

激光与光电子学进展

Tm:YAP 激光波长调谐及脉冲运转性能的研究

蒋裕堃^{1,2,3}, 钱传鹏^{2,3}, 刘晶^{2,3}, 樊雨晴^{2,3}, 张一驰^{2,3}, 余婷^{2,3}, 施翔春^{2,3*}, 叶锡生^{2,3}, 曹清^{1**}¹上海大学理学院物理系, 上海 200444;²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤激光技术实验室, 上海 201800;³中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

摘要 报道了由 LD 泵浦的 Tm:YAP 激光器的研究工作。Tm:YAP 激光器采用波长为 793 nm 的 LD 进行端面泵浦, 腔内声光调 Q 运转。当激光工作重复频率为 300 Hz、输入泵浦功率为 37.07 W 时, 获得了最大单脉冲能量为 17.06 mJ、脉冲宽度为 26.9 ns 的 1936 nm 激光输出, 相应的峰值功率为 634.2 kW, 在目前已报道的该晶体峰值功率数值中较高。在最大泵浦功率下, 激光器在水平和垂直方向上的光束质量分别为 1.41 和 1.34。此外, 在激光器连续运转下, 采用双法布里-珀罗标准具对激光波长进行调节, 光谱调谐范围 1932.11~1942.07 nm。

关键词 激光器; Tm:YAP 晶体; 声光 Q 开关; 高峰值功率; 2 μm 激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222143

Study on Wavelength Tuning and Pulse Performance of Tm:YAP Laser

Jiang Yuyao^{1,2,3}, Qian Chuanpeng^{2,3}, Liu Jing^{2,3}, Fan Yuqing^{2,3}, Zhang Yichi^{2,3}, Yu Ting^{2,3}, Shi Xiangchun^{2,3*}, Ye Xisheng^{2,3}, Cao Qing^{1**}¹Department of Physics, College of sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Laboratory of High Power Fiber Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;³Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Appiled Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The research work of LD pumped Tm:YAP laser is reported. Tm:YAP laser is end pumped by LD with wavelength of 793 nm, and acoustooptic Q-switched operation in the cavity. When the laser repetition frequency is 300 Hz and the input pump power is 37.07 W, a 1936 nm laser output with a maximum single pulse energy of 17.06 mJ and a pulse width of 26.9 ns is obtained, and the corresponding peak power is 634.2 kW, which is higher than the reported peak power values of this crystal. At the maximum input pump power, the beam quality factors for horizontal and vertical directions were 1.41 and 1.34, respectively. In addition, under the continuous operation of the laser, a double Fabry-Perot etalon is used to adjust the laser wavelength, and the spectral tuning range is 1932.11–1942.07 nm.

Key words lasers; Tm:YAP crystal; acousto-optic Q-switched; high peak power; 2 μm laser

1 引言

高峰值功率 2 μm 固体激光器在材料加工^[1]、激光雷达^[2]、大气传感^[3]、医疗手术^[4]等多个方面具有不错的应用前景。单掺铥晶体是目前获得 2 μm 激光重要的技术途径之一。这种方式的优势在于一方面具有成熟的泵浦源技术, 另一方面单掺铥晶体具备上能级寿命长、量子效率高等优点^[5-6]。常见的单掺铥离子的晶

体有 Tm:YLF^[7-8]、Tm:YAG^[9-10] 和 Tm:YAP^[11-13], 其中 Tm:YAP 晶体不仅热性能和机械性能好, 光学性能方面也有诸多优势^[14]。Tm:YAP 为双折射晶体, 可以较好地抑制热致双折射引起的退偏损耗, 输出线偏振激光^[15]。不同切割方向的 Tm:YAP 晶体对应的吸收谱和发射谱具有一定差异^[16], 其吸收峰 793 nm 更接近商用二极管发射波长, 同时较宽的发射谱线具备可调谐的潜力。此外, 该晶体的上能级寿命处于毫秒量级,

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-01; 录用日期: 2022-08-05; 网络首发日期: 2022-08-19

通信作者: *shixc@siom.ac.cn; **qcao@shu.edu.cn

可以较长时间存储能量,受激发射截面($\sigma=5.0\times 10^{-21}\text{ cm}^2$)几乎是 Tm:YAG 截面($\sigma=2.2\times 10^{-21}\text{ cm}^2$)的两倍^[17],因此该晶体在获取高重复频率激光方面具有良好的应用前景。

近年来,Tm:YAP 脉冲激光器得到了快速发展,研究人员在不同的重复频率和调 Q 方式上进行了大量研究。2015 年哈尔滨工业大学运用电光腔倒空技术在 1 kHz 重复频率下得到了 7.1 ns 极窄脉宽的激光,但是其单脉冲能量仅为 0.03 mJ,峰值功率为 4.22 kW^[18]。2019 年长春理工大学报道了一种双端泵浦 Tm:YAP 声光调 Q 激光器,在 1 kHz 重复频率下得到中心波长为 1988 nm、脉冲宽度为 38.04 ns 的激光,其单脉冲能量为 16.36 mJ,峰值功率为 430 kW^[19]。2020 年长春理工大学报道了电光调 Q 的 Tm:YAP 激光器,在 10 kHz 的重复频率下到了 20.64 ns 脉宽的激光,单脉冲能量最大为 2.2 mJ,峰值功率为 107.5 kW^[20]。2020 年山东大学报道了声光调 Q 的 Tm:YAP 激光器,在 6 kHz 的重复频率下到了 45 ns 脉宽的激光,单脉冲能量最大为 1.12 mJ,峰值功率为 248.8 kW^[21]。2020 年俄罗斯报道了声光调 Q 的 Tm:YAP 激光器,在 1 kHz 的重复频率下到了 29.5 ns 脉宽的激光,单脉冲能量最大为 2.3 mJ,峰值功率为 107.5 kW^[22]。以上研究进展中,多数实验是在 kHz 以上的高重复频率下进行,所获得的最高峰值功率为 430 kW。对于低重复频率下的高峰值功率 Tm:YAP 激光研究较少,仅 2019 年山东大学采用电光调 Q 在 200 Hz 的重复频率下得到了 17 ns 的窄脉宽激光,单脉冲能量最大为 3.15 mJ,峰值功率为 185.3 kW^[23]。

掺杂原子数分数为 3% 的 Tm:YAP 晶体的上能级寿命为 3.24 ms^[13],在相同的泵浦条件下,200~300 Hz

的重复频率有望获得更高的单脉冲能量和峰值功率,因而,本文针对这一工作条件开展研究工作。采用掺杂原子数分数 3% 的 Tm:YAP 晶体作为增益介质,在 300 Hz 重复频率下得到了高达 634.2 kW 的峰值功率。

2 实验装置

采用中心波长为 793 nm、纤芯直径 200 μm 、数值孔径(NA)为 0.22 的 LD 作为激光器的泵浦源。LD 采用尾纤输出,泵浦光在经过焦距分别为 15 mm 和 55 mm 的透镜组(M1 和 M2)后准直聚焦,通过前腔片后进入 Tm:YAP 晶体,焦点位于晶体前 1/3 处,焦斑直径约为 750 μm ,泵浦光的最大功率为 37 W。

实验采用尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 12 mm、掺杂原子数分数 3%、b-cut(Pbnm 空间)的 Tm:YAP 晶体作为增益介质,该晶体两端均镀有对泵浦光和信号光的增透膜,对泵浦光的单程吸收效率可以达到 92%。将四周包裹上铝箔的晶体放置在紫铜制作的热沉内,通水冷却,水的温度控制在 17 $^{\circ}\text{C}$ 。激光谐振腔采用由 M3 和 M6 组成的平凹腔,物理腔长为 265 mm。前腔片 M3 为平面镜,镀有对 793 nm 高透和 1.9 μm 高反的膜层,后腔片 M6 是曲率半径 $R=-200\text{ mm}$ 的平凹镜,耦合输出透过率 $T=30\%$ 。通过临界腔法测得最大泵浦功率下晶体热焦距约为 95 mm,经由 ABCD 矩阵计算得到该谐振腔内晶体附近基模光斑直径约为 0.6 mm,略小于泵浦光斑直径。声光调制器(AOM)通光孔径为 6 \times 10 mm。M4 和 M5 分别为 0.1 mm 和 0.5 mm 厚度的法布里-珀罗(FP)标准具。输出激光经 M7(45 $^{\circ}$,高透@793 nm,高反@1.9 μm)滤除泵浦光,反射到 Ophir 公司生产的功率计内测量功率。功率计的量程为 150 W,精度为 0.01 W。实验装置如图 1 所示。

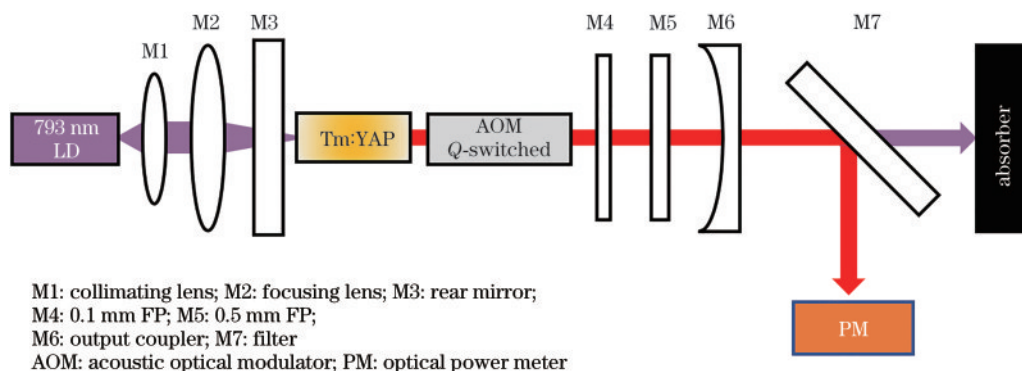


图 1 可调谐 Tm:YAP 脉冲激光器的实验装置图

Fig. 1 Experimental schematic of tunable Tm:YAP pulsed laser

3 实验结果分析

3.1 连续激光输出特性分析

本文研究了 Tm:YAP 激光器在声光调制器插入与否情况下的连续输出特性。激光器在空腔状态下,输出功率随泵浦功率的增加而线性增加,如图 2 所示。

激光器的泵浦阈值为 19.7 W,在吸收泵浦功率为 37.07 W 的条件下得到了 7.62 W 的连续波(CW)激光输出功率,斜率效率为 45.1%。当 AOM 放置于腔内时,由于其带来的插入损耗,连续激光最高输出功率降为 7.55 W,斜率效率降至 40.9%。使用 YOKOGAWA 公司生产的 AQ6375 型光谱仪对 Tm:YAP 晶体自由运

转输出光谱进行测量,其分辨率为 ± 0.05 nm。测量结果如图 3 所示,波长范围为 1934~1938 nm。

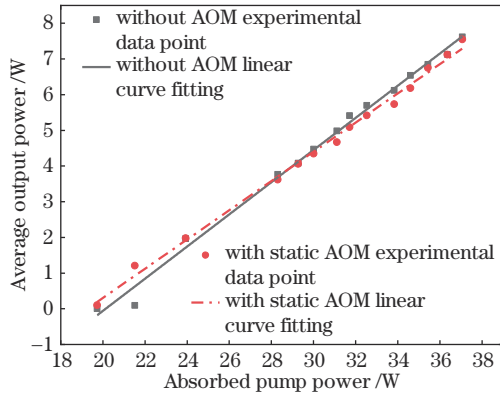


图 2 Tm:YAP 连续激光器输出与泵浦的关系

Fig. 2 Relationship between output and pump of Tm:YAP CW laser

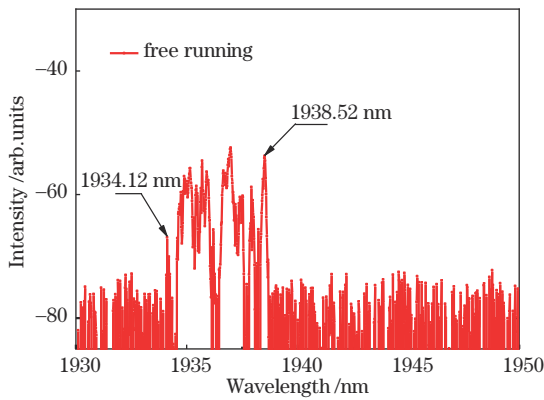


图 3 Tm:YAP 连续激光器自由运转时的光谱图

Fig. 3 Spectrum of Tm:YAP CW laser for free running

为了实现 Tm:YAP 激光器的窄线宽、可调谐运转,在腔内插入了 0.1 mm 和 0.5 mm 厚度的双 FP 标准具,兼顾调谐范围和输出光谱,通过旋转 FP 角度实现波长调谐。实验获得的调谐范围为 1932~1942 nm,结果如图 4 所示。在 1936 nm 处获得最高输出功率为 7.13 W,斜率效率为 38.7%,半峰全宽

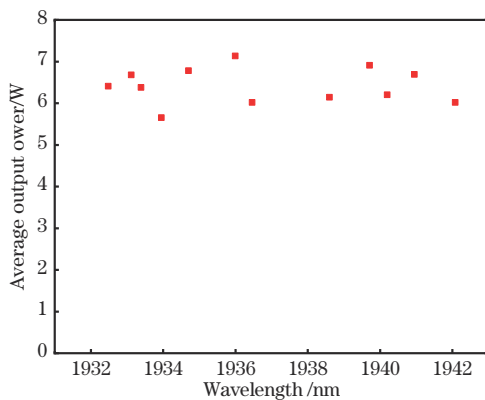


图 4 Tm:YAP 连续激光器的调谐性能

Fig. 4 Tunable performance of Tm:YAP CW laser

(FWHM)为 0.12 nm,如图 5 和图 6 所示。激光器最高输出功率在 5 min 内的稳定性如图 7 所示。

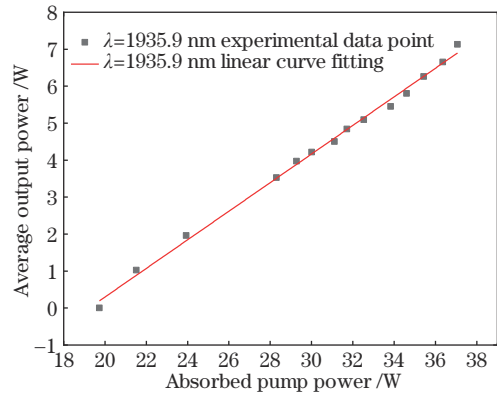


图 5 窄线宽 Tm:YAP 连续激光器输出与泵浦的关系

Fig. 5 Relationship between output and pump of narrow linewidth Tm:YAP CW laser

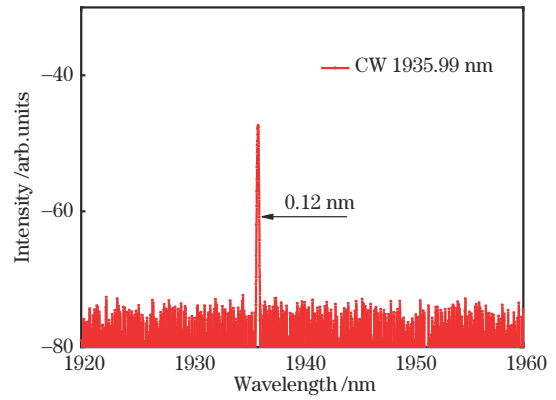


图 6 Tm:YAP 连续激光器展线宽运转光谱图

Fig. 6 Spectrum of linewidth Tm:YAP CW laser

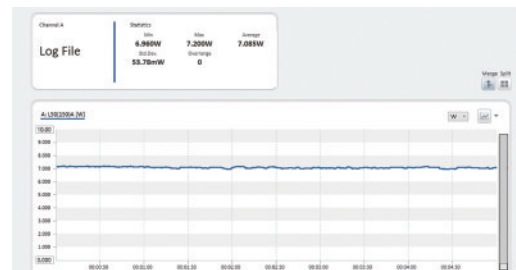


图 7 Tm:YAP 连续激光器功率稳定性曲线图

Fig 7 Power stability curve of Tm:YAP CW laser

在该波长下对激光器输出最高功率时 x 和 y 方向上的光束质量采用 90/10 刀口法进行测量,结果分别为 1.62 和 1.30,如图 8 所示。

3.2 脉冲激光输出特性

选择在晶体最大增益波长 1935.9 nm 处进行调 Q 实验。由于晶体的热透镜效应,振荡光经过晶体后会产生聚焦效果,得到一个腔内最小光斑。将声光调制器放置于该光斑的位置,以增强其关断能力。在调 Q 模式下,研究了 Tm:YAP 激光器不同重复频率下的脉

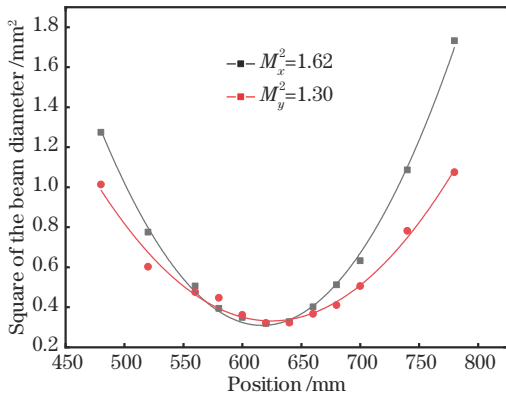


图 8 窄线宽 Tm:YAP 连续激光器的输出光束质量

Fig. 8 Output beam quality of narrow linewidth Tm:YAP CW laser

冲输出特性。

激光器在 1 kHz、700 Hz、500 Hz、300 Hz 不同重复频率下对应的最高平均功率分别为 7.08 W、7.05 W、6.85 W、5.12 W，相应的斜率效率为 38.46%、38.55%、38.00%、29.22%，实验结果如图 9 所示。

使用 Tektronix 公司生产的 1 GHz 带宽、5 GSa/s

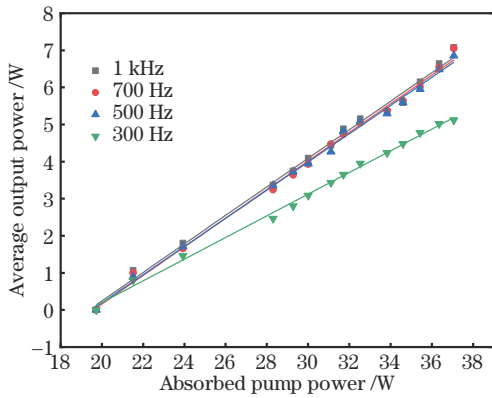


图 9 Tm:YAP 脉冲激光器不同重复频率下平均输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 9 Relationship between average output power and pump power of Tm:YAP pulsed laser at different repetition frequencies

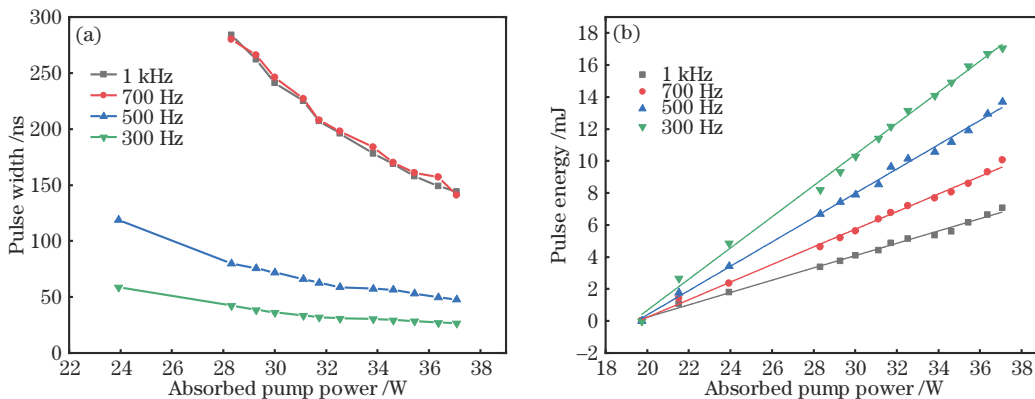


图 10 不同重复频率下脉冲宽度和单脉冲能量与泵浦的关系。(a) 脉冲宽度；(b) 单脉冲能量

Fig. 10 Pulse width and single pulse energy versus pump power at different repetition frequencies. (a) Pulse width; (b) single pulse energy

采样率的 DPO4102B 型示波器和 PIN 管对输出激光的脉冲宽度进行探测。不同重复频率下，脉冲宽度和单脉冲能量与吸收泵浦功率的关系如图 10、图 11 所示。Tm:YAP 脉冲激光器采用连续泵浦，一个脉冲对应的泵浦周期是重复频率的倒数。当泵浦周期开始后，上能级粒子数会随着泵浦能量持续提供而不断增加，当时间达到上能级寿命时，由于自发辐射造成上能级粒子向下跃迁，上能级粒子数增长趋势因此变缓。随着泵浦持续，自发辐射不断增强，当泵浦和自发辐射对上能级粒子数的作用达到平衡时，上能级粒子数不再发生变化，晶体储能饱和。所以说一般来讲，当泵浦周期等于或略大于晶体上能级寿命时，能得到最大的脉冲能量。如果继续增加泵浦周期，并不能提高总储能，反而会由于热效应的增加而出现激光器性能的劣化。对于掺杂原子数分数为 3% 的 Tm:YAP 晶体，其上能级寿命为 3.24 ms，对应的重复频率近似为 300 Hz。该激光器在 300 Hz 重复频率下得到了最高单脉冲能量为 17.06 mJ、最短脉冲宽度为 26.9 ns 的激光输出，对应的最大峰值功率为 634.2 kW，是目前 300 Hz 重复频率下的最高峰值功率。与原子数分数 3% 的 Tm:YAP 晶体 3.24 ms 上能级寿命相吻合。

Tm:YAP 激光器调 Q 输出光谱如图 12 所示，中心波长为 1935.96 nm，FWHM 为 0.26 nm。激光器在调 Q 和连续状态下的光谱相比，中心波长无明显变化，线宽略有增加，在中心波长附近夹杂着其余光谱。调 Q 模式下，储能的积累使得增益较强，且由于 FP 没有镀膜，激光器不再是单光谱输出。激光器在 300 Hz 重复频率下 x 和 y 轴的光束质量如图 13 所示，结果分别为 1.41 和 1.34。Tm:YAP 晶体的各向异性使得不同轴向的导热效果不同，而且晶体本身对于该波长激光存在吸收。因此，脉冲激光相对于连续激光而言，激光持续时间较短，晶体减少了对输出激光重吸收而产生的热量，使得 x 方向上光束质量变好。

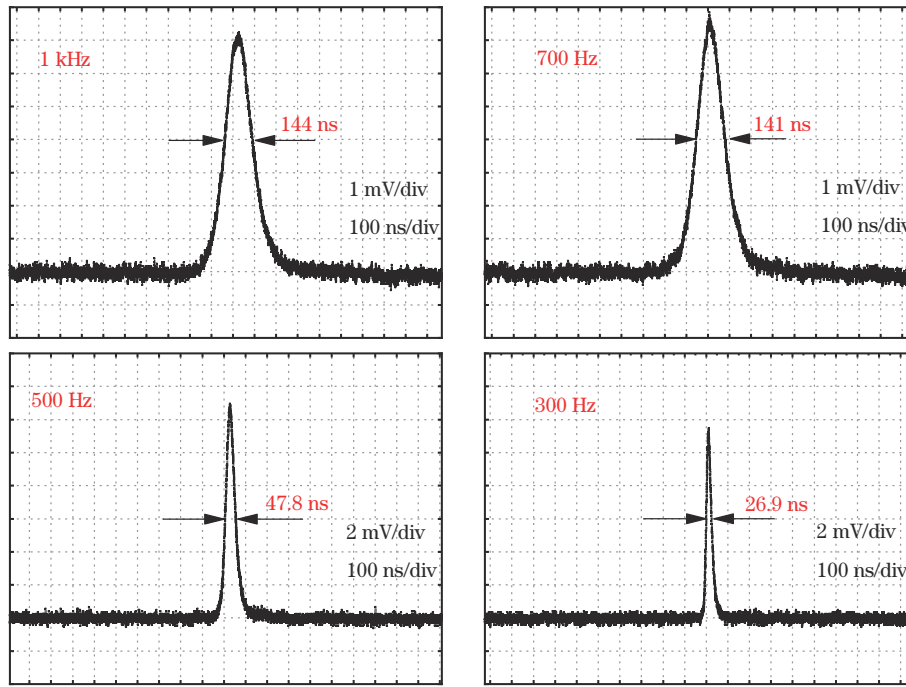


图 11 不同重复频率下的脉冲波形

Fig 11 Pulse shape at different repetition frequencies

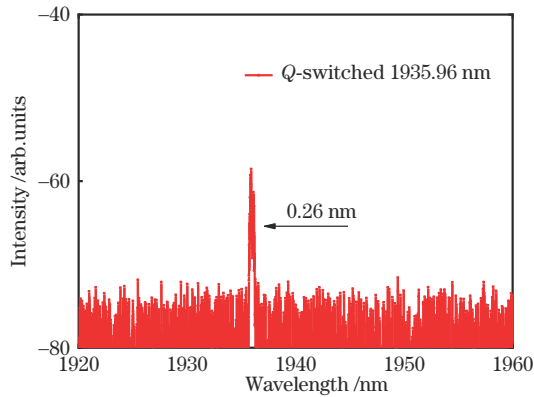


图 12 Tm:YAP 激光器调 Q 模式下的光谱图

Fig. 12 Spectrum of Tm:YAP laser in Q-switched mode

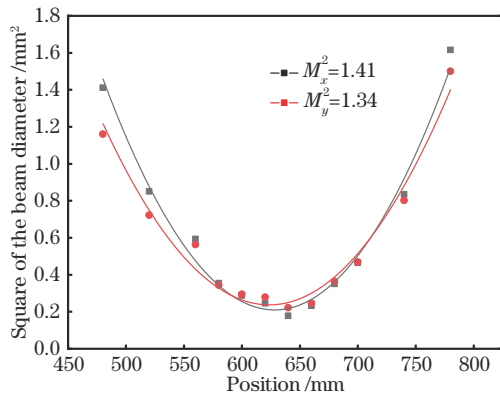


图 13 Tm:YAP 激光器调 Q 模式下的光束质量

Fig. 13 Output beam quality of Tm:YAP Q-switched mode

4 结 论

本文报道了 LD 泵浦的 Tm:YAP 激光器,对其连续状态下的波长调谐和脉冲状态下获取高峰值功率的性能进行了研究。实验通过双 FP 对 b-cut(Pbmm 空间)的 Tm:YAP 连续激光器进行波长调节,研究了其增益范围和对应强度。选择了增益最强处 1936 nm 作为激光器的中心波长进行调 Q 实验,研究该激光器在 300 Hz~1 kHz 范围内不同重复频率下的激光输出特性。在 300 Hz 的重复频率下,激光器的平均输出功率为 5.12 W,对应的最高单脉冲能量和最短脉冲宽度分别为 17.06 mJ 和 26.9 ns,峰值功率高达 634.2 kW,在目前报道的 Tm:YAP 峰值功率数据中处于较高水平。实验结果表明,Tm:YAP 晶体在实现高峰值功率激光输出方面具有较大的潜力。

参 考 文 献

- [1] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2 μm laser sources and their possible applications[M]//Pal B. Frontiers in guided wave optics and optoelectronics. London: InTech, 2010: 471-500.
- [2] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 4-15.
- [3] McAleavey F J, MacCraith B D. Efficient diode pumped Tm³⁺-doped fluoride fibre laser for hydrocarbon gas

- sensing[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(10): 800-802.
- [4] Jelinková H, Koranda P, Šulc J, et al. Diode pumped Tm: YAP laser for eye microsurgery[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6871: 68712N.
- [5] 李上. 高功率 Tm: YAP 板条激光器实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Li S. Experimental studies on Tm: YAP slab laser with high power[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [6] 杜艳秋. 连续及被动调 Q 脉冲铥钽共掺钒酸盐激光器特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Du Y Q. Characteristics of continuous wave and passively Q-switched pulsed thulium and holmium codoped vanadate laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] Yao B Q, Meng P B, Li G, et al. Comparison of Tm: YLF and Tm: YAP in thermal analysis and laser performance[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(8): 1866-1873.
- [8] Sheintop U, Perez E, Sebbag D, et al. Actively Q-switched tunable narrow bandwidth milli-Joule level Tm: YLF laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22135-22143.
- [9] Lai K S, Phua P B, Wu R F, et al. 120-W continuous-wave diode-pumped Tm: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(21): 1591-1593.
- [10] Liu P, Jin L, Liu X, et al. High efficiency Tm: YAG slab laser with hundred-Watts-level output power[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2498-2502.
- [11] Cai S S, Kong J, Wu B, et al. Room-temperature cw and pulsed operation of a diode-end-pumped Tm: YAP laser[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(1): 133-136.
- [12] Mao Y F, Gao Y, Wang L. 254 W laser-diode dual-end-pumped Tm: YAP InnoSlab laser[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8224-8227.
- [13] Buryy O A, Sugak D Y, Ubizskii S B, et al. The comparative analysis and optimization of the free-running Tm³⁺: YAP and Tm³⁺: YAG microlasers[J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(3): 433-442.
- [14] Bai F, Chen X Y, Liu J L, et al. A narrow linewidth continuous wave Ho: YAG laser pumped by a Tm: YLF laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(11): 64-66.
- [15] Li Y Y, Xu Y, Leng Y X, et al. Diode-pumped high-efficiency broadband tunable Tm: YAP laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 081402.
- [16] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient 1.94- μm Tm: YALO laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(1): 78-81.
- [17] Payne S A, Chase L L, Smith L K, et al. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺, and Ho³⁺[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(11): 2619-2630.
- [18] Yao B Q, Li X L, Shi H W, et al. Diode-pumped electro-optical cavity-dumped Tm: YAP laser at 1996.9 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10): 101402.
- [19] Wen Y, Zhang H L, Zhang L, et al. 1.99 micron Tm: YAP acousto-optical Q-switch laser[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 563(3): 032007.
- [20] Wen Y, Li T Y, He Q F, et al. Laser-diode dual-end-pumped electro-optic Q-switched slab Tm: YAP laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103215.
- [21] Guo L, Yang Y L, Zhao S Z, et al. Room temperature watt-level 3.87 μm MgO: PPLN optical parametric oscillator under pumping with a Tm: YAP laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32916-32924.
- [22] Sheintop U, Perez E, Nahear R, et al. Widely tunable, narrow bandwidth, mJ level Tm: YAP laser with YAG Etalons[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 136: 106710.
- [23] Yang Y L, Zhao S Z, Li T, et al. High-peak-power Q-switched 1988 nm bulk laser based on an electro-optical La₃Ga₅SiO₁₄ modulator[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(8): 2616-2620.