【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

百千瓦级高峰功率 Tm:YLF 激光器

任席奎^{1,2}, 裴继红¹, 阮双琛²

1) 深圳大学电子与信息工程学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳市激光工程重点实验室,
先进光学精密制造技术广东普通高校重点实验室, 深圳大学物理与光电工程学院, 广东深圳 518060

摘要: 为研制一款具有高峰值功率与高光束质量的 $2\ \mu\text{m}$ 波段固体激光器, 搭建二极管激光器 (laser diode, LD) 单端抽运声光调 Q Tm:YLF 激光器. 激光器的输出中心波长为 $1\ 879\ \text{nm}$, 采用声光调 Q 技术, 得到重复频率为 $2\ \text{kHz}$ 的脉冲激光输出, 峰值功率达到 $100.2\ \text{kW}$, 最大单脉冲能量为 $5.25\ \text{mJ}$, 最短脉冲宽度为 $52.2\ \text{ns}$, 光-光转换率为 30% , 斜率效率为 33% . 光束 M^2 因子分别为 x 方向 1.51 和 y 方向 1.71 , 光束质量良好. 该激光器同时具有高峰值功率与优良光束质量的特点, 可广泛用于透明塑料的精细加工、激光医疗以及工业打标等领域.

关键词: 光电子与激光技术; 固体激光器; 声光调 Q; Tm:YLF 晶体; 大功率激光器; 中红外激光器
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.04403

Hundred-kilowatt-level high peak power Tm:YLF laser

REN Xikui^{1,2}, PEI Jihong¹, and RUAN Shuangchen²

1) College of Electronics and Information Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher Education Institutes, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to develop a $2\ \mu\text{m}$ band solid state laser with high peak power and high beam quality, we construct a laser diode single-end pumped Q-switch Tm:YLF laser, the central wavelength of which is $1\ 879\ \text{nm}$ and actively Q-switched using an acoustic-optics modulator working at a repetition frequency of $2\ \text{kHz}$. The output peak power up to $100.2\ \text{kW}$ is achieved with the single pulse energy of $5.25\ \text{mJ}$, the shortest pulse width of $52.2\ \text{ns}$, corresponding to a slope efficiency of 33% and an optical conversion efficiency of 30% . The output beam shows the good beam quality of $M_x^2 = 1.51$ and $M_y^2 = 1.71$. The laser has high peak power and excellent beam quality, which can be widely used in the fine processing of transparent plastics, laser medical treatment, industrial laser marking and other fields.

Key words: optoelectronics and laser technology; solid laser; acoustic-optics Q-switched; Tm:YLF crystal; high power laser; mid-infrared laser

工作波长在 $2\ \mu\text{m}$ 附近的激光在医学、遥感、激光雷达与中红外激光产生等领域具有广泛应用.

在医学上, $2\ \mu\text{m}$ 激光可用作激光手术刀, 具有对人体组织穿透深度浅, 手术精度高的特点^[1]; 在遥

Received: 2019-11-25; **Accepted:** 2020-01-03

Foundation: National Key S & T Research and Development Program of China (2016YFA0401100); Shenzhen Science and Technology Research Foundation (JCYJ20160331114355870)

Corresponding author: Professor RUAN Shuangchen. E-mail: scruan@szu.edu.cn

Citation: REN Xikui, PEI Jihong, RUAN Shuangchen. Hundred-kilowatt-level high peak power Tm:YLF laser [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 403-407. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

感方面, $2\ \mu\text{m}$ 激光可用于测量大气中水蒸汽与 CO_2 含量, 用相干多普勒雷达测量风切变与风速^[2]; $2\ \mu\text{m}$ 波段激光对大气和烟雾穿透能力强, 适合应用于激光测距与激光雷达领域; $2\ \mu\text{m}$ 激光也适合作为抽运源, 通过光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 方式产生中红外激光 ($3\sim 5$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$)^[3-4].

与光纤激光器相比, 固体激光器具有光束质量好和峰值功率高等特点. 近年来, 国内外科学家围绕 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光器展开大量研究. YAO 等^[5]报道一种 InGaAs/GaAs 作为可饱和吸收体的被动调 Q Tm:YAP 激光器, 实现 $1\ 940\sim 1\ 964\ \text{nm}$ 的宽波段调谐, 产生激光的最短脉宽为 $447\ \text{ns}$, 最大单脉冲能量为 $28.1\ \mu\text{J}$. 李哲等^[6]实现 $480\ \text{mJ}$ 的电光调 Q Cr,Tm,Ho:YAG 激光器的 $2\ \mu\text{m}$ 输出, 脉冲宽度 $80\ \text{ns}$, 但其采用闪光灯泵浦方式, 光束质量难以保证. FAORO 等^[7]利用 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 作为可饱和吸收体, 在 Tm:YLF 激光器中获得脉宽 $14\ \text{ns}$, 峰值功率 $65\ \text{kW}$ 的 $1\ 900\ \text{nm}$ 波段输出. FENG 等^[8]采用 Tm:LSO 晶体作为增益介质, 通过被动调 Q 方式实现脉宽 $7.8\ \mu\text{s}$ 、单脉冲能量 $14\ \mu\text{J}$ 的 $2\ 038\ \text{nm}$ 激光输出. HOU 等^[9]采用石墨烯可饱和吸收镜, 获得脉宽为 $735\ \text{ns}$ 、单脉冲能量为 $8.5\ \mu\text{J}$ 、平均功率为 $362\ \text{mW}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出. 欧阳德钦等^[10]采用光纤激光器实现平均功率 $100\ \text{W}$ 的脉冲激光输出, 但由于重复频率过高, 峰值功率仅为 $12.3\ \text{kW}$. SEBBAG 等^[11]报道采用 Cr:ZnS 作为可饱和吸收体的 Tm:YAP 被动调 Q 激光器, 获得波长为 $1\ 935\ \text{nm}$ 、脉冲宽度为 $35.8\ \text{ns}$ 、单脉冲能量为 $1.85\ \text{mJ}$ 的脉冲激光输出. LIU 等^[12]使用 LiNbO_3 电光调制, 实现脉宽为 $107.4\ \text{ns}$ 、重复频率为 $200\ \text{Hz}$ 、单脉冲能量为 $1.65\ \text{mJ}$, 峰值功率为 $15.4\ \text{kW}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出. SHEINTOP 等^[13]报道一种高峰值功率窄线宽可调谐的声光调 Q Tm:YLF 激光器, 峰值功率可达 $53.2\ \text{kW}$. 由以上研究结果可见, 有关 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光器的研究主要集中在不同脉冲激光调制方式, 以及不同增益晶体方面, 以实现 $2\ \mu\text{m}$ 波段更短的脉冲宽度与更高峰值功率激光输出. 但由于 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光对水汽的吸收强烈, 高峰值功率可能导致光学零件的损坏. 因此, 室温下实现 $2\ \mu\text{m}$ 的高峰值功率激光输出并不容易, 鲜有报道在室温条件下, 仅通过振荡器实现峰值功率超过 $100\ \text{kW}$ 的 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光输出.

本研究在室温条件下, 采用激光端面泵浦

Tm:YLF 晶体, 通过合理的腔型设计, 实现峰值功率 $100\ \text{kW}$ 的 $1\ 879\ \text{nm}$ 激光输出, 对应脉宽为 $52.2\ \text{ns}$, 重复频率为 $2\ \text{kHz}$, 最大平均输出功率为 $10.5\ \text{W}$, 斜率效率为 33% , 光-光转换效率为 30% , x 和 y 方向 M^2 因子分别为 1.51 和 1.71 . 所研制激光器具有高的峰值功率与良好的光束质量, 有望用于透明塑料的精细加工、激光医疗以及激光打标等领域.

1 实验装置

图 1 为 Tm:YLF 激光器的实验装置示意图. 为确保激光具有较高的光束质量, 实验采用端面泵浦方式, 二极管激光器 (laser diode, LD) 的最大泵浦功率为 $120\ \text{W}$, 中心波长为 $793\sim 796\ \text{nm}$, 其工作波长可以随着温度的调节而变化 ($0.3\ \text{nm}/^\circ\text{C}$). 通过仔细调节工作温度, 实现 LD 输出波长与 Tm:YLF 的吸收谱相匹配, 从而实现最大转换效率. LD 通过纤芯直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的多模光纤 ($\text{NA}=0.22$) 输出, 并将其耦合至 $1.0:1.5$ 的扩束器中, 经扩束器出来的泵浦光汇聚至 Tm:YLF 晶体中心, 此时泵浦光光斑直径约为 $300\ \mu\text{m}$. 图 1 中的 M_1 、 M_2 与 M_3 分别为激光器的泵浦镜、 45° 二色镜与输出镜, 均为厚度 $3\ \text{mm}$ 、直径 $20\ \text{mm}$ 的 JGS1 石英玻片. 其中, M_1 为平凹镜, 双面均对 $792\sim 796\ \text{nm}$ 高透 (透射率 $T > 95\%$), 凹面 (曲率半径为 $200\ \text{mm}$) 镀有 $1\ 850\sim 2\ 000\ \text{nm}$ 的增反膜 (反射率 $R > 99.9\%$); M_2 朝向谐振腔的一面镀有 $1\ 850\sim 2\ 000\ \text{nm}$ 的增反膜 ($R > 99.9\%$); M_3 凹面 (曲率半径为 $200\ \text{mm}$) 镀有 $1\ 850\sim 2\ 000\ \text{nm}$ 的部分透射膜, 实验采用透射率 T 分别为 10% 和 15% 的 2 种输出镜. Tm:YLF 晶体是 σ 偏振的 a 轴晶体, 是激光器的工作物质, Tm^{3+} 掺杂质量分数为 2% , 晶体尺寸为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$, 两端镀有对 $792\sim 796\ \text{nm}$ 和 $1\ 850\sim 2\ 000\ \text{nm}$ 的增透膜 ($R > 99.9\%$). 声光 Q 开关两端

图 1 Tm:YLF 声光调 Q 激光器实验装置

Fig. 1 (Color online) Experimental setup of Q-switch Tm:YLF laser

镀有对 792 ~ 796 nm 和 1 850 ~ 2 000 nm 的增透膜 ($R > 99.9\%$), 频率能在 1 ~ 100 kHz 调节, 用 50 W 的电源驱动. 为了抑制腔内的热透镜效应, 必须对晶体与声光 Q 开关晶体散热. Tm:YLF 晶体用厚度为 0.1 mm 的铜片包裹, 置于紫铜热沉上, 紫铜热沉与声光晶体经循环水致冷, 用恒温水箱将温度控制在 20 °C. 实验在室温下进行, 实验室相对湿度约 45%. 经计算, 将激光器的腔长设计为 50 mm, M_2 与 M_3 的距离为 95 mm.

2 结果及分析

研究不同输出耦合镜下的激光器输出表现. 采用 $T = 10\%$ 的输出耦合镜, 当输入功率为 2.84 W 时, 开始出现 1 879 nm 的激光输出, 即起振阈值为 2.84 W; 采用 $T = 15\%$ 的输出耦合镜, 当输入功率为 2.93 W 时, 出现激光输出, 即起振阈值为 2.93 W. 图 2 分别为 $T = 10\%$ 与 $T = 15\%$ 时, 输出激光功率与泵浦功率的关系曲线. 可见, 产生激光的最大输出功率分别为 9.5 W 和 10.6 W, 光-光转换率分别为 27.1% 和 30.28%. 因此, 采用 $T = 15\%$ 的输出耦合镜能够实现更高的输出功率与转换效率, 实验采用 $T = 15\%$ 的输出耦合镜.

图2 不同输出耦合镜下，输出功率与输入功率的关系

Fig. 2 Relationship between output power and input power under different output coupling mirrors

调 Q 激光器的重复频率与输出激光的脉冲宽度、峰值功率密切相关, 因此, 实验研究输入功率为 35 W 时, 不同重复频率对脉宽的影响, 结果如图 3. 可见, 输出激光脉宽随重复频率的增加而增大. 为获得更短的输出脉宽, 并兼顾保护激光器器件, 最终将激光器的脉冲宽度设定为 2 kHz.

当输入功率为 35 W 时, 使用光谱仪 (NIRQuest 256-2.5, 测量范围 900 ~ 2 500 nm) 测量激光器的输出光谱, 如图 4. 可见, 在连续工作模式下, 输

图3 输入功率 35 W 时, 输出激光的脉冲宽度与重复频率的关系

Fig. 3 Relationship between the pulse width and the repetition frequency at the input power of 35 W

图4 连续激光与调 Q 激光的输出光谱

Fig. 4 Output spectra of continuous laser and Q-switched laser

出激光的中心波长为 1 901 nm; 调 Q 状态下输出的中心波长为 1 879 nm, 谱线宽度为 0.79 nm. 调 Q 激光的中心波长相对于连续激光发生蓝移, 这是由声光 Q 开关工作时引入的额外损耗造成的.

图 5 为调 Q 重复频率为 2 kHz 时, 1 879 nm 激光的平均输出功率随泵浦功率的变化情况. 可见, 脉冲激光的平均输出功率整体随着泵浦功率的提高

图5 重复频率为 2 kHz 时, 1 879 nm 激光的平均输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 5 The relationship between average output power and pump power at a repetition rate of 2 kHz

线性增加, 当泵浦功率为 35 W 时, 获得最大输出功率 10.5 W. 对应的光-光转换率为 30%, 斜率效率为 33%. 当泵浦功率超过 35 W 时, 实验中听到明显的水汽声音, 说明激光器的峰值功率过高, 已经和空气中的水汽产生作用, 若将环境湿度降低, 可获得更高功率的输出. 为了保护激光器元件不被损坏, 实验中没有进一步增加泵浦功率.

图 6 为当重复频率为 2 kHz 时, 1 879 nm 激光脉冲宽度与泵浦功率的关系. 可见, 脉冲宽度随输入功率的增加而减小. 图 7 为重复频率为 2 kHz、泵浦功率为 35 W 时的脉冲轮廓, 最短脉冲宽度为 52.2 ns. 实验中使用 PIN 光电探测器 (EOTET-5000) 探测散射光的脉冲信号, 使用示波器 (Tektronix DPO7104C) 显示脉冲波形和宽度.

图 6 重复频率为 2 kHz 时, 1 879 nm 激光脉冲宽度与泵浦功率的关系

Fig. 6 The relationship between pulse width and pump power at a repetition rate of 2 kHz

图 7 重复频率为 2 kHz、泵浦功率为 35 W 时的脉冲波形与脉冲宽度

Fig. 7 (Color online) Pulse shape and pulse width at repetition frequency of 2 kHz and pump power of 35 W

同时计算了不同泵浦功率下的输出激光峰值功率, 如图 8. 可见, 激光器的峰值功率随着泵浦功率的提高基本呈线性增加, 当泵浦功率为 35 W 时, 获得最大峰值功率为 100.2 kW.

图 8 输出激光的峰值功率随泵浦功率的变化

Fig. 8 The peak power of the output laser versus the pump power

使用本课题组自行搭建装置测试输出激光光束在最高功率时的光束质量 (M^2 因子), 实验装置如图 9. 其中, 透镜 L_1 与 L_2 的焦距分别 150 mm 与 350 mm; M_4 为反射镜; M_5 和 M_6 为反射式衰减片; 格兰泰勒棱镜用来连续改变进入探测器的功率. 使用光束分析仪 (Pyrocam IIIHR) 连接电脑来观测光斑形状, 实验中将相机安装在一个线性导轨上, 方便连续改变相机的位置.

测得沿光束传播方向上不同位置的光斑宽度, 并进行拟合计算, 结果如图 10. x 和 y 方向上的 M^2

图 9 测试 M^2 因子的装置

Fig. 9 (Color online) Experimental setup for testing M^2 factor

图 10 光束在不同位置处的光束半径与光斑形状

Fig. 10 (Color online) Beam radius and spot shape at different positions

因子值分别为1.51和1.71,光学不对称性为1.13,说明该激光器在最高输出功率下仍具有较好的光束质量.最后,利用格兰泰勒棱镜测试输出光的偏振特性,其消光比接近1,说明输出激光为线偏振光.

结 语

本研究报道一种LD端面泵浦Tm:YLF晶体声光调Q激光器,具有结构简单、紧凑及成本低的特点.通过合理设计谐振腔尺寸以及优化输入条件,实现中心波长为1 879 nm的线偏振激光输出,峰值功率达100.2 kW,最短脉冲宽度为52.2 ns,斜率效率为33%.输出激光在 x 和 y 方向的 M^2 因子分别为1.51和1.71,光束质量良好.若将激光器封装在氮气或氩气中,以隔绝空气中的水汽,有望获得更高的输出峰值功率.所研制激光器在塑料精细加工、激光打标及激光医疗等领域有重要应用.

基金项目:国家重点科技攻关计划资助项目(2016YFA0401100);深圳市科技计划基础研究资助项目(JCYJ20160331114355870)

作者简介:任席奎(1986—),深圳大学博士后研究人员.研究方向:高功率固体激光器与光纤激光器的相关技术、非线性光学. E-mail: mailrenxikui@163.com

引 文:任席奎,裴继红,阮双琛.百千瓦级高峰值功率Tm:YLF激光器[J].深圳大学学报理工版,2020,37(4):403-407.

参考文献 / References:

- [1] NAPPI L, SORRENTINO F, ANGIONI S, et al. The use of laser in hysteroscopic surgery [J]. *Minerva Ginecologica*, 2016, 68(6): 722-726.
- [2] FREHLICH R, HANNON S M, HENDERSON S W. Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime [J]. *Applied Optics*, 1997, 6(15): 3491-3499.
- [3] 姚宝权, 贺万骏, 李玉峰, 等. 2 μm Tm, Ho:YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 39-42.
YAO Baoquan, HE Wanjun, LI Yufeng, et al. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho:YLF laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 39-42. (in Chinese)
- [4] KIELECK C, EICHHORN M, HIRTH A, et al. High-efficiency 20-50 kHz mid-infrared orientation-patterned GaAs optical parametric oscillator pumped by a 2 μm holmium laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 262-264.
- [5] YAO Baoquan, TIAN Yi, LI Gang, et al. InGaAs/GaAs saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched dual-wavelength Tm:YAP lasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13574-13579.
- [6] 李 哲, 王 礼, 杨经纬, 等. 480 mJ, 2 μm 高能室温运转电光调 Q Cr,Tm,Ho:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 603007.
LI Zhe, WANG Li, YANG Jingwei, et al. 2 μm high pulse energy electro-optical Q-switch Cr,Tm,Ho:YAG laser in room temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 603007. (in Chinese)
- [7] FAORO R, KADANKOV M, PARISI D, et al. Passively Q-switched Tm:YLF laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1517-1519.
- [8] FENG T L, ZHAO S Z, YANG K J, et al. Diode-pumped continuous wave tunable and graphene Q-switched Tm:LSO lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24665-24673.
- [9] HOU Jia, ZHANG Baitao, HE Jingliang, et al. Passively Q-switched 2 μm Tm:YAP laser based on graphene saturable absorber mirror [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4968-4971.
- [10] 欧阳德钦, 赵俊清, 郑志坚, 等. 百瓦级全光纤化掺铥光纤激光器[J]. *深圳大学学报理工版*, 2014, 31(6): 608-613.
OUYANG Deqin, ZHAO Junqing, ZHENG Zhijian, et al. Hundred-watt-level all-fiber thulium doped fiber laser [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, 31(6): 608-613. (in Chinese)
- [11] SEBBAG D, KORENFELD A, BEN-AMI U, et al. Diode end-pumped passively Q-switched Tm:YAP laser with 1.85 mJ pulse energy [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1250-1253.
- [12] LIU Cheng, ZHAO Shengzhi, LI Yufei, et al. Stable kilo-hertz electro-optically Q-switched Tm,Ho:YAP laser at room temperature [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 189-193.
- [13] 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.

【中文责编:方 圆;英文责编:溯 心】