

## Tm, Ho 声光调 Q 激光系统理论与实验研究

乔亮<sup>1</sup>, 羊富贵<sup>1</sup>, 夏忠朝<sup>1</sup>, 武永华<sup>2</sup>, 江琳沁<sup>2</sup>

(1. 福建江夏学院 数理教研部, 福建 福州 350108;

2. 福建江夏学院 电子信息科学学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 利用激光速率方程理论, 对 Tm, Ho 激光系统计算预测得出最佳耦合输出透过率和调 Q 激光脉冲宽度。实验采用 Tm, Ho:LuLF 为增益介质, 三向侧面泵浦, 环形腔声光调 Q。选用透过率 20% 和 30% 的输出镜作对比。在透过率 20% 耦合输出时, 得到调 Q 激光脉冲能量最大为 58.0 mJ, 对应光光转换效率为 1.45%; 在透过率 30% 耦合输出时, 得到调 Q 激光脉冲能量最大为 62.9 mJ, 对应光光转换效率 1.57%, 并且获得了最大动静比 48.7%。激光脉冲宽度在注入能量 3.25 J 时为 417.2 ns。与理论计算结果较为一致。

**关键词:** 激光器; 速率方程; Tm, Ho:LuLF; 声光调 Q

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1141-04

## Theoretical and experimental research on Tm, Ho acoustic-optic Q-switched laser

Qiao Liang<sup>1</sup>, Yang Fugui<sup>1</sup>, Xia Zhongchao<sup>1</sup>, Wu Yonghua<sup>2</sup>, Jiang Linqin<sup>2</sup>

(1. Department of Mathematics and Physics, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China;

2. Department of Electronic Information Science, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In the Tm, Ho laser system, the optimum transmittance and pulse duration was practiced using the rate equations theory. In a 2 m ring resonator, the Tm, Ho: LuLF laser material was side-pumped from three directions and Q-switched of acoustic-optic device. The output coupler of 20% and 30% transmittance was compared. In the 20% transmittance coupler, it was demonstrated that the Q-switched laser pulse energy of 58.0 mJ with an optical to optical efficiency of 1.45%. The 62.9 mJ energy was obtained with the optical to optical efficiency of 1.57% in the 30% transmittance coupler. And the 48.7% of dynamic to static ratio was obtained in the same injection. The pulse duration was 417.2 ns when 3.25 J energy was injected. The experiment values are in consistent with the simulation results.

**Key words:** laser; rate-equation; Tm, Ho:LuLF; acoustic-optic Q-switched

收稿日期: 2014-08-14; 修订日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51402050); 福建省教育厅科技项目(JA12333, JK2014058); 福建省公共基础课实验教学平台项目(物理综合创新实验中心)

作者简介: 乔亮(1980-), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光器件的研究。Email: liangliangqiao@126.com

## 0 引言

2 微米( $\mu\text{m}$ )波长的激光具有良好的大气穿透性,同时又处于人眼安全的波段范围内,在激光遥感方面有着重要的应用前景<sup>[1-3]</sup>。在固体激光器中,直接获得 2  $\mu\text{m}$  波段的激光主要依赖激光增益介质的发射谱线。通常,这些增益介质要么掺杂铥离子(thulium,  $\text{Tm}^{3+}$ ),要么掺杂铈离子(holmium,  $\text{Ho}^{3+}$ ),或者是两种离子共掺。 $\text{Tm}$ ,  $\text{Ho}$  共掺的激光介质既可利用  $\text{Tm}^{3+}$ 对泵浦光吸收面积大的优点,又可利用  $\text{Ho}^{3+}$ 激光发射截面大的优势<sup>[4]</sup>。Walsh<sup>[5]</sup>和 Louchev<sup>[6]</sup>等人对这类双掺的晶体作为激光介质进行过理论模拟。根据 Vikas Sudesh 等人的研究结果证明<sup>[7]</sup>,在低重频室温条件下, $\text{Tm}$ ,  $\text{Ho}:\text{LuLF}$ (氟化镨锂)晶体具备较好的激光性能。

此文利用速率方程理论,模拟计算给出最佳耦合输出透过率和调 Q 激光脉冲宽度,并应用于二极管侧面泵浦  $\text{Tm}$ ,  $\text{Ho}:\text{LuLF}$  声光调 Q 激光器中。实验上获得与理论预见较为一致的实验结果,对实验起到预测与指导的作用。

## 1 理论模型

根据 Wagner 等人的研究<sup>[8]</sup>,可以用下式表示调 Q 激光脉冲的脉宽:

$$t_p = t_r \frac{n_i - n_f}{n_i - n_i [1 + \ln(n_i/n_f)]} \quad (1)$$

式中: $n_i$ 、 $n_t$ 、 $n_f$ 表示初始、阈值、最终的反转粒子数密度; $t_r$ 是腔内光子往返渡越时间。 $n_i$ 、 $n_t$ 、 $n_f$ 之间的关系是:

$$n_i - n_f = n_t \ln \frac{n_i}{n_f} \quad (2)$$

可见,只要能够得出以上三个粒子数密度,就可以求出调 Q 激光脉冲宽度,下面逐一来考察。阈值处反转粒子数密度  $n_t$  为:

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为激光介质受激发射截面; $l$ 为激光介质的长度; $R$ 为输出镜的反射率; $L$ 为腔内损耗。至此,笔者可以得出  $n_t$ 。为了能够求出初始和最终的反转粒子数密度  $n_i$  和  $n_f$ , 还需要另外一个它们二者之间的关

系式。对于重复率为  $f$  的 Q 开关运转,在脉冲之间建立的反转粒子数的最长时间为  $t=1/f$ 。因此,为了在每次 Q 开关周期之后使反转粒子数回到其初始数值,有

$$n_i = n_\infty - (n_\infty - n_f) \exp\left(\frac{-1}{\tau_f f}\right) \quad (4)$$

式中: $n_\infty$ 为反转粒子数的渐进值; $\tau_f$ 为能级寿命。联合求解(2)式和(4)式,得出  $n_i$  和  $n_f$ 。代入到(1)式,就可以求得激光脉冲宽度。结合此文的实验情况,计算得出脉冲宽度为 405.9 ns。

Degnan 推导出了优化 Q 开关激光器运转的解析解<sup>[9]</sup>,下式就是谐振腔最佳反射率公式:

$$R_{\text{opt}} = \exp\left[-L\left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z}\right)\right] \quad (5)$$

式中: $z=2g_0l/L$ ,  $2g_0l$  是对数小信号增益,通过反射率不同的输出镜,确定出每面镜输出激光的阈值方式,得出小信号增益和谐振腔的损耗。代入(5)式计算得到调 Q 激光输出耦合镜的最佳反射率为 71%左右,即透过率为 29%左右。计算中所用到的参量,在表 1 中列出。在计算过程中,大部分物理量是客观值,和实验紧密联系。比如腔内损耗,在估算过程中,需要与实验结果反复对比磨合。

表 1 计算所用数据

Tab.1 Data for calculation

Parameter	Symbol	Value
Cavity optical length	$L_{\text{opt}}$	2.0109
Stimulated emission cross section	$\sigma$	$1.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Crystal length	$l$	2.0 cm
Output reflectance	$R$	0.8
Crystal diameter	$w_r$	0.2 cm
Pumping energy	$P$	3.25 J
Quantum efficiency	$\eta_Q$	0.91
Stokes factor	$\eta_s$	0.5
Energy level lifetime	$\tau_f$	15 000 $\mu\text{s}$

## 2 实验及分析

图 1 为实验装置示意图,标号 1 的器件为输出耦合镜,分别采用了 20%和 30%的透过率,通过对比

验证理论预测的结果。标号 2 的器件为平面高反镜, 标号 3 是大曲率半径的曲面高反镜; 标号 4 为泵浦头, 采用三向侧面泵浦的水循环冷却结构, LD 泵浦源选用的是美国 Nlight 公司的垂直叠层半导体激光器, 中心波长为 792 nm; 激光介质 Tm, Ho 掺杂浓度分别为 5%, 0.5%, 圆棒状尺寸为  $\Phi 4 \times 20$  mm。标号 5 是声光 Q 开关(古奇-休斯古公司 QS027-4H-AP1)<sup>[10-11]</sup>。泵浦源以 1 Hz 的重复频率工作。在一个泵浦循环中, Q 开关打开一次。没有对环形腔进行单向抑制, 因此两个方向即图 1 中标号 6 和标号 7 两个位置都有激光能量输出。文中的实验数据, 仅是其中一个方向, 即标号 6 的位置。采用透过率 16%, 20%, 30%, 40% 的输出镜, 分别进行了实验。从输出激光脉冲能量方面来说, 透过率 20% 和 30% 的输出镜效果较其他两种好。为此, 选用了透过率 20% 和 30% 输出镜得到的数据进行对比。在实验中, 频繁更换输出镜, 需尽量乘除人为操作等对系统的影响, 确保所获得的数据具有高的重复性。

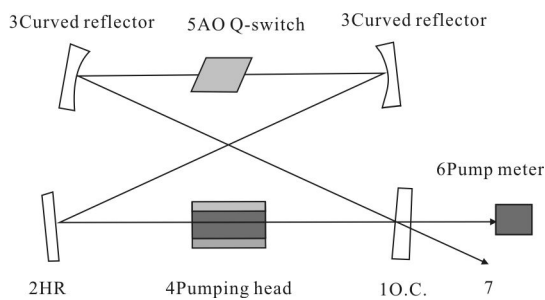


图 1 激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser

图 2 是分别采用透过率 20% 和 30% 的输出镜在自由运转和调 Q 状态下输出激光脉冲的能量分布图。从图中可以看出在自由运转时, 透过率 20% 输出镜输出激光能量均高于透过率 30% 输出镜的情况。而在调 Q 状态下, 透过率 30% 输出镜输出激光能量逐渐高于透过率 20% 输出镜, 与我们理论预测最佳输出耦合透过率 29% 左右的结论比较一致。注入能量 4.00 J 时, 透过率 30% 耦合输出得到调 Q 激光能量为 62.9 mJ, 对应光光转换效率 1.57%; 透过率 20% 耦合输出得到调 Q 激光脉冲能量为 58.0 mJ, 对应光光转换效率为 1.45%。

笔者计算了一下动静比——即自由运转下的输

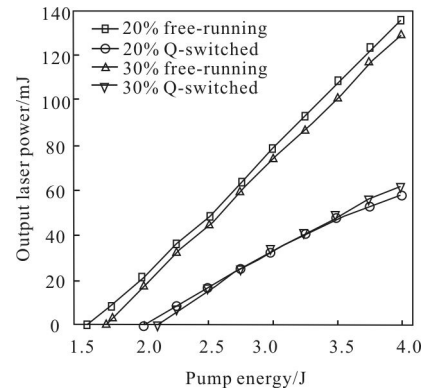


图 2 透过率 20% 和 30% 的输出镜自由运转和调 Q 激光能量

Fig.2 Laser power of normal mode and Q-switched in 20% and 30% transmission of output coupler

出能量转化为调 Q 脉冲能量的比率, 如图 3 所示。在注入能量大于 2.50 J 之后, 透过率 30% 输出镜的动静比都高于透过率 20% 输出镜的情况。随着注入能量的不断提高, 高的动静比更有助于获得高的调 Q 脉冲能量。在注入能量为 4.00 J 时, 透过率 30% 输出镜的情况下获得 48.7% 的动静比。而相等注入能量时, 透过率 20% 输出镜的情况下, 动静比已经呈下降趋势, 这不利于获得高调 Q 脉冲能量。

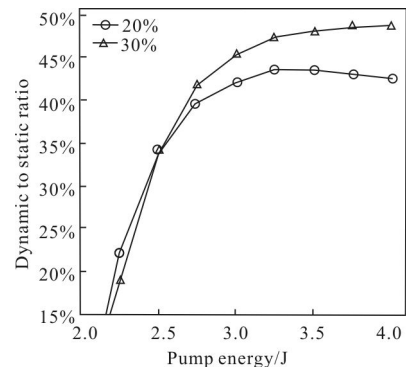


图 3 输出耦合镜 20% and 30% 透过率下的输出激光能量动静比

Fig.3 Dynamic to static ratio of output laser in 20% and 30% transmission of output coupler

图 4 显示的是调 Q 激光脉冲宽度随着泵浦能量的变化。随着泵浦能量的加大, 输出激光脉冲宽度逐渐变小。在注入能量为 3.25 J 的时候, 调 Q 激光脉冲形状如图 5 所示, 脉宽为 417.2 ns。这与之前预测的结果基本一致。

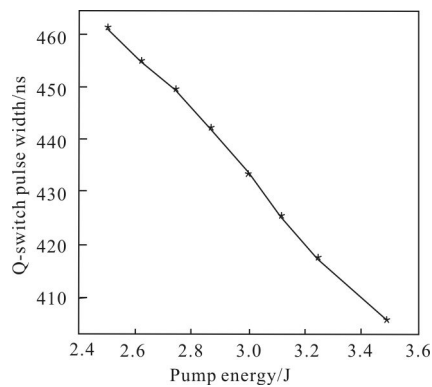


图 4 调 Q 激光脉冲宽度

Fig.4 Pulse width of Q-switched laser

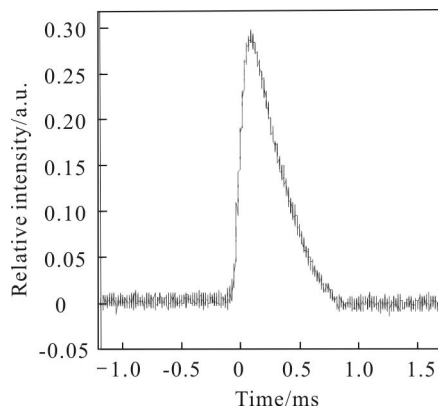


图 5 调 Q 激光脉冲形状

Fig.5 Waveform of Q-switched pulse

### 3 结论

此文利用 Wagner 和 Degnan 的理论,对 Tm, Ho 双掺的声光调 Q 环形腔激光系统进行了脉冲宽度和最佳耦合输出透过率的理论计算,预测出在注入能量 3.25 J 时,输出调 Q 脉冲宽度为 405.9 ns,最佳耦合输出透过率为 29%左右。

笔者选用了透过率 20%和 30%的两种输出镜做对比实验。当注入能量为 3.25 J 时,输出调 Q 脉宽为 417.2 ns。在调 Q 状态下,透过率 30%耦合输出的能量和动静比均高于透过率 20%的耦合输出。在注入能量为 4.00 J 时,获得调 Q 脉冲能量为 62.9 mJ。

如果继续加大注入能量,那么有希望获得更高能量的脉冲输出。但是目前,激光系统需要更有效的冷却等措施,因此笔者没有给出更高注入能量的数据。这也将是以后系统需要完善的方面。

### 参考文献:

- [1] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, et al. High-energy  $2\mu\text{m}$  Doppler lidar for wind measurements [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(11): 116201.
- [2] Yu Jirong, Bo C Trieu, Ed A Modlin, et al. 1J/pulse Q-switched  $2\mu\text{m}$  solid-state laser [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 462-464.
- [3] Chen Weibiao, Zhou Jun, Liu Jiqiao, et al. Doppler lidar and its all solid-state single frequency laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 31(1): 57-60. (in Chinese)
- [4] Shu Shijiang, Yu Ting, Zang Huaguo, et al.  $2\mu\text{m}$  diode-side-pumped injection-seeded solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1442-1447. (in Chinese)
- [5] Brian M Walsh, Norman P Barnes, Mulugeta Petros, et al. Spectroscopy and modeling of solid state lanthanide lasers: Application to trivalent  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Ho}^{3+}$  in  $\text{YLiF}_4$  and  $\text{LuLiF}_4$  [J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(7): 3255-3271.
- [6] Oleg A Louchev, Yoshiharu Urata, Satoshi Wada. Numerical simulation and optimization of Q-switched  $2\mu\text{m}$  Tm, Ho: YLF laser [J]. *Opt Express*, 2007, 15(7): 3940-3947.
- [7] Vikas Sudesh, Kazuhiro Asai. Spectroscopic and diode-pumped-laser properties of Tm, Ho: YLF; Tm, Ho: LuLF; and Tm, Ho: LuAG crystals: a comparative study [J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, 20(9): 1829-1837.
- [8] W G Wagner, B A Lengyel. Evolution of a giant pulse in a laser [J]. *J Appl Phys*, 1963, 34(7): 2040-2046.
- [9] John J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J QE*, 1989, 25(2): 214-220.
- [10] Qiao Liang, Hou Xia, Chen Weibiao. High pulse power  $2\mu\text{m}$  ring laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1327-1331. (in Chinese)
- [11] Shu Shijiang, Yu Ting, Liu Rongtao, et al. Diode-side-pumped AO Q-switched Tm, Ho: LuLF laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(9): 091407-1.