

## Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 主动调 Q 脉冲参数模拟

董小龙,高兰兰,张帆,焦石,纪冠东

(长春理工大学理学院,吉林 长春 130022)

**摘要:** 利用调 Q 速率方程,确定了最优输出耦合反射率,最大脉冲能量,最大峰值功率和脉冲宽度与无量纲变量  $z$  的关系,并分析了谐振腔往返损耗、谐振腔增益和反转衰减因子分别对 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 调 Q 脉冲参数的影响。结果表明:最优输出耦合反射率和脉冲宽度随谐振腔往返损耗的增大而减小,最大脉冲能量和最大峰值功率受反转衰减因子的影响很大,并随反转衰减因子的增大而减小。通过确定  $z$  值可以将调 Q 脉冲参数具体化。

**关键词:** 主动调 Q; 脉冲参数模拟; 反转衰减因子; 无量纲变量  $z$

**中图分类号:** O437 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-1986-05

## Simulation of actively Q-switched pulse parameters in Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG

Dong Xiaolong, Gao Lanlan, Zhang Fan, Jiao Shi, Ji Guandong

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Using Q-switched rate equations, the relationship among the optimum reflectivity, maximum pulse energy, largest peak power, pulse width and the dimensionless variable  $z$  was analyzed, and the influence of the condition of different cavity roundtrip dissipative loss, cavity gain and inversion reduction factor on actively Q-switched pulse parameters in Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG was also analyzed, respectively. The modeling results indicate that the optimum reflectivity and pulse width decrease with the increase of cavity roundtrip dissipative loss, and the maximum pulse energy and largest peak power decrease with the increase of inversion reduction factor which affects maximum pulse energy and largest peak power greatly. One can make the Q-switched pulse parameters embodied through the certain value of  $z$ .

**Key words:** actively Q-switched; simulation of pulse parameters; inversion reduction factor; dimensionless variable  $z$

收稿日期:2014-11-21; 修订日期:2014-12-25

作者简介:董小龙(1988-),男,硕士生,主要从事非线性频率变换以及激光调 Q 技术方面的研究。Email:171199519@qq.com

通讯作者:高兰兰(1975-),女,副教授,博士后,主要从事 LD 泵浦全固态激光器技术方面的研究。Email:gll\_75@163.com

## 0 引言

主动调 Q 激光器在信息存储、激光测距、激光雷达、遥感技术等领域有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。与被动调 Q 激光器相比,主动调 Q 激光器更易得到高峰值功率并且脉冲稳定的激光输出<sup>[3]</sup>。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体荧光寿命短(90~100 μs),激光增益高并且具有偏振输出特性,常常作为主动调 Q 激光器的工作物质,但 Nd:YVO<sub>4</sub> 较低的热导率限制了其在大泵浦功率下获得高的激光输出<sup>[4]</sup>。由于 Nd:YAG 晶体具有较好的光学特性且荧光寿命长(230 μs),更容易产生高功率,高峰值功率和高脉冲能量的激光输出<sup>[5]</sup>。2007年, Y.Wang 等报道了声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 窄脉宽激光器,通过压缩腔长实现了脉宽为 2 ns 的激光输出<sup>[6]</sup>。2012 年, Y.Bai 等通过电光调制陶瓷 Nd:YAG 实现了脉冲能量 24.3 mJ, 峰值功率 5.11 MW, 脉宽 4.86 ns 的 355 nm 激光输出<sup>[7]</sup>。同年,戴梅等通过电光调制灯泵浦的 Nd:YAG 晶体得到脉冲能量 42 mJ, 峰值功率 100 MW, 脉宽 9.2 ns 的 1 064 nm 激光输出<sup>[8]</sup>。可以看出实验的结果都具有较高水平,但在确定增益的条件下尚不清楚 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 到底能够获得最大脉冲能量、最大峰值功率、最短脉宽分别为多少的调 Q 激光输出。

文章从调 Q 速率方程出发,推导出脉冲最优输出耦合反射率  $R_{opt}$ , 最大脉冲能量  $E_{max}$ , 最大峰值功率  $P_{max}$  和脉冲宽度  $\tau$  与无量纲变量  $z$  的关系并分别对 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 做了模拟分析与对比。指出谐振腔增益、谐振腔往返损耗与反转衰减因子对调 Q 脉冲参数的影响,而国内几乎没有关于反转衰减因子的模拟,最后对模拟的参数进行了验证。

## 1 速率方程的建立

调 Q 激光器的参数模拟问题最终都归结到腔内光子数密度  $\phi$  和反转粒子数密度  $n$  与时间的变化关系<sup>[9]</sup>:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma n l \phi}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \sigma n c \phi \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为受激发射横截面积; $l$  为工作物质的长度; $\gamma$  为反转衰减因子; $c$  为光速;光束往返通过谐振腔

的时间  $t_r = \frac{2l'}{c}$ ,  $l'$  为激光谐振腔的长度;光子的衰减

时间  $t_c = \frac{t_r}{\left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right]}$ ,  $R$  为输出镜发射率; $L$  为光波

来回通过谐振腔的损耗。

根据拉格朗日乘子法(Lagrange multiplier),求出了脉冲最优输出耦合反射率  $R_{opt}$ , 最大脉冲能量  $E_{max}$ , 最大峰值功率  $P_{max}$ , 和脉冲宽度  $\tau$ 。分别为:

$$R_{opt} = \exp\left[-L\left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z}\right)\right] \quad (3)$$

$$E_{max} = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} L(z-1-\ln z) \quad (4)$$

$$P_{max} = \frac{Ah\nu L^2}{2\sigma\gamma t_r} \left(\frac{z-1-\ln z}{\ln z}\right) \left\{ z - \left(\frac{z-1}{\ln z}\right) \left[ 1 + \ln\left(\frac{z\ln z}{z-1}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t_r}{L} \left\{ \ln z \left[ \frac{1}{z - \left[ \frac{z-1}{\ln z} \right] \left[ 1 + \ln\left(\frac{z\ln z}{z-1}\right) \right]} \right] \right\} \quad (6)$$

式中: $h\nu$  为激光光子的能量; $A$  为激光光束通过的面积,无量纲变量  $z = \frac{2g_0 l}{L}$ , 定义为光束往返的小信号增益与散射损耗的比值。小信号增益系数  $g_0 = \sigma n_i$ ,  $n_i$  为初始的粒子数密度。可以看出变量  $z$  与腔内增益成正比,而与腔内往返净损耗成反比。

## 2 主动调 Q 脉冲参数的模拟

### 2.1 主动调 Q 脉冲最优输出耦合反射率的模拟

脉冲参数模拟的相关能量如表 1 所示。图 1 表示了往返损耗  $L$  分别为 0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.1 时,最优输出耦合反射率和无量纲变量  $z$  的关系。

表 1 脉冲参数模拟的相关参量

Fig.1 Related parameters about the simulation of pulse parameters

Parameter	Nd:YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>
$\sigma$	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
$l$	10 mm	10 mm
$l'$	10 cm	10 cm
$L$	0.04	0.02
$A$	0.1256 cm <sup>2</sup>	0.125 6 cm <sup>2</sup>
$h\nu$	$1.87 \times 10^{-19} \text{ J}$	$1.87 \times 10^{-19} \text{ J}$

由图 1 可以得出结论:对于同一损耗  $L$ ,最优输

出耦合反射率随着腔内增益的增大而减小,且高增益下最优输出耦合反射率的减小变的缓慢。对于同一增益,往返损耗越大,最优输出耦合反射率越小,且减小的速率变慢。可以这样理解,如果谐振腔输出镜反射率大,那么腔内光束可多次经过工作物质,这就降低了谐振腔的阈值,所以往返损耗会变低。但过高的反射率又会使得腔内存储能量提取不充分,导致出现多个脉冲输出<sup>[10]</sup>。

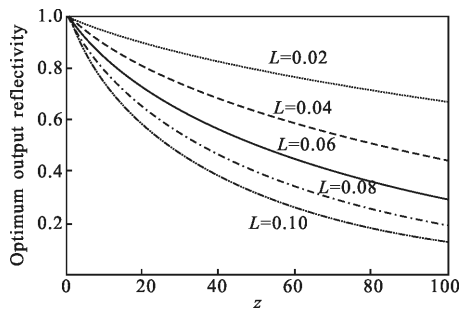


图 1 不同往返净损耗条件下,最优输出耦合反射率和变量  $z$  的关系

Fig.1 Optimum output reflectivity as a function of  $z$  under condition of different cavity roundtrip losses

## 2.2 主动调 Q Nd:YAG 与 Nd:YVO<sub>4</sub> 最大脉冲能量的模拟

无论工作物质是 Nd:YAG 还是 Nd:YVO<sub>4</sub>, 其上下能级都是由多个距离很近的简并能级所组成,他们之间会通过热跃迁的形式释放光子,而且还会受到自发辐射的影响,所以反转衰减因子  $\gamma$  不能被完全的计算出来<sup>[11]</sup>,但是反转衰减因子的研究可以提高理论模拟与实验结果的一致性。反转衰减因子  $\gamma$  对应着单光子发射后反转粒子数的净减少值。有的文章认为  $\gamma=2$ <sup>[12]</sup>,可以理解为每发射一个光子,不仅使激光上能级减少一个粒子,激光下能级同时也增加一个粒子。这是建立在形成激光过程中下能级没有损失任何光子的条件下,即每发射一个光子,下能级粒子数始终为 1,而且也没有考虑热跃迁因素的影响。有的文章认为  $\gamma=1$ <sup>[13]</sup>,可以理解为下能级释放粒子的速度很快以至于反转粒子数还没有形成,即每发射一个光子,下能级粒子数始终为 0,而实际上激光在形成与发射的过程中下能级一直都是存在粒子数的。对于一般情况,每发射一个光子,下能级粒子数部分被释放并且上能级由于热跃迁部分被填充。这样的  $\gamma$  值既不等于 1 也不等于 2,所以模拟所

取的  $\gamma$  值很均衡。

图 2 和图 3 分别表示了反转衰减因子  $\gamma$  为 0.4、0.8、1.3 和 1.8 时, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量和变量  $z$  的关系。由图可以得出结论:对于同一  $\gamma$  值, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量都随着增益的增大而增加,但 Nd:YVO<sub>4</sub> 的最大脉冲能量增长较为缓慢,这与其上能级寿命(90~100  $\mu$ s)的限制有关。对于同一增益, Nd:YAG 的最大脉冲能量比 Nd:YVO<sub>4</sub> 的最大脉冲能量大很多, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量都随  $\gamma$  值的减小而增加,且在高增益条件下 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量随  $\gamma$  值的变化很大,这也反应出研究反转衰减因子  $\gamma$  对脉冲参数模拟的重要性。

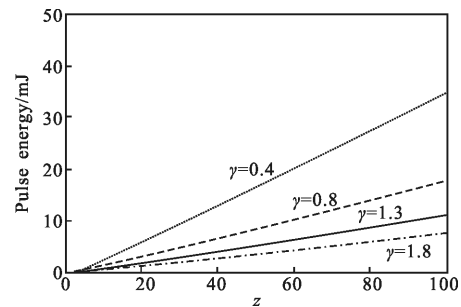


图 2 不同反转衰减因子条件下, Nd:YVO<sub>4</sub> 的最大脉冲能量和变量  $z$  的关系

Fig.2 Maximum pulse energy of Nd:YVO<sub>4</sub> as a function of  $z$  under condition of different inversion reduction factors

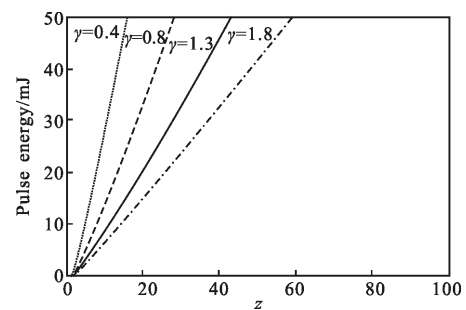


图 3 不同反转衰减因子条件下, Nd:YAG 的最大脉冲能量和变量  $z$  的关系

Fig.3 Maximum pulse energy of Nd:YAG as a function of  $z$  under condition of different inversion reduction factors

## 2.3 主动调 Q Nd:YAG 与 Nd:YVO<sub>4</sub> 最大峰值功率的模拟

图 4 和图 5 分别表示了反转衰减因子  $\gamma$  为 0.4、0.8、1.3 和 1.8 时, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大峰值

功率和变量  $z$  的关系。由图可以得出类似的结论: 对于同一  $\gamma$  值, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大峰值功率都随着增益的增大而增大。对于同一增益, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量都随  $\gamma$  值的减小而增加, 很明显的看出 Nd:YAG 的最大峰值功率要比 Nd:YVO<sub>4</sub> 的最大峰值功率大很多。这里需要说明的是之所以最大峰值功率与  $z$  的变化趋势同最大脉冲能量与  $z$  的变化趋势相同, 是因为所取的腔长均为 10 cm, 这样便于形成对比。

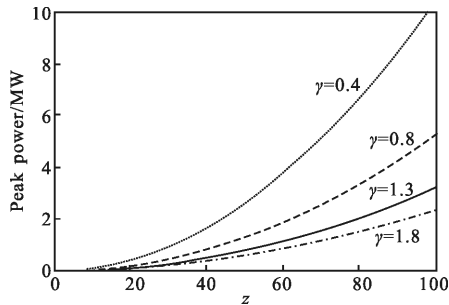


图 4 不同反转衰减因子条件下, Nd:YVO<sub>4</sub> 的最大峰值功率和变量  $z$  的关系

Fig.4 Maximum peak power of Nd:YVO<sub>4</sub> as a function of  $z$  under condition of different inversion reduction factors

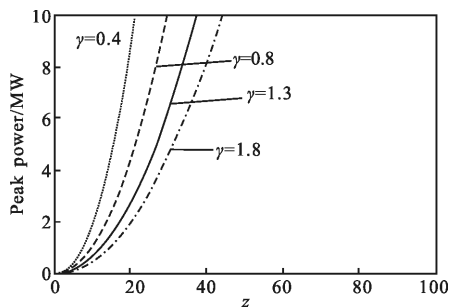


图 5 不同反转衰减因子条件下, Nd:YAG 的最大峰值功率和变量  $z$  的关系

Fig.5 Maximum peak power of Nd:YAG as a function of  $z$  under condition of different inversion reduction factors

## 2.4 主动调 Q 脉冲宽度的模拟

图 6 表示了往返损耗  $L$  分别为 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 和 0.1 时, 脉冲宽度和无量纲变量  $z$  的关系。由图可以得出结论: 对于同一增益, 脉冲宽度随着损耗的增大而减小, 由于腔长没变, 所以图中脉冲宽度变化较小。对于同一  $L$  值, 脉冲宽度随着增益的增大而减小, 且高增益下脉冲宽度变化不明显。这是由于高增益下腔内光子数已经趋于饱和, 继续加大泵浦功

率对脉宽的影响已经很小, 所以如何快速地将腔内光子数释放出去将会成为进一步压缩脉宽的因素。

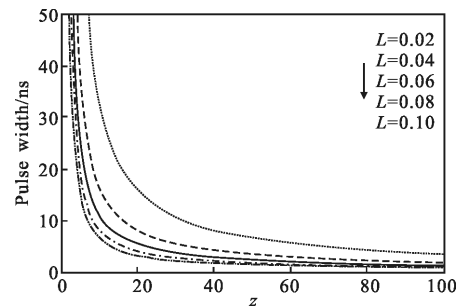


图 6 不同往返净损耗条件下, 脉冲宽度和变量  $z$  的关系

Fig.6 Pulse width as a function of  $z$  under condition of different cavity roundtrip dissipative losses

## 3 主动调 Q 脉冲参数模拟的验证

为了验证脉冲参数模拟的可靠性, 首先应分别确定出 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 两者的  $z$  值, 然后从图中分别读出所需的参数值即可。假定 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 输出的脉冲能量分别为 10 mJ 和 50 mJ, 之所以这样取值是为了让  $z$  值落在有效的区间上, 均为 1.3。那么 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 两者的  $z$  值分别为 88.9 和 43, 对应的最优输出耦合反射率分别为 69% 和 66.4%; 对应的峰值功率分别为 2.564 MW 和 11.53 MW; 对应的脉冲宽度分别为 3.77 ns 和 3.71 ns。所得结果符合理论, 也满足公式  $E=P_{av}/f$  和  $P_p=E/\tau$ 。其中  $P_{av}$  为平均功率,  $f$  为重复频率,  $P_p$  为峰值功率。

## 4 结论

从调 Q 速率方程出发, 推导出脉冲最优输出耦合反射率  $R_{opt}$ , 最大脉冲能量  $E_{max}$ , 最大峰值功率  $P_{max}$ , 和脉冲宽度  $\tau$ 。在不同往返净损耗条件下分别讨论了最优输出耦合反射率与  $z$  的关系和脉冲宽度与  $z$  的关系。指出反转衰减因子  $\gamma$  的重要性, 并发现 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的最大脉冲能量和最大峰值功率随  $\gamma$  变化十分明显, 而  $\gamma$  对脉冲宽度和最优输出耦合反射率的影响较小。模拟中 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的受激发射截面  $\sigma$  均取的很小, 如果将 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 的受激发射截面分别取  $3.42 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$  和  $6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 发现最大脉冲能量和最大峰值功率的变化也是巨大的, 这也说明了有效发射截面对实验模拟的重要性。调 Q 脉冲参数的模拟是非常有必要

的,这对后续进一步的实验研究提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Yang Kejian, Zhao Shengzhi, Li Guiqiu, et al. Modeling of a diode-pumped acousto optically Q-switched intracavity doubling Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 1-6.
- [2] Kajava T T, Gaeta A L. Q switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(16): 1244-1246.
- [3] Yu X, Wang C, Chen F, et al. Comparison of electro-optical and acousto-optical Q-switched, high repetition rate Nd:GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(3): 442-445.
- [4] Chang L, Yang C, Yi X J, et al. 914 nm LD end-pumped 31.8 W high beam quality E-O Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser without intracavity polarizer [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(9): 1369-1372.
- [5] Chang L, Yang C, Pang Q S, et al. 885 nm LD end-pumped 22.7 W high beam quality electro-optical Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(5): 914-917.
- [6] Wang Y, Gong M, Zhang H. 2 ns pulse width high repetition rate short cavity acousto-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(7): 1-2.
- [7] Bai Y, Chen X M, Lu B L, et al. Short pulse width UV laser at 355 nm based on pulse LD side-pumped ceramic Nd:YAG and BBO electro-optical Q-switched [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(2): 393-397.
- [8] Dai Mei, Jin Guangyong, Wang Chao, et al. 100 MW high peak power and high beam quality Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 612-616. (in Chinese)
- 戴梅, 金光勇, 王超, 等. 100 MW 级高峰值功率高光束质量 Nd:YAG 激光器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 612-616.
- [9] Degnan John J. Theory of the optically coupled Q-switched laser [J]. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 1989, 25(2): 214-220.
- [10] Chen Y F, Chen S W, Tsai S W, et al. Output optimization of a high-repetition-rate diode-pumped Q-switched intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm [J]. *Applied Physics B*, 2003, 77: 505-508.
- [11] D Barry Coyle, David V Guerra, Richard B Kay. An interactive numerical model of diode-pumped, Q-switched/cavity-dumped lasers[J]. *Applied Physics*, 1995, 28: 452-462.
- [12] Wang Peifeng. Study on high-power diode end-pumped all-solid-state laser [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- 王培峰. 大功率半导体激光器端面泵浦全固态激光器研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- [13] Ning Guobin, Liang Wei. The study of high-repetitive frequency electro-optical Q-switched of continuous Nd:YAG laser [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2005, 28(4): 10-13. (in Chinese)
- 宁国斌, 梁伟. 连续抽运 Nd:YAG 激光高重频电光调 Q 研究 [J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(4): 10-13.