

文章编号: 0253-2239(2007)02-0287-4

LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ 被动调 Q 钕玻璃激光器研究

钟 鸣^{1,2} 王 骥¹ 王月珠¹ 俞其寿² 黄 炼² 樊红英² 刘文兵^{2*}

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)
(² 西南技术物理研究所光电对抗部, 成都 610041)

摘要: 综述了被动调 Q 钕玻璃激光器的发展概况, 推导了被动调 Q 钕玻璃激光器输出脉冲能量、脉宽的解析表达式, 数值模拟了腔内损耗与输出脉冲能量、脉宽及峰值功率的关系以及输出脉冲能量与输入抽运能量的关系。设计了一台 LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ 被动调 Q 钕玻璃激光器, 实验验证了数值模拟分析结果。结果表明, 腔内损耗增加将导致输出脉冲能量下降, 脉宽变大, 从而峰值功率降低。输入能量低于 12 J 时, 输出只有单脉冲, 当输入能量大于 12 J 时, 输出会出现双脉冲。在 8 J 的电输入下, 获得了峰值功率 50 kW, 2.7 mJ 的 1.535 μm 激光输出。最后讨论了提高单脉冲能量的方法。

关键词: 钕玻璃激光器; LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺; 被动调 Q; 人眼安全激光测距

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Er:Glass Laser with LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ Passive Q-Switch

Zhong Ming^{1,2} Wang Qi¹ Wang Yuezhu¹ Yu Qishou² Huang Lian²

Fan Hongying² Liu Wenbing²

(¹ Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)
(² Department of Opto-Electronic Countermeasure, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

Abstract: The progress of the Er:glass lasers with passive Q-switch is discussed. The analytical expressions of the output energy and pulse width are derived. The energy, pulse width and peak power of the output pulse as functions of the cavity loss are numerically simulated. The relation between the output pulse energy and input pumping energy is numerically simulated. An Er:glass laser with LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ passive Q-switch was built to verify the numerical results. The results show that the increase of cavity loss results in widening of pulse width, decling of pulse energy and peak power of the output pulse. There is only single-pulse output when the input energy is less than 12 J. When the energy is over 12 J, it brings double-pulse output. 1.535 μm laser output with energy of 2.7 mJ and peak power of 50 kW was gained in the experiments by the power supply of 8 J. In the end, the methods to increase the output pulse energy are discussed.

Key words: Er:glass laser; LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺; passive Q-switch; eyesafe laser ranging

1 引 言

钕玻璃激光器作为人眼安全激光测距光源自从 1965 年被人们发现以来^[1]就受到广泛的重视。由于掺钕磷酸盐玻璃是一个三能级激光系统, 其振荡阈值相对较高。激光材料和激光器件研究人员在掺钕磷酸盐玻璃材料、器件的研究上采取了多种措施降低其阈值。因此使得掺钕磷酸盐玻璃激光技术得到了迅速的发展。而被动调 Q 不需要额外的电源、结构简单坚固、使用方便、成本低, 因此被动调 Q 受到军用激光测距的重视。最近几年 1.535 μm 被动调 Q 材料的研

究发展非常迅速。2002 年, Ruikun Wu 等报道了激光二极管抽运 U²⁺:CaF₂ 和 Co²⁺:MgAl₂O₄ 被动调 Q 的实验结果, 获得了 0.5 mJ、10 ns 的 TEM₀₀ 模的激光输出^[2]。R. D. Stultz 报道了 1.54 μm 钕玻璃激光器的被动调 Q 研究结果, 他们采用 U⁴⁺:SrF₂ 作为被动调 Q 组件, 获得 3 mJ、脉冲半峰全宽 60 ns 的 1.533 μm 激光输出^[3]。Stultz 还研究了 U⁴⁺:SrF₂、Er³⁺:CaF₂、Er³⁺:Ca₅(PO₄)₃FA 作为被动吸收调 Q 组件的特性^[4]。V. Podlipensky 等研究了 Cr²⁺:ZnSe 和 Co²⁺:ZnSe 作为钕玻璃饱和吸收 Q 开关的特性,

作者简介: 钟 鸣(1957—), 男, 湖南人, 研究员, 博士生导师, 主要从事强激光技术的研究。E-mail: office@xiwu.net

* 通信联系人。E-mail: novemberlwb@hotmail.com

收稿日期: 2006-04-07; 收到修改稿日期: 2006-06-26

获得 5 mJ 的 1.54 μm 激光输出。采用 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 获得 26% 的 Q 开关转换效率^[5]。Yasi Jiang 等研究了 $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ 作为饱和吸收 Q 开关的性能。通过使用 $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ 作为饱和吸收 Q 开关,在 1.535 μm 处获得 10 mJ 的能量和 60 ns 脉冲宽度的激光输出,重复频率 8.5 Hz^[6]。卿光弼等采用 $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ 作为被动调 Q 元件,闪光灯抽运,在 12 J 的电输入下,获得 12 mJ 的 1.535 μm 的输出,重复频率 10 次/分钟^[7]。作者则进行了闪光灯抽运, $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 研究,在 8 J 的电输入下获得了峰值功率 50 kW, 2.7 mJ 的 1.535 μm 激光输出。

2 数值模拟

Szabo 和 Stein 首先推导出了被动调 Q 激光器的耦合速率方程^[8],如下所示:

$$\frac{d\phi}{dt} = \left[2\sigma nl - 2\sigma_s n_s l_s - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L \right] \frac{\phi}{t_r}, \quad (1a)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma\phi n, \quad (1b)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = -\gamma_s\sigma_s\phi n_s, \quad (1c)$$

其中 ϕ 是光子密度, n 是反转粒子数密度, n_s 是可饱和吸收体的粒子数密度, σ 和 σ_s 分别是激光介质的受激发射截面和可饱和吸收体的吸收截面, l 和 l_s 分别是增益介质和饱和吸收体的长度, c 是真空中光速, $t_r = 2l'/c$ 是光束在光程为 l' 的谐振腔内的往返时间, R 是输出耦合镜的反射率, L 是腔内损耗。参量 γ 称作“简并度因子”^[9] 或“反转减少因子”^[10], 其对应于发射一个光子反转粒子数密度减少的量, 而 γ_s 对应于饱和吸收体每吸收一个光子其反转粒子数减少的量。

从上述方程组可以解出光子密度的方程^[11]:

$$\phi(n) = \frac{l}{\gamma l'} \left\{ n_i - n - \frac{\ln(1/R) + L}{2\sigma l} \ln\left(\frac{n_i}{n}\right) - \frac{l_s \gamma_s n_{si}}{\gamma_s} \left[1 - \left(\frac{n}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\alpha = \gamma_s \sigma_s / \gamma \sigma$, 最后一项是由于饱和吸收体的影响而产生的。

下面利用方程组(1)和式(2)推导出了钕玻璃激

光器 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 的输出能量和脉宽表达式,并进行了数值模拟。掺钕磷酸盐玻璃为三能级结构,计算中的相关参量见实验研究部分。

2.1 输出能量与损耗的关系

从(1a)式可以得到经谐振腔耦合镜输出的瞬时功率为

$$P(t) = -h\nu A l' \frac{d\phi}{dt} \Big|_R = \frac{h\nu A l'}{t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \phi(t), \quad (3)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, $A l'$ 为模体积。因此,被动调 Q 激光器输出能量的表达式为

$$E = \int_0^\infty P(t) dt = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right), \quad (4)$$

式中 n_i 和 n_t 分别为介质内初始的和最终的反转粒子数密度,即调 Q 结束时介质内的反转粒子数密度, n_{si} 为饱和吸收体内初始的粒子数密度。通过令 $\phi(n) = 0$ 可以得到一个关于 n_t 的超越方程

$$n_i - n_t - \frac{\ln(1/R) + L}{2\sigma l} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - \frac{l_s \gamma_s n_{si}}{\gamma_s} \left[1 - \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^\alpha \right] = 0, \quad (5)$$

图 1 为钕玻璃激光器 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 谐振腔内的损耗与输出能量的关系曲线图。从图中可以看出,在其它条件不变的情况下,激光器输出能量随腔内损耗的增大而降低。

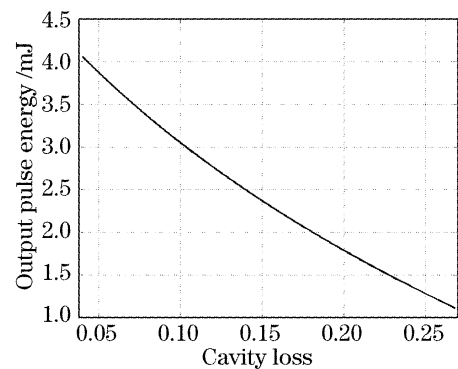


图 1 输出能量与腔内损耗关系曲线图

Fig. 1 Relation between output pulse energy and cavity loss

2.2 输出激光脉宽与损耗的关系

当光子密度达到最大值 ϕ_{\max} 时,谐振腔输出瞬时功率亦达到最大值 P_{\max} :

$$P_{\max} = \frac{h\nu A l'}{t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \phi_{\max} = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left\{ n_i - n_t + \frac{\ln(1/R) + L}{2\sigma l} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - \frac{l_s \gamma_s n_{si}}{\gamma_s} \left[1 - \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 n_t 为输出功率最大时介质内的反转粒子数密度,其可通过(1a)式除以(1b)式并令 $d\phi/dt=0$ 解得

$$n_t = \frac{\ln(1/R) + L}{2\sigma l} + \frac{l_s \sigma_s n_{si}}{\sigma} \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^\alpha, \quad (7)$$

因此,由(4)式和(6)式可以计算出输出激光脉冲的半峰全宽(FWHM)为

$$t_p = \frac{E}{P_{\max}} = \frac{\gamma_s t_r \ln(n_i/n_t)}{2\sigma l \gamma_s (n_i - n_t) + \gamma_s [\ln(1/R) + L] \ln(n_t/n_i) - 2\sigma l_s \gamma_{si} [1 - (n_t/n_i)^a]} \quad (8)$$

根据公式(8)可以对 LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ 被动调 Q 的掺钕玻璃(Er:glass)激光器的输出脉冲宽度与腔内损耗的关系进行数值模拟,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,输出脉宽随腔内损耗的增大而增加。在腔内损耗小于 0.18 的情况下,随着损耗的增加,输出脉冲宽度的增加比较缓慢;而当腔内损耗大于 0.18 时,输出脉冲宽度随腔内损耗增加而急剧变大。

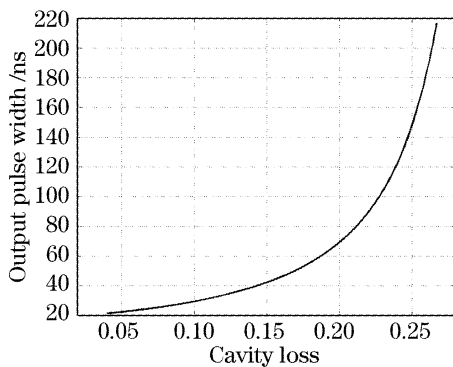


图 2 输出脉冲宽度与腔内损耗关系曲线图

Fig. 2 Output pulse width versus cavity loss

图 3 是峰值功率与腔内损耗的数值模拟,可以看出输出脉冲峰值功率随腔内损耗增加而急剧下降,其原因是输出脉冲宽度随腔内损耗增加而急剧变大。

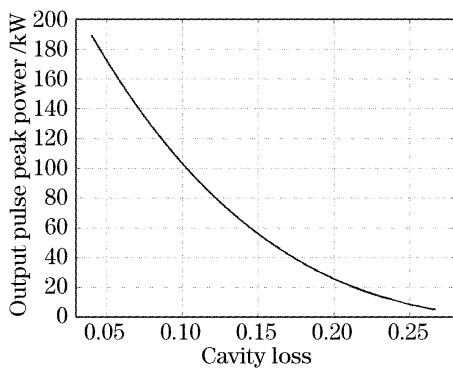


图 3 输出脉冲峰值功率与腔内损耗的关系

Fig. 3 Output pulse peak power versus cavity loss

作为测距机使用光源需要的是峰值功率、单脉冲能量,因此在其它条件不变的情况下要尽量降低腔内损耗。

2.3 输出脉冲能量与输入能量的关系

钕玻璃激光器是三能级系统,在三能级系统中

$$g_0 = \alpha_0 (kE_{in} - 1) / (KE_{in} + 1), \quad (9)$$

其中 g_0 为小信号增益系数, α_0 为吸收系数, K 为钕玻璃激光器能级转换因子, E_{in} 为抽运输入能量。将

(9) 式代入(4) 式中便可以得到抽运输入能量与输出脉冲能量的关系。

图 4 是对输出脉冲能量与输入能量的关系在不同损耗下进行的数值模拟,从图中可以看出,在相同的抽运能量下,腔内损耗越小,输出脉冲能量越大,而对于任一腔内损耗值,输出脉冲能量随着抽运能量的增大而增大。但是在输入能量增加的情况下,即使腔内损耗增加,其输出能量也可能增加,如 8 J 输入、损耗 $L=0.05$ 的输出相对于 a 点,而 10 J 输入、 $L=0.10$ 的输出相对于 b 点,显然 b 点处的能量高于 a 点处的能量。

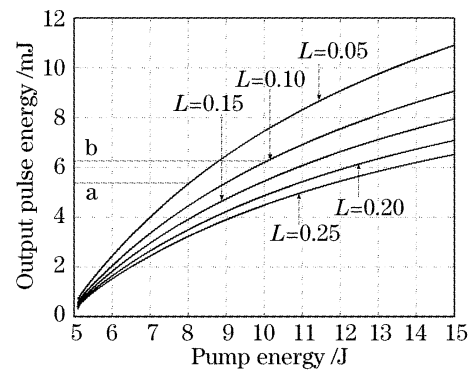


图 4 不同腔内损耗下,输出脉冲能量与输入能量的关系

Fig. 4 Relations between output pulse for energy and input pulse energy different cavity loss

从以上分析可以看出,提高被动调 Q 激光器单脉冲能量的方法有降低腔内损耗和提高输入能量。当腔内损耗一定时,单靠提高输入能量的办法并不一定能提高单脉冲能量。其原因是,调 Q 材料随着能量密度的增大变得透明起来,当腔内能量密度达到某一较高值时,材料就会“饱和”或“漂白”,从而导致产生很高的透射率^[12],谐振腔输出激光。此后腔内能量密度减小,调 Q 材料恢复不透明状态。但如果剩余抽运能量足以使腔内能量密度再次达到使调 Q 材料“漂白”的值时,被动 Q 开关又一次打开,谐振腔输出第二个脉冲,所以说单靠提高输入能量,并不能提高输出单脉冲的能量,而只能增加单脉冲的数量。

3 LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ 被动调 Q 实验研究

3.1 实验装置

图 5 为本实验装置示意图。其中 1 为 1.535 μm

全反镜;2 为脉冲氙灯;3 为钕玻璃棒($\phi 2.3 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$);4 为 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 片 ($7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.27 \text{ mm}$, 小信号透射率为 38%);5 为 $1.535 \mu\text{m}$ 输出镜 ($R=78\%$);6,7 为经标定的激光能量计和光电探测系统。

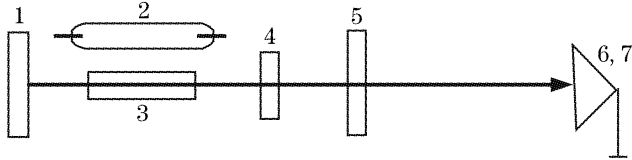


图 5 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 实验示意图

Fig. 5 Experimental setup of $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ passive Q-switching

3.2 实验结果及讨论

利用上述激光装置进行了钕玻璃激光器 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 实验。图 6 为输入电能与激光器输出能量的关系曲线。输出脉冲的能量以 10 个脉冲取平均。

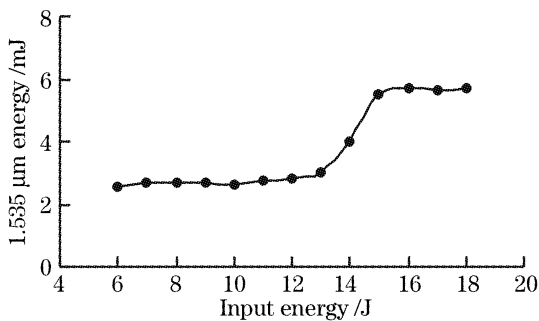


图 6 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 钕玻璃激光器输入与输出能量关系曲线图

Fig. 6 $1.535 \mu\text{m}$ output versus input energy of an Er:glass laser with $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ passive Q-switch

从图 6 可以看出,在 6~12 J 的输入能量内,只出现单脉冲。而在 12~16 J 的输入能量下,可能出现单脉冲,也可能出现双脉冲。随着输入能量的增加,出现双脉冲的概率亦增加。因此 10 个脉冲的平均值逐步变大。当输入能量大于 14 J 后,完全出现双脉冲,这与 2.3 的分析是相吻合的。这在激光测距中是不允许的。文献[13]的试验结果同样证实了这一点。

在 8 J 的电输入下,获得了 2.7 mJ 的 $1.535 \mu\text{m}$ 激光输出,脉冲宽度为 50 ns,输出波形如图 7 所示。

从该实验结果可以看出,输出脉冲的峰值功率仅 50 kW,比常用的 $1.06 \mu\text{m}$ 测距光源差两倍,这将极大地影响了测程。实验和理论证明单靠提高输入能量并不能提高单脉冲能量,通过增加被动调 Q 片 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 的厚度,增加激光谐振腔内的损耗,提高输出脉冲的能量,可使得输出脉冲的峰

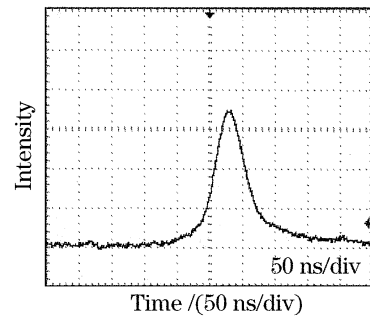


图 7 $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ 被动调 Q 钕玻璃激光波形图

Fig. 7 Oscillogram of wave profile from Er:glass laser with $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Co}^{2+}$ passive Q-switch

值功率增加,但这势必导致输入电脉冲能量的增加。因此对被动调 Q 激光器的各种参量存在一个优化设计的问题,有关这方面的工作在继续进行。

参 考 文 献

- 1 E. Snitzer, R. Woodcock. $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ glass laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **6**(3): 45~46
- 2 Ruikun Wu, J. D. Myers, M. J. Myers *et al.*. Diode pumped miniature eye-safe laser Q-switched by $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ and $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4723**: 94~97
- 3 Robert D. Stultz, Marly B. Camargo, Suzanne T. Montgomery *et al.*. $\text{U}^{4+}:\text{SrF}_2$ efficient saturable absorber Q-switch for the $1.54 \mu\text{m}$ erbium: glass laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(8): 948~950
- 4 Robert D. Stultz, Marly B. Camargo, Milton Birnbaum. Q-switch saturable absorber materials for solid state lasers[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2115**: 31~37
- 5 A. V. Podlipensky, V. G. Shcherbitsky, N. V. Kuleshov *et al.*. $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ and $\text{Co}^{2+}:\text{ZnSe}$ saturable-absorber Q-switches for $1.54 \mu\text{m}$ Er:glass lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(14): 960~962
- 6 Yasi Jiang, Ruikun Wu, Daniel L. Rhonehouse *et al.*. Bleaching and Q-switching of $\text{U}^{2+}:\text{CaF}_2$ at 1535 nm [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2379**: 26~31
- 7 Qing Guangbi, Chen Dezhang, Li Mingqiang. Laser ranging technology of $1.54 \mu\text{m}$ Er-glass laser[R]. SWITP, GF Report, 209-2001-002 (in Chinese)
卿光弼,陈德章,李名强. $1.54 \mu\text{m}$ 钕玻璃激光测距技术[R]. 西南技术物理研究所,GF 报告,209-2001-002
- 8 A. Szabo, R. A. Stein. Theory of laser giant pulsing by a saturable absorber[J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(5): 1562~1566
- 9 W. Koechner. *Solid State Laser Engineering* [M]. New York: Springer-Verlag, 1976. ch8
- 10 John J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220
- 11 John J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(11): 1890~1901
- 12 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: The Science Press, 2002. 442 (in Chinese)
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥译,北京:科学出版社,2002. 442
- 13 Zhong Ming, Han Kai, Yang Zeming *et al.*. Experimental studies of intracavity Raman laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 1993, **20**(10): 787~790 (in Chinese)
钟鸣,韩凯,杨泽明等. $1.54 \mu\text{m}$ 腔内喇曼激光器实验研究[J]. 中国激光, 1993, **20**(10): 787~790