

# 准三能级Tm:YAP自调Q固体激光器理论探讨

李长俊, 张新陆\*, 康攀强, 郭婷婷, 王玉芳

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

Email: \*zhangxinlu1@aliyun.com

收稿日期: 2020年11月13日; 录用日期: 2020年11月28日; 发布日期: 2020年12月4日

## 摘要

在考虑基态重吸收的前提下,建立了准三能级Tm:YAP自调Q激光器的速率方程理论模型。通过数值模拟,确定了Tm:YAP的晶体掺杂浓度为5.0at.%,长度为5 mm,输出透过率为6%的耦合镜,为实现稳定的自调Q脉冲输出可行性提供了理论依据。讨论了泵浦功率在7~18 W时,脉冲宽度、重复频率、峰值功率、脉冲能量等随泵浦功率的变化关系。在泵浦功率为18 W时,脉冲宽度为5.1  $\mu\text{s}$ ,重复频率为22.7 kHz,峰值功率为12.1 W,脉冲能量为61.9  $\mu\text{J}$ 。

## 关键词

Tm:YAP, 自调Q, 准三能级, 参数优化

# Theoretical Discussion on Quasi Three-Level Tm:YAP Self-Q-Switching Solid State Laser

Changjun Li, Xinlu Zhang\*, Panqiang Kang, Tingting Guo, Yufang Wang

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Email: \*zhangxinlu1@aliyun.com

Received: Nov. 13<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 28<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 4<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Under considering the reabsorption of ground state, the quasi-three-level rate equation theoretical model of Tm:YAP self-Q-switching solid-state laser was established, and the crystal doping concentration of 5.0 at.%, the length of 5 mm and the coupling mirror with transmission rate of 6% was determined by numerical simulation, which provided a theoretical basis for the realization of

\*通讯作者。

stable self-Q-switching pulse output. The pulse width, repetition frequency, peak power and pulse energy as functions of pump power at 7 - 18 W were discussed. The pulse width is 5.1  $\mu\text{s}$ , the repetition frequency is 22.7 kHz, the peak power is 12.1 W and the pulse energy is 61.9  $\mu\text{J}$ .

## Keywords

Tm:YAP, Self-Q-Switching, Quasi-Three-Level, Parameter Optimization

Copyright © 2020 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

近年来, 红外激光器在激光雷达、激光测距、大气环境检测方面发挥非常重要的作用, Tm:YAP 固体激光器输出波长位于  $2\ \mu\text{m}$  附近, 处于大气传输窗口, 且对人眼安全, 在光电对抗、遥感探测及激光医疗方面的应用, 越来越多地受到人们关注[1]。脉冲激光具有脉宽窄、光谱范围窄、峰值功率高和重频可调谐等优点[2], 而获得脉冲式激光重要的一个手段就是调 Q 操作, 调 Q 一般分为主动调 Q 和被动调 Q, 主动调 Q 常见的操作方式有机械转镜调 Q、声光调 Q、电光调 Q 等, 被动调 Q 则是在腔内放置一块饱和吸收体材料, 常见的材料有  $\text{Cr}^{2+}$  掺杂的晶体、碳基材料等。然而, 主动调 Q 激光器在腔内增加调 Q 元件, 面临的问题包括增加了成本, 腔型结构不够紧凑以及使得腔结构复杂化; 被动调 Q 激光器在腔内使用饱和吸收体, 会增加腔内损耗, 同时饱和吸收体的损伤阈值限制了激光器的单脉冲能量[3]。产生纳秒和微秒脉冲的另一种机制是自调 Q (SQS), 自调 Q 特点突出, 在腔内不需要放置任何调 Q 元件, 自调 Q 脉冲激光器腔结构更加紧凑, 成本低廉, 另外, 腔内损耗更低, 容易输出较高的平均功率[4], 因此, 对激光脉冲序列的研究具有重要的意义。

近年来已有一些关于激光自调 Q 脉冲序列的研究报道, 1993 年, Li Shiqun 等人报道了第一台用双掺晶体 Cr,Nd:YAG 作为激活介质的自调 Q 脉冲激光器[5], 2005 年, Su Liangbi 等人报道了 Yb,Na:CaF<sub>2</sub> 激光器, 得到最小脉宽为 1.5  $\mu\text{s}$ , 重复频率为 28 kHz 的脉冲序列, 最大平均输出功率为 400 mW, 斜率效率为 20.3% [6]。双掺晶体的自调 Q 脉冲最早被发现, 其产生机理是由于双掺离子中的一种离子为可饱和吸收离子, 而另一种作为激活粒子产生激光振荡, 输出脉冲激光。随着时间推移,  $1\ \mu\text{m}$  波段的自调 Q 脉冲激光器得到广泛研究, 其中较为常见的掺杂晶体为  $\text{Nd}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  作为激活粒子, 2012 年, Gupta Pradeep K. 等人用 SQS 型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器, 产生脉冲宽度为 460 ns, 重复频率为 61.2 kHz, 单脉冲能量为 10  $\mu\text{J}$ , 平均输出功率为 600 mW, 输出波长为 914 nm [7]。2014 年, Xu Jinlong 等人研究了自调 Q 正交极化双波长 Yb:CGB 激光器, 两个中心波长分别为 E/b 极化 1052.6 nm 和 E/c 极化 1057.7 nm, 输出脉冲序列重频为 35 kHz, 脉冲宽度为 287 ns, 最高输出功率为 416 mW [8]。Song Qi 等人在 2015 年报道了另一种双波长自调 Q 激光器, 使用钽玻璃激光器, 输出中心波长为 1056.86 nm 和 1060.23 nm, 脉冲宽度和重复频率分别为 2.02  $\mu\text{s}$  和 50.2 kHz [9]。同年, Cai Wei 等人用 Tm:YAP 激光器实现 SQS 脉冲输出, 中心波长为 1988 nm, 最短脉冲持续时间 1.64  $\mu\text{s}$ , 重复率 65.16 kHz, 平均输出功率 1.68 W, 文中指出产生自调 Q 脉冲的机理是晶体的热透镜效应[3]。2018 年 Zhang Bin 等人报道了自调 Q Tm:YLF 激光器, 输出波长 1.91  $\mu\text{m}$ , 相应的脉宽和重复率分别为 1.4  $\mu\text{s}$  和 21 kHz, 平均输出功率为 610 mW, 并提出自调 Q 脉冲的产生基于准三能级的可饱和重吸收效应[10]。目前关于自调 Q 脉冲激光器在  $1\ \mu\text{m}$  波段的报道较多, 而在  $2\ \mu\text{m}$  波

段的研究还比较少,关于产生自调 Q 脉冲激光的机理也是出现两种不同的声音,依然存在一些疑问,有必要对自调 Q 脉冲激光器的产生机理进行理论分析,为了更好地研究自调 Q 脉冲激光器的输出特性,本文通过改变晶体掺杂浓度,晶体长度以及输出镜的透过率参数,找到最优的参数,分析自调 Q 脉冲激光器输出特性。

## 2. 速率方程模型建立

Tm 激光器中  $\text{Tm}^{3+}$  在 794 nm 附近有强的吸收峰,所以以 794 nm 的半导体泵浦源泵浦时容易产生 1.9  $\mu\text{m}$  的激光输出;存在横向驰豫过程,即  $\text{Tm}^{3+}$  吸收一个泵浦光子会产生两个位于激光上能级的光子,可以表达为  ${}^3\text{H}_4 + {}^3\text{H}_6 \rightarrow 2{}^3\text{F}_4$ 。以 794 nm 的激光为泵浦激励时,基态中的  $\text{Tm}^{3+}$  吸收泵浦光的能量跃迁到  ${}^3\text{H}_4$  能级后,不能在  ${}^3\text{H}_4$  能级长时间停留,在自发辐射和无辐射跃迁效应下迅速转移到  ${}^3\text{F}_4$  能级上,当  ${}^3\text{F}_4$  能级上的粒子数不断积累到一个值时,在  ${}^3\text{F}_4$  能级和  ${}^3\text{H}_4$  能级之间形成粒子数反转,某时刻谐振腔内的 Q 值突然变大时,就会有 1.9  $\mu\text{m}$  的激光产生[11]。在准三能级系统中,激光跃迁会导致较低的激光能级产生热粒子布局,导致基态重吸收效应(GSRA),GSRA 损耗在本质上是可饱和的,因此它提供了一种有效的自调 Q 开关机制。基于上述考虑,Tm:YAP 激光器的自调 Q 现象可以归结在  ${}^3\text{H}_6$  能级产生热粒子群的可饱和 GSRA 机制,图 1 是 Tm 离子的能级示意图,主要涉及到激光的能量传输和 GSRA 过程。

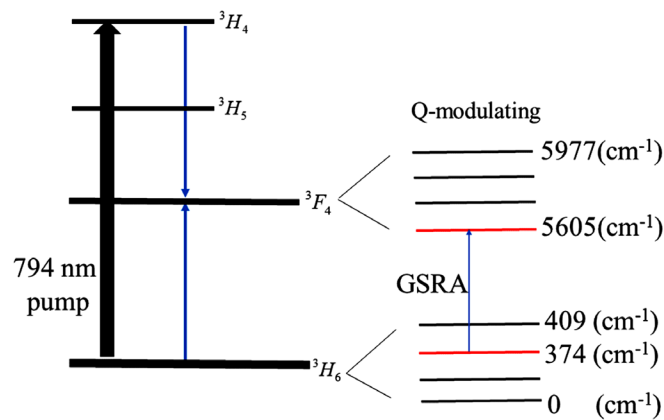


Figure 1. Diagram of  $\text{Tm}^{3+}$  energy levels  
图 1.  $\text{Tm}^{3+}$  能级示意图

Tm:YAP 自调 Q 脉冲激光器的速率方程可表示为[7] [10] [12]:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\phi(t)}{T_c} [2l\sigma n(t) - L_0 - \log(1/R) - Q(t)] + \pi\omega_p^2 l \frac{n(t)}{\tau_f} \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = (f_1 + f_2) \left[ \frac{\eta_c \eta_a P_{in}}{\pi\omega_p^2 l h\nu_p} - \frac{\sigma\phi(t)n(t)}{\pi\omega_l^2 T_c} \right] - \frac{n(t) + f_1 N}{\tau_f} \quad (2)$$

$$Q(t) = \sigma f_1 N l \frac{I_s}{I(t)} \ln \left( 1 + 2 \frac{I(t)}{I_s} \right) \quad (3)$$

$$I_s = \frac{h\nu}{(f_1 + f_2)\sigma\tau_f} \quad (4)$$

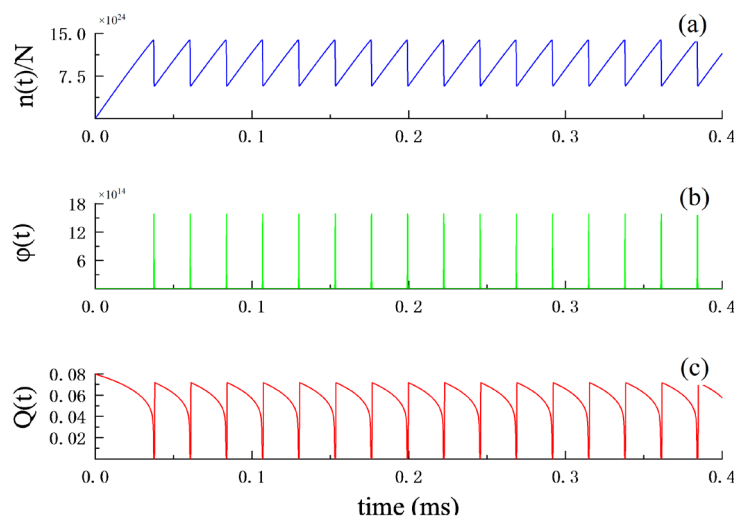
$$I(t) = \phi(t) \frac{h\nu}{\pi\omega_l^2 T_c} \quad (5)$$

其中, (1)式表示腔内瞬时光子数, (2)式为腔内瞬时反转粒子数密度, (3)式表示重吸收损失项, (4)式为增益介质的 Tm:YAP 的饱和强度, (5)式为增益介质的瞬时激光强度。方程中各符号代表的物理意义及数值见表 1 [12]。

**Table 1.** The physical meaning and numerical value represented by each symbol  
**表 1.** 各符号表示的物理意义及数值

符号(单位)	物理意义	数值
$\sigma(\text{cm}^2)$	Tm:YAP 的受激发射截面	$4.7 \times 10^{-21}$
$f_1$	Tm <sup>3+</sup> 中 <sup>3</sup> F <sub>4</sub> 能级的玻耳兹曼常数	0.46
$f_2$	Tm <sup>3+</sup> 中 <sup>3</sup> H <sub>6</sub> 能级的玻耳兹曼常数	0.017
$l(\text{cm})$	Tm:YAP 的晶体长度	0.5
$T_c(\text{s})$	腔内激光光子寿命	$1 \times 10^{-8}$
$R$	输出耦合镜反射率	96%
$\omega_p(\mu\text{m})$	泵浦光斑半径	200
$\omega_l(\mu\text{m})$	腔模光斑半径	160
$N(\text{g}/\text{cm}^3)$	Tm <sup>3+</sup> 掺杂浓度 5.0at.% 的粒子总数	$9.985 \times 10^{20}$
$\tau_r(\text{ms})$	Tm <sup>3+</sup> 中 <sup>3</sup> F <sub>4</sub> 能级的寿命	4.4
$h(\text{J} \cdot \text{s})$	普朗克常量	$6.62 \times 10^{-34}$
$c(\text{m}/\text{s})$	光速	$3 \times 10^8$
$\lambda_p(\text{nm})$	泵浦光波长	794
$\lambda(\mu\text{m})$	输出光波长	1.94
$L$	谐振腔固定腔损	0.005
$\eta_c$	交叉弛豫的量子产率	1.6
$\eta_a$	泵浦光吸收效率	0.74

将表 1 各数值带入(1)-(5)式, 在泵浦功率  $P_{in}$  为 10 W 时, 可以得到粒子数关于时间的变化曲线图, 如图 2 所示, 其中图 2(a)表示反转粒子数密度随时间的变化情况, 随着泵浦能量的注入, 在 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级和 <sup>3</sup>H<sub>4</sub> 能级之间形成粒子数反转, 当达到一定阈值, 反转粒子数积累到最高水平, 随之反转粒子数水平开始下降, 并产生光子如图 2(b)所示, 在反转粒子数积累的过程中是没有光子产生的, 当反转粒子数从最高水平开始下降时, 光子产生, 也就是表现出来的脉冲输出。图 2(c)表示重吸收损耗项, 当泵浦能量注入时, 重吸收损耗逐渐减小到零, 此时晶体相当于饱和吸收体被全部漂白, 光子产生后, 晶体重吸收损耗项恢复, 随着反转粒子数积累的过程, 晶体逐渐被漂白, 然后光子脉冲产生。此过程往复实现, 产生了稳定的自调 Q 脉冲输出。

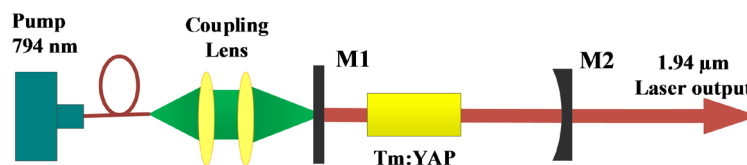


**Figure 2.** Changes of particle number in the cavity: (a) Inversion particle number density, (b) Photon number in the cavity, and (c) Reabsorption loss term

**图 2.** 腔内粒子数变化情况: (a) 反转粒子数密度, (b) 腔内光子数, (c) 重吸收损失项

### 3. 参数优化与讨论

为了对实验方案的可行性提供依据, 本文模拟了各参数对输出功率的影响, 找到斜率效率最高的腔参数。图 3 所示为理论模拟所用到的实验装置图。采用简单的平凹腔结构, 泵浦源为输出波长为 794 nm 的光纤耦合激光二极管, 纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22。使用 1:1 耦合透镜组将泵浦光耦合进 Tm:YAP 激光晶体。腔镜 M1 为平面镜, 镀有 1.9~2.1  $\mu\text{m}$  全反射膜和 780~800 nm 高透射膜, 腔镜 M2 曲率半径为 300 mm, 其对 1.9~2.1  $\mu\text{m}$  激光的最佳透过率将在下文的理论模拟中进行讨论。

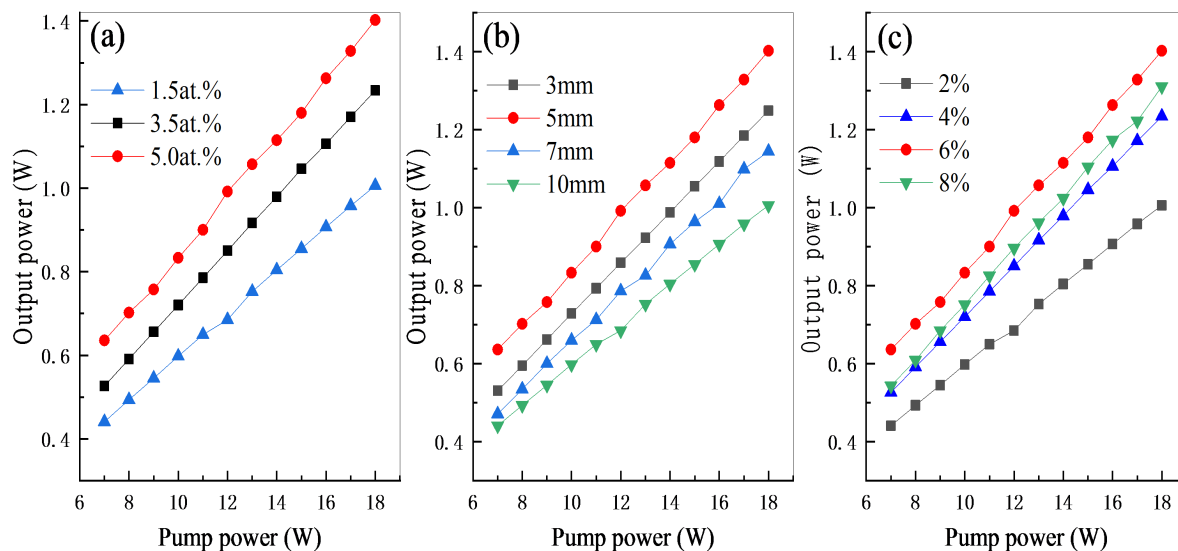


**Figure 3.** Experimental setup diagram

**图 3.** 实验装置图

仿真模拟结果如图 4 所示, 给出不同晶体掺杂浓度、晶体长度、以及输出镜透过率下, 输出功率的变化趋势, 找到最佳的输出效率。功率范围在 7~18 W 时, 脉冲序列稳定输出, 因此我们对泵浦功率为 7~18 W 进行分析研究。图 4(a) 表示在晶体长度为 5 mm, M2 透过率为 6% 时, 掺杂浓度为 1.5 at.%、3.5 at.%、5.0 at.% 的 Tm:YAP 晶体, 输出功率随着泵浦功率的变化情况; 从图中可以明显看出, 在一定的浓度范围内, 掺杂浓度 5.0 at.% 的 Tm:YAP 晶体输出斜率效率最高, 而且光转换效率最高, 浓度过高会出现浓度淬灭的现象, 并不是浓度越高越好; 由于 5.0 at.% 的 Tm:YAP 容易生长, 且比较常见, 因此实验中, 我们选用掺杂浓度为 5.0 at.% 的 Tm:YAP 晶体。图 4(b) 表示 M2 透过率为 6%, 掺杂浓度为 5 at.% 时, 晶体长度为 3 mm、5 mm、7 mm、10 mm 的 Tm:YAP 晶体, 输出功率随着泵浦功率的变化情况; 从图中可以明显得出, 在一定的晶体长度范围内, 晶体长度为 5 mm 的 Tm:YAP 晶体输出斜率效率最高, 而且光转换效率最高, 在实验中, 我们选用长度为 5 mm 的 Tm:YAP 晶体。图 4(c) 表示掺杂浓度为 5.0 at.%, 长度为 5 mm 时, 输出耦合镜 M2 的透过率为 2%、4%、6%、8%, 输出功率随着泵浦功率的变化情况; 从图中可以得出, 输出耦合镜 M2 的透过率为 6% 时, 输出的斜率效率最高, 且光转换效率最高。综上所述,

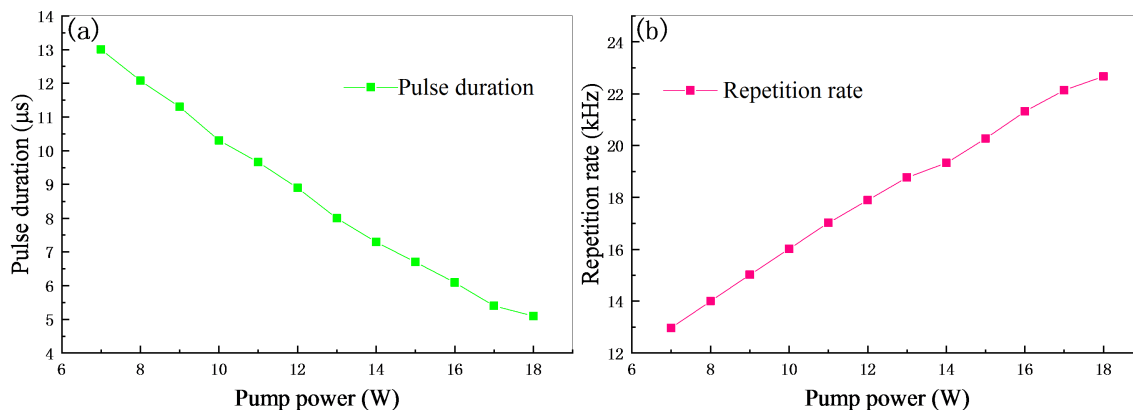
为了实验得到更优良的输出特性,我们在实验中选用掺杂浓度为 5.0 at.%, 长度为 5 mm 的 Tm:YAP 晶体, 选用透过率为 6% 的输出耦合镜 M2。选择浓度时, 浓度增加的时候, 光转换效率和输出斜率效率也随之增加, 但是浓度过高会出现浓度淬灭效应, 使得输出效率下降; 晶体长度与晶体掺杂浓度有一定的联系, 每种掺杂浓度都存在一个最佳的晶体长度, 平衡了吸收效率与再吸收损耗的关系; 透过率决定输出功率的效率, 当透过率增加时, 提高了透射光的比例, 有利于提高输出功率, 但是同时阈值也增加了, 从而导致腔内光强下降, 因此存在一个使输出功率达到极大值的最佳透过率。



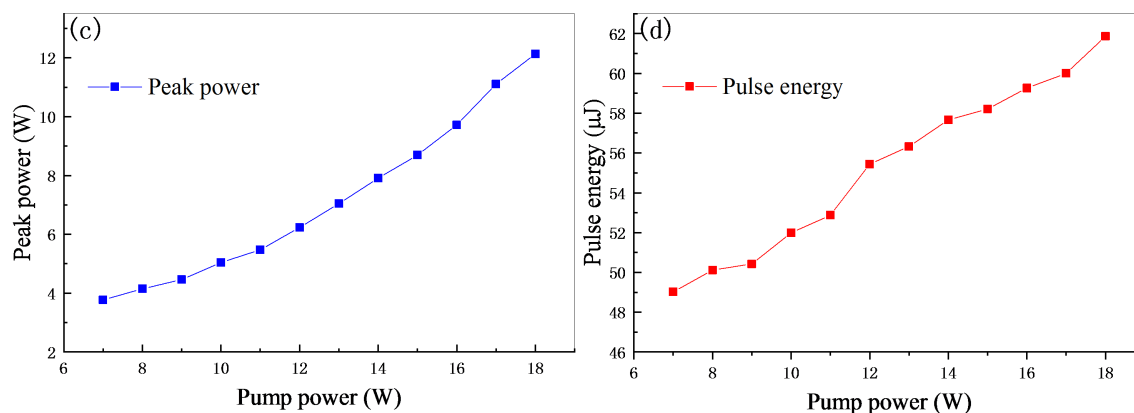
**Figure 4.** Output power changes with pump power under different parameters: (a) Crystal doping concentration; (b) Crystal length; and (c) Output coupling mirror transmittance

**图 4.** 不同参数下输出功率随泵浦功率的变化情况: (a) 晶体掺杂浓度; (b) 晶体长度; (c) 输出耦合镜透过率

通过数值模拟, 选用掺杂浓度为 5.0 at.%, 长度为 5 mm 的 Tm:YAP 晶体, 透过率为 6% 的输出耦合镜 M2。得到脉冲宽度、重复频率、峰值功率、脉冲能量随泵浦功率变化的关系图, 如图 5 所示。图 5(a) 表示脉冲宽度随泵浦功率的增加逐渐减小的过程, 随着泵浦功率的增加变化趋势也越来越平缓。图 5(b) 表示脉冲重复频率随泵浦功率的增加逐渐增加的变化过程, 近似线性增长。图 5(c) 表示峰值功率随泵浦功率的增加的逐渐变大, 而且变化趋势越来越明显。图 5(d) 表示单脉冲能量随泵浦功率增加逐渐变大的过程, 在不同的功率下变化趋势有明显变化。在泵浦功率为 18 W 时, 脉冲宽度为 5.1  $\mu\text{s}$ , 重复频率为 22.7 kHz, 峰值功率为 12.1 W, 脉冲能量为 61.9  $\mu\text{J}$ 。







**Figure 5.** The evolutions of (a) Pulse width, (b) Repetition frequency, (c) Peak power, and (d) Pulse energy with the increase of the pump power

**图 5.** 各输出特性随泵浦功率的变化情况: (a) 脉冲宽度; (b) 重复频率; (c) 峰值功率; (d) 脉冲能量

## 4. 结论

通过数值模拟, 确定 Tm:YAP 的晶体掺杂浓度为 5.0 at.%, 长度为 5 mm, 输出透过率为 6% 的耦合镜。对自调 Q 实验的实质进行了理论分析, 对自调 Q 脉冲激光器的研究具有指导意义。泵浦功率从 7 W 增加到 18 W, 脉冲宽度逐渐减小, 重复频率、峰值功率、脉冲能量不断增加。在泵浦功率为 18 W 时, 脉冲宽度为 5.1 μs, 重复频率为 22.7 kHz, 峰值功率为 12.1 W, 脉冲能量为 61.9 μJ。自调 Q 脉冲激光器在 2 μm 波段的研究越发广泛, 利用其自身的损耗小、成本低的优势, 在科研、医疗等领域具有非常深远的意义。

## 基金项目

国家自然科学基金(61775166, 61275138), 天津自然科学基金(19JCZDJC32600), 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)。

## 参考文献

- [1] 李玉峰. 二极管泵浦单掺 Tm<sup>3+</sup> 固体激光器研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [2] 公爽. Yb:GYSO 固体调 Q 激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [3] Cai, W., Liu, J., Li, C., Zhu, H., Ge, P., Zheng, L., Su, L. and Xu, J. (2015) Compact Self-Q-Switched Laser near 2 μm. *Optics Communications*, **334**, 287-289. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.049>
- [4] Zhang, G., Fu, X., Shen, Y. and Gong, M. (2018) High Power Self-Q-Switching in Nd:LuAG Lase. *IEEE Photonics Journal*, **6**, 1505009. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2883994>
- [5] Li, S., 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**, 203-204. <http://doi.org/10.1364/OL.18.000203>
- [6] Su, L., Xu, J., Xue, Y., Wang, C., Chai, L., Xu, X. and Zhao, G. (2005) Low-Threshold Diode-Pumped Yb<sup>3+</sup>, Na<sup>+</sup>:CaF<sub>2</sub> Self-Q-Switched Laser. *Optics Express*, **13**, 5635-5640. <http://doi.org/10.1364/OPEX.13.005635>
- [7] Gupta, P.K., Singh, A., Sharma, S.K., Mukhopadhyay, P.K., Bindra, K.S. and Oak, S.M. (2012) Note: Self Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser at 914 nm. *The Review of Scientific Instruments*, **83**, 046110. <http://doi.org/10.1063/1.4705996>
- [8] Xu, J., Ji, Y., Wang, Y., Zhen, Y., 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**, 6577-6585. <http://doi.org/10.1364/OE.22.006577>
- [9] Song, Q., Wang, G., Zhang, B., Zhang, Q., Wang, W., Wang, M., Sun, G., Bo, Y. and Peng, Q. (2015) Dual-Wavelength Self-Q-Switched Nd:GYSO Laser. *Journal of Modern Optics*, **62**, 1655-1659. <http://doi.org/10.1080/09500340.2015.1061063>

- [10] Zhang, B., Li, L., He, C., Tian, F., Yang, X., Cui, J., Zhang, J. and Sun, W. (2018). Compact Self-Q-Switched Tm:YLF Laser at 1.91  $\mu\text{m}$ . *Optics Laser Technology*, **100**, 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.001>
- [11] 丁艳. 二极管泵浦 Tm:YAP/YVO<sub>4</sub> 拉曼激光器输出特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [12] Li, Q., Feng, B., Zhang, Z. and Zhang, T. (2011) Direct Numerical Simulation of Quasi-Three-Level Passive Q-Switched Laser. *Optics Communications*, **284**, 3391-3398. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.03.061>