

基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器研究

马建立¹,张玲²,甘新昌¹,栾志浩³,李星星⁴,郭伟钦⁴,李宏峰^{3*}

(1.深圳光韵达光电科技股份有限公司,广东 深圳 518057;2.中国科学院半导体研究所 中国科学院半导体材料科学重点实验室,北京 100083;3.北京印刷学院 机电工程学院,北京 102600;4.五邑大学 数字光芯片联合实验室,广东 江门 529020)

摘要: Nd:YAG 陶瓷具有可大尺寸、低成本制备的特点,但基于 Nd:YAG 陶瓷的锁模激光器尚未得到大量验证。采用 Nd:YAG 陶瓷作为增益介质、半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模元件,优化设计了 W 型谐振腔。在泵浦功率为 11.49 W 时,获得了波长为 1.06 μm 、重复频率为 144 MHz 和输出平均功率为 1.25 W 的稳定连续锁模激光,锁模激光的脉冲宽度为 33.6 ps,单脉冲能量为 8.7 nJ,峰值功率为 0.26 kW。实验结果表明: Nd:YAG 陶瓷作为增益介质,可应用于被动锁模超快皮秒激光器中。

关键词: 激光二极管泵浦; Nd:YAG 陶瓷; 被动锁模; 皮秒脉冲; 激光器

中图分类号: TH248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)10-0007-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of passively mode-locked laser based on Nd:YAG ceramic

MA Jianli¹, ZHANG Ling², GAN Xinchang¹, LUAN Zhihao³, LI Xingxing⁴, GUO Weiqin⁴, LI Hongfeng^{3*}

(1. Shenzhen Sunshine Laser & Electronics Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518057, China; 2. Key Lab of

Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;

4. Joint Lab of Digital Optical Chip, Wuyi University, Jiangmen Guangdong 529020, China)

Abstract: Nd:YAG ceramics have the characteristics of large size and low cost, but the mode-locked laser based on Nd:YAG ceramics has not been widely verified. Using Nd:YAG ceramic as gain medium and semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) as mode-locked element, the W-type resonator is optimized. When the pump power is 11.49 W, 1.25 W stable mode-locked laser with laser wavelength of 1.06 μm and repetition frequency of 144 MHz is generated. The pulse width of the mode-locked laser is 33.6 ps, the single pulse energy is 8.7 nJ, and the peak power is 0.26 kW. The experimental results show that Nd:YAG ceramics can be used as gain medium in passively mode-locked ultrafast picosecond lasers.

Key words: laser diode pump; Nd:YAG ceramic; passive mode-locking; picosecond pulse; laser

0 引言

由于激光技术的广泛应用,21 世纪被誉为“激光加工时代”。在高端激光精密加工中,相比于连续波和

收稿日期:2021-01-04。

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B090904002)资助;北京市实培计划项目资助;深圳市工业和信息化产业发展专项资金扶持计划项目(ZDYBH201900000008)资助;北京印刷学院基础研究重点项目(Ea201807)资助;北京市教委科研计划(KM201810015006)资助。

作者简介: 马建立(1980—),男,博士,广东省激光精密制造工程中心主任,现就职于深圳光韵达光电科技股份有限公司,主要从事激光技术及激光应用方面的研究工作,主持了广东省重点领域研发计划项目、深圳市产业发展专项扶持计划项目等。

***通信作者:** 李宏峰(1977—),女,博士,副教授,主要研究方向为激光器频率变换、智能算法等方面。



纳秒脉冲激光,皮秒超快激光具有与物质作用时间短、峰值功率高和加工精细度高等优点,在智能手机屏幕切割、手机摄像头切割、半导体晶圆切割、微孔加工和硬脆玻璃等透明材料加工领域,具有非常重要的应用前景^[1-9]。锁模是获得皮秒脉冲激光的有效方法之一。相比于主动锁模,被动锁模具有结构简单、成本低等优点,被动锁模技术是在工业中被广泛应用的重要技术之一^[10-13]。

Nd:YAG 晶体是被动锁模激光器中常用的固体激光晶体之一,然而 Nd:YAG 晶体的生长周期长、制备成本较高。与 Nd:YAG 晶体相比,Nd:YAG 陶瓷具有可高掺杂、易于大尺寸制备、制备周期短和制造成本低等优点,成为激光领域的研究热点^[14]。2004 年,杨成伟等

马建立,张玲,甘新昌,等:基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器研究

人^[15]研制出激光二极管(LD)泵浦的 Nd:YAG 陶瓷微型激光器件,当泵浦功率为 1.5 W 时,获得了 516 mW 的 1064 nm 连续激光输出。2009 年,兰瑞君等人^[16]报导了 LD 端面泵浦 Nd:YAG 陶瓷、磷酸氧钛钾(KTP)腔内倍频的全固态连续波绿光激光器,当泵浦功率为 21.6 W 时,1064 nm 基频输出为 11.3 W,采用 KTP 晶体腔内倍频,获得了 1.86 W 的 532 nm 绿光输出。2010 年,马庆磊等人^[17]研究了 808 nm 侧面泵浦国产 Nd:YAG 陶瓷棒的激光输出特性,当泵浦功率为 60 W 时,获得了 21.6 W 的 1064 nm 连续激光输出,光-光转换效率为 36%,并通过对比实验得出 Nd:YAG 陶瓷的性能已经接近于 Nd:YAG 晶体。2012 年,吴昊等人^[18]采用 Nd:YAG 陶瓷,在泵浦功率为 145 W、谐振腔输出耦合镜透过率为 20% 时,获得了 44.28 W 的 1064 nm 连续激光输出,腔内插入 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 开关,在 124 W 泵浦功率下,获得了重频为 10.03 kHz,平均功率为 4.62 W 的准连续激光输出。2017 年,李密等人^[19]制作了双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条,当二极管总泵浦功率为 18.06 kW 时,通过双程放大提取了 7.08 kW 的激光功率,光-光转换效率高达 39.2%,单程传输的退偏振约为 3.2%。但是,关于 Nd:YAG 陶瓷的超快激光研究较少。本文研究基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模皮秒激光特性。

1 基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器

1.1 实验装置

基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器的实验装置示意图如图 1 所示。泵浦源采用中心波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器,光纤的芯径为 200 μm、数值孔径为 0.22。泵浦光经过 1:2 的光学耦合器并透过双色镜 M₁ 聚焦到 Nd:YAG 陶瓷中。双色镜 M₁ 为平面镜,镀有 808 nm 高透膜和 1.06 μm 高反膜;输出镜 M₂ 是平面镜,镀 1.06 μm 波长透过率 T=10% 的膜;M₃ 和 M₄ 是曲率半径分别为 500 mm 和 150 mm 的平凹镜,都镀有 1.06 μm 的高反膜。激光增益介质是 Φ3 mm(直径)×5 mm(长)、0.6a% 掺杂的 Nd:YAG 陶瓷,Nd:YAG 陶瓷 2 个端面镀有 1.06 μm 的高透膜。Nd:YAG 陶瓷

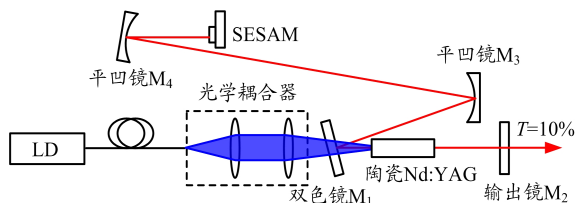


图 1 基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器的实验装置示意图

的吸收光谱、发射光谱、热导率以及荧光寿命等都和单晶 Nd:YAG 相似^[15]。Nd:YAG 陶瓷制作成本低、制备时间短且易于大尺寸制备,更适合大规模生产;同时,在介质性能方面具有更宽范围的可掺杂浓度,为激光器设计带来更广阔的选择范围,因此 Nd:YAG 陶瓷在大批量应用方面比单晶更具优势^[16]。锁模调制元件为半导体可饱和吸收镜(SESAM)。

1.2 W 型谐振腔设计

本文采用上述光学器件对谐振腔进行优化,并设计出各光学器件之间的最佳距离。稳定性好的谐振腔是激光器锁模必要条件,稳定的谐振腔指高斯光束经过一闭合路径的传播和变换后满足自洽条件。采用高斯光束变换的 ABCD 传输矩阵设计 W 型谐振腔,使泵浦光和振荡光在激光增益介质中具有好的模式匹配,从而获得高光束质量激光输出。此外,根据连续锁模条件为谐振腔设计提供依据。本文通过理论推导得到连续锁模所需的腔内最小单脉冲能量 E 为:

$$E = \sqrt{F_{\text{sat},l} A_{\text{sat},l} F_{\text{sat},A} A_{\text{sat},A} R} \quad (1)$$

其中, $F_{\text{sat},l}$ 为增益介质的饱和通量, $A_{\text{sat},l}$ 为增益介质中的光斑面积, $F_{\text{sat},A}$ 为可饱和吸收体的饱和通量, $A_{\text{sat},A}$ 为可饱和吸收体中的光斑面积, R 为可饱和吸收体的调制深度。

由式(1)可知,为了减小连续锁模所需的腔内最小单脉冲能量,可以适当减小振荡光在增益介质和可饱和吸收体中的光斑面积。

通过优化设计, W 型谐振腔长度参数如下: M₂ 距离 Nd:YAG 陶瓷的右端面 77 mm, M₁ 距离 Nd:YAG 陶瓷的左端面 20 mm, M₁ 与 M₃ 相距 224 mm, M₃ 与 M₄ 相距 642 mm, M₄ 与 SESAM 相距 77 mm。

2 实验结果

激光输出平均功率随泵浦光功率变化如图 2 所示, 阈值泵浦光功率为 1.70 W, 随着泵浦光功率增加, 激光输出平均功率接近于线性增加。当泵浦光功率为 7.36 W、激光输出平均功率为 0.72 W 时, 实现

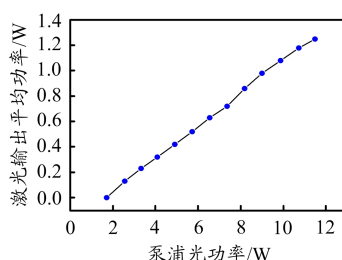


图 2 激光输出平均功率随泵浦光功率变化曲线图

了连续锁模激光运转。实验结果表明:当泵浦光功率为 10.73 W 时,激光输出平均功率为 1.18 W,光-光转换效率为 11%;当泵浦光功率为 11.49 W 时,获得波

长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、重复频率为 144 MHz 、激光输出平均功率为 1.25 W 的连续锁模激光运转,光-光转换效率为 10.9% 。继续增加泵浦功率,锁模激光失锁。

连续锁模激光脉冲波形使用示波器测量,本文实验采用安捷伦 DSO6104A 型 1 GHz 带宽的示波器,得到稳定的连续锁模激光脉冲序列图如图 3 所示。锁模激光的脉冲间隔周期为 6.94 ns ,与实验测量结果一致。锁模激光的脉冲宽度采用自行搭建的自相关仪进行测量,锁模激光通过 45° 半透半反的镜片分成透射光路和反射光路, 45° 半透半反镜片镀有对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光 50% 透过率和 50% 反射率的膜。在反射光路上有光路延迟装置,通过调节光路延迟装置改变反射光路的长度,从而改变反射光路和透射光路的光程差,反射光和透射光通过聚焦透镜聚焦到和频晶体中,和频信号通过探测器探测。测量结果如图 4 所示,脉冲宽度测量数据符合高斯拟合,测得的脉冲宽度为 33.6 ps ,属于超快激光加工常用的脉冲宽度。当输出功率为 1.25 W 时,单脉冲能量为 8.7 nJ ,峰值功率为 0.26 kW 。该研究表明,基于 Nd:YAG 陶瓷的被动锁模激光器可以获得稳定的皮秒激光输出。

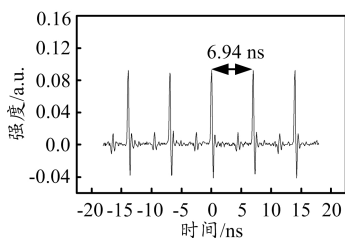


图3 锁模激光脉冲序列测量图

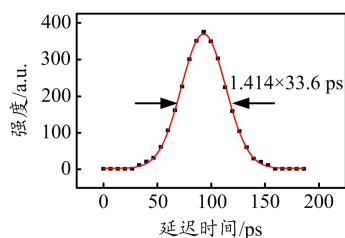


图4 锁模激光脉冲宽度数据拟合图

3 结束语

本文采用 $0.6\text{a}\%$ 掺杂的 Nd:YAG 陶瓷,在泵浦功率为 11.49 W 时,获得了波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、重复频率为 144 MHz 以及平均输出功率为 1.25 W 的连续锁模激光,锁模激光脉冲宽度为 33.6 ps ,单脉冲能量为 8.7 nJ ,峰值功率为 0.26 kW 。随着 Nd:YAG 陶瓷制备技术的不断提高,可以获得更高输出功率和转换效率的锁模激光。该研究验证了 Nd:YAG 陶瓷在超快激光器中应用的可行性,后续可采用 Nd:YAG 陶瓷进行激光功率放大,获得满足工业加工应用的高功率超快激光;同时,该研究为发挥 Nd:YAG 陶瓷制备的大尺寸、低成本特点,降低工业超快激光器成本,进一步推广 Nd:YAG 陶瓷在工业皮秒激光器中的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] TAO L L, HUANG X W, HE J S, et al. Vertically standing PtSe_2 film: a novel saturable absorber for passively mode-locked Nd:LuVO₄ laser [J]. Photonics Research, 2018, 6(7): 750–755.
- [2] ALEXANDER W, THOMAS H, PATRICK M, et al. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR [J]. Phys. Procedia, 2011, 12: 292–301.
- [3] ASHKENASI D, ROSENFELD A, VAREL H, et al. Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses [J]. Applied Surface Science, 1997, 120: 65–80.
- [4] GUO L, WANG G L, ZHANG H B, et al. High-power picoseconds 355 nm laser by third harmonic generation based on CsB_3O_5 Crystal [J]. Applied Physics B, 2007, 88(2): 197–200.
- [5] 尹鹏宇. 超快激光加工透明脆性材料工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [6] 段金鹏. 皮秒激光加工系统与精细钻孔工艺的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [7] 王成. 皮秒激光加工系统研制及工艺试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [8] 庞继伟, 王超, 蔡玉奎. 玻璃材料激光加工技术的研究进展[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 417–428.
- [9] 李乾坤, 刘学青, 成荣. 基于激光加工的玻璃透镜阵列制备[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 131–136.
- [10] 高月, 宋秋艳, 陈根祥. 被动锁模激光器的关键技术与研究进展[J]. 光通信技术, 2015, 39(3): 14–17.
- [11] 孙旭, 贾东方, 李梓豪, 等. 长腔被动锁模掺铒光纤激光器的方波脉冲产生[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 48–53.
- [12] YIM J H, CHO W B, LEE S, et al. Fabrication and characterization of ultrafast carbon nanotube saturable absorbers for solid-state laser mode locking near $1\text{ }\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93: 161106-1–161106-3.
- [13] TAN W D, SU C Y, KNIZE R, et al. Mode locking of ceramic Nd: Yttrium aluminum garnet with graphene as a saturable absorber [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96: 031106-1–031106-3.
- [14] IKESUE A. Polycrystalline Nd: YAG ceramics lasers[J]. Optical Materials, 2002, 19(1): 183–187.
- [15] 杨成伟, 霍玉晶, 何淑芳, 等. LD 泵浦的 Nd:YAG 陶瓷激光器[J]. 光电子·激光, 2004, 15(7): 787–789.
- [16] 兰瑞君, 刘宏, 王正平, 等. LD 抽运的 Nd:YAG 陶瓷/KTP 绿光激光器[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7686–7689.
- [17] 马庆磊, 宗楠, 鲁远甫, 等. 高效率侧面泵浦国产 Nd:YAG 陶瓷激光器[J]. 光电子·激光, 2010, 21(1): 19–21.
- [18] 吴昊, 李洪祚, 王一帆, 等. 连续侧面泵浦 Nd:YAG 陶瓷激光器被动调 Q 研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 278–282.
- [19] 李密, 胡浩, 高清松, 等. 高功率双浓度掺杂的 Nd:YAG 复合陶瓷板条激光器[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 168–173.