

文章编号:1001-5078(2019)07-0831-04

· 激光器技术 ·

Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光器脉冲输出特性研究

白青山

(通辽职业学院, 内蒙古 通辽 028000)

摘要:研究了 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光器脉冲输出特性,通过 Cr^{4+} :YAG 跃迁吸收的速率方程模型,模拟分析了 Cr^{4+} :YAG 初始透过率和晶体长度对激光输出脉冲宽度的影响,并利用氙灯泵浦 Nd:YAG 激光器进行了被动调 Q 实验。结合模拟结果分析了产生激光多脉冲的现象,通过对被动 Q 开关参数的优化,获得了激光脉冲宽度约为 17.5 ns,单脉冲能量为 195 mJ 的稳定激光脉冲输出。

关键词:被动调 Q; Cr^{4+} :YAG;双脉冲现象

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.008

Study on pulse output characteristics of Cr^{4+} :YAG passively Q-switched laser

BAI Qing-shan

(Tongliao Vocational College, Tongliao 028000, China)

Abstract: The pulse output characteristics of Cr^{4+} :YAG passive Q-switched laser were studied. The effects of initial transmittance and crystal length of Cr^{4+} :YAG on the laser output pulse width were simulated by the rate equation model of Cr^{4+} :YAG transition absorption. The Nd:YAG laser pumped by xenon lamp is used for passive Q-modulation experiment. Combined with the simulation results, the phenomenon of generating laser multi-pulse is analyzed. By optimizing the passive Q-switching parameters, a stable laser pulse output with a laser pulse width of about 17.5 ns and single pulse energy of 195 mJ is obtained.

Key words: passive Q-switching; Cr^{4+} :YAG; double-pulse phenomenon

1 引言

被动调 Q 固态激光器具有设计简单、紧凑、成本低和重量轻等优点, Cr^{4+} :YAG 因为物化性能稳定、热导性好、吸收截面大、掺杂浓度高、饱和光强小、损伤阈值高,并且在 0.9 ~ 1.2 μm 波段范围具有显著的可饱和吸收特性而得到了人们的格外关注^[1-5]。本文对 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光器脉冲输出特性进行了研究,理论分析了 Cr^{4+} :YAG 参数、谐振腔长度等对激光输出脉冲的影响,根据理论模拟结果,进行了 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光器激光脉冲

宽度压窄优化实验,获得了窄脉冲激光输出,实验分析为激光探测、激光测距、激光加工等应用提供十分重要的实际参考。

2 理论分析

激光 Q 开关脉冲的脉冲宽度可表示为^[6]:

$$\Delta t = \frac{2l}{c(T+L)} \times \frac{n_i - n_f}{n_i - n_t[1 + \ln(n_i/n_t)]} \quad (1)$$

式中, Δt 为输出激光脉冲宽度; T 为输出镜的透过率; L 为谐振腔往返损耗,除透射损耗之外的其他损耗; l 为谐振腔的腔长, n_i, n_t, n_f 分别为初始、阈值和

最终反转粒子数; c 为真空中的光速。可以看出, 输出激光脉宽与腔长成线性关系, 腔长变长输出脉宽变宽, 腔长变短输出脉宽变窄。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 与 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长激光吸收有关的能级及跃迁过程如图1所示。 N_1, N_2, N_3, N_4 分别表示各能级的粒子数密度, e_g 和 e_e 表示基态和激发态吸收截面, 辐射跃迁速率(k_2, k_3 和 k_4) 比其他过程都快得多, 故 N_3 和 N_4 可以忽略。室温下, N_2 对应的能级寿命约为 $3.4\ \mu\text{s}$, 从 $3T_1$ 到 $3T_2$ 能级的弛豫时间约为 $50\ \text{ps}$ 。

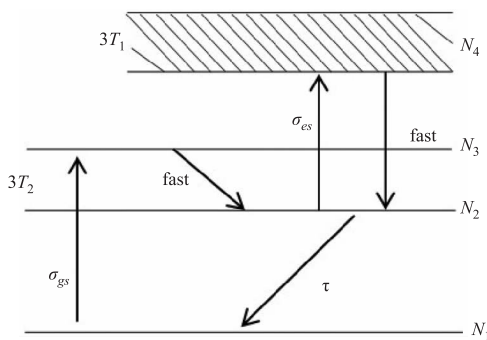


图1 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 能级及跃迁过程

Fig. 1 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ energy level and transition process

当光强较小时, Cr^{4+} 离子将吸收大部分光子, 而由基态跃迁到3态, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的透过率很小; 当光强较大时, Cr^{4+} 离子只吸收一部分光子就可全部由基态跃迁到激发态, 而激发态吸收小于基态吸收, 其他大部分光子将不被吸收, 表现为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的透过率较大。

描述和计算 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 跃迁吸收的速率方程如式(2)所示^[7]:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma_{gs} n_{gs} l_s - 2\sigma_{es} (n_{0s} - n_{gs}) l_s - \left(\ln \frac{1}{R} + \delta \right)] \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = R_p(t) \left(1 - \frac{n}{N_T} \right) - \gamma \sigma c \phi n - \frac{n}{\tau_a} \quad (3)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = \frac{n_{0s} - n_{gs}}{\tau_{gs}} - \sigma_{gs} c \phi n_{gs} \quad (4)$$

$$\frac{dn_{es}}{dt} = \sigma_{gs} c \phi n_{gs} \quad (5)$$

$$n_{gs} - n_{es} = n_{0s} \quad (6)$$

式中, ϕ 为激光腔中光子数密度; n 为增益介质反转粒子数密度; n_{gs} 为可饱和吸收体基态粒子数密度; n_{es} 为可饱和吸收体激发态粒子数密度; n_{0s} 为可饱和吸收体总粒子数密度; σ 和 l 分别为增益介质的受激发射截面和长度; σ_{gs} 和 σ_{es} 分别为可饱和吸收

体基态和激发态的吸收截面; l_s 为可饱和吸收体沿光腔轴线的长度; R 为输出镜的反射率; δ 是激光器腔体的耗散性损耗; c 为光速; l'_c 为光学谐振腔的等效光程长度; $t_r = l'_c/c$ 为光在腔中往返一周的时间; γ 是反转因子, 对于四能级系统为1, 三能级系统为2; $R_p(t)$ 是抽运速率; N_T 是增益介质的总粒子数密度; τ_a 是增益介质的上能级寿命; τ_{gs} 是饱和吸收体的恢复时间。

实际使用的晶体表面镀有增透膜, 因此过程中不考虑晶体表面的反射、散射和其他损耗。

小信号透过率, 即初始透过率为:

$$T_0 = \exp(-\sigma_{gs} n_{0s} d) \quad (7)$$

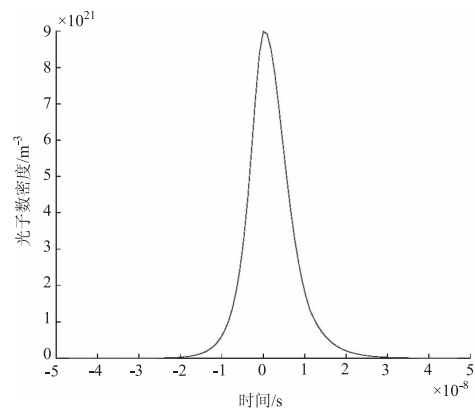
饱和水平下, 饱和透过率为:

$$T_s = \exp(-\sigma_{es} n_{0s} d) \quad (8)$$

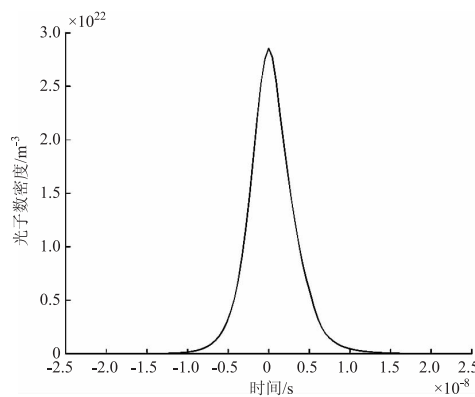
式中, d 为晶体厚度。

利用 Matlab 对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 过程进行了模拟分析, 其中 $\sigma_{gs} = 8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_{es} = 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 谐振腔长设定为 $500\ \text{mm}$ 。

模拟分析了晶体初始透过率和厚度对激光特性的影响, 如图2所示, 模拟结果可以看出, 降低初始



(a) 初始透过率为24%, 长度5 mm



(b) 初始透过率为14%, 长度7 mm

图2 光子数密度随时间的变化曲线

Fig. 2 Photon number density versus time curve

透过率,增大晶体长度可使激光输出脉冲宽度变窄。所在实验中,根据实验装置和条件,设计合理的饱和和吸收晶体参数,可使激光脉冲宽度变窄,避免双脉冲现象的发生。

3 实验装置

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器光路如图 3 所示。激光器增益介质是掺杂浓度为 1.5at % ,尺寸为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的 Nd : YAG 晶体棒。激光器谐振腔由曲率半径 2 m 的凹镜 M_1 以及透过率 90 % 的输出镜 M_2 组成,谐振腔腔长为 500 mm,激光器采用脉冲氙灯作为激励源,采用循环水冷却方式。

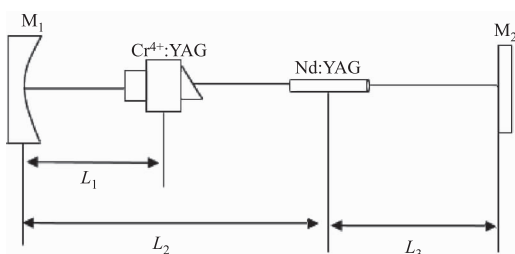


图 3 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passive Q-switched laser

4 实验结果与分析

采用可饱和吸收的掺铬 YAG 晶体作为激光器的被动 Q 开关,晶体尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,透过率为 24 %。实验利用 DET10A 型探测器 (Thorlabs 公司,美国) 和 TDS3034B 型示波器 (Tektronix 公司,美国) 测量激光输出光束脉冲波形,如图 4 所示,可以看出,低能量运行时激光输出脉冲宽度约为 30 ns,当增加泵浦能量时,出现双脉冲现象。这是由于泵浦速率提高,导致了调 Q 状态的快速转变,脉冲建立时间变短,进而导致在单个脉冲驱动周期中,不断地改变着调 Q 的状态,导致反转粒子数的不断积累和释放,会出现双脉冲甚至多个脉冲输出。泵浦电压 880V 时的激光脉冲波形如图 5 所示。

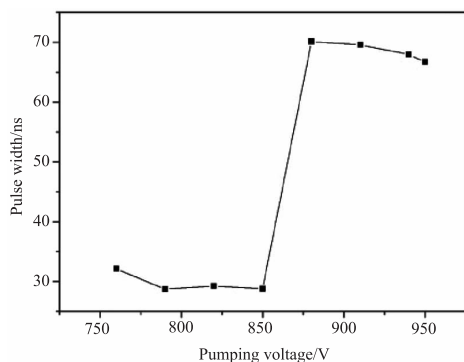


图 4 激光脉冲宽度随泵浦电压变化

Fig. 4 Laser pulse width varies with pump voltage

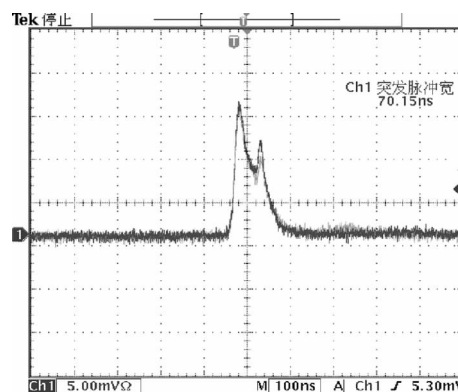


图 5 激光脉冲波形图

Fig. 5 Profile of laser pulse

根据激光实验产生的双脉冲现象,对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 参数进行了优化调整,选用尺寸 $\Phi 10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,透过率为 14 % 的被动 Q 晶体,测量激光输出光束脉冲波形,如图 6 所示,可以看出,当增加泵浦能量时,激光输出脉冲宽度逐渐变窄,最窄脉宽为 17.5 ns,激光输出能量约为 195 mJ,由于激光脉冲储能与被动调 Q 脉冲建立时间与间形成良好的匹配,激光能够始终保持单脉冲,但这使得激光腔内损耗增加,提高了激光阈值。泵浦电压 880 V 的激光脉冲波形如图 7 所示。

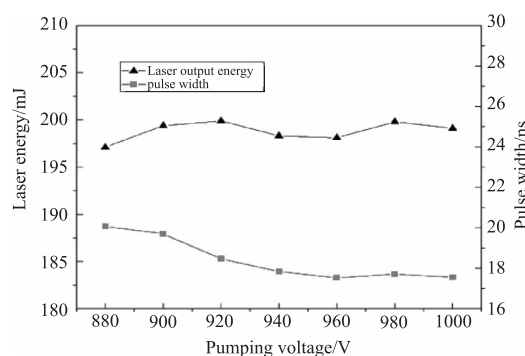


图 6 激光能量和脉宽随泵浦电压变化

Fig. 6 Laser energy and pulse width varies with pump voltage

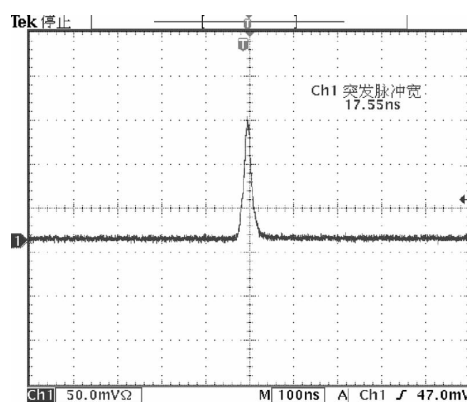


图 7 激光脉冲波形图

Fig. 7 Profile of laser pulse

5 结 论

研究了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器脉冲输出特性,通过 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 跃迁吸收的速率方程模型,模拟分析了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率和晶体长度对激光输出脉冲宽度的影响,并利用氙灯泵浦 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器进行了被动调 Q 实验。结合模拟结果分析了产生激光多脉冲的现象,通过对被动 Q 开关参数的优化,当采用初始透过率 14%,长度为 7 mm 的被动 Q 开关时,实现了激光脉冲宽度约为 17.5 ns,单脉冲能量为 195 mJ 的稳定激光脉冲输出。

参考文献:

- [1] MA Y, HE Y, YU X, et al. Multiple-beam, pulse-burst, passively Q switched ceramic $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser under microlens array pumping [J]. *Optical Express*, 2015, 23 (19):24955 – 24961.
- [2] FENG C, LIU M, LI Y, et al. Gold nanorods saturable absorber for Q switched $\text{Nd}:\text{GAGG}$ lasers at 1 μm [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(3):81.
- [3] Zayhowski J J. Passively Q-switched $\text{Nd}:\text{YAG}$ microchip lasers and applications [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, 303 – 304:393 – 400.
- [4] DONG Jun, WANG Guangyu, REN Yingying. Advances in passively Q-switched solid-state lasers based on composite materials [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6):0601003. (in Chinese)
- 董俊,王光宇,任滢滢. 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6):0601003.
- [5] LIU Qi, MENG Junqing, ZU Jifeng, et al. High repetition frequency narrow pulse electro-optical Q-switched laser for space applications [J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(6):0601005. (in Chinese)
- 刘琪,孟俊清,祖继峰,等. 适于空间应用的高重复频率窄脉冲电光调 Q 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6):0601005.
- [6] W Koechner. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- W 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] Ou Yangbin, DING Yanhua, WAN Xiaoke, et al. Saturable absorption of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ and its performance as passive Q-switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(12): 1665 – 1670. (in Chinese)
- 欧阳斌,丁彦华,万小珂,等. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究 [J]. *光学学报*, 1996, 16(12):1665 – 1670.