激光器中实现了超高频率的突发脉冲产生, 通过在光纤激光器中加入由双折射光纤制成的滤波器和腔内偏振器, 不仅可以产生单脉冲, 也可以产生突发脉冲串。然而, 这种方法需要较高的泵浦功率, 且产生的突发脉冲功率相对较低。2019 年, WU W 等人^[6]利用调 Q 振荡器和双程侧面泵浦放大系统组成 Nd:YAG 激光器, 设置突发脉冲频率为 1 kHz, 获得了突发持续时间为 100 ms、脉冲宽度为 900 ps 的突发脉冲。在 10 Hz 的工作频率下, 单脉冲能量可以达到 81 mJ, 峰值功率为 90 MW。但该激光器装置较复杂, 额外损耗较高。2020 年, LI S C 等人^[7]研究了基于腔内法布里–珀罗(F-P)器件的自锁模激光器

收稿日期: 2024-01-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目(NO.61705055)资助。

作者简介: 厉泽荣(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于杭州电子科技大学通信工程学院通信工程专业, 主要的研究方向有电磁探测(雷定位, 电磁平坦度等)、固体激光器等(突发脉冲激光器, 双波长激光器, 倍频激光器等方向)。

* 通信作者: 胡森(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为视觉感知、激光雷达、光电对抗等领域。



突发脉冲运行机理。实验发现, 采用不同厚度的 F-P 器件于激光谐振器内, 可生成重复频率可调的子脉冲突发脉冲。当 F-P 器件的厚度为 4.5 mm 时, 突发脉冲的重复频率为 48 MHz, 子脉冲重复频率为 33.12 GHz。此项研究不仅为灵活调控突发脉冲参数提供了新思路, 而且引发了因谐振腔过长而导致的突发脉冲不稳定及额外损耗的问题。本文设计一种可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器, 旨在实现突发脉冲的稳定调控。

1 理论分析

自锁模激光器主要依赖激光晶体的克尔效应, 该效应^[8]通过激光晶体的自聚焦效应引起幅度调制, 进而实现脉冲的形成与压缩。克尔效应的折射率可以表示为

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 I \exp\left(-\frac{2r^2}{\alpha \omega^2 / \eta_0}\right) \quad (1)$$

其中, η_0 为线性折射率, η_1 为非线性折射率系数, I 为入射激光的中心光强, α 为常量, ω 为入射到激光介质中的光斑半径, r 为空间高斯光束宽度。

由式(1)可知, 激光脉冲的光强与折射率成正比, 当激光脉冲透过激光晶体时, 光强较高的部分损失较小, 光强较低的部分损失较大。

当谐振腔内的高强度模式被加强, 并因腔内 F-P 效应或空间烧孔效应^[9-10]导致纵模发生模式群化^[11]时, 便会产生激光脉冲突发的现象。

本文通过调节激光晶体的长度与谐振腔的长度, 控制入射到激光晶体表面的光斑大小, 从而输出锁模形成的突发脉冲信号^[12]。当 $2M+1$ 个纵模在激光谐振腔内振荡时, 激光的总振幅可以表示为

$$E(t) = \sum_{m=-M}^M A_m e^{-m^2/2M^2} e^{-i2f_{\text{CAV}} \pi m t} \quad (2)$$

其中, m 为谐振腔内振荡模式序数, A_m 为谐振腔内电磁波的归一化透射系数, f_{CAV} 为突发脉冲的重复频率, t 为时间。

谐振腔内电磁波的归一化透射系数^[13]表示为

$$A_m = \left[1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{\sqrt{1 - (R_1 R_2)^2}} \sin^2 \left(\frac{\pi m n L_{\text{RFP}}}{L_{\text{CAV}} + (n-1)L_{\text{RFP}}} \right) \right]^{-b} \quad (3)$$

其中, R_1 、 R_2 分别为激光晶体入射、出射端面的反射率, L_{CAV} 为谐振腔的总光学腔长, L_{RFP} 为形成 F-P 腔的激光晶体长度, b 为电磁波有效往返次数(纵模的增益分布为高斯分布), n 为激光晶体折射率。通过对腔长为 600 mm 和激光晶体长度 L_{RFP} 分别为 5、6、10 mm 的激光器参数进行仿真, 获得了突发脉冲的脉宽和纵模分布的数据, 如图 1 所示。

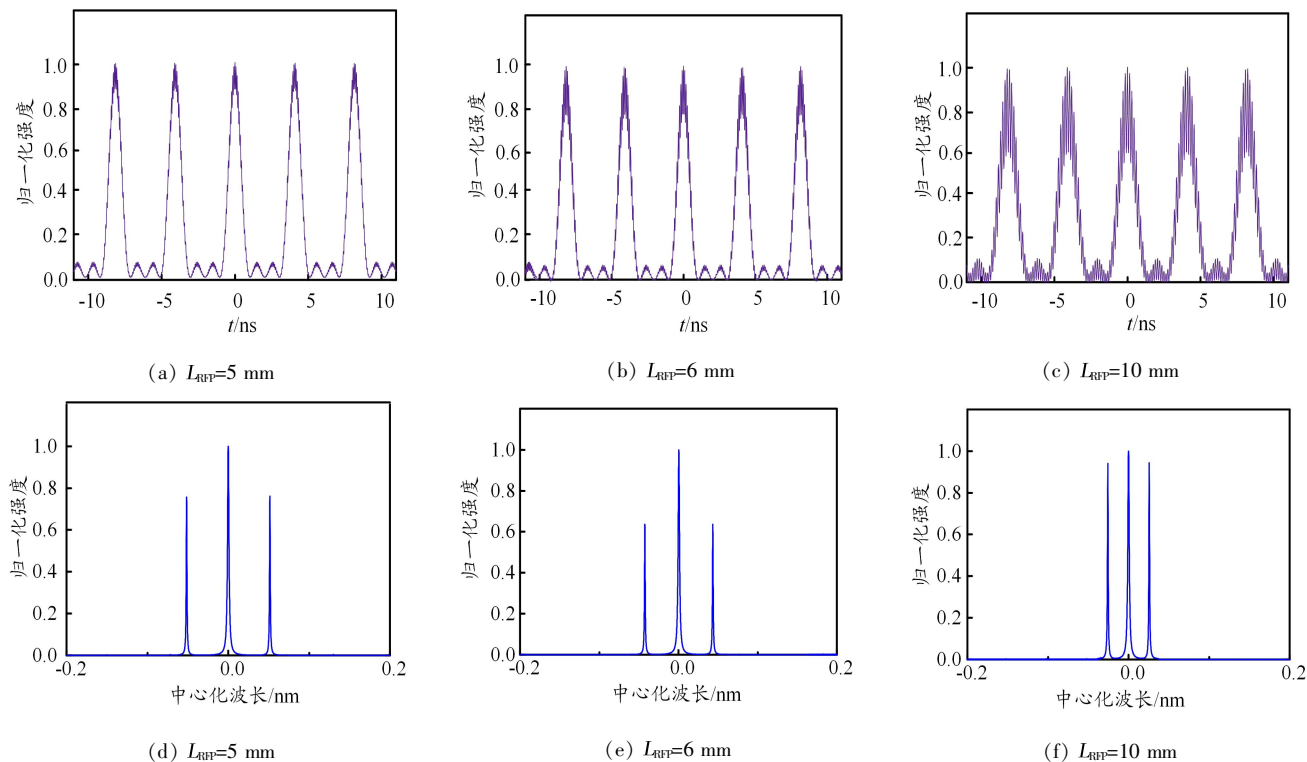


图 1 仿真突发脉冲脉宽和纵模分布

厉泽荣, 胡森, 许蒙蒙, 等: 可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器

由图 1(a)~图 1(c) 可知, 当激光晶体长度 L_{RFP} 分别为 5、6、10 mm 时, 600 mm 的谐振腔激光器均能产生不同特征的突发脉冲。同时, 突发脉冲的时间周期由谐振腔的光学腔长决定, 两者间的关系为 $2L_{\text{cav}}/c=4\text{ ns}$, c 表示光速。经计算发现, 突发脉冲的时间宽度与激光晶体的光学长度存在显著关联, 其中单个突发脉冲的半高全宽分别为 1.4、1.5、2.2 ns, 重复频率分别为 13.64、11.36、6.82 GHz。图 1(d)~图 1(f) 中, 当 L_{RFP} 分别为 5、6、10 mm 时, 纵模间隔 $\Delta\lambda_{\text{RFP}}$ 分别为 0.052、0.044、0.026 nm。改变激光器内激光晶体的长度对输出突发脉冲激光的脉宽具有决定性影响, 激光晶体的长度越长, 产生突发脉冲的脉宽越宽, 进而改变了激光脉冲的重复频率及振荡纵模间隔的大小。

2 实验分析

2.1 实验装置

本文的实验装置如图 2 所示。采用中心波长为 808 nm、纤芯直径为 100 μm 、数值孔径为 0.22 的 40 W 光纤耦合激光二极管作为泵浦源。激光晶体为 a-cut Nd:YVO₄ 晶体, 横向尺寸为 3 mm×3 mm, L_{RFP} 分别为 3、5、6、10 mm, 掺杂浓度为 1.0 at.%。晶体输入端面镀有 1 064 nm 波长的全反膜(HR, 反射率 $R=99.8\%$)和 808 nm 波长的高透膜(AR, $R=0.2\%$), 输出端面在 808 nm 波长和 1 064 nm 波长镀有高透膜(AR, $R=0.2\%$)。采用

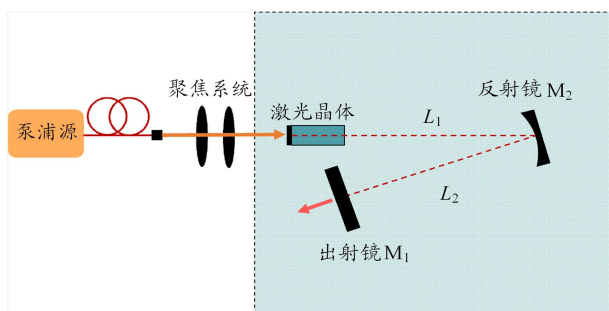
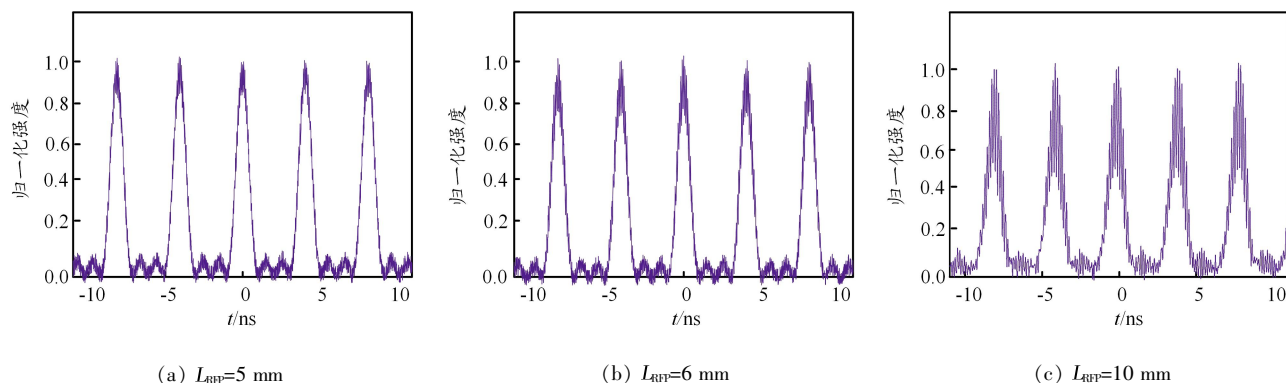


图 2 实验装置



铜箔包裹晶体侧面, 安装于可调水冷铝制支架, 控制水冷温度在 20°, 以便降低晶体中热效应引起的干扰。谐振腔为了增大腔长到 600 mm, 采用了折叠式三镜腔的设计, 出射镜 M_1 镀有 1 064 nm 波长的全反膜(HR, $R=99.8\%$); 反射镜 M_2 镀有 1 064 nm 波长的高反膜($R=95\%$)。控制谐振腔的整体腔长保持在 600 mm 且折叠腔两臂的角度不变, $L_1=400\text{ mm}$ 、 $L_2=200\text{ mm}$ 。本文使用采样率为 40 GS/s 和带宽为 18 GHz 的数字示波器(Agilent, DSO81204)观察输出自锁模突发脉冲序列的时间轨迹; 借助带宽为 18 GHz 的探测器(Lightsensing, LSHIPD-A18G)捕捉信号; 同时, 利用量程为 100 pW~200 W 的光功率计(Thorlabs, PM100A)检测激光器的平均输出功率; 最后, 通过分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪(Advantest, Q8384)测量脉冲的光谱。

2.2 实验结果

2.2.1 对输出突发脉冲特性的影响

实验研究了腔长为 600 mm, 激光晶体长度 L_{RFP} 分别为 5、6、10 mm 时, 3 组对照组激光器的输出时间序列及模式分布如图 3 所示。

由图 3(a)~图 3(c) 可知, 当 L_{RFP} 为 5、6、10 mm 时, 激光器产生的突发脉冲均清晰可辨, 单个突发脉冲的半高全宽分别为 1.4、1.5、2.2 ns, 对应的重复频率分别为 13.66、11.37、6.82 GHz, 与仿真结果吻合较好。本文使用光谱仪观察激光器产生的激光模式分布, 如图 3(e)~图 3(f) 所示。由于光谱仪的探测分辨率为 0.01 nm, 而谐振腔的自由空间范围所对应的子纵模线宽与间隔远小于这一分辨率, 因此在图中仅观测到了由激光晶体形成的 F-P 腔所对应的纵模包络; 同时, 不同激光晶体长度对产生激光脉冲的中心波长影响较小, 均在 1 064.4 nm 附近具有最高的增益, 模式分布呈高斯型。激光晶体 F-P 效应对应的纵模间隔 $\Delta\lambda_{\text{RFP}}$ 为 0.055、0.045、0.025 nm, 实验结果与仿真结果

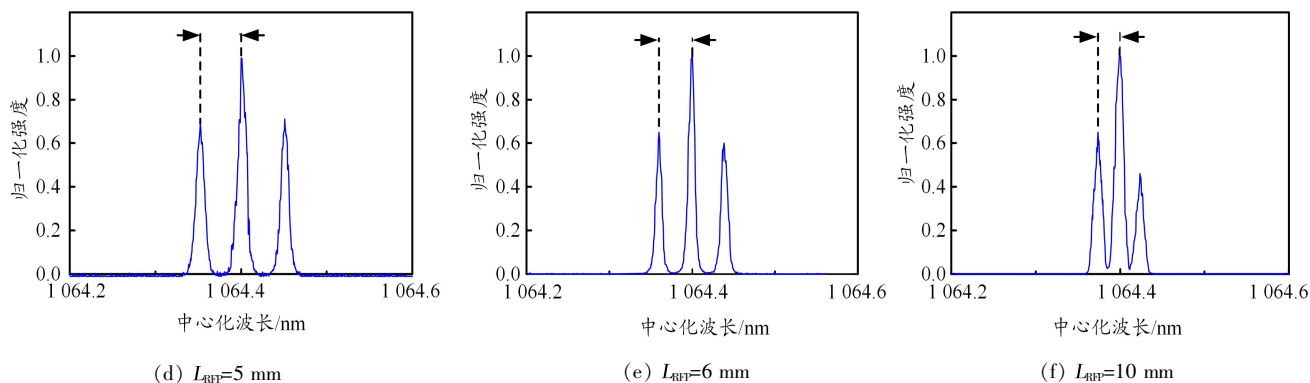


图3 激光器输出的时间序列及模式分布

吻合较好。实验表明,随着 L_{RFP} 的增大,突发脉冲的脉宽也逐渐变大,具体如图4所示,突发脉冲的半高全宽与激光晶体的长度呈线性关系。

2.2.2 对输出突发脉冲特性的影响

本文以 $L_{RFP}=5\text{ mm}$ 为例,采用对时域信号进行傅里叶快速交换(FFT)变换的方法,研究突发脉冲的频率分布情况,结果如图5所示。低频部分观测到 0.25 GHz 的频率分量,高频部分观测到 13.14、13.39、13.64、13.89 GHz 这4个频率分量,其中相邻2个频率

分量之间的频率差为 0.25 GHz。考虑到 600 mm 长谐振腔对应的自由光谱为 0.25 GHz,而 $L_{RFP}=5\text{ mm}$ 的激光晶体对应的自由光谱为 13.64 GHz。因此,输出的激光光谱是间隔为 13.64 GHz 的光谱包络。通过对输出突发脉冲的频谱和光谱分析可知,在激光器产生的单个包络纵模内部,存在的子纵模相互拍频,从而形成了突发脉冲。

2.2.3 对突发脉冲光束质量和输出功率的研究

在不同长度的激光晶体中,激光阈值功率约为 0.21 W。本文将泵浦功率设置为 5.5 W,水冷温度设置为 20 °C,观测不同长度的激光晶体输出突发脉冲的光束质量。激光输出突发脉冲的输出功率与光束质量图如图6所示。图6(a)中,当 $L_{RFP}=5\text{ mm}$ 时,通过计算可知斜效率和光光转换效率分别为 9.57% 和 8.73%,最大平均输出功率为 0.78 W;当 $L_{RFP}=6\text{ mm}$ 时,斜效率和光光转换效率分别为 10.88% 和 9.78%;当 $L_{RFP}=10\text{ mm}$ 时,斜效率和光光转换效率分别为 16.44% 和 14.14%。该结果表明,随着激光晶体长度的增加,激光器的效率不断提高,但由于热效应因素,激光输出效率的提高速度逐渐放缓,其增加速度与激光晶体长度的增加并不成正比。图6(b)中,当 $L_{RFP}=5\text{ mm}$ 时,光束

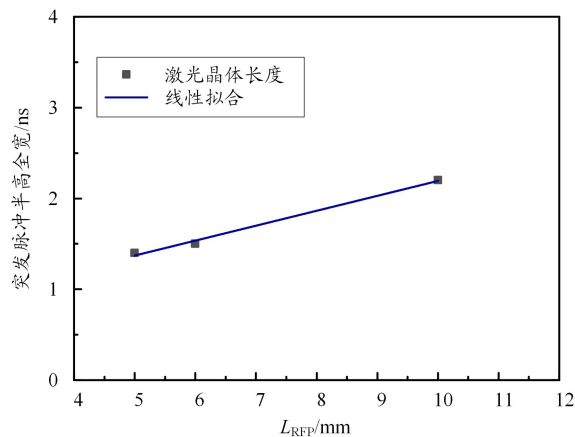
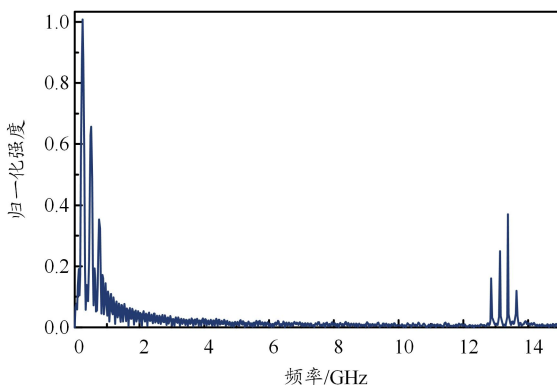
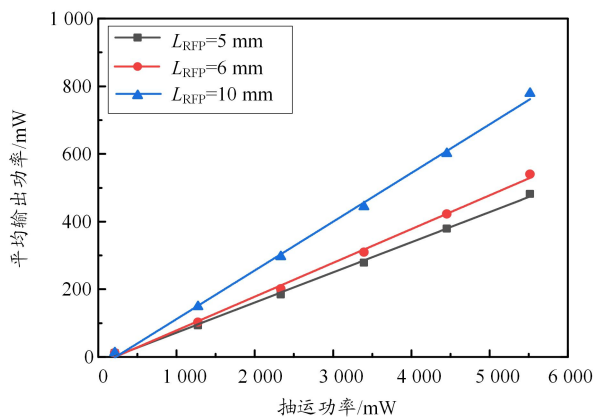


图4 单个突发脉冲的半高全宽与激光晶体长度的关系图

图5 激光晶体长度 $L_{RFP}=5\text{ mm}$ 输出突发脉冲的频谱图

(a) 平均输出功率与抽运功率的关系

厉泽荣, 胡森, 许蒙蒙, 等: 可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器

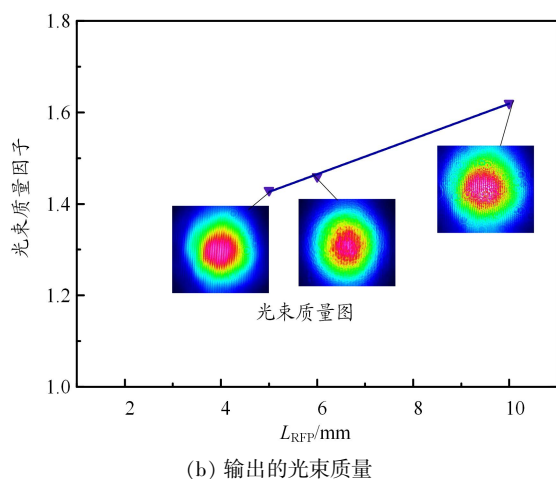


图6 激光输出突发脉冲的输出功率与光束质量图

质量因子为 1.42, 表现出最佳的光束质量; 随着激光晶体长度的增加, 光束质量因子呈线性增加, 光束质量因子分别为 1.42、1.44 和 1.62, 输出的光束因强烈的热效应会引起光束的失真, 导致光束质量变差。

3 结束语

本文设计了一种可调谐脉宽的全固态自锁模突发脉冲激光器。实验结果表明: 通过调节激光晶体的长度可以有效改变单个突发脉冲的脉宽, 当激光晶体长度分别为 5、6、10 mm 时, 实验获得单个突发脉冲的半高全宽分别为 1.4、1.5、2.2 ns。改变激光晶体长度的同时也会对突发脉冲的光束质量产生影响, 激光晶体长度越长, 输出激光脉冲的光束质量越差。在激光晶体长度为 5 mm 且泵浦光功率为 5.5 W 的条件下, 本文成功获得了光束质量最佳的突发脉冲。这些突发脉冲的重复频率高达 13.64 GHz, 最大输出功率达到了 0.78 W。同时, 本文测得对应的斜效率为 9.57%, 光光转化率为 8.73%。因此, 在全固态激光器内通过调节激光晶体长度对输出稳定可调的突发脉冲具有重要影响。

参考文献:

- [1] PATTON R A, GABET K N, JIANG N, et al. Multi-kHz mixture fraction imaging in turbulent jets using planar Rayleigh scattering[J]. Applied Physics B, 2012, 106(2): 457–471.
- [2] THUROW B, JIANG N, SAMIMY M, et al. Narrow-linewidth megahertz-rate pulse-burst laser for high-speed flow diagnostics[J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 5064–5073.
- [3] THUROW B S, SATIJA A, LYNCH K. Third-generation megahertz-rate pulse burst laser system[J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 2086–2093.
- [4] LI X, XU H, YAN R, et al. Burst-mode YVO₄/Nd:YVO₄ laser oscillator with pulse repetition rate up to 500 kHz [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 228: 165789-1–165789-7.
- [5] ZHAO L M, TANG D Y, LIU D. Ultrahigh-repetition-rate bound-soliton fiber laser[J]. Applied Physics, 2010, 99(3): 441–447.
- [6] WU W, LI X, MEI F, et al. 30 mJ, 1 kHz sub-nanosecond burst-mode Nd: YAG laser MOPA system[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36129-1–36129-6.
- [7] LI S C, LI T L, HUANG Y H, et al. Generation and characterization of burst modes in passively mode-locked lasers with internal Fabry-Perot cavities[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 61–64.
- [8] 代俊锋. 基于克尔透镜效应的自锁模 Tm:YAP 固体激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [9] 金益文. 基于自锁模 Nd: YVO₄ 激光器对模间拍频机制和空间烧孔效应的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [10] JIN Y, HU M, XU M, et al. Exploiting the etalon effect to manipulate the pulse characteristics of a self-mode-locked Nd: YVO₄ laser with a flexible cavity length[J]. Optics Communications, 2022, 517: 128331-1–128331-6.
- [11] JIN Y, XV M, HU M, et al. High-repetition pulsed Nd:YVO₄ laser based on the multi-longitudinal-mode beat note [J]. Optical Engineering, 2021, 60(6): 066106–066106.
- [12] LÜHRMANN M, THEOBALD C, WALLENSTEIN R, et al. Efficient generation of mode-locked pulses in Nd:YVO₄ with a pulse duration adjustable between 34 ps and 1 ns[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6177–6186.
- [13] CHEN Y F, CHANG M T, HUANG T L, et al. Orthogonally polarized self-mode-locked lasers with repetition rate multiplication up to hundreds of gigahertz: observation of temporal carpets [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5): 1–6.