

脉冲抽运被动调 Q 激光器脉冲间隔特性研究

许 韬 金光勇 于永吉 陈薪羽 王 超 吴春婷

(长春理工大学理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 采用数值模拟和实验相结合的方法对脉冲激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出脉冲间隔特性进行分析。从被动调 Q 速率方程出发,结合脉冲 LD 抽运的特点,考虑剩余反转粒子数密度的影响,推导出输出调 Q 脉冲间隔时间的计算公式。重点分析了抽运脉宽、输出镜反射率、抽运功率和 Cr⁴⁺:YAG 初始透射率对输出脉冲间隔时间的影响。结果表明,数值模拟与实验结果基本吻合。

关键词 激光器;脉冲抽运;被动调 Q;脉冲间隔

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.061401

Study on the Pulse Interval of Passively Q-Switched Laser Pumped by Diode Laser Pulse

Xu Tao Jin Guangyong Yu Yongji Chen Xinyu Wang Chao Wu Chunting

(Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A passively Q-switched Nd:YAG laser pumped by diode pulse is set up. The characteristics of the laser pulse intervals are analysed by combining numerical simulation and experimental method. Starting with the rate equation of passively Q-switching mode, the Q-switched pulse intervals are formulated in consideration of the feature of diode pulse pumping and the influence of surplus inverse population density. The influence of pumping current and pulse width, the reflectivity of output mirror and the initial transmission of Cr⁴⁺:YAG on pulse interval time is analysed emphatically. The result indicates that the numerical simulation of pulse interval time coincides with the experimental data.

Key words lasers; pulse pumped; passive Q-switching; pulse interval

OCIS codes 140.3540; 140.3538; 140.3430; 140.3580

1 引言

激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 激光器,由于具有体积小、结构简单、输出激光脉冲峰值功率高、脉宽窄等特点,被广泛地应用于激光通信、雷达探测、远程测距和医学等诸多领域^[1~10]。LD 脉冲抽运的被动调 Q 激光器由于在高功率脉冲抽运时输出的激光为多脉冲形式,因此在对激光脉冲序列没有严格要求的情况下,优先考虑采用被动调 Q 方法。然而,在很多军事应用中要求对脉冲序列有一定的控制精度^[5]。因此,对脉冲 LD 抽运的被动调 Q 激光器输出脉冲间隔进一步的研究,有助于扩展其在敌我识别、抗干扰通信等领域的应用。抽运功率、输出镜反射率、小信号透射率、抽运脉宽是影响 LD 脉冲抽运被动调 Q 激光器输出激光脉冲间隔特性的重要因素。但是目前的报道^[6~11]多数只限于在上述因素下对激光器输出脉冲能量、峰值功率、稳定性等方面的研究,而没有专门针对在脉冲 LD 抽运条件下对被动调 Q 激光器输出脉冲序列间隔特性的研究。

收稿日期: 2011-12-05; 收到修改稿日期: 2011-12-28; 网络出版日期: 2012-04-01

基金项目: 吉林省科技支撑重点项目(20100355)资助课题。

作者简介: 许 韬(1986—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: xutao1225@yahoo.cn

导师简介: 金光勇(1971—),男,博士,博士生导师,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: jgyciom@163.com(通信联系人)

本文从被动调 Q 理论入手,推导出在脉冲 LD 抽运被动调 Q 情况下输出脉冲序列间隔时间的计算公式,并通过实验验证和分析了抽运功率、抽运脉宽、小信号透射率、输出镜反射率对输出激光脉冲间隔时间的影响。

2 被动调 Q 理论

2.1 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 速率方程

根据被动调 Q 理论,考虑可饱和吸收体的激发态吸收以及抽运周期和自发辐射的影响,被动调 Q 速率方程可写为^[12]

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \{ 2\sigma n l - 2\sigma_g n_g l_s - 2\sigma_e n_e l_s - [\ln(1/R) - L] \}, \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma c\phi n - n/\tau + W_p, \quad (2)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = -\sigma_g c\phi n_g + (n_{s0} - n_g)/\tau_s, \quad (3)$$

$$n_g + n_e = n_{s0}, \quad (4)$$

式中 ϕ 是激光谐振腔中的光子密度; n 是瞬间粒子数反转密度; n_g 和 n_e 分别是可饱和吸收体中基态和激发态的粒子密度; n_{s0} 是可饱和吸收体内总的粒子数密度; σ 是激光受激发射截面; l 和 l_s 分别是增益介质和可饱和吸收体的长度; c 是真空中光速; R 是输出镜反射率; γ 是激光晶体的反转简并因子(对 Nd:YAG 晶体 $\gamma = 1$); $t_r = 2l'/c$, 是光在光程长为 l' 的谐振腔内往返的时间; σ_g 和 σ_e 分别是可饱和吸收体的基态和激发态吸收截面; τ 是增益介质的上能级寿命; τ_s 是可饱和吸收体的激发态寿命; W_p 是抽运速率; L 是腔内无用损耗。

对于脉冲抽运的被动调 Q 激光器,在抽运刚开始时,由于腔内光子数密度很低,可饱和吸收体的粒子数几乎都在基态,因此在可饱和吸收体的反转粒子数达到饱和之前,令(1)式左侧等于 0,并使 $n_g = n_{s0}$, 初始粒子数密度 n_i 可表示为

$$n_i = \frac{2\sigma_g n_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l} = \frac{\ln(1/T_0^2) + \ln(1/R) + L}{2\sigma l}, \quad (5)$$

式中 $T_0 = \exp(-n_{s0}\sigma_g l_s)$ 为初始透射率。随着抽运的继续,光子数密度迅速增加,可饱和吸收体内处在基态的粒子数被激发到激发态,令 $n_g = 0$, 得到阈值反转粒子数密度 n_{th} :

$$n_{th} = \frac{2\sigma_e n_{s0} l_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma l}. \quad (6)$$

在调 Q 激光脉冲输出以后,腔内反转粒子数迅速减少到阈值反转粒子数 n_{th} 以下,得到剩余反转粒子数密度 n_f :

$$n_i - n_f - n_{th} \ln(n_i/n_f) = 0. \quad (7)$$

从以上几式可以看出,对于被动调 Q 激光器,初始反转粒子数密度 n_i 并不取决于抽运速率 W_p , 而是由初始透射率 T_0 和输出镜反射率 R 决定^[13]。

2.2 调 Q 脉冲间隔理论推导

在脉冲 LD 抽运的被动调 Q 激光器中,抽运脉宽 $t_p < \tau$, 即抽运脉宽小于受激粒子的上能级寿命。相对于连续抽运,脉冲抽运存在一定的抽运周期,被动调 Q 晶体属于慢饱和吸收体,导致了它与连续抽运被动调 Q 的不同特点。从数值求解被动调 Q 速率方程出发,对脉冲 LD 抽运 Nd:YAG 被动调 Q 激光器的输出参数进行研究,给出在一个抽运脉宽内产生的脉冲序列之间的间隔时间,以及在一定条件下产生单脉冲的个数。

脉冲 LD 抽运的调 Q 激光器,在一个抽运脉宽时间之内,假定被动 Q 开关打开的频率为 f , 则在脉冲之间建立反转粒子数的最长间隔为 $t_c = 1/f$, 又因是脉冲抽运,抽运脉宽小于激光粒子的上能级寿命,由可饱和吸收体吸收的抽运功率引起的初始反转粒子数 n_i 可写成^[14]

$$n_i = n_{pp} - (n_{pp} - n_f) \exp[-1/(t_p f)], \quad (8)$$

式中 n_{pp} 是脉冲抽运时腔内的反转粒子数密度,抽运脉宽为 t_p , Q 开关频率为 f 。在脉冲抽运的情况下,没有

抽运作用的时远远超过抽运时长,因此认为每个抽运周期的反转粒子数密度都从 0 增至 n_i ,即在每个周期开始之前可饱和吸收体已经完全恢复。若在一个抽运脉宽作用时间产生多脉冲,则在首脉冲输出以后也存在剩余反转粒子数密度 n_f ,而 $n_i > n_f$,所以首脉冲建立的时间要长,同实验中看到的一致。通过(8)式可以推导出在一个抽运脉宽时间之内产生的调 Q 脉冲间隔时间 t_c :

$$t_c = t_p \ln \left(\frac{n_{pp} - n_f}{n_{pp} - n_i} \right) = t_p \ln \left\{ \frac{t_p P_p [1 - \exp(-2\alpha l)] - h\nu_p A_p n_f}{t_p P_p [1 - \exp(-2\alpha l)] - h\nu_p A_p n_i} \right\}, \quad (0 < t_p < \tau) \quad (9)$$

式中 P_p 是抽运光功率, α 是增益介质的吸收系数, $h\nu_p$ 抽运光子能量, A_p 是抽运光束横截面积。

假定将首脉冲建立的时间近似看作 n_i 建立的时间,相对于后续脉冲建立的时间 n_f/W_p ,首脉冲建立的时间要长,所以可得出在一个抽运脉冲时间内产生的多脉冲个数 m 为

$$m = \frac{t_p - n_f/W_p}{t_c} = \frac{n_{pp} - n_f}{n_{pp} \ln \left(\frac{n_{pp} - n_f}{n_{pp} - n_i} \right)}. \quad (10)$$

根据上述条件,如果要产生单脉冲,则不需考虑剩余反转粒子数密度 n_f ,只需要使 $t_p/2 < t_c \leq t_p$ 。同理若要在一个抽运脉宽时间之内输出 m 个脉冲,则只需满足 $\frac{t_p}{m+1} < t_c \leq \frac{t_p}{m}$ 。

综上所述,由以上几式便能求出脉冲 LD 抽运被动调 Q 在一个抽运周期内产生单脉冲或多脉冲的抽运速率和脉宽,或者是在一定的条件之下,可以求得产生调 Q 脉冲个数和脉冲间隔时间。在 Matlab 环境下,针对抽运功率、输出镜反射率、抽运脉宽和初始透射率对输出脉冲间隔时间的影响进行数值模拟计算。相关参数如表 1 所示。

表1 用于数值模拟的 Nd:YAG 和 Cr⁴⁺:YAG 的相关参数

Table 1 Spectral parameters of Nd:YAG and Cr⁴⁺:YAG used in numerical simulations

Parameters	Values
σ_g	$3.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
σ_e	$4.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
σ	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
$h\nu$	$1.86 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
$h\nu_p$	$1.78 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
a	0.24 mm^{-1}
τ	$230 \text{ }\mu\text{s}$
τ_s	$3.4 \text{ }\mu\text{s}$

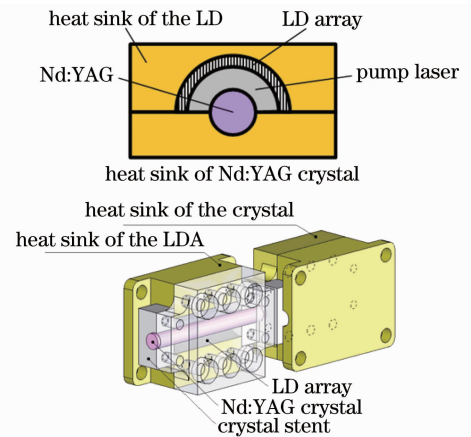


图 1 LDA 抽运模块结构图

Fig. 1 Schematic of LDA side-pumped Nd:YAG laser structure

3 实验结果及分析

实验采用双半环形 LD 阵列(LDA)侧面交错抽运双棒串接的 Nd:YAG 晶体,如图 1 所示。每个 LDA 阵列均封装了 30 条 LD bars,其中 808 nm LD 单条的峰值功率为 100 W,抽运脉宽为 100~300 μs ,由美国 Coherent 公司生产。LDA 与晶体棒中心距离为 3 mm,共使用 60 条 LD bars。

谐振腔选取平-平腔结构,实验装置如图 2 所示,腔长为 170 mm。Nd:YAG 激光棒的尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,Nd³⁺ 掺杂离子百分数为 0.8%。选用初始透射率分别为 30%、44.8%、54.1% 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为调 Q 晶体,直径为 10 mm。全反镜 M1 表面镀 1064 nm 高反膜($R > 99.8\%$),选用平面输出镜 M2,对 1064 nm 激光的反射率分别为 10%、20%、40%。在重复频率为 1 Hz 时,使用 OPHIR 公司 NOVA II 型号能量计测量,美国 Tektronix 公司 TDS2012B 型示波器和 DET10A 探测器对输出激光的能量和脉冲激光波形进行实时观测。

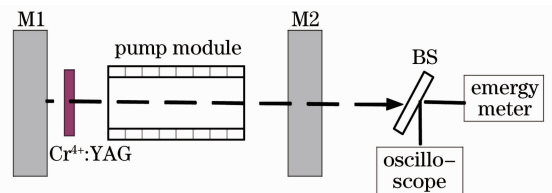


图 2 被动调 Q Nd:YAG 激光器实验装置示意图

Fig. 2 Q-switched Nd:YAG laser system

3.1 抽运功率对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 脉冲间隔的影响

在激光腔内加入可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体后,将谐振腔调至最佳状态,获得调 Q 脉冲激光输出。此时输出镜对 1064 nm 透射率为 80%,谐振腔长为 170 mm, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透射率为 30%,抽运脉宽 200 μs 。通过示波器观察得到在不同抽运功率下的波形图。

由图 3 可以看出,随着抽运功率的增加,输出的脉冲个数也逐渐增加,由于剩余粒子反转数的存在,使得首脉冲建立时间大于下一个脉冲建立时间,所以对于脉冲抽运的被动调 Q 激光器中,剩余反转粒子数是不可忽略的。在以下实验中,调 Q 输出脉冲间隔时间均取脉冲间隔时间的平均值。输出脉冲间隔时间随抽运功率的变化及其与理论模拟结果对比情况,如图 4 所示。随着抽运功率的增加,输出脉冲序列间隔时间逐渐变小,与理论模拟基本吻合。由于抽运功率增加而抽运速率也相应增加,脉冲建立时间变短,在同一抽运脉宽下,脉冲个数增加,脉冲序列间隔减小,而输出能量增加。同时,也验证了文献[13]中,单脉冲能量不随抽运功率的增加而改变的理论。

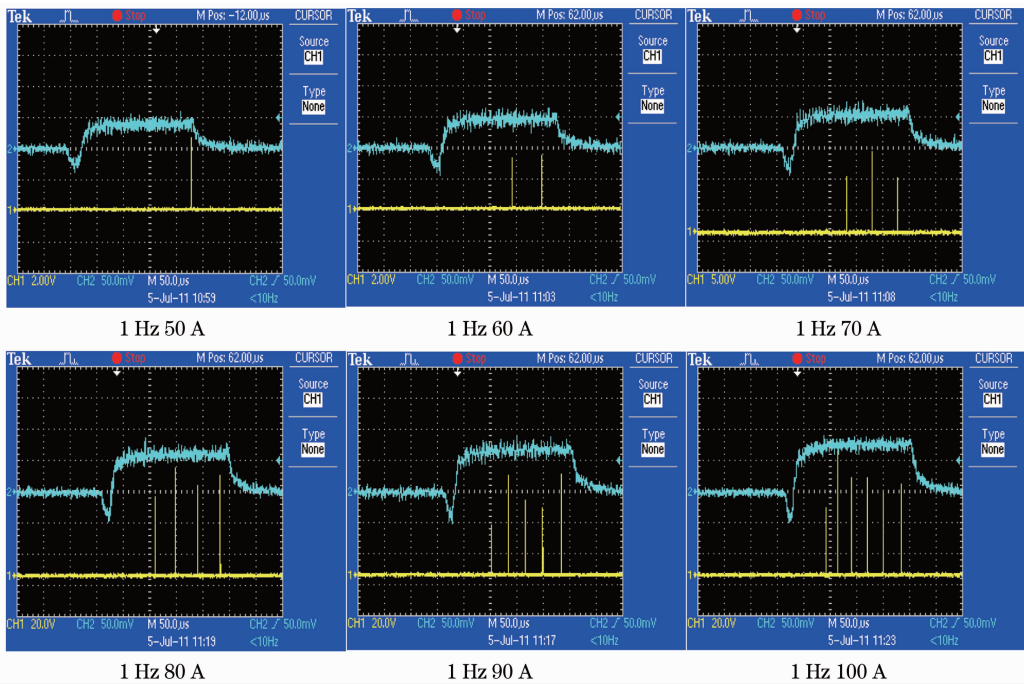


图 3 不同抽运功率下的脉冲序列波形

Fig. 3 Oscilloscope traces of output pulse during one pump duration with different pump currents

3.2 抽运脉冲宽度对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 脉冲间隔的影响

在初始透射率为 30%,输出镜透射率为 80%,谐振腔等其他条件不变的情况下,通过改变抽运脉宽,可以得到输出脉冲间隔时间随抽运脉宽的变化,如图 5 所示。在同一抽运功率时,调 Q 脉冲间隔随着抽运脉

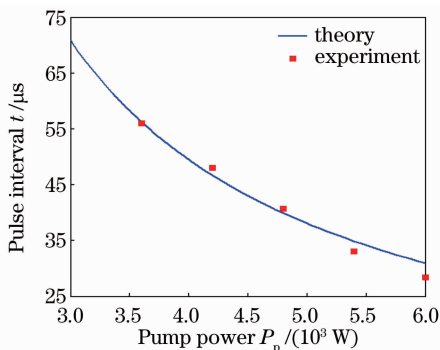


图 4 不同抽运功率下的脉冲间隔

Fig. 4 Pulse intervals of different pump currents

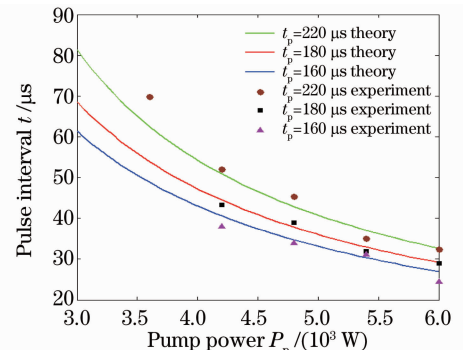


图 5 不同抽运脉宽的脉冲间隔

Fig. 5 Pulse intervals of different pumping pulse widths

宽的增加而增加,而输出脉冲能量也逐渐增加,由于当抽运脉宽增加时,腔内能量密度增高,激发了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的激发态吸收(ESA)效应,使吸收饱和和透射率提高,调 Q 激光建立时间变长,上能级粒子数积累增多,输出脉冲能量也随之增加,与文献[15]所述相吻合。此时由于调 Q 时间变长,脉冲序列间隔也随之增加。

3.3 初始透射率对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 脉冲间隔的影响

由图6可以看出,在输出镜反射率为 20%,抽运脉宽 200 μs 时,随着 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透射率的增加,腔内插入损耗变小,激光阈值也相应减小,这使得晶体达到饱和时间变小,在同一个抽运脉宽内脉冲个数增加,脉冲间隔时间也随之减小。当初始透射率为 30%,输出镜透射率为 80% 时,获得的调 Q 单脉冲能量 35 mJ,脉宽约为 10.8 ns,脉冲峰值功率达到 3.25 MW,其调 Q 脉宽如图 7 所示。

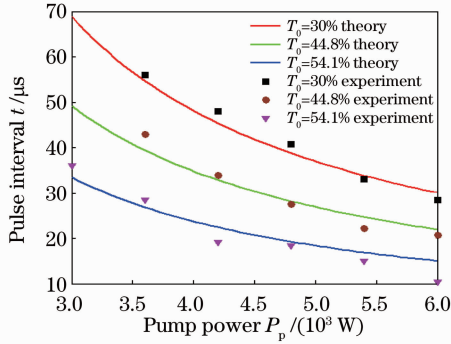


图 6 不同初始透射率的脉冲间隔

Fig. 6 Pulse intervals of different initial transmissions

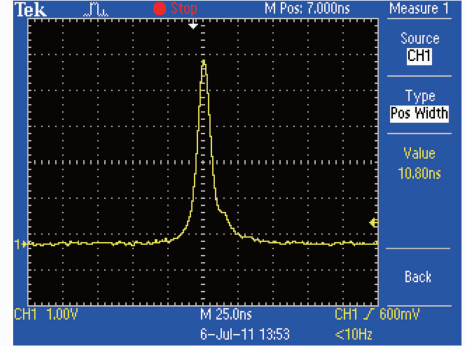


图 7 调 Q 脉宽

Fig. 7 Oscilloscope traces of output pulse width

3.4 输出镜反射率对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 脉冲序列间隔的影响

输出镜反射率也是影响被动调 Q 脉冲间隔的一个重要因素。如图 8 所示,在 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透射率为 30%,抽运脉冲宽度为 200 μs ,其他条件保持不变,输出镜反射率分别为 10%、20%、40% 的情况下,调 Q 脉冲间隔随注入功率变化的曲线。在抽运功率一定时,随着输出镜反射率增加,激光器阈值减小,脉冲建立时间变短,调 Q 脉冲个数增加,输出调 Q 脉冲间隔变小,与理论模拟结果基本一致。

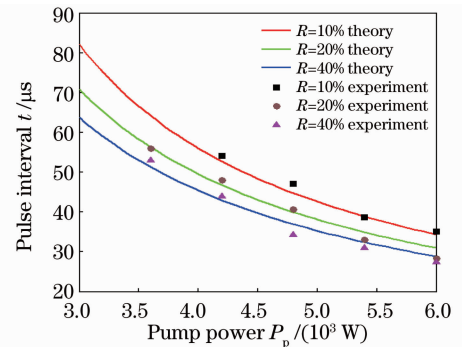


图 8 不同输出镜反射率的脉冲间隔

Fig. 8 Pulse intervals of different output mirror reflectivities

4 结 论

基于被动调 Q 速率方程理论,结合脉冲抽运的特点,给出了包含剩余反转粒子数的脉冲序列间隔时间的计算公式,进行了相关理论数值模拟和实验验证,分析了初始透射率、抽运脉宽、抽运功率以及输出镜反射率对输出脉冲序列间隔时间的影响。理论模拟与实验结果吻合。

参 考 文 献

- 1 J. A. Morris, C. R. Pollock. Passive Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8): 440~442
 - 2 Wang Zhimin, Xu Jianqiu, Chen Weibiao. High-power passively Q-switched ultra-thin slab lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(S1): S36~S38
 - 3 Pan Haifeng, Zeng Heping. Passively Q-switched Nd:GdVO₄ solid-state lasers with stabilized repetition rates[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(9): 520~523
 - 4 Yang Chengwei, Huo Yujing, Yin Xiaodong *et al.*. Experimental study on LD pumped Nd:YVO₄ laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 1~4
- 杨成伟, 霍玉晶, 尹晓东 等. 激光二极管抽运 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2004,

- 31**(1): 1~4
- 5 Wang Yuye, Xu Degang. Single-mode quasi-CW passively Q-switch Nd:YAG laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(2): 143~147
王与焯, 徐德刚. 准连续 TEM₀₀ 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(2): 143~147
- 6 Tian Xinning, Yan Ping, Liu Qiang *et al.*. Pre-pumped passively Q-switched Nd:YAG/Cr:YAG microchip laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9): 536~537
- 7 Liang Tian, Ding Zheng, Qi Wenzong. Numerical simulations of up conversions effects in passively Q-switched solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 791~796
梁田, 丁征, 齐文宗. 被动调 Q 固体激光器上转换效应的数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 791~796
- 8 Nie Jinsong, Ning Yonggang. Study on the time delay of passive Q-switch laser[J]. *Laser Journal.*, 2006, **27**(1): 11~13
聂劲松, 宁永刚. 被动调 Q 激光器的时间延迟特性研究[J]. 激光杂志, 2006, **27**(1): 11~13
- 9 Jiang Xinying, Zheng Jianguang, Duan Wentao *et al.*. Theoretical and experimental research on output characteristics of Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 586~588
蒋新颖, 郑健刚, 段文涛等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(3): 586~588
- 10 Qi Yunfeng, Lou Qihong, Zhang Yinghua *et al.*. Study on Ti:sapphire end-pumped Nd:YAG ceramic laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1449~1454
漆云凤, 楼祺洪, 张影华等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1449~1454
- 11 Lu Changyong, Li Li, Liu Xu *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1228~1231
卢常勇, 李莉, 刘旭等. 角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1228~1231
- 12 Dong J.. Numerical modeling of CW-pumped repetitively passively Q-switched Yb:YAG lasers with Cr:YAG as saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(1-6): 337~344
- 13 Chen Y. F., Lan Y. P., Chang H. L.. Analytical model for design criteria of passively Q-switched lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2001, **37**(3): 462~468
- 14 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang *et al.* trans. Fifth Edition. Beijing: Science Press, 2003. 40
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥等译, 第五版. 北京: 科学出版社, 2003. 40
- 15 Wan Xiaoke, Lin Lihuang, Ouyang Bin *et al.*. Excited state absorption saturation of Cr⁴⁺:YAG and its passive Q-switch performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(11): 1567~1570
万小柯, 林礼煌, 欧阳斌等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 与激发态吸收饱和[J]. 光学学报, 1997, **17**(11): 1567~1570