

# 端面泵浦Tm:YAP自调Q激光器输出特性研究

文光晨, 张新陆\*

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2024年5月6日; 录用日期: 2024年6月11日; 发布日期: 2024年6月18日

## 摘要

搭建Tm:YAP自调Q脉冲激光器, 实验中选用掺杂浓度为5 %, 尺寸是 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的Tm:YAP晶体作为增益介质, 晶体沿c轴切割。在泵浦光斑半径为 $200 \mu\text{m}$ , 腔长为 $20 \text{ mm}$ 情况下, 选用的曲率半径为 $100 \text{ mm}$ 、 $300 \text{ mm}$ 和 $500 \text{ mm}$ 的输出镜进行实验。当泵浦功率为 $13.3 \text{ W}$ , 输出镜曲率半径为 $100 \text{ mm}$ 时, 输出脉宽为 $0.49 \mu\text{s}$ , 最大单脉冲能量为 $158 \mu\text{J}$ , 中心波长为 $2044 \text{ nm}$ 。

## 关键词

Tm:YAP激光器, 自调Q, 脉冲输出

# Study on Output Characteristics of End-Pumped Tm:YAP Self-Q-Switched Laser

Guangchen Wen, Xinlu Zhang\*

School of Physical Science and Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

Received: May 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 18<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A Tm:YAP self Q-switched pulse laser is built, the gain medium is a c-cut bulk Tm:YAP crystal with the doping concentration of 5 % and the dimensions of  $3 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ . When the pump beam waist size is  $200 \mu\text{m}$ , the cavity length is  $20 \text{ mm}$  and the output mirrors curvature radius of  $100 \text{ mm}$ ,  $300 \text{ mm}$  and  $500 \text{ mm}$  are selected for the experiment. When the pump power is  $13.3 \text{ W}$  and the output mirror curvature radius is  $100 \text{ mm}$ , the maximum single pulse energy can be achieved to be  $158 \mu\text{J}$ , the pulse width is  $490 \text{ ns}$  and the central wavelength is  $2044 \text{ nm}$ .

\*通讯作者。

## Keywords

Tm:YAP Laser, Self-Q-Switched, Pulsed Laser

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

激光技术自诞生之后就在不断发展进步，在医疗、通讯、工业、军事、商业等几乎全部科技领域都有着激光技术的支持，激光有着不可小觑的应用前景。近年来，处于人眼安全区的  $2\text{ }\mu\text{m}$  波段中红外激光光源广泛应用于激光医疗[1] [2]、激光雷达[3]、激光遥感、激光测距、大气环境监测[4]、空间通讯等前沿科技领域。以 Tm:YAP 晶体为增益介质的固体激光器可输出近  $2\text{ }\mu\text{m}$  激光，并且晶体本身具有良好的机械性能和热力学性能，适合作为获取  $2\text{ }\mu\text{m}$  激光的增益介质。

基于调 Q 技术获得的脉冲激光具有峰值功率高、单脉冲能量大、输出脉宽窄等优点，因此脉冲激光是医疗、材料加工等领域常用的激光光源[5]。目前常见的调 Q 技术主要有主动调 Q、被动调 Q 和自调 Q，前两种方式都是通过在激光器谐振腔内插入额外元件实现调制，都可以实现高能量、短脉宽输出，但是会在腔内引入损耗，并且无法将腔型紧凑化。而自调 Q 并不需要在腔内插入额外元件，因此能够将腔结构变得更紧凑，制造成本也会更加低廉，因此对于自调 Q 激光器的研究具有广阔的前景[6]。

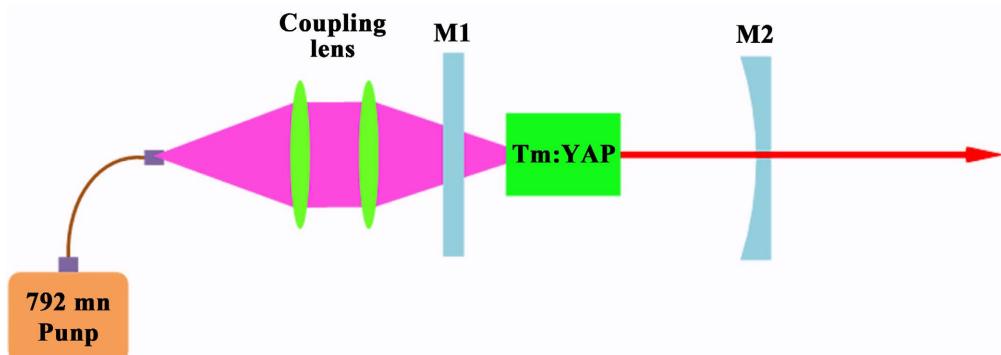
早在 1968 年，Isaac 等人在一台输出波长为  $694.3\text{ nm}$  的红宝石激光器中观察到了自调 Q 脉冲输出现象。这是首次在未加任何调制元件的激光器中观察到调 Q 脉冲输出[7]。随后在 1993 年，Li 等人首次实现了使用 Cr, Nd:YAG 晶体的 LD 泵浦自调 Q 激光器。该激光器产生了  $30\text{ }\mu\text{J}$  的单脉冲能量和  $30\text{ ns}$  的脉宽，中心波长为  $1064\text{ nm}$  [8]。2003 年，清华大学的徐震等人利用简化的自调 Q 速率方程，通过数值求解计算了自调 Q 输出脉冲多个参量，首次提出将自调 Q 晶体同时看作激光增益介质和可饱和吸收体的观点，分析认为在自调 Q 晶体中，激光增益作用的长度和可饱和吸收作用的长度相等[9]。

在 2014 年，Xu 等人报道了一台 LD 泵浦的 Yb:CGB 晶体自调 Q 激光器。该激光器可以实现  $1052.6\text{ nm}$  和  $1057.7\text{ nm}$  的正交偏振双波长激光输出，输出脉宽为  $287\text{ ns}$ ，平均输出功率为  $416\text{ mW}$ ，脉冲重频为  $35\text{ kHz}$  [10]。2018 年，Zhang 等人设计了 Tm:YLF 自调 Q 激光器，并实现脉冲输出。当吸收泵浦功率为  $4.5\text{ W}$  时，输出脉宽为  $1.4\text{ }\mu\text{s}$ ，脉冲重频为  $21\text{ kHz}$ ，输出激光中心波长为  $1.91\text{ }\mu\text{m}$ ，最大平均输出功率为  $610\text{ mW}$  [11]。2023 年，Kang 等人利用掺 Tm 光纤激光器对 Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体进行泵浦，实现自调 Q 脉冲输出。在泵浦功率为  $11.7\text{ W}$  时，激光器最大平均输出功率为  $1.07\text{ W}$ ，输出脉宽为  $1.81\text{ }\mu\text{s}$ ，最高脉冲重频为  $56.53\text{ kHz}$ 。这是首次关于单掺杂 Ho 晶体自调 Q 脉冲激光器的报道[12]。

## 2. 实验装置

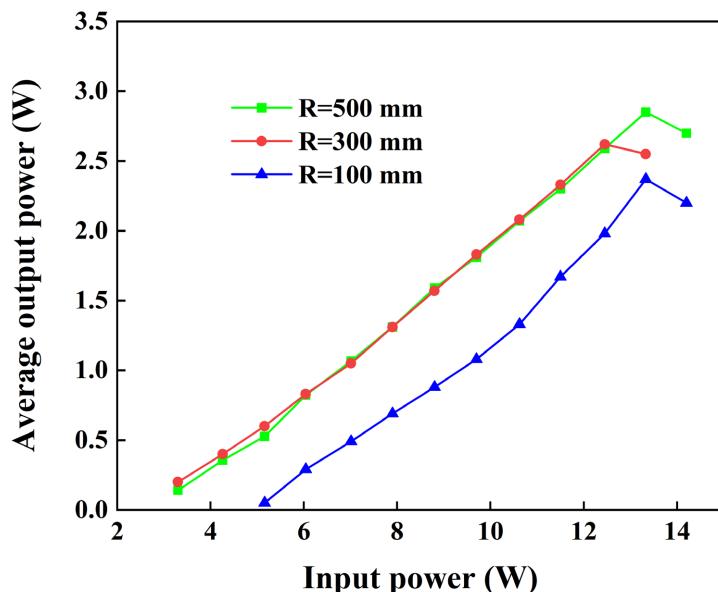
LD 单端泵浦 Tm:YAP 自调 Q 激光器实验装置如图 1 所示，采用平凹腔结构，腔长为  $20\text{ mm}$ 。实验中采用的增益介质为 c-cut 的 Tm:YAP 晶体，Tm 离子的掺杂浓度为  $5\%$ ，晶体尺寸为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ，晶体两端均镀有对  $792\text{ nm}$  和  $1.94\text{ }\mu\text{m}$  的抗反膜，以减少能量损失。为防止泵浦光照射使热量在晶体内堆积，从而面临热致双折射和热量梯度差所产生的应力形变，导致晶体损坏，将整个晶体放置在紫铜热沉中，把晶体周围利用厚度为  $0.1\text{ mm}$  的钢箔紧密包裹，以便增加晶体与铜块之间的接触面积，以减少不均匀的热效应。热沉下方放置连接有温控系统的热电制冷片，再在水冷模块的协助下对晶体进行散热。整

个实验过程中, 通过温控系统将温度保持在 283 K (10°C)。实验采用的泵浦源工作中心波长为 792 nm 的二极管激光器, 可以达到的最大输出功率分别为 43 W, 工作温度设定在 25°C。通过光纤耦合输出, 光纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径都为 0.22, 光束质量因子为 174.5。泵浦光通过耦合比为 1:1 的耦合系统输出, 两片平凸透镜 L1, L2 构成了这套耦合系统, 两透镜焦距均为 65 mm。通过两个透镜组耦合之后, 泵浦光斑在 Tm:YAP 晶体端面处的光斑半径为 200  $\mu\text{m}$ 。M1 和 M2 分别为激光谐振腔的输入镜和输出镜。M1 为平面透镜, 镀有 780~800 nm 高透膜和 1.9~2.1  $\mu\text{m}$  全反膜; M2 为凹平透镜, 对 1.9~2.1  $\mu\text{m}$  激光的透过率为 2%, 其曲率半径分别为 100 mm、300 mm 和 500 mm, 在后续会对不同曲率半径的输出镜进行分开实验, 以此探究输出镜曲率半径对输出特性的影响。平均输出功率由美国 Coherent 公司生产的型号为 PM30 的激光功率计探测。通过 Tektronix 公司生产的一个 100 MHz 带宽的 MDO3012 型数字荧光示波器和 InGaAs PIN 快速光电二极管探测器(上升时间~10 ns)来记录调 Q 的脉冲激光信号, 以此可以获取脉冲光的脉冲宽度和脉冲重频。



**Figure 1.** Experimental setup diagram  
**图 1.** 实验装置图

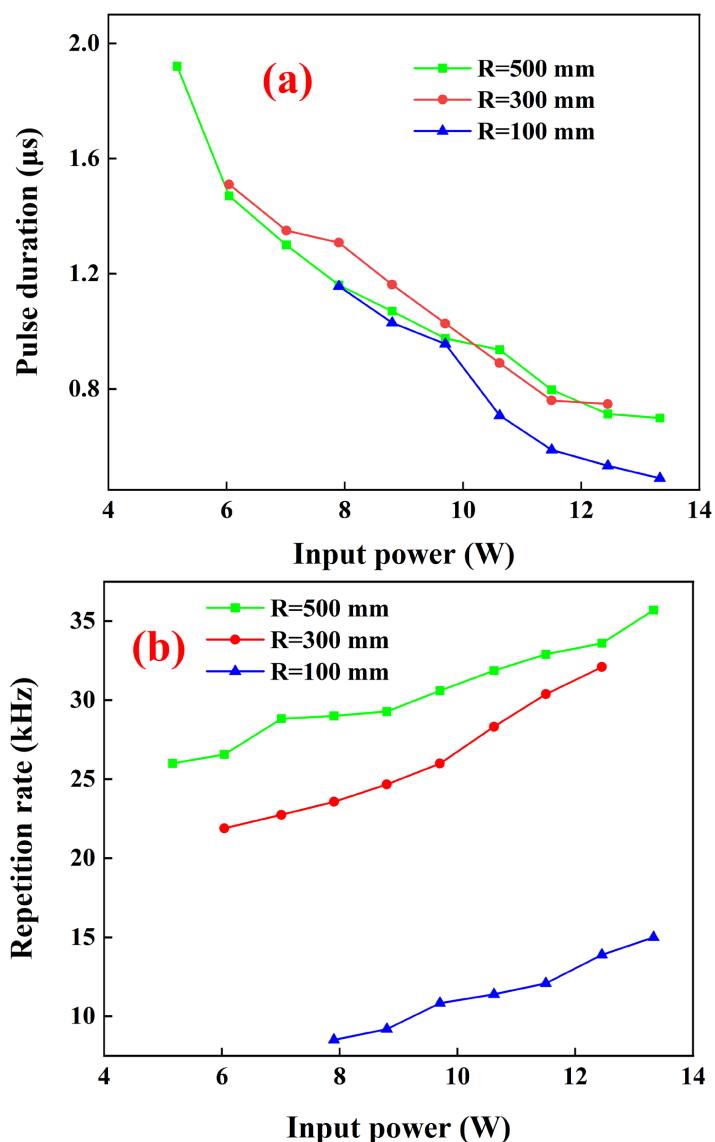
### 3. 实验结果及分析



**Figure 2.** Variation of average output power with pump power at different curvature radius  
**图 2.** 不同曲率半径时平均输出功率随泵浦功率变化曲线

通过更换不同曲率半径的输出镜进行实验，谐振腔腔长  $L = 20$  mm，前腔镜紧贴激光晶体，泵浦光斑半径  $\omega_p = 200 \mu\text{m}$ ，保持不变，选择曲率半径为 100 mm、300 mm 和 500 mm 的输出镜进行实验。不同曲率半径输出镜对应输出激光平均功率如图 2 所示。从图中可以看出相同泵浦功率下，平均输出功率会随着输出镜曲率半径的减小而减小，且都出现了饱和现象。在泵浦功率为 13.3 W，输出镜曲率半径为 500 mm 时，对应最大平均输出功率为 2.85 W。

图 3 所示为不同输出镜曲率半径情况下，输出脉宽和脉冲重频都随着泵浦功率变化的曲线。从图(a)中可以看出，脉宽随着泵浦功率变化先是急剧减小，随后减小趋势变缓，最后趋于稳定。在泵浦功率为 13.3 W，腔长为 20 mm，输出镜曲率半径为 100 mm 时，输出脉宽最窄为 0.49  $\mu\text{s}$ 。图(b)中可以看出，输出重频会随着泵浦功率的增加而呈现线性增加，在泵浦功率为 13.3 W，腔长为 20 mm，输出镜曲率半径为 500 mm 时，最大输出重频为 35.7 kHz。



**Figure 3.** Variation of (a) output pulse width and (b) pulse refrequency with pump power at different curvature radius

图3. 不同曲率半径时(a) 输出脉宽和(b) 脉冲重频随泵浦功率变化曲线

图 4 所示为不同输出镜曲率半径下, 输出峰值功率和输出单脉冲能量随泵浦功率的变化曲线。从图(a)中可以看出峰值功率和单脉冲能量都随着泵浦功率的增加而线性增加, 且各自的最大值都是在曲率半径为 100 mm 时获得, 最大值峰值功率为 322.5 W, 最大单脉冲能量为 158 μJ。从图中还可以发现, 在泵浦功率相同情况下, 峰值功率和单脉冲能量会随着曲率半径减小而增大。

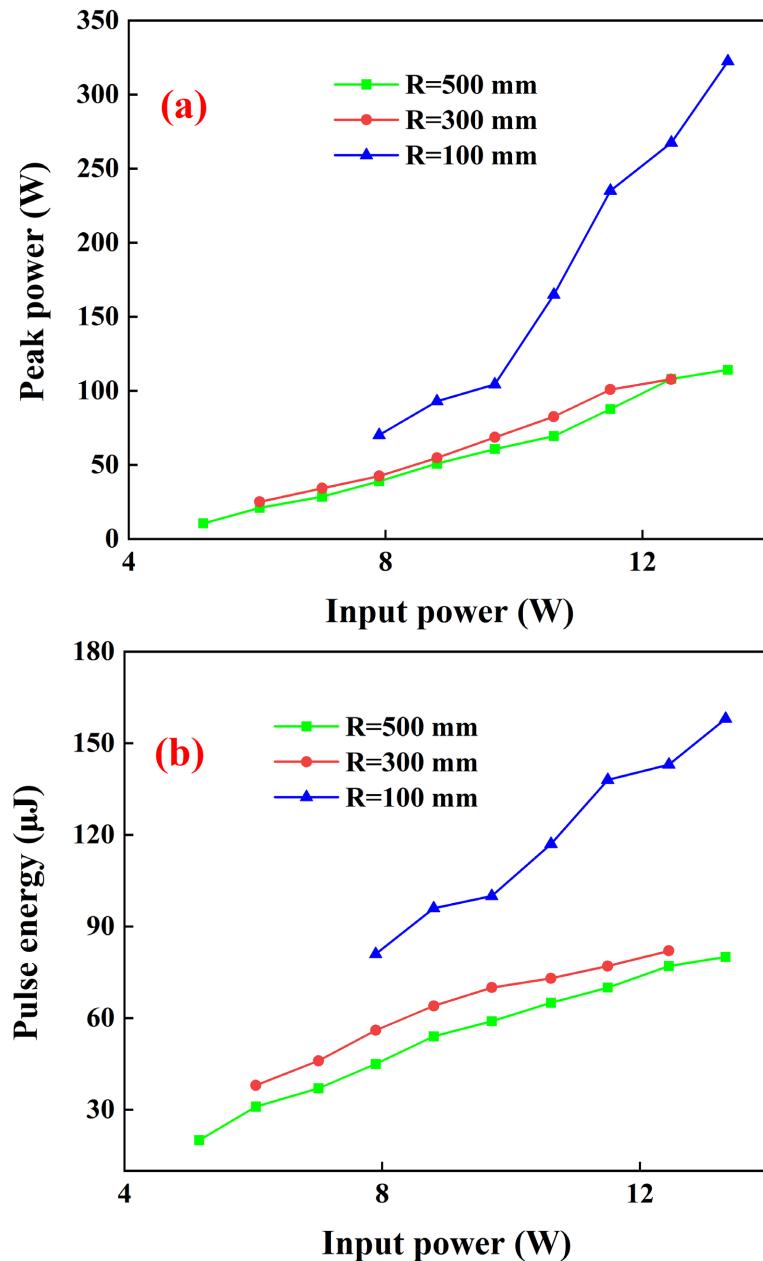
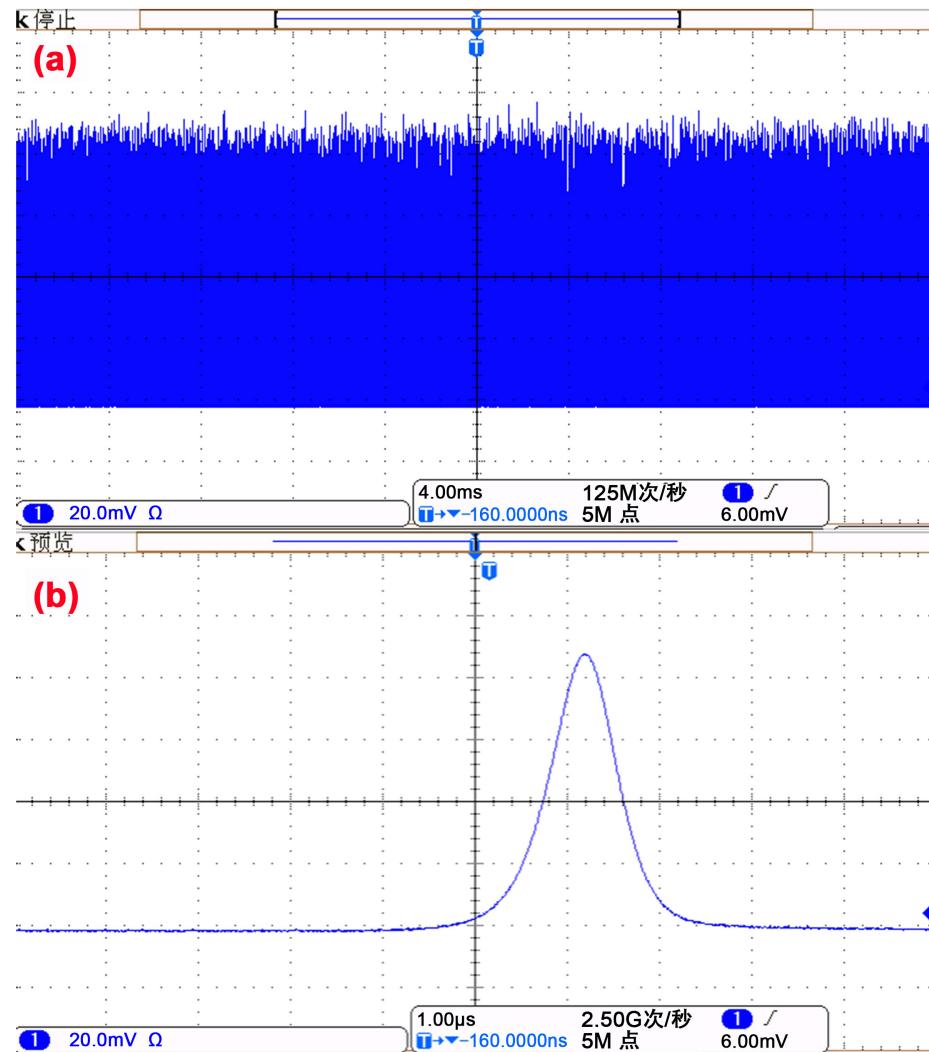
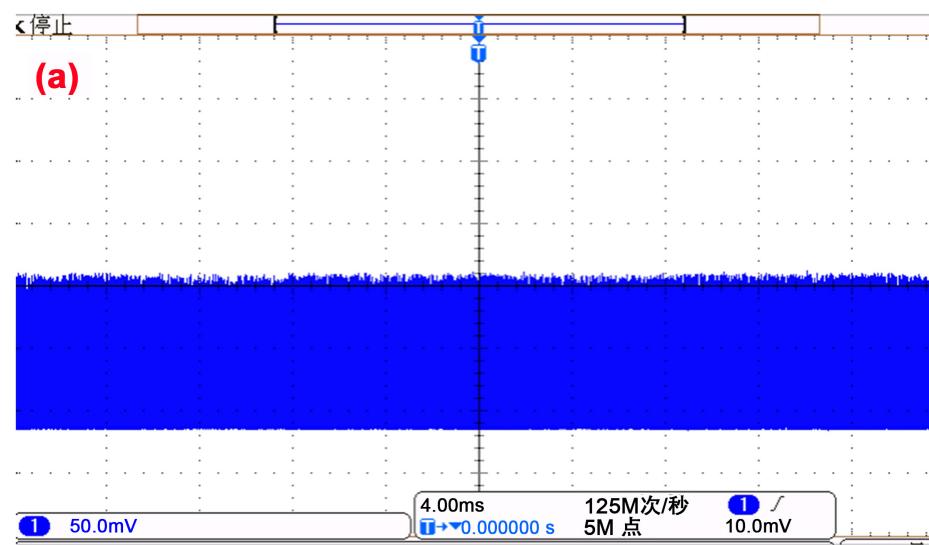


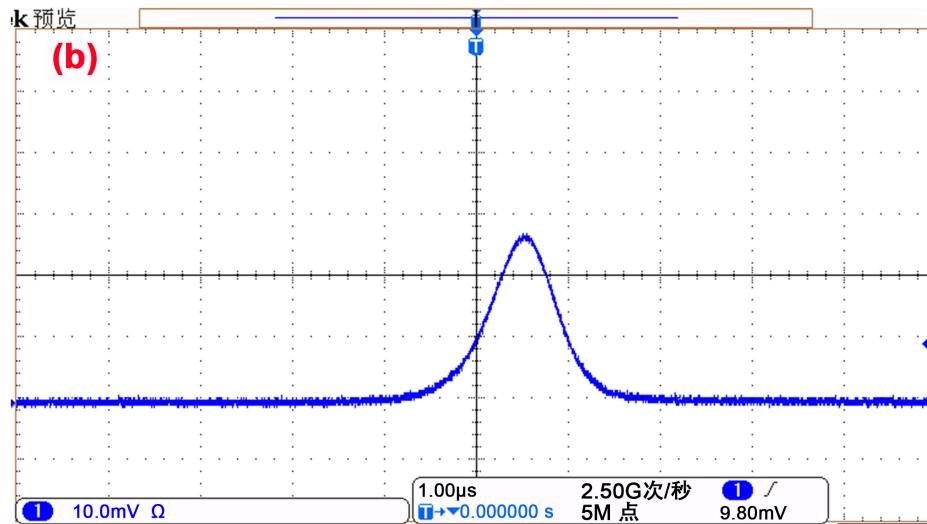
Figure 4. Variation of (a) peak power and (b) pulse energy with pump power at different curvature radius  
图 4. 不同曲率半径时(a) 峰值功率和(b) 单脉冲能量随泵浦功率变化曲线

图 5、图 6 分别展示了腔长  $L = 20$  mm, 输出镜曲率半径分别为 100 mm、300 mm 时, 从示波器上观察到不同时间范围下的自调 Q 脉冲图, 两种情况下都是在各自达到最大输出功率下进行取样。图中(a)表示每格宽度为 4 ms, 图(b)表示每格宽度为 1 μs。各自的最窄脉冲宽度为 0.49 μs、0.75 μs。



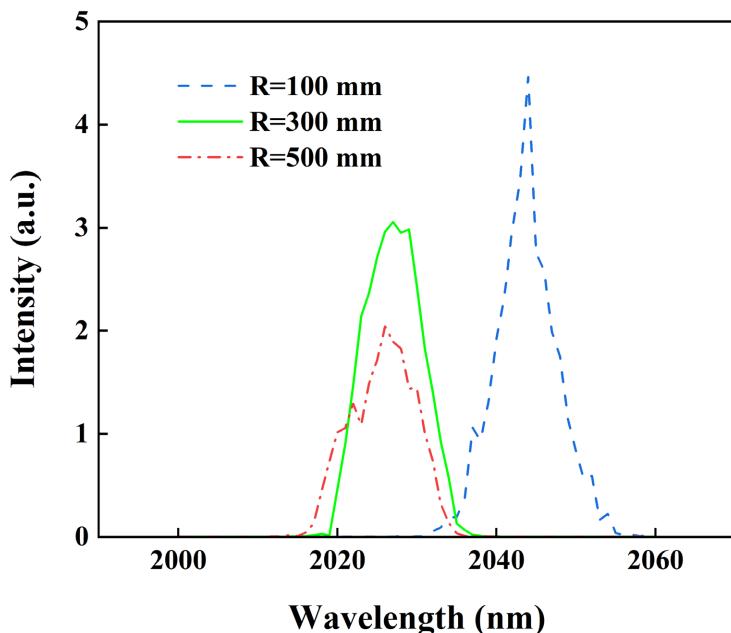
**Figure 5.** The diagram of output pulses when  $R = 100 \text{ mm}$  (a)  $4 \text{ ms}/\text{div}$  and (b)  $1 \mu\text{s}/\text{div}$   
**图 5.**  $R = 100 \text{ mm}$  时的脉冲图(a)  $4 \text{ ms}/\text{div}$  和(b)  $1 \mu\text{s}/\text{div}$





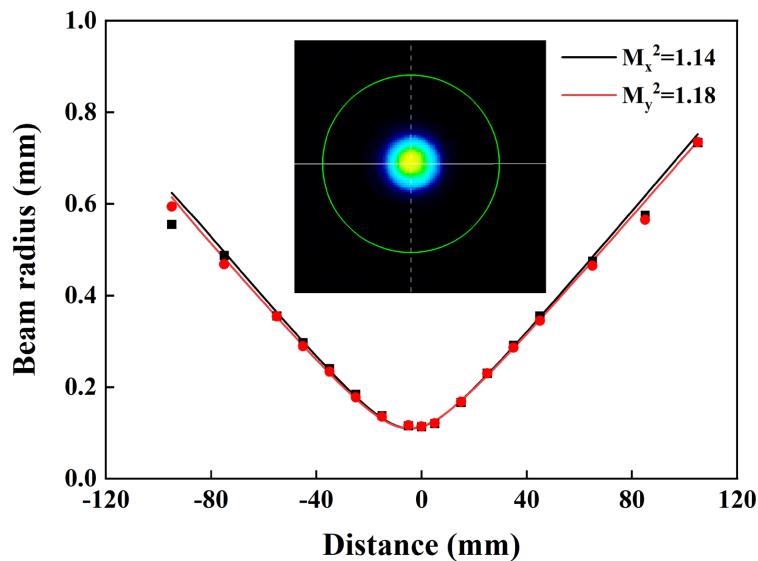
**Figure 6.** The diagram of output pulses when  $R = 300$  mm (a) 4 ms/div and (b) 1  $\mu$ s/div  
**图 6.**  $R = 300\text{mm}$  时的脉冲图(a) 4 ms/div 和(b) 1  $\mu$ s/div

利用单色仪分别测量了在腔长  $L = 20$  mm 时, 输出镜曲率半径分别为 500 mm、300 mm、100 mm 的输出激光中心波长, 结果如图 7 所示。从图中可看出, 在腔长为 20 mm 时, 曲率半径为 500 mm 和 300 mm 的输出中心波长接近, 都在 2026 nm 附近, 而当曲率半径为 100 mm 时, 中心波长则红移到 2044 nm 处。



**Figure 7.** Output wavelength at different curvature radius  
**图 7.** 不同曲率半径下输出波长

利用光束质量分析仪测量了在泵浦光斑半径为  $200 \mu\text{m}$  时, 腔长为 20 mm, 输出镜曲率半径为 100 mm 情况下的光束质量以及二维能量分布, 如图 8 所示。在 x 和 y 方向上的光束质量因子都接近 1.1; 从二维能量分布图中可以看出, 该情况下在光束截面上光斑的椭圆度较好, 能量集中分布在光斑中心位置。因此, 我们可以认为该输出激光的模式为  $\text{TEM}_{00}$  模。

**Figure 8.** Beam quality when  $R = 100$  mm**图 8.**  $R = 100$  mm 时光束质量

#### 4. 结论

本文根据 Tm 离子的基态重吸收效应，建立了 Tm:YAP 自调 Q 激光器的速率方程模型，并通过数值模拟计算了谐振腔内反转粒子数与光子数密度，脉冲输出的平均输出功率、脉冲宽度、输出脉冲重频、峰值功率、单脉冲能量等相关参数随泵浦功率的变化趋势。通过数值模拟速率方程为后续实验提供参考。

在完成模拟计算之后，搭建 Tm:YAP 自调 Q 脉冲激光器。在泵浦光斑半径为  $200 \mu\text{m}$ ，腔长为  $20 \text{ mm}$  情况下，通过更换曲率半径分别为  $100 \text{ mm}$ 、 $300 \text{ mm}$  和  $500 \text{ mm}$  的输出镜进行实验，探究输出镜曲率半径对 Tm:YAP 自调 Q 激光器输出特性的影响。当泵浦功率为  $13.3 \text{ W}$ ，输出镜曲率半径为  $100 \text{ mm}$  时，输出脉宽为  $0.49 \mu\text{s}$ ，最大单脉冲能量为  $158 \mu\text{J}$ ，中心波长为  $2044 \text{ nm}$ 。

#### 参考文献

- [1] Bach, T., Herrmann, T.R.W., Haecker, A., Michel, M.S. and Gross, A. (2009) Thulium: Yttrium-Aluminium-Garnet Laser Prostatectomy in Men with Refractory Urinary Retention. *BJU International*, **104**, 361-364. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410x.2009.08412.x>
- [2] Shen, Y., Li, G., Xie, G., She, C., Jing, C. and Chu, J. (2022) Integration of Blue-green Electroluminescence Structure in Mid-Infrared Hollow Optical Fiber for Targeting Invisible  $\text{CO}_2$  Laser Beam. *Optical and Quantum Electronics*, **54**, 587. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03955-7>
- [3] Refaat, T.F., Singh, U.N., Yu, J., Petros, M., Remus, R. and Ismail, S. (2016) Double-Pulse 2-Mm Integrated Path Differential Absorption Lidar Airborne Validation for Atmospheric Carbon Dioxide Measurement. *Applied Optics*, **55**, Article ID: 4232. <https://doi.org/10.1364/ao.55.004232>
- [4] Henderson, S.W. and Hannon, S.M. (2005) Advanced Coherent Lidar System for Wind Measurements. *SPIE Proceedings*, San Diego, 31 July-4 August 2005, 108-117. <https://doi.org/10.1117/12.620318>
- [5] Wang, L., Huang, H., Shen, D., Zhang, J., Chen, H. and Tang, D. (2017) Highly Stable Self-Pulsed Operation of an Er:  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  Ceramic Laser at  $2.7 \mu\text{m}$ . *Laser Physics Letters*, **14**, Article ID: 045803. <https://doi.org/10.1088/1612-202x/aa5ced>
- [6] Jiang, M., Zhang, Q., Qiu, K., Zhang, D. and Feng, B. (2012) Self-Q-Switched Cr, Nd:YAG Laser under Direct 885nm Diode Laser Pumping. *Optics Communications*, **285**, 3684-3687. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.05.020>
- [7] Freund, I. (1968) Self-Q-Switching in Ruby Lasers. *Applied Physics Letters*, **12**, 388-390. <https://doi.org/10.1063/1.1651867>
- [8] Li, S., Lee, K.K., Zhou, S., Wang, P. and Chen, Y.C. (1993) Self-Q-Switched Diode-End-Pumped Cr, Nd:YAG Laser

- with Polarized Output. *Optics Letters*, **18**, Article 203. <https://doi.org/10.1364/ol.18.000203>
- [9] 徐震, 何永学, 吴念乐, 等. 自调 Q 激光器的理论分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1215-1219.
- [10] Xu, J., Ji, Y., Wang, Y., You, Z., Wang, H. and Tu, C. (2014) Self-Q-Switched, Orthogonally Polarized, Dual-Wavelength Laser Using Long-Lifetime Yb<sup>3+</sup> Crystal as Both Gain Medium and Saturable Absorber. *Optics Express*, **22**, Article 6577. <https://doi.org/10.1364/oe.22.006577>
- [11] Zhang, B., Li, L., He, C.J., Tian, F.J., Yang, X.T., Cui, J.H., et al. (2018) Compact Self-Q-Switched Tm:YLF Laser at 1.91 μm. *Optics & Laser Technology*, **100**, 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.001>
- [12] Kang, P., Zhang, X., Pang, S., Jing, X., Zhao, Y. and Huang, J. (2022) Investigation of the Temporal Behavior of the Self-Q-Switched Ho: GDVO4 Laser Pumped by a Tm-Doped Fiber Laser. *Optics & Laser Technology*, **156**, Article ID: 108525. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108525>