

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

雷旬^{1,2,3,4}, 刘奇^{1**}, 王煜¹, 惠勇凌^{1,2,3,4}, 朱占达^{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 通过实验研究了大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器的输出特性。采用芯径尺寸为 $320\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 、原子数分数为 1% 的 Yb:YAG, 包层尺寸为 $7\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ 、原子数分数为 0.5% 的 Er:YAG, 长度为 77 mm 的单包层矩形晶体波导, 以及可饱和吸收晶体为初始透过率 85% 的 Cr^{4+} :YAG, 获得了被动调 Q 脉冲能量 $0.84\ \text{mJ}@8.7\ \text{kHz}$, 脉冲宽度为 23.8 ns, 光束质量 $M^2 = 1.12 \times 1.06$ 。实验结果证明, 大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器可获得近衍射极限高功率脉冲输出。

关键词 激光器; 全固态激光器; 晶体波导; 近衍射极限输出; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1214001

Passively Q-Switched Pulse Laser with Large Core Size Crystal Waveguide Near Diffraction-Limit Beam Quality Output

Lei Hong^{1,2,3,4}, Liu Qi^{1**}, Wang Yu¹, Hui Yongling^{1,2,3,4}, Zhu Zhanda^{1,2,3,4}, Li Qiang^{1,2,3,4*}

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

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

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

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

Abstract The output characteristics of a passively Q-switched pulse laser with a large core size crystal waveguide are studied experimentally. Using Yb:YAG with core size of $320\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ and an atomic number fraction of 1%, Er:YAG with cladding size of $7\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ and an atomic number fraction of 0.5%, a single-clad rectangular crystal waveguide with a length of 77 mm, and a Cr^{4+} :YAG saturable absorption crystal with initial transmittance of 85%, a passively Q-switched pulse energy of $0.84\ \text{mJ}@8.7\ \text{kHz}$, a pulse width of 23.8 ns, and a beam quality of $M^2 = 1.12 \times 1.06$ is obtained. Experimental results show that the high peak power pulse output with near diffraction-limit can be obtained by passively Q-switched pulse laser with large core diameter crystal waveguide.

Key words lasers; solid-state laser; crystal waveguide; near diffraction-limit output; passively Q-switched

OCIS codes 140.3480; 140.3570; 140.3615; 140.3540

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-23; 录用日期: 2021-01-18

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

* E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn; ** E-mail: liuqi97966@163.com

1 引言

高功率、高光束质量的小型化激光器有特殊的应用,如地图遥感测绘、测距、材料加工等^[1-2]。光纤激光器基模输出时芯径较小,纤芯内光功率密度高,容易引起非线性效应^[3],难以获得高功率输出。固体激光器采用晶体材料作为增益介质,具有高导热性、大吸收系数和发射截面,可以获得高功率输出,但由于材料和结构引起的热效应管理困难,高功率下光束质量退化严重^[4]。相比之下,晶体波导激光器结合了光纤激光器和固体激光器两者的优势,具有良好的模式限制作用,在保持单横模的情况下可以获得更大的模场面积,是一种有利于实现高功率、高光束质量、结构紧凑的激光器。

单晶光纤作为一种特殊的晶体波导,实验证明可获得高功率输出^[5-9]。其中,2006年,法国奥尔赛中央大学^[6]利用直径为 1 mm、长度为 50 mm、原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 单晶光纤实现最高 4.4 mJ@1 kHz 脉冲能量、脉宽为 12 ns 的调 Q 输出,光束质量因子 $M^2=5$ 。该实验使用了大数值孔径和大芯径的单晶光纤,获得了高功率脉冲输出,但容易激发高阶模,输出光束质量较差。2017年,美国陆军研究所^[10]利用芯径尺寸为 $40\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}$ 、长度为 84 mm、原子数分数为 2% 的 Ho:YAG 晶体单包层方波导,实现了 $1\ \mu\text{J}@442\ \text{kHz}$ 脉冲能量、脉宽为 2 μs 、波长为 2.09 μm 的调 Q 输出,光束质量近似为基横模(TEM₀₀ 模)。该实验使用了小芯径尺寸的晶体方波导,输出光束质量好,但小芯径限制了增益介质的模体积,输出能量较小。为提高输出脉冲能量和平均功率,就需要增大晶体波导的芯层尺寸,增大增益介质的模体积,但在常规晶体波导的芯层尺寸的设计中,存在单模截止条件的限制,超过单模截止条件确定的芯径尺寸,会激发高阶模,输出光束质量变差,因此如何在大芯层尺寸条件下获得单横模输出成为国内外研究的重点。

针对这一问题,2019年,本课题组采用包层与芯层折射率匹配的方法,减小了两者的折射率差,同时引入了模式竞争的方法,扩大能实现基模输出的晶体波导芯层尺寸,并制备了大芯径尺寸单包层晶体波导,构成晶体波导激光器,连续运行时实现近衍射极限的激光输出^[11-13]。本文在此基础上,研究了大芯径尺寸晶体波导在被动调 Q 运转时的激光输出特性,由于调 Q 过程中,腔内模式振荡次数比连续时多,模式竞争更加明显,有选模的作用,易于高

光束质量的输出。实验利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 元件,搭建晶体波导被动调 Q 脉冲激光器,实现 1030 nm 的激光脉冲输出,脉冲能量为 0.84 mJ@8.7 kHz,脉冲宽度为 23.8 ns,斜率效率为 11.11%,光束质量为 $M^2=1.12\times 1.06$ 。实验结果证明,大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器可获得近衍射极限高功率脉冲输出。

2 理论分析与波导制备

2.1 理论分析

Yb:YAG 具有较高量子效率(约 91%)和较长的荧光寿命(0.95 ms@1.0% Yb:YAG),能实现有效的能量存储和高效的脉冲输出。为避免高掺杂时引起的再吸收效应,选择原子数分数为 1% 的 Yb:YAG 作为晶体波导芯层材料。

在晶体波导的设计中,通过单模截止条件^[14]可计算芯层上限尺寸为

$$B = \frac{2d}{\lambda} NA < 1.37, \quad (1)$$

式中: B 为归一化厚度; λ 为激光波长; NA 为晶体波导数值孔径。文献^[15]采用无掺杂 YAG 作为包层时,计算单模晶体波导芯层尺寸为 35 μm ,波导芯层尺寸较小。

在保证高光束质量的条件下提高输出功率,需要扩大晶体波导单模输出的芯层尺寸,根据(1)式,通过减小数值孔径 NA ,即减小芯层和包层的折射率差,可以增大单模芯层尺寸。选择原子数分数为 0.5% 的 Er:YAG 作为包层材料,因为 Er:YAG 对 940 nm 泵浦光和 1030 nm 输出光是透明的,不会影响泵浦吸收和激光输出特性,通过干涉测量方法^[16]得出原子数分数为 0.5% 的 Er:YAG 与 1% 的 Yb:YAG 的折射率差达到了 4×10^{-6} ,经计算得出 $NA=0.0038$,单模最大芯层厚度可达 185 μm 。与常规芯层厚度相比,采用折射率匹配的方法可以将单模芯层厚度提升约 5 倍,如表 1 所示。但进一步通过减小折射率差来增大芯层尺寸存在困难,主要是由于极小的折射率差匹配难以实现。

如果进一步扩大芯层尺寸,此时就会出现多模情况,但考虑到晶体波导在激光器中作为增益介质,是有源器件,在振荡过程中由于模式竞争作用,只要保证基模获得的增益高于其他模式,基模依然可以优先获得增益并输出。根据这一思路,在计算中引入一阶模功率约束因子 $\Gamma_{m=1}$,在增益饱和情况下,一阶模由于没有获得足够的增益而在芯层中被抑

表 1 折射率匹配芯层厚度与常规芯层厚度对比

Table 1 Comparison of refractive index matching core layer thickness and conventional core layer thickness

Core material	Cladding material	Refractive index difference	Single-mode core layer thickness / μm
1% Yb:YAG	YAG	1.1×10^{-4}	35
1% Yb:YAG	0.5% Er:YAG	4×10^{-6}	185

制,基模在模式竞争中胜出。此时一阶模功率约束因子需要满足的条件为 $\Gamma_{m=1} < 0.64^{[15]}$,即约束因子的表达式为

$$\Gamma_{m=1} = \frac{\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} |U(x,y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |U(x,y)|^2 dx dy} < 0.64, \quad (2)$$

式中: $U(x,y)$ 为波导截面的电场分布; d 和 w 分别为波导厚度和宽度,为了简化计算,令波导的芯层截面为正方形,使 $d=w$ 。可得,

$$\Gamma_{m=1} = \frac{\left[\frac{d}{2} + \frac{1}{2k_x} \sin(k_x d) \right]^2}{\left[\frac{d}{2} + \frac{1}{2k_x} \sin(k_x d) \right]^2 + 2\cos^2 \frac{k_x d}{2} \cdot \frac{1}{\gamma_x} \left[\frac{d}{2} + \frac{1}{2k_x} \sin(k_x d) \right] + \frac{1}{\gamma_x^2} \cos^4 \frac{k_x d}{2}} < 0.64, \quad (3)$$

式中: k_x 为芯层的波矢大小; γ_x 为包层衰减系数。方波导在一维方向上的特征方程为

$$k_x = m\pi + 2\arctan\left(\frac{\gamma_x}{k_x}\right). \quad (4)$$

一阶模对应 $m=1$,计算得单模最大芯层尺寸上限为 $332 \mu\text{m}$ 。

为了理解模式竞争抑制高阶模作用,计算了芯层尺寸为 $332 \mu\text{m}$ 时,无源条件下芯层内存在的模式数。矩形波导中主要存在两种基本模式,一种是电磁场的主要分量为 E_y 和 H_x ,并且 H_y 很小,可认为 $H_y=0$,这时电场主要沿 y 方向偏振,这种模式称为 E_{mn}^y 模;另一种是电磁场的主要分量为 E_x 和 H_y ,并且 H_x 很小,可认为 $H_x=0$,这时电场主要沿 x 方向偏振,这种模式称为 E_{mn}^x 模。这里下标 m,n 分别表示 x,y 方向模式的阶数。将晶体波导近似为方波导, $d=w, n_1 \approx n_2$,此时可以将 E_{mn}^x 和 E_{mn}^y 的特征方程统一改写为 $E_{mn}^{x,y}$ 。

$$B\pi\sqrt{2(1-P^2)} = (p+q)\pi + 4\arctan\sqrt{\frac{1+P^2}{1-P^2}}, \quad (5)$$

式中: P 为归一化传播常数,取值范围 $0 < P < 1$,当 $P=0$ 时,模式截止; p,q 最小取值为 0 ,这里 $E_{p=0,q=0}^x$ 为 x 偏振方向电场的基横模。在厚度为 $332 \mu\text{m}$ 时,对应的 $B=2.45, p+q$ 最大取值为 2 ,此时波导内除了 $E_{00}^{x,y}$,还存在 $E_{01}^{x,y}, E_{10}^{x,y}$ 及 $E_{11}^{x,y}, E_{02}^{x,y}, E_{20}^{x,y}$ 。而有源条件下,该晶体波导达到增益饱和时,通过振荡过程中模式竞争可以抑制晶体波导

内一阶模和二阶模,该尺寸只存在基模 $E_{00}^{x,y}$ 。

2.2 波导制备

根据计算结果,实验室利用扩散键合技术制备单包层矩形晶体波导。考虑到计算过程可能存在偏差,选定芯层的尺寸为 $320 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$,芯层 $320 \mu\text{m}$ 低于理论值,可以保证近衍射极限的输出;芯层 $400 \mu\text{m}$ 高于理论值,可以探索增大单模芯层尺寸的潜力。制备晶体波导的基本工艺为:晶体表面处理、光胶和热处理。晶体表面处理是将晶体键合面的面型和粗糙度加工到满足光胶的条件^[17],基本过程为:上盘、磨砂、研磨、粗抛、精抛、检测。光胶是将两块晶体通过范德瓦尔斯力吸附在一起,具有一定的结合强度,该过程需要在超净间完成,将处理好的键合面进行酸洗,擦拭清洁,对准贴合,并均匀挤压,排出键合面的气泡和液体,光胶好的晶体在常温下静置一段时间,等待光胶稳定。热处理使光胶好的晶体键合面处的原子通过热扩散形成新的化学键,该过程需要在真空热压炉中进行,经过升温、恒温、退火,完成扩散键合。制备该单包层矩形晶体波导,一共需要进行 4 次键合才能完成。

3 实验装置

该晶体波导是单包层波导,其横截面结构与显微照片如图1所示,芯层为横截面尺寸 $320 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 、掺杂原子数分数为 1% 的Yb:YAG,包层为横截面尺寸 $7 \text{mm} \times 30 \text{mm}$ 、掺杂原子数分数为 0.5% 的Er:YAG,波导全长为 77mm 。采用较大

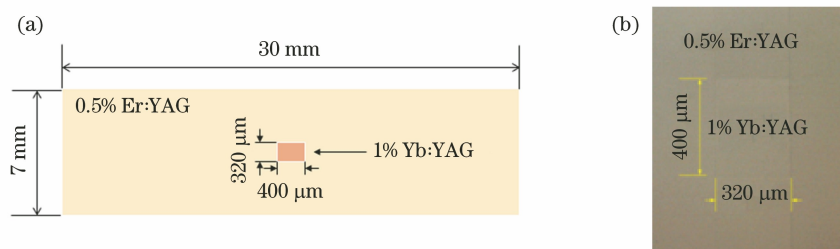


图 1 晶体波导。(a)晶体波导截面结构示意图;(b)晶体波导芯层显微照片

Fig. 1 Crystal waveguide. (a) Cross-section structure of crystal waveguide; (b) micrograph of crystal waveguide core layer

的包层厚度可以保证足够的机械强度,同时考虑到该晶体波导的后续制作而留存的加工余量。

晶体波导被动调 Q 激光器的实验结构如图 2 所示,其中泵浦源是通过光纤耦合输出的半导体激光器,光纤芯径为 $105\ \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.22$,中心波长为 $940\ \text{nm}$,最大输出功率为 $140\ \text{W}$ 。L1 和 L2 是焦距分别为 $20\ \text{mm}$ 和 $50\ \text{mm}$ 的平凸透镜,组合成 2.5 倍扩束准直和聚焦系统,将泵浦光以 $260\ \mu\text{m}$ 的束腰光斑大小耦合进波导内部。由于晶体波导是单包层波导,没有约束泵浦光,是芯层泵浦,泵浦光 NA 与波导 NA 不匹配。通过调节泵浦光束腰在晶体波导的位置,尽可能增加晶体波导芯层的吸收率。M1 和 M2 为腔镜,均靠近晶体波导端面,其中 M1 镜对 $940\ \text{nm}$ 增透,对 $1030\ \text{nm}$ 高

反,M2 为 $1030\ \text{nm}$ 的输出耦合镜。晶体波导两个端面都镀有 $940\ \text{nm}$ 和 $1030\ \text{nm}$ 的增透膜,以减小菲涅耳反射损耗。晶体波导四周包裹铝箔,夹在两个水冷铜热沉之间进行冷却,温度控制在 $20\ ^\circ\text{C}$ 。输出镜后加入双色镜($940\ \text{nm}$ 高反, $1030\ \text{nm}$ 增透),用于分离泵浦光和振荡光,方便测量。被动调 Q 晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 尺寸为 $\Phi 5 \times 2\ \text{mm}$,初始透过率为 85% ,固定于环形铜圈的夹具内。为避免剩余泵浦光被 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 吸收,形成热积累,在被动调 Q 晶体之前加一光阑用于阻挡部分剩余泵浦光。虽然波导 NA 很小,光束从波导端面出来的发散角小,但为减小振荡光束的衍射损耗,光阑、被动调 Q 晶体和耦合镜尽量靠近晶体端面,实验装置照片如图 3 所示。

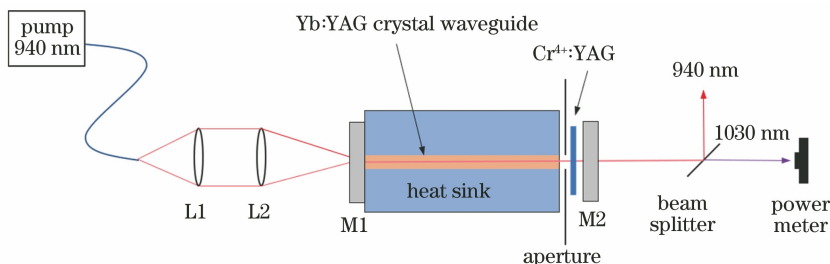


图 2 被动调 Q 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of passively Q-switched experimental setup

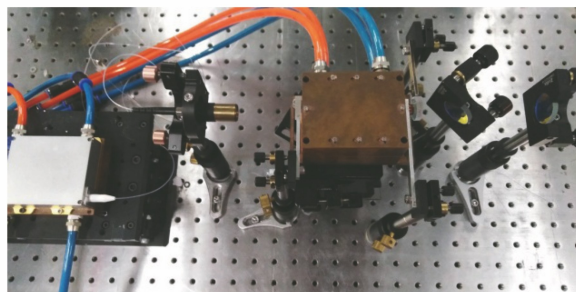


图 3 实验装置照片

Fig. 3 Photo of experimental setup

4 实验结果与讨论

为对比连续波(CW)与被动调 Q 两种状态下的输出特性,即腔内不加入被动调 Q 晶体时,连续输出;加入被动调 Q 晶体时,被动调 Q 输出。采用透过率为 70% 的输出耦合镜进行实验。在调 Q 过程中, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 吸收剩余泵浦光导致晶体过热,当泵浦功率超出 $65\ \text{W}$ 后,造成明显的输出不稳定,虽然泵浦源最大功率为 $140\ \text{W}$,但为了获得稳定的输出,测量只在 $65\ \text{W}$ 泵浦功率内进行。测量结果如图 4 所示,当泵浦功率 $65\ \text{W}$ 时,连续状态的输出功率为

12.0 W,斜率效率为 27.78%;被动调 Q 状态下的输出功率为 7.1 W,斜率效率为 11.11%。可以看出相同条件下,晶体波导被动调 Q 激光器的输出光功率和斜效率比连续状态低,可能的原因有两个:1)输出耦合镜与晶体波导端面间因插入光阑和 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体,存在约 6 mm 的距离,造成衍射损耗;2)调 Q 过程中晶体波导芯层四个侧面间,可能存在较强的自发辐射放大(ASE)和寄生振荡,消耗了部分积累的反转粒子,导致了该晶体波导激光器的阈值较高,效率较低。

为了获得最大的脉冲输出能量,对输出耦合镜透过率进行优化。选择在靠近 Cr⁴⁺:YAG 晶体附近放置不同透过率的输出耦合镜,透过率分别为 70%、80%、90%,采用初始透过率相同的被动调 Q 晶体元件进行实验,测量不同透过率条件下的输出功率。实验结果如图 5 所示,输出耦合镜透过率为 80%,获得的输出功率最大,当泵浦功率 65 W 时,通过透射实验测得的波导芯层吸收泵浦功率 33.0 W,泵浦吸收效率为 50.7%。可以看出泵浦吸

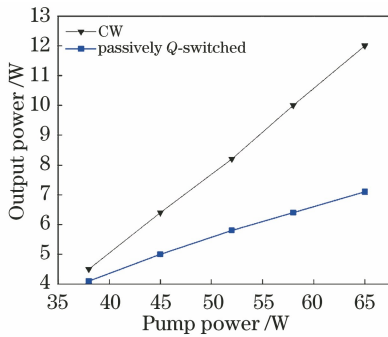


图 4 连波和被动调 Q 两种状态输出功率
Fig. 4 Output power of continuous wave and passively Q-switched

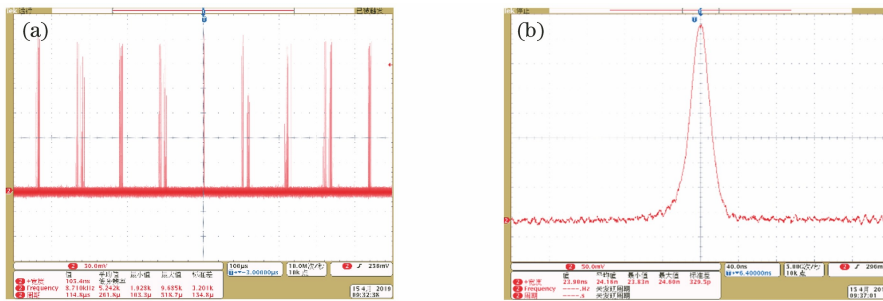


图 6 测量结果。(a)被动调 Q 脉冲序列;(b)被动调 Q 脉冲轮廓

Fig. 6 Measurement results. (a) Passively Q-switched pulse sequence; (b) passively Q-switched pulse profile

虽然晶体波导芯层为矩形,但输出激光远场光斑为近圆形,使用 Ophir-Spiricon 公司的 SP620U 型(190~1320 nm)光束分析仪,测量晶体波导被动

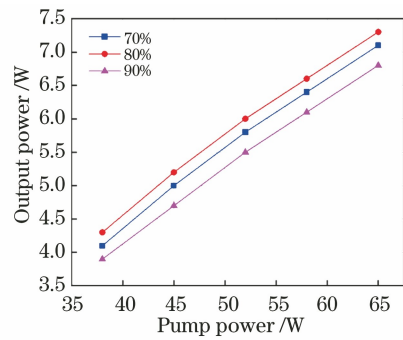


图 5 不同透过率条件下的输出功率

Fig. 5 Output power at different transmission rates

收率不高,原因是波导为单包层结构下较低的数值孔径,不能充分接收和吸收泵浦光,如果将波导制成双包层波导,则该问题将会得到有效改善。

采用泰克公司的 DPO-4104B 型高速示波器(带宽为 1 GHz,采样率为 5 GSa/s)配合 Thorlabs 公司的 PDA10CF 阻抗放大镉镓砷探测器(波长范围为 800~1700 nm,带宽为 150 MHz)检测输出脉冲序列的重复频率和脉宽,测量结果如图 6 所示。输出激光波长为 1030 nm,在输出功率为 7.3 W 时,测量脉冲宽度为 23.8 ns,对应脉冲能量为 0.84 mJ@8.7 kHz。从脉冲序列图可以看出,被动调 Q 输出脉冲存在时间抖动和幅值不稳定。一方面是调 Q 过程中,腔内增益和损耗的动态变化造成 Q 开关速度不确定,可以采取增益预泵浦的方式来提高脉冲稳定性;另一方面是晶体波导剩余泵浦光较多,被动调 Q 晶体 Cr⁴⁺:YAG 吸收剩余泵浦光造成的积热,对于热干扰造成的脉冲能量不稳定的问题,需要对 Cr⁴⁺:YAG 进行冷却,也可以将 Cr⁴⁺:YAG 和晶体波导直接键合成一个整体,来减少 Cr⁴⁺:YAG 晶体热积累。

调 Q 激光器输出的光束质量。用焦距为 $f = 150$ mm 凸透镜将输出光聚焦,经分光棱镜衰减后,测量在束腰前后对称不同位置处的光斑直径,拟合

出位置与光斑直径的曲线,计算光束质量因子 M^2 。在输出功率为 7.3 W 时,光束质量 $M^2 = 1.12 \times 1.06$,如图 7 所示。波导芯层尺寸远远超过了传统的基模截止芯层尺寸上限,仍然得到了接近衍射极限的激光输出。 x 方向(400 μm)和 y 方向(320 μm)的尺寸不同,但光束质量几乎相同,原因是调 Q 过程中,模式振荡次数多,模式竞争更加明显,更加有利于基模输出,该结果也展示了晶体波导芯层尺寸还有进一步提高的潜力。

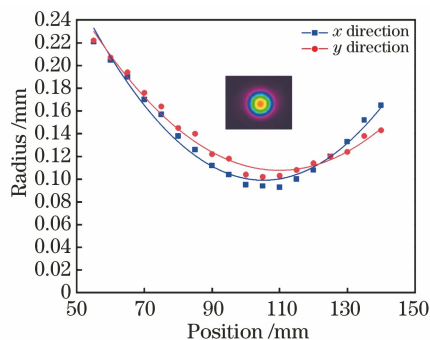


图 7 被动调 Q 光束质量拟合曲线

Fig. 7 Beam quality fitting curve of passively Q-switched

5 结 论

常规无掺杂包层的晶体波导基模输出时的芯层尺寸约为 35 μm ,通过包层与芯层的折射率匹配,减小 NA,可以将基模输出晶体波导的芯层尺寸增大到 185 μm ,再利用模式竞争的方法,继续扩大基模输出晶体波导芯层尺寸至 332 μm ,与常规无掺杂情况相比,芯层尺寸上限提升约 8 倍。根据计算制备了 320 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 的大芯层尺寸晶体波导,并进行调 Q 脉冲实验,实验证明了大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器,可获得近衍射极限、高峰值功率脉冲输出。该晶体波导被动调 Q 脉冲激光器工作时,输出脉冲能量 0.84 mJ@8.7 kHz,脉冲宽度 23.8 ns,当泵浦功率为 65 W 时,泵浦吸收效率为 50.7%,获得最高的输出功率 7.3 W,斜率效率 11.11%,光束质量 $M^2 = 1.12 \times 1.06$ 。

不足和展望:波导是单包层的,包层不能限制发散的泵浦光,且波导与泵浦光 NA 不匹配,导致泵浦吸收率较低。今后的工作,可以通过减小内包层的厚度,再键合一层外包层,将波导做成双包层结构来提升泵浦吸收效率,提高激光器效率;还可以在增益介质外键合吸收层,切断 ASE 和寄生振荡回路,减少 ASE 和寄生振荡的影响,提升整体效率。

参 考 文 献

- [1] Exrance A. Military technology: laser weapons get real[J]. Nature, 2015, 521(7553): 408-410.
- [2] Yumashev K V, Denisov I A, Posnov N N, et al. Nonlinear absorption properties of $\text{Co}^{2+} : \text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal[J]. Applied Physics B, 2000, 70(2): 179-184.
- [3] Cheng Y S, Chen G, Li J Y, et al. Research progress of high-power erbium-ytterbium codoped fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170607.
程永师, 陈瑰, 李进延, 等. 高功率钕镱共掺光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170607.
- [4] Chen F, Li Z Q. Solid-state waveguide lasers based on laser crystals [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500008.
陈峰, 李子琦. 基于激光晶体的固态波导激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500008.
- [5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [6] Didierjean J, Castaing M, Balembois F, et al. High-power laser with Nd:YAG single-crystal fiber grown by the micro-pulling-down technique [J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3468-3470.
- [7] Sangla D, Martial I, Aubry N, et al. High power laser operation with crystal fibers [J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 263-273.
- [8] Martial I, Balembois F, Didierjean J, et al. Nd:YAG single-crystal fiber as high peak power amplifier of pulses below one nanosecond [J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11667-11679.
- [9] D len X, Zaouter Y, Martial I, et al. Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 109-111.
- [10] McDaniel S A, Berry P A, Cook G, et al. CW and passively Q-switched operation of a Ho:YAG waveguide laser [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 1-6.
- [11] Hu X, Cheng D J, Lei H, et al. Near diffraction-limited laser output from a very large size rectangular core crystalline waveguide[J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2685-2688.
- [12] 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.
- [13] 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.

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.

[14] Mackenzie J I, Li C, Shepherd D P, et al. Longitudinally diode-pumped Nd:YAG double-clad planar waveguide laser[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(10): 698-700.

[15] 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.

[16] Wu T, Hui Y L, Yan Z, et al. Zygo interferometer for the precious measurement of tiny refractive index change of two laser crystals [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 196-199.

[17] Zou Y, Wu T, Li Z T, et al. Bondability criterions of laser crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001009.

邹岩, 吴婷, 李之通, 等. 激光晶体的键合条件研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001009.