

基于大芯径晶体波导的半导体可饱和吸收镜锁模激光器

李帅¹, 李国泰¹, 张凯伦¹, 朱占达^{1,2,3,4}, 惠勇凌^{1,2,3,4}, 雷旬^{1,2,3,4}, 李强^{1,2,3,4*}

¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;

²北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;

³激光先进制造北京市高等学校工程研究中心, 北京 100124;

⁴跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 大芯径晶体波导可吸收更高功率的泵浦光,能够实现更高的输出功率,同时在锁模运行时芯层中的峰值功率密度相对较低,而且减少了非线性效应的积累。基于此,构建了一种基于 Yb:YAG 大芯径晶体方波导的被动锁模皮秒激光器。实验中,首先使用高反镜替代半导体可饱和吸收镜(SESAM),在较高的泵浦功率下调节晶体波导的位置和角度以实现泵浦光与波导芯层的匹配;然后,仔细调节球面反射镜的角度,使信号光耦合进波导芯层中以尽量减小腔内的损耗。所设计的激光器采用折叠腔结构,在腔内没有色散补偿器件的情况下,实现了平均功率为 10.2 W、脉冲宽度为 65 ps、重复频率为 30.15 MHz、单脉冲能量为 0.34 μ J 的激光输出。

关键词 激光器; 固体激光器; 锁模激光器; 晶体波导; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1014004

Semiconductor Saturable Absorption Mirror Mode-Locked Laser Based on Large Core Size Crystal Waveguide

Li Shuai¹, Li Guotai¹, Zhang Kailun¹, Zhu Zhanda^{1,2,3,4}, Hui Yongling^{1,2,3,4},
Lei Hong^{1,2,3,4}, Li Qiang^{1,2,3,4*}

¹*Institute of Laser Engineering Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

²*Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing 100124, China;*

³*Beijing Colleges and Universities Engineering Research Center of Advanced Laser Manufacturing, Beijing 100124, China;*

⁴*Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China*

Abstract Large core diameter crystal waveguides can absorb higher power pump light and achieve higher output power. At the same time, the peak power density in the core layer is relatively low during mode-locking operation, and the accumulation of nonlinear effects is reduced. Based on this, a passively mode-locked picosecond laser based on Yb:YAG large core diameter crystal square waveguide is constructed. In the experiment, firstly, the high mirror is used instead of the semiconductor saturable absorption mirror (SESAM), and the position and angle of the crystal waveguide are adjusted to match the pump light with the waveguide core layer under higher pump power. Then, the angle of the spherical mirror is carefully adjusted to couple the signal light into the waveguide core layer to minimize the loss in the cavity. The designed laser adopts a folded cavity structure, and achieves an average power of

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2021-12-15; 录用日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(62075003)、北京市自然科学基金、教委科研计划(4202007, KZ202110005010)

通信作者: *ncltlq@bjut.edu.cn

10.2 W, pulse width of 65 ps, repetition rate of 30.15 MHz, and single pulse energy of 0.34 μJ without dispersion compensation device.

Key words lasers; solid-state laser; mode-locked laser; crystal waveguide; semiconductor saturable absorption mirror

1 引言

高功率的超短脉冲激光器在各种科学研究和工业加工领域具有重要的应用价值,如高次谐波产生^[1]、阿秒光源生成^[2]和激光精密微加工及切割^[3]。波导激光器(光纤激光器)凭借着高表面体积比、限制激光模式的特点,被认为是一种可以获得高功率、高质量光束的理想激光器。然而,玻璃波导的发展正受到基本物理学的限制,包括玻璃材料的热力学性能较差^[4]和非线性效应的过度积累^[5],这阻碍了从振荡器中直接获得高功率的超短脉冲。为了满足实际应用需要,一般采用复杂的多级放大系统进行功率扩展。为了实现简单紧凑的激光系统,研究高性能的超短脉冲振荡器具有重要意义。

全晶体材料所制成的晶体波导,如钇铝石榴石(YAG)具有比玻璃材料更高的热导率、更大的发射截面和更小的受激布里渊增益系数^[6],因此晶体波导具备高功率激光输出的潜力。2014年,美国Onyx光学公司^[7]设计了一种65 mm长的Yb:YAG波导激光器,其具有尺寸为40 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 的芯径和尺寸为102 $\mu\text{m} \times 102 \mu\text{m}$ 的未掺杂YAG内包层,使用光纤耦合激光二极管模块在940 nm波长处进行包层泵浦,可以在1030 nm波长处实现功率为13.2 W的连续输出。该晶体波导是通过无黏合剂键合(AFB)方法^[8]制成的,所以避免了飞秒激光刻写技术^[9]所造成的晶格畸变和缺陷所导致的散射损耗,这有利于获得高功率的超短脉冲。同时,根据折射率匹配理论,采用AFB方法来扩大基模场面积,而基模场面积的增大可以降低芯层中的功率密度,减少非线性效应的积累。2019年,本课题组根据折射率匹配和模式竞争理论,采用AFB方法制备了长度为77 mm的大芯根基模晶体波导^[10],并进行实验成功实现了功率为26 W的连续输出^[11-12],次年又在10 kHz的频率下实现了功率为1.75 mJ的调Q脉冲输出^[13-14]。大芯径晶体波导可吸收更高功率的泵浦光,能够实现更高的输出功率,同时在锁模运行时芯层中的峰值功率密度相对较低,这减少了非线性效应的积累。因此,大芯径晶体波导锁模振荡器具备直接输出高功率超短脉冲的潜力。

本文以大芯径晶体波导作为增益介质,构建了基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)为可饱和吸收体的全正色散锁模激光器。通过对腔型的设计抑制了调Q锁模(QML)的过程,获得了平均功率为10.2 W、重复频率为30.15 MHz、脉冲宽度为65 ps的连续锁模(CWML)激光。实验结果表明,大芯径晶体方波导锁模激光器具有高功率扩展的潜力。

2 实验原理与装置

2.1 腔型设计

在被动锁模激光器中,锁模所需的可饱和吸收体会引起调Q激光器的不稳定,使激光器工作在kHz重复频率的调Q锁模状态。这种不稳定所产生的高能量脉冲会对SESAM造成永久性损伤,解决这一问题对于高功率锁模激光器来说尤为关键。Hönninger等^[15]给出了抑制调Q锁模的条件,即

$$E_P > E_{P,c} = (F_{\text{sat},L} A_{\text{eff},L} F_{\text{sat},A} A_{\text{eff},A} \Delta R)^{1/2}, \quad (1)$$

式中: E_P 表示腔内锁模脉冲的能量; $E_{P,c}$ 表示激光器实现连续锁模的阈值能量; $F_{\text{sat},L} \propto 1/m_o$ 表示激光晶体的饱和光通量,其中 m_o 表示激光晶体的发射截面; $A_{\text{eff},L}$ 表示晶体中有效光斑的面积; $F_{\text{sat},A}$ 表示由SESAM材料决定的饱和能量; $A_{\text{eff},A}$ 表示SESAM上有效光斑的面积; ΔR 表示SESAM的调制深度。掺镱钇铝石榴石(Yb:YAG)有着较宽的增益带宽和较长的荧光寿命^[16],是一种很有前景的高功率超短脉冲激光增益介质,但其在SESAM锁模时存在一个主要缺点是激光发射截面较小,而且具有较大的增益饱和系数。同时大芯径晶体波导具有较大的光斑面积,使得这种激光器相比传统激光器具有更大的 $E_{P,c}$ 。为了实现大芯径晶体波导激光器的稳定连续锁模,通过多种手段来抑制QML。首先,选用调制深度 ΔR 和饱和通量 $F_{\text{sat},A}$ 较小的SESAM来降低实现连续锁模的阈值能量 $E_{P,c}$ 。其次,为了增大腔内锁模脉冲能量 E_P ,选用透过率较小的输出镜(透过率 $T=10\%$)。最后,在腔内加入三组4f系统来扩大腔长 L 以获得更大的 E_P ,同时通过改变球面反射镜组的焦距比来控制SESAM上的光斑面积 $A_{\text{eff},L}$,从而使激光器满足抑制调Q锁模的条件,即 $E_P > E_{P,c}$ 。

本文分析了腔长和SESAM上的光斑面积对连

续锁模阈值功率的影响。模拟 SESAM 上不同尺寸的光斑, 连续锁模阈值功率与腔长的相关曲线如图 1 所示。从图 1 可知, 当激光器的腔长为 5 m 时, 连续锁模阈值功率应在 2.5~6.2 W 之间, 选择较小的光斑面积能获得更低的连续锁模阈值功率, 但过小的光斑面积可能会导致 SESAM 出现损伤。因此, 优化腔型可将 SESAM 上光斑的半径控制在 150~200 μm 之间。激光器的实验原理如图 2(a) 所示, 其中 OC 为输出镜, LD 为激光二极管。根据 ABCD 传输矩阵理论可以计算出激光谐振腔内的光斑分布曲线, 如图 2(b) 所示。从图 2 可以看到, SESAM 上有效光斑的半径约为 171 μm , 这种情况下大芯径晶体波导激光器的连续锁模阈值为 1.39 μJ , 相应的连续锁模阈值为 4.19 W。同

时从图 2 可以看出, 腔内子午光束曲线与弧矢光束曲线有着较好的重合度, 这说明腔内具有较小的像散。

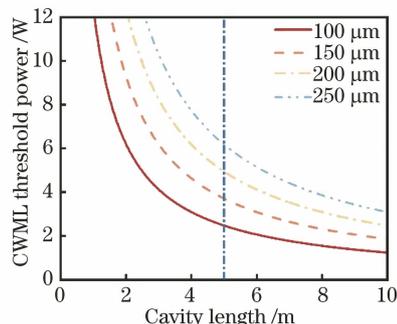


图 1 不同光斑尺寸下腔长与连续锁模阈值功率的关系
Fig. 1 Relationship between cavity length and continuous mode-locking threshold power under different spot sizes

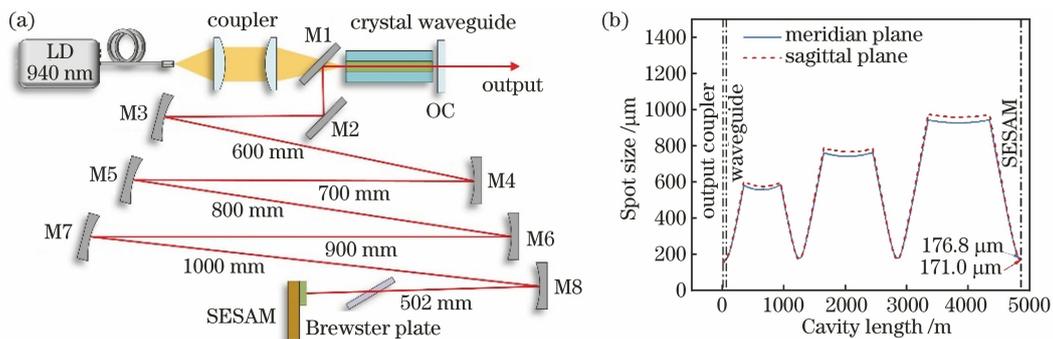


图 2 腔型设计示意图。(a)实验原理图;(b)腔内光斑的分布曲线

Fig. 2 Schematic of cavity design. (a) Experimental diagram; (b) distribution curve of light spot in cavity

2.2 实验装置

大芯径晶体波导锁模激光器的实验装置如图 3 所示。单包层晶体波导的结构参数: 芯径材料选用掺杂原子数分数为 1% 的 Yb:YAG, 尺寸为

320 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$; 包层材料选用掺杂原子数分数为 0.5% 的 Er:YAG, 尺寸为 7 mm \times 30 mm, 长度为 77 mm。在芯径的四周键合包层, 波导的水平 and 垂直方向均为导波方向, 这可以起到良好的模式限制

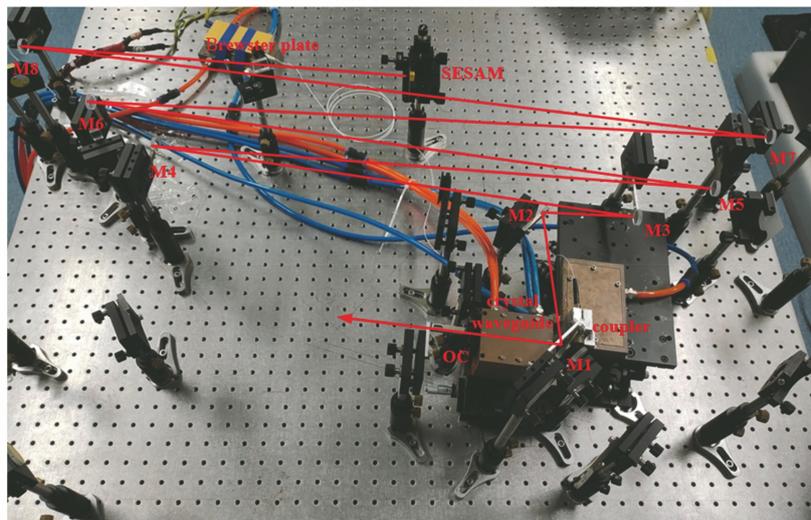


图 3 大芯径晶体波导锁模激光器的实验装置

Fig. 3 Experimental device of crystal waveguide mode-locked laser with large core diameter

作用,而且能在保持单横模的情况下获得更大的模场面积^[12]。波导两端镀 940 nm 和 1030 nm 波长的增透膜,接着安装在铜制的热沉中,并主动冷却至 20 °C。泵浦光源为光纤耦合半导体激光器,中心发射波长为 940 nm,线宽约为 0.4 nm,最大功率为 135 W。实验中采用端泵浦结构,LD 泵浦光由芯径为 105 μm 、数值孔径 NA 为 0.22 的光纤耦合输出,输出光经过两个焦距分别为 20 mm 和 60 mm 的凸透镜后扩束,再耦合进晶体波导的芯径中。经过仿真和实验,当泵浦光的束腰位置移动到芯径内 2 mm 时,可以确定晶体波导中芯径的吸收效率最高。M1 是 45°平面双色镜(在 940 nm 波长处透过率 $T > 85\%$,在 1030 nm 波长处反射率 $R > 99.5\%$),用于将信号光和泵浦光分开;M2 是 45°平面全反镜;M3、M4、M5、M6、M7 和 M8 均是球凹面反射镜,曲率半径分别为 600,600,800,800,1000,1000 mm(在 1030 nm 波长处反射率 $R > 99.5\%$)。在腔内加入偏振片可以提高信号光的偏振特性,激光器的等效腔长为 4.96 m,输出镜的透射率为 10%。BATOP 公司生产的 SESAM 在 1030 nm 波长附近的饱和通量和调制深度分别为 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 和 0.6%,弛豫时间为 1 ps。

3 实验结果及分析

实验中,首先使用高反镜替代 SESAM,在较高的泵浦功率下调节晶体波导的位置和角度,可以实现泵浦光与波导芯层的匹配;然后,仔细调节球面反射镜的角度,使信号光耦合进波导芯层中以尽量减小腔内的损耗,最终实现最大功率为 11.6 W 的连续光输出,即对应 31.8% 的斜效率。将高反镜换成 SESAM 进行锁模实验,大芯径晶体波导锁模激光器随着泵浦功率的增加会存在不同的输出状态。图 4(a)为大芯径晶体波导激光器在连续和锁模运转下的平均输出功率随泵浦功率的变化曲线。从图 4(a)可以看到:当泵浦吸收功率为 17 W 时,激光器的输出功率达到阈值并且其进入调 Q 锁模状态,输出功率为 0.6 W,在这种工作状态下激光输出由调 Q 包络下的锁模脉冲组成,使用数字示波器记录锁模脉冲序列,如图 4(b)所示;当泵浦吸收功率为 28 W 时,连续运转下的输出功率为 4.2 W,说明激光器实现了稳定连续锁模,如图 4(c)和图 4(d)所示,实验中的连续锁模阈值功率与理论预期相符;当泵浦吸收功率为 52 W 时,锁模运转下最大的输出功率为 10.2 W,对应的单脉冲能量为 338 nJ,斜效

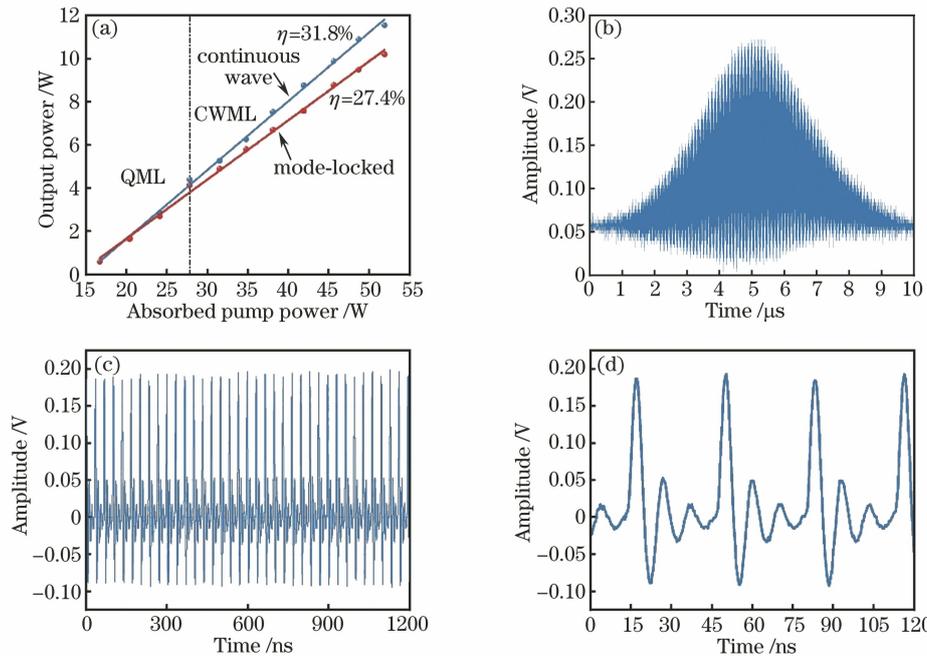


图 4 晶体波导锁模激光器的实验结果。(a)连续和锁模操作中输出功率与吸收泵浦功率的关系;

(b)调 Q 锁模脉冲序列;(c)1200 ns 时间下的连续锁模脉冲序列;(d)120 ns 时间下的连续锁模脉冲序列

Fig. 4 Experimental results of crystal waveguide mode-locked laser. (a) Relationship between output power and absorbed pump power in continuous and mode-locked operation; (b) Q-switched mode-locked pulse sequence; (c) continuous mode-locked pulse sequence at 1200 ns; (d) continuous mode-locked pulse sequence at 120 ns

率 η 为 27.4%，相比连续运转仅降低 4.4 个百分点，这是由于所用的 SESAM 具有较低的非饱和损耗，当输出最大功率时，入射到 SESAM 上的脉冲约为饱和通量的 37 倍，低于 SESAM 的损伤阈值，故未观察到其损坏的迹象。

使用频谱分析仪测量锁模脉冲的射频频谱，结果如图 5(a) 所示。从图 5(a) 可以看到，锁模脉冲的重复频率为 30.15 MHz，在 30 kHz 的分辨率带宽 (RBW) 下信噪比达到 49.7 dB，说明激光器未出现寄生调制信号，表明振荡器处于较稳定的锁模状态。采用光谱仪测量锁模脉冲的光谱，连续、锁模下的锁模脉冲光谱如图 5(b) 所示。从图 5(b) 可以看到，在最高输出功率下，光谱的中心波长 λ 位于 1032 nm，宽度 $\Delta\lambda$ 为 0.11 nm。使用自相关仪测量锁模脉冲强度的自相关曲线，结果如图 5(c) 所示。假设获得的脉冲为高斯型，则锁模脉冲宽度为 65 ps。锁模

脉冲的时间带宽积为 2.021，说明锁模运转期间存在很大的啁啾，原因是晶体波导的长度为 77 mm，脉冲在腔内积累了大量的群速度色散。由于在实验腔内未设置负色散器件，仅利用 SESAM 的可饱和吸收特性对信号光进行调制，所以输出脉冲的脉宽相对较宽。使用刀口法对最高输出功率的激光进行测量，输出光经过衰减后使用焦距 $f = 150$ mm 的凸透镜进行聚焦，测量在束腰前后对称位置处的光斑尺寸并进行拟合，结果如图 5(d) 所示。从图 5(d) 可以看到，光束质量因子 M^2 在 x 方向为 1.12，在 y 方向为 1.05，晶体波导激光器输出的基模远场光斑近似为圆形。波导中芯层的尺寸在 x 方向和 y 方向不同，导致在不同的热应力下 x 方向的发散角比 y 方向略大，但波导在两个方向都仅支持单模运转，故光束质量近似一致。

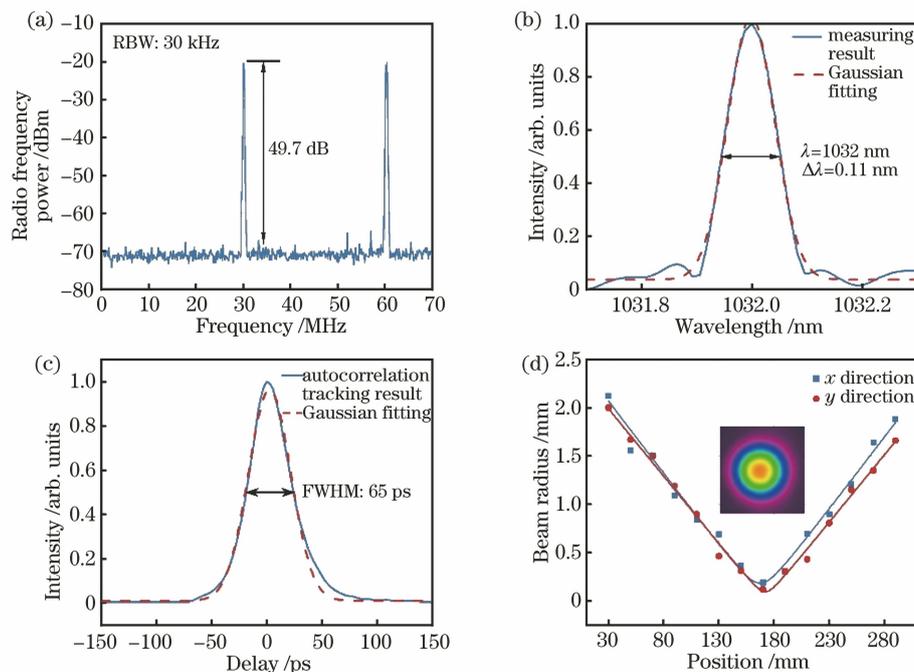


图 5 连续锁模激光器的脉冲参数。(a) 射频频谱；(b) 光谱图；(c) 自相关曲线；
(d) 光束质量拟合曲线及输出的基模远场光斑

Fig. 5 Pulse parameters of continuous mode-locked laser. (a) Radio frequency spectrum; (b) spectrogram;
(c) autocorrelation curve; (d) beam quality fitting curve and output fundamental mode far-field spot

大芯径晶体波导锁模激光器的输出功率可以进一步扩展，而且输出功率曲线未出现功率饱和的现象，同时在泵浦功率最大时未观察到由 SESAM 饱和引起的脉冲分裂迹象，如图 4(a) 所示。由于目前采用的端面泵浦方式的注入功率有限，将大芯径晶体波导制成双包层结构、采用侧面泵浦或角泵浦可以获得更高的泵浦吸收功率。当泵浦吸收功率较大

时，可以适当增加 SESAM 上的光斑面积和输出镜的透过率，从而在保证锁模稳定的情况下提高激光器的平均输出功率和斜效率。最后，在腔内加入负色散器件来管理色散，可以形成呼吸孤子锁模机制，压缩脉冲宽度可以进一步提升峰值功率。由于大芯径波导具有较大的模场面积，即使峰值功率有所提升，也不会造成过多的非线性积累。因此，期望大芯

径晶体波导可以实现更高功率的锁模激光。在接下来的实验中,功率扩展和色散管理将成为主要工作。

4 结 论

本文构建了一种基于大芯径晶体方波导的 SESAM 锁模激光器。在重复频率为 30.15 MHz 的情况下,所设计的激光器获得了平均输出功率为 10.2 W、脉冲宽度为 65 ps 的输出,此时激光中心波长为 1032 nm,光束质量因子 M^2 在 x 方向为 1.12,在 y 方向为 1.05。本文分析了功率进一步扩展所面临的主要问题,证实大芯径晶体波导有望成为实现高功率、高脉冲能量超短脉冲激光源的一种全新途径。

参 考 文 献

- [1] Steinmeyer G, Sutter D H, Gallmann L, et al. Frontiers in ultrashort pulse generation: pushing the limits in linear and nonlinear optics [J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1507-1512.
- [2] Leone S R, McCurdy C W, Burgdörfer J, et al. What will it take to observe processes in 'real time'? [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3): 162-166.
- [3] Ancona A, Döring S, Jauregui C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3304-3306.
- [4] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [5] Liu W, Liao R Y, Zhao J, et al. Femtosecond Mamyshev oscillator with 10-MW-level peak power [J]. *Optica*, 2019, 6(2): 194-197.
- [6] Dubinskii M, Zhang J, Fromzel V, et al. Low-loss 'crystalline-core/crystalline-clad' (C4) fibers for highly power scalable high efficiency fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 5092-5101.
- [7] Mu X D, Meissner S, Meissner H, et al. High efficiency Yb:YAG crystalline fiber-waveguide lasers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6331-6334.
- [8] Mu X D, Meissner H, Lee H C, et al. True crystalline fibers: double-clad LMA design concept of Tm:YAG-core fiber and its mode simulation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 82373M.
- [9] Chen F, de Aldana J R V. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): 251-275.
- [10] 程德江, 胡星, 惠勇凌, 等. 大芯层尺寸 Yb:YAG 晶体波导的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 231401.
Cheng D J, Hu X, Hui Y L, et al. Design of large-core Yb:YAG crystal waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 231401.
- [11] Cheng D J, Hu X, Lei H, et al. Design and experimental verification of near diffraction-limited output of a large core size Yb:YAG crystalline waveguide laser [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 307-310.
- [12] 薛凯, 胡星, 程德江, 等. 大芯径 Yb:YAG 晶体波导近衍射极限激光输出的计算和实验验证 [J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1914002.
Xue K, Hu X, Cheng D J, et al. Calculation and experimental verification of large core size Yb:YAG crystalline waveguide with near-diffraction-limited laser output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1914002.
- [13] Hui Y L, Liu Q, Hu X, et al. High efficiency active Q-switched laser operation with a large size rectangular core crystalline waveguide [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2099-2105.
- [14] 雷芻, 刘奇, 王煜, 等. 近衍射极限输出的大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器 [J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1214001.
Lei H, Liu Q, Wang Y, et al. Passively Q-switched pulse laser with large core size crystal waveguide near diffraction-limit beam quality output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1214001.
- [15] Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, et al. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(1): 46-53.
- [16] Taira T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(9): 1867-1874.