

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.007

基于 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 键合晶体的被动调 Q 亚纳秒激光器

唐敬玲^{1,2}, 齐月^{1,2}, 白振旭^{1,2*}, 齐瑶瑶^{1,2},
丁洁^{1,2}, 颜秉政^{1,2}, 王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{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: 全固态被动调 Q 激光器有光束质量好、脉冲宽度窄、结构紧凑等特点, 在雷达探测、工业制造等领域具有广泛应用前景。对 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 键合晶体被动调 Q 激光器的输出特性进行了理论和实验研究, 在泵浦光中心波长为 808 nm、光斑直径为 230 μm、泵浦功率为 6.72 W 的泵浦条件下, 获得了平均功率 1.41 W、脉宽 736 ps, 重复频率 8.46 kHz 的调 Q 激光输出。进一步研究表明, 随着泵浦光焦点远离 Nd: YAG 端面, 激光光斑的对称性下降; 且泵浦光焦点离 Nd: YAG 端面的距离沿晶体轴向增大时, 激光阈值呈上升趋势。

关键词: 激光技术; 全固态; 键合晶体; 被动调 Q; Cr⁴⁺: YAG

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)04-00483-09

Passively Q-switched sub-nanosecond laser based on YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG composite crystal

TANG Jingling^{1,2}, QI Yue^{1,2}, BAI Zhenxu^{1,2*}, QI Yaoyao^{1,2},
DING Jie^{1,2}, YAN Bingzheng^{1,2}, WANG Yulei^{1,2}, LYU Zhiwei^{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: Due to its excellent characteristics of good beam quality, narrow pulse width and compact structure, all-solid-state passively Q-switched lasers have a wide application in radar detection, industrial manufacturing etc. Here, the output characteristics of passively Q-switched YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG laser are studied theoretically and experimentally. While being pumped by 808 nm laser with 230 μm beam diameter and 6.72 W power, a Q-switched laser output with an average power of 1.41 W and pulse width of 736 ps at the repetition rate of 8.46 kHz is obtained. Furthermore, it is shown that the symmetry

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61927815)

作者简介: 唐敬玲 (1995 -), 女, 山东临沂人, 研究生, 主要从事全固态被动调 Q 激光器方面的研究。E-mail: 18865503029@163.com

导师简介: 吕志伟 (1961 -), 山东烟台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高能量固体激光器及非线性光学方面的研究。

E-mail: zhiweilv@hebut.edu.cn

收稿日期: 2021-05-08; 修改日期: 2021-11-10

*通信作者。zxbai@hebut.edu.cn

of the laser beam decreases as the focus of the pump laser moves away from the Nd: YAG end face, and the laser threshold shows an upward trend when the distance between the focus of the pump laser and the Nd: YAG end face increases along the axis of the crystal.

Key words: laser techniques; all-solid-state; composite crystal; passively Q-switched; Cr⁴⁺: YAG

0 引言

全固态被动调 Q 激光器具有结构紧凑、体积小等优点,被广泛应用于激光点火^[1-3]、精密加工^[4,5]等领域。与传统可饱和吸收体(如染料片等)相比,Cr⁴⁺: YAG 晶体具有基态吸收截面大($\sim 10^{-18}$ cm²)、散热性能好、损伤阈值高(500 MW/cm²)等优点,是一种在 1 μ m 波段理想的被动 Q 开关材料^[6-10]。目前,全固态被动调 Q 激光器已经广泛应用在科研、军事等领域,但严重的热效应却阻止了其性能进一步提高。将激光晶体与可饱和吸收体进行热键合处理,并在键合晶体两端直接镀膜构成平-平腔结构,不仅能够有效改善激光器的热效应问题^[11-13],也能够进一步压缩腔长、减少腔内损耗,获得高效率、短脉冲的调 Q 激光输出^[14-16]。2017 年, Li 等^[14]报道了一种 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 激光器,泵浦脉宽为 1 ms 时,获得了 11 个调 Q 脉冲的稳定输出,其脉冲能量为 210 μ J、脉宽为 1.7 ns。2016 年, Dascalu 等^[17]利用键合晶体 Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG,实现了独立的四光斑输出,且光斑间距在毫米量级。

本文研究了激光二极管(LD)端面泵浦的 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 激光器的输出特性。在泵浦光中心波长为 808 nm、光斑直径为 230 μ m、泵浦功率为 6.72 W 的条件下,实现了脉冲宽度为 736 ps、平均功率为 1.41 W、重复频率为 8.46 kHz 的调 Q 激光输出。

1 模拟分析

为研究晶体键合方式对激光器输出特性的影响,首先利用 LASCAD 软件对单 Nd: YAG 晶体、以及三种不同键合方式的 Nd: YAG 激光器的输出特性进行建模分析,键合方式及晶体长度如表 1 所示,晶体的端面尺寸均设置为 3 mm \times 3 mm。四种不同的谐振腔结构及其泵浦方式如图 1(a)~(d)所示。

表 1 激光晶体尺寸表

Table 1 Laser crystal's length

Parameter	Composite crystal			
	Nd: YAG	YAG/Nd: YAG	Nd: YAG/ YAG	YAG/Nd: YAG/ YAG
Crystal length/mm	7	2+5	5+2	1+5+1

在仿真模型中,设置泵浦功率为 90 W,泵浦光斑直径为 400 μ m,腔长为晶体长度 7 mm,输出镜反射率为 70 % 时,仿真所得结果如表 2 所示。由表 2 可知,基于 YAG/Nd: YAG 的激光器,其光束质量因子 M^2 最小,这表明长的前端键合 YAG 晶体能够有效改善热效应对激光器的影响。分析可知,键合晶体能够有效提高激光晶体的散热能力,降低热效应对激光器的影响。基于以上模拟分析,使用 LASCAD 软件模拟分析键合方式对晶体内部温度及热应力分布的影响。四种激光晶体内部的温度分布如图 1(e)~(h)所示,由图可知,键合晶体 YAG/Nd: YAG 的中心温度低于其他晶体的中心温度,且靠近泵浦光一侧的端面温度最低。因此, Nd: YAG 晶体的入射前端键合 YAG 晶体能够有效减少晶体端面的形变量,提高泵浦光的利用率。四种激光晶体内部

的热应力分布如图 1(i)~(l)所示, 由图可知, 前端键合晶体能够有效缓解端面热应力问题, 且能够有效降低热透镜效应对激光器的影响, 避免出现因晶体端面热应力过大而造成晶体破裂现象。

表 2 不同键合晶体对应的激光输出特性仿真结果

Table 2 Simulation results of laser output characteristics corresponding to different composite crystals

Output parameter	Composite crystal			
	Nd: YAG	YAG/Nd: YAG	Nd: YAG/ YAG	YAG/Nd: YAG/ YAG
Threshold/W	3.01	3.17	3.2	3.2
Output power/W	5.03	4.92	4.78	4.83
Thermal focal length/mm	27.69	33.95	29.88	34.49
Spot radius/ μm	56.60	58.20	59.60	60.80
Beam quality M^2	1.19	1.13	1.75	1.17

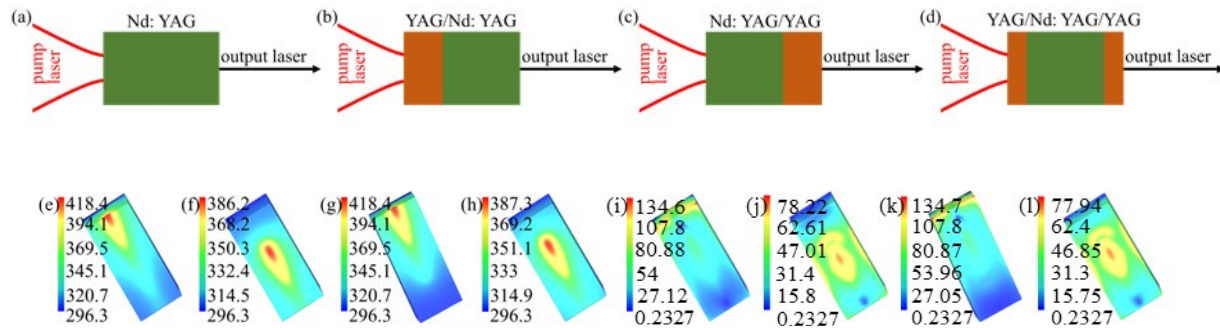


图 1 (a)~(d) 激光晶体示意图; (e)~(h) $P_{in}=10.72\text{ W}$, 激光晶体温度分布切面图; (i)~(l) $P_{in}=10.72\text{ W}$, 激光晶体热应力分布切面图

Fig. 1 (a)-(d) Schematic of laser crystal; (e)-(h) $P_{in}=10.72\text{ W}$, Schematic diagram of temperature distribution inside laser crystals;

(i)-(l) $P_{in}=10.72\text{ W}$, Schematic diagram of thermal stress distribution of laser crystals

将 LASCAD 模拟的 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 激光器仿真结果与已有的研究成果进行对比, 对比结果如表 3 所示, 从表中可知, 短的腔长有利于激光器输出特性的提高。而在键合晶体两端直接镀膜构成平-平腔结构, 在减小激光器尺寸的基础上, 降低腔内损耗, 从而可进一步提高激光器的输出特性。

表 3 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 激光器仿真结果与其他研究成果对比表

Table 3 Comparison of simulation result of YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG passively Q-switched lasers and other research results

Measured parameter	Composite crystal		
	YAG/Nd: YAG/Cr ⁴⁺ : YAG	YAG/Nd: YAG/Cr ⁴⁺ : YAG/YAG ^[16]	YAG/Nd: YAG/Cr ⁴⁺ : YAG ^[14]
Crystal size/ mm^3	$3 \times 3 \times (2+5+2)$	$3 \times 3 \times (1+7+1+1)$	$3 \times 3 \times (2+5.5+1.5)$
Cavity length/mm	9	10	25
Single pulse energy/ μJ	691	18.2	425.8
Pulse width/ns	1.42	1.23	1.9
M^2	1.13	1.18	1.7

2 实验装置及结果

2.1 实验装置

根据模拟仿真结构,对 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 键合晶体进行激光实验研究,实验装置以及采用的晶体分别如图 2(a)和(b)所示。LD 耦合输出光纤的纤芯直径为 200 μm , 波长为 808 nm, 光纤耦合头的光斑放大倍率分别为 1 倍和 2 倍, 实测泵浦光束腰直径 ω_0 分别为 230 μm 、530 μm 。YAG/Nd: YAG/ Cr⁴⁺: YAG 的尺寸为 3 mm \times 3 mm \times (2+5+2) mm。泵浦光入射端 (YAG 端) 镀有 HR@808 nm/HT@1064 nm 的膜层作为前腔镜, Cr⁴⁺: YAG 端镀有 $R = 40\%$ @1064 nm 的反射膜作为输出镜, Cr⁴⁺: YAG 初始透过率为 40%。晶体由铜热沉包裹, 并以水冷方式进行冷却。

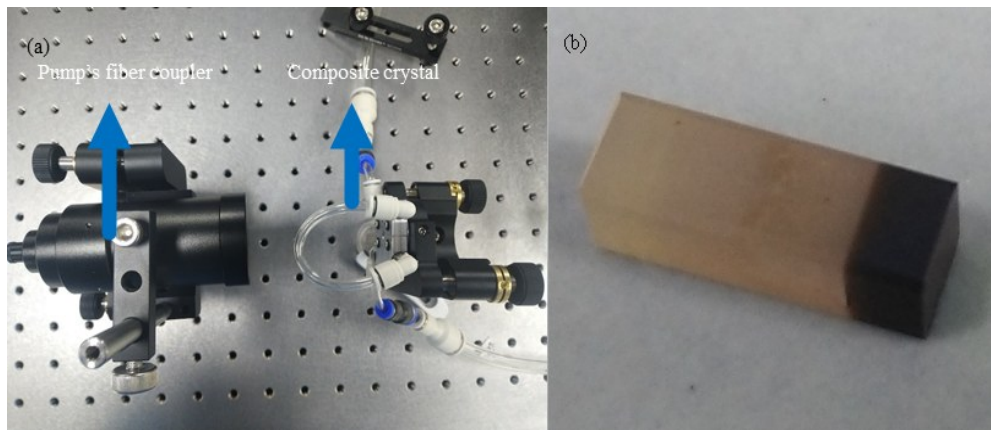


图 2 (a) 实验装置实物图; (b) 键合晶体 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 实物图

Fig. 2 (a) Experimental setup; (b) Physical diagram of composite crystal YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG

2.2 实验结果及分析

理论上,在相同泵浦功率情况下,泵浦光光斑口径越小,光斑处的光功率密度越大,所产生的激光阈值功率越低,但是入射光斑越小也会导致晶体内部热应力加剧。因此,选择合适的泵浦光半径 ω_0 对获得稳定的激光输出具有重要意义。 ω_0 分别在 230 μm 和 530 μm 两种情况下,测得输出光的平均功率 P_{out} 及脉冲宽度随注入泵浦功率 P_{in} 的变化关系如图 3 所示。由图 3(a)可知,在相同泵浦功率情况下, $\omega_0 = 530 \mu\text{m}$ 的激光产生阈值为 $\omega_0 = 230 \mu\text{m}$ 的四倍以上,一方面是由于泵浦功率密度下降,另一方面是泵浦光斑尺寸的增加影响入射光与腔内振荡光的模式匹配,且入射光斑越大腔内模式竞争越严重。该实验结果与泵浦光直径对固体激光器和半导体激光器激光阈值的影响吻合^[18,19]。此外,由图 3(b)可看出,泵浦功率确定的情况下,输出激光的脉冲宽度与 ω_0 正相关。 $\omega_0 = 230 \mu\text{m}$, $P_{\text{in}} = 6.72 \text{ W}$ 时,脉宽测得最小值 736 ps; $\omega_0 = 530 \mu\text{m}$, $P_{\text{out}} = 13.82 \text{ W}$ 时,脉宽测得最小值 1300 ps。其主要原因是泵浦光功率密度减小,导致脉冲产生及饱和吸收体漂白的的时间大幅增加;且随着泵浦功率的增加,调 Q 脉冲激光的脉宽呈先下降后上升的趋势。

当 $\omega_0 = 230 \mu\text{m}$ 时,调 Q 激光的单脉冲时域波形随泵浦功率的变化如图 4 所示。在一定功率范围内, P_{in} 的增加会压缩调 Q 激光的脉冲宽度;但当 P_{in} 进一步增加, Cr⁴⁺: YAG 晶体出现 Q 开关“关不断”的现象,并观察到脉冲串的出现,使得整体脉宽呈上升趋势。

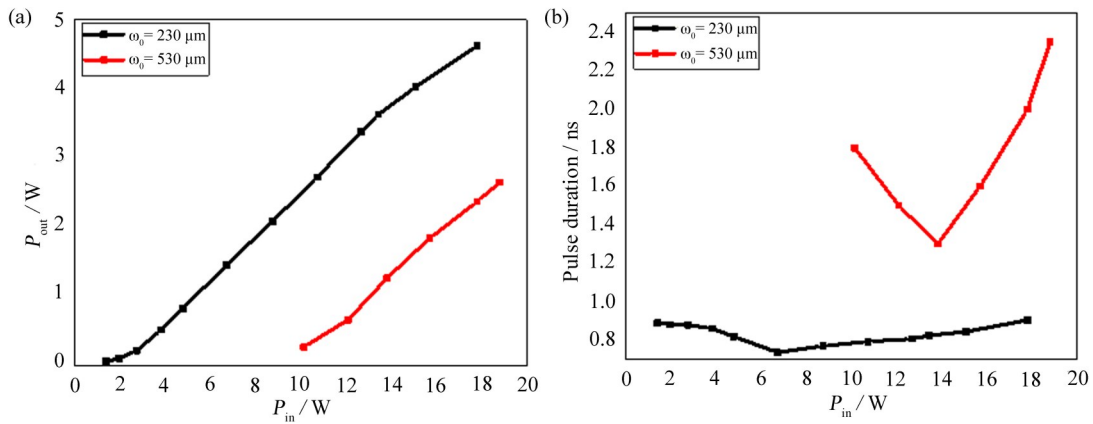


图 3 (a) 输出光平均功率随泵浦功率的变化曲线; (b) 脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线

Fig. 3 (a) Average output power versus pump power; (b) Pulse duration versus pump power

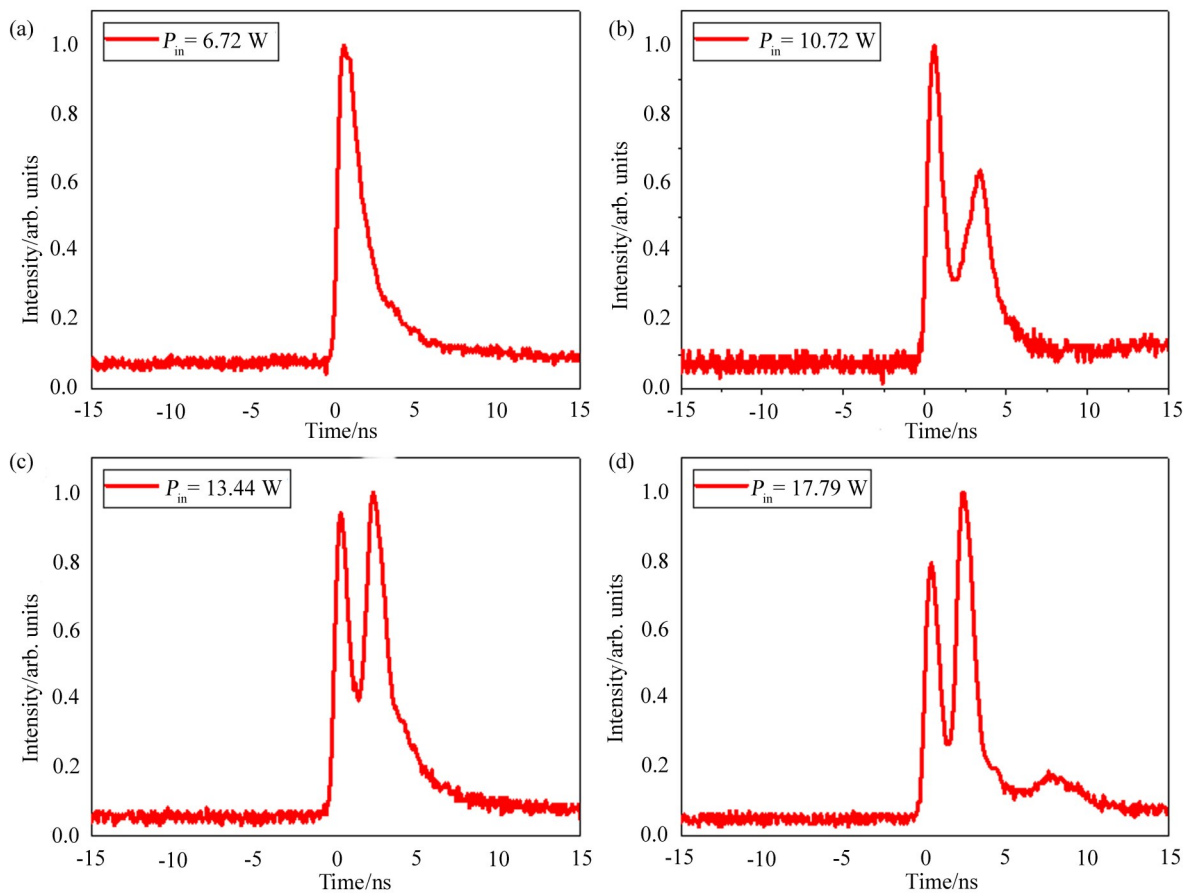


图 4 单脉冲波形示意图(10 ns/div)

Fig. 4 Schematic diagram of single pulse trace (10 ns/div)

脉冲的重复频率随 P_{in} 的变化关系如图 5 所示。从中可见, ω_0 越大, 重复频率越低。主要原因是: 随着 ω_0 的增加, 入射光的功率密度减小, 导致 $Cr^{4+}: YAG$ 达到饱和状态所需时间增长, 重复频率呈下降趋势。结合图 3~5 可知, $\omega_0 = 230 \mu m$ 时, 激光器的输出特性较好, 故选取泵浦光束腰直径为 $230 \mu m$ 进行后续实验。

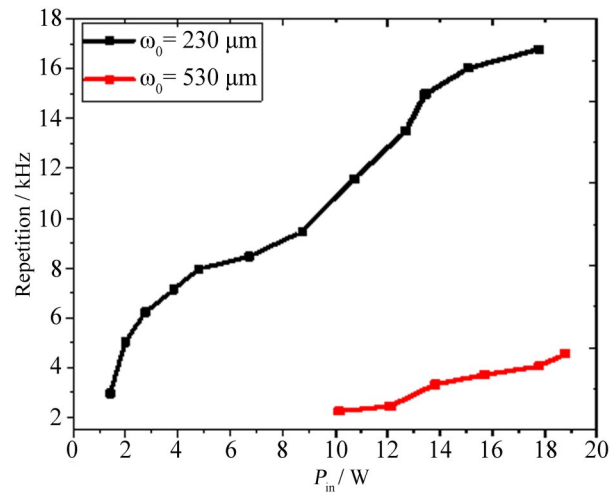


图5 输出光重复频率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 5 Repetition rate versus pump power

调Q激光的近场光斑随 P_m 的变化关系如图6所示。由图可知,随着 P_m 的增加,晶体热累积量变大,导致晶体出现热致双折射效应,进而导致激光光斑对称性变差。当 $P_m = 10.72$ W时, $P_{out} = 2.70$ W,实验测得调Q激光x和y方向上的光斑半径如图7所示。由图可知,热致双折射效应导致晶体不同位置处的折射率发生改变,进而导致输出光半径出现偏差,通过计算可得, $M_x^2 = 4.06$, $M_y^2 = 3.19$ 。

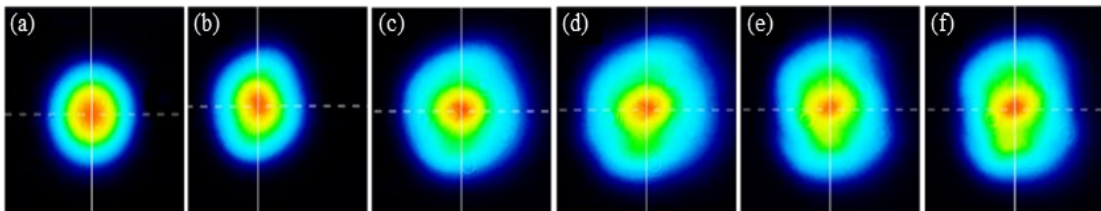


图6 激光光斑随泵浦功率 (a) 3.8 W; (b) 10.72 W; (c) 13.5 W; (d) 14.8 W; (e) 16.7 W; (f) 17.8 W 的变化关系图

Fig. 6 Laser's beam distribution versus pump power (a) 3.8 W; (b) 10.72 W; (c) 13.5 W; (d) 14.8 W; (e) 16.7 W; (f) 17.8 W

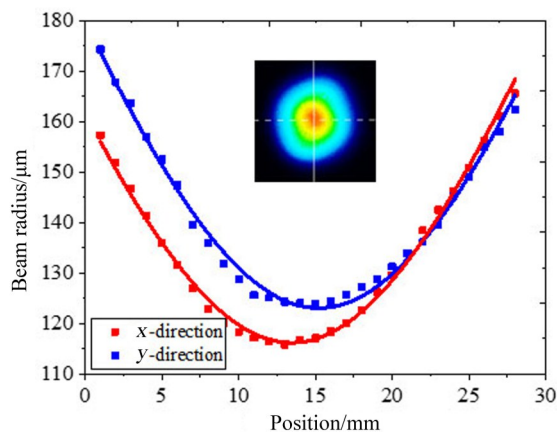


图7 光束质量因子示意图

Fig. 7 Schematic diagram of beam quality factor

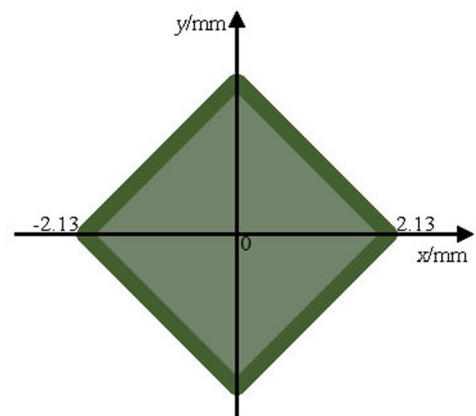


图8 键合晶体端面示意图

Fig. 8 End face diagram of composite crystal

上述实验中, 泵浦光焦点位置位于 Nd: YAG 的中心, 由于泵浦光半径仅为百微米量级, 因此研究不同焦点位置(水平和轴向)对激光器输出特性的影响, 将有助于优化激光输出参数和激光器稳定性。图 8 为晶体端面示意图, 以 Nd: YAG 晶体端面正中心为原点, 焦点沿 x 轴变化, 实验采用调节精度为 10 μm 位移平台精准控制焦点位置的变化。结果表明激光器阈值未发生改变, 但调 Q 激光的近场光斑发生恶化。P_{in} = 10.72 W 时, 激光光斑与焦点位置的关系如图 9 所示, 当焦点位置发生变化时, 晶体内部热应力分布不均匀, 导致晶体不同位置处的折射率发生改变, 进而导致调 Q 激光的光斑恶化。

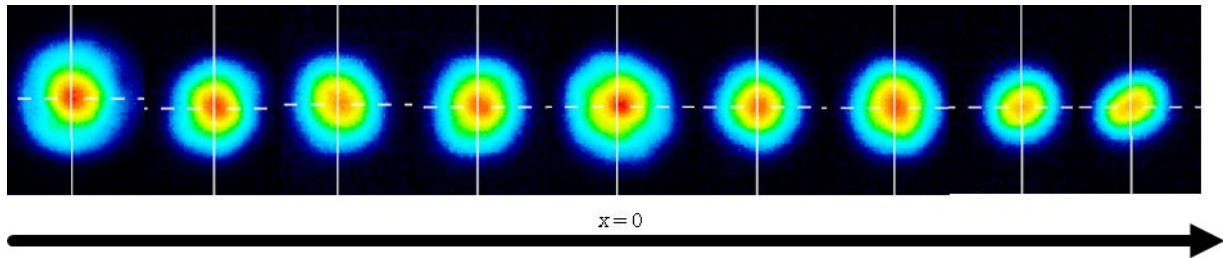


图 9 激光光斑随焦点位置变化关系图

Fig. 9 Laser's beam distribution versus focus position

图 10 为焦点位置沿晶体轴向变化的示意图, 设置 YAG 和 Nd: YAG 键合面为原点, 焦点位置沿晶体轴向 (z 轴) 变化, 使用位移平台精准控制焦点位置。实验发现, 当 z = 0 mm 时, 激光阈值功率最低; 随着 |z| 的增大, 激光阈值呈上升趋势。但是 z = (0 ± 0.5) mm 范围内, 激光的产生阈值变化并不明显 (< 0.2 W), 这意味着该键合结构对泵浦光轴向位置具有较强的不敏感性, 容易实现稳定的激光输出。

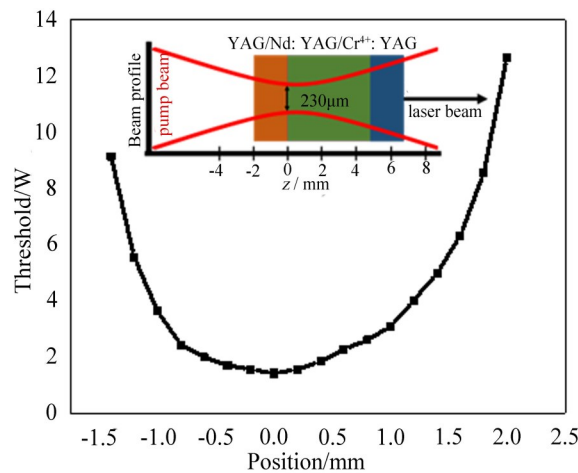


图 10 激光阈值随焦点位置的变化曲线 (插图: 焦点位置沿晶体轴向变化示意图)

Fig. 10 Laser's threshold versus focus position (insert: focus position along crystal axis)

3 结 论

对基于键合晶体的 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 激光器进行了研究。使用 LASCAD 软件建立光路模型, 对激光系统的工作物质及可饱和吸收体进行详细设计与优化。基于仿真结果, 对 YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG 被动调 Q 激光器进行实验研究, 在泵浦光中心波长为 808 nm、光斑直径为 230 μm、泵浦功率为 6.72 W

的条件下, 获得了平均功率 1.41 W、脉宽 736 ps、重复频率 8.46 kHz 的调 Q 脉冲激光输出。实验结果表明, 当泵浦光焦点位于增益介质端面中心、且位于 YAG 和 Nd: YAG 键合交界处时, 激光器具有最佳的输出特性。本研究结果对优化键合晶体设计、实现稳定的小型化全固态被动调 Q 激光器具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Tsunekane M, Inohara T, Ando A, *et al.* High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(2): 277-284.
- [2] Pavel N, Tsunekane M, Kanehara K, *et al.* Composite all-ceramics, passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG monolithic micro-laser with two-beam output for multi-point ignition [C]. *IEEE Conference on Laser Science to Photonic Applications*. Baltimore, USA, IEEE, 2011.
- [3] Ma Y F, He Y, Yu X, *et al.* Multiple-beam, pulse-burst, passively Q-switched ceramic Nd:YAG laser under micro-lens array pumping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24955-24961.
- [4] Zayhowski J J. Compact solid-state sources and their applications [C]. *SPIE Conference on Solid State Laser Technologies and Femtosecond Phenomena*. London, UK, SPIE, 2004.
- [5] Dong J, Ma J. Advances in passively Q-switched Yb³⁺-doped laser materials microchip solid-state lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2278-2288.
董俊, 马剑. 被动调 Q 掺 Yb³⁺ 激光材料固体微片激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2278-2288.
- [6] Tang J L, Bai Z X, Zhang D, *et al.* Advances in all-solid-state passively Q-switched lasers based on Cr⁴⁺:YAG saturable absorber [J]. *Photonics*, 2021, 8(4): 93.
- [7] Koromyslov A L, Tupitsyn I M, Cheshev E A. Dual-wavelength Q-switched laser based on a lens-shaped Nd:YAG active element and a Cr⁴⁺:YAG passive Q-switch [J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(2): 95-97.
- [8] Liu Y, Yan R P, Wu W T, *et al.* High-repetition-rate passively Q-switched Nd:GdTaO₄ 1066 nm laser under 879 nm pumping [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103025.
- [9] Dou X D, Yang J N, Ma Y J, *et al.* Passive Q-switching of a Yb:LuVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG: Approaching the intrinsic upper limit of repetition rate [J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35(6): 064201.
- [10] Cui C, Wang Y L, Lv Z W, *et al.* Development on high resolution dual wavelength passive Q-switched laser system for pseudo-thermal light source [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(1): 6-8, 62.
崔璨, 王雨雷, 吕志伟, 等. 用于赝热光鬼成像双波长高分辨激光光源研制 [J]. *光电技术应用*, 2019, 34(1): 6-8, 62.
- [11] Guo X Y, Tokita S, Kawanaka J. 12 mJ Yb:YAG/Cr:YAG microchip laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 459-461.
- [12] Li J Z, Chen Z Q, Zhu S Q. High-peak-power and short-pulse laser with a Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0606007.
李景照, 陈振强, 朱思祁. 基于 Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体的高峰值功率短脉冲激光器. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0606007.

- [13] Li J Z, Zhu S Q. High-peak-power short-pulse laser using a Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal [J]. *Optik*, 2019, 176: 630-635.
- [14] Li X D, Zhou Y P, Yan R P, *et al.* A compact pulse burst laser with YAG/Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite crystal [J]. *Optik*, 2017, 136: 107-111.
- [15] Yan R P, Li X D, Zhang Y B, *et al.* High-repetition-rate, high-peak-power burst mode laser with YAG/Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG composite crystal [J]. *Optik*, 2018, 175: 263-267.
- [16] Huang X S, Hui Y L, Jiang M H, *et al.* Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG micro laser with high beam quality [C]. *SPIE International Symposium on Optoelectronic Technology and Application*. Beijing, China, SPIE, 2016.
- [17] Dascalu T, Croitoru G, Grigore O, *et al.* High-peak-power passively Q-switched Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG composite laser with multiple-beam output [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 267-271.
- [18] Lin Z, Gao C, Gao M, *et al.* Diode-pumped single-frequency microchip CTH:YAG lasers using different pump spot diameters [J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(1): 81-84.
- [19] Liu X, Klinkhammer S, Wang Z Y, *et al.* Pump spot size dependent lasing threshold in organic semiconductor DFB lasers fabricated via nanograting transfer [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 27697-27706.