

文章编号: 0258-7025(2003)07-0585-05

被动 Q 开关激光器的预抽运技术

巩马理, 闫平, 谢韬, 柳强

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 采用增益预抽运技术改善被动调 Q 固体激光器输出的不稳定性, 并在 Cr^{4+} , Nd^{3+} :YAG 双掺自调 Q 晶体上得到实验验证。与连续抽运和脉冲抽运条件下的激光脉冲参数进行比较, 激光脉冲的频率稳定性和幅值稳定性都有大幅度提高, 并在实验基础上给出了预抽运参数的优化结论。

关键词 激光技术; 被动调 Q 固体激光器; 增益预抽运技术

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Study of Pre-pumping Mechanism for Passively Q-switched Lasers

GONG Ma-li, YAN Ping, XIE Tao, LIU Qiang

(Department of Precision Instruments & Mechanism, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Using pre-pumping mechanism to improve the stability of passively Q-switched lasers, it has been verified with Nd^{3+} , Cr^{4+} :YAG. Compared with CW pump and pulse pump, the stability of both frequency and amplitude for pre-pump is much improved. Finally, the experiment results of optimization of pre-pumping parameters are given.

Key words laser technique; passively Q-switch solid-state laser; pre-pumping mechanism

1 引言

高效率、高稳定性、高功率、高重复频率的 Q 开关固体激光器可以选用被动调 Q 或主动调 Q 技术来实现。与主动调 Q 相比, 被动调 Q 固体激光器减少了复杂的驱动电路, 消除了电磁辐射对 LD 抽运源的影响, 并且具有体积小、效率高、成本低等优点, 有利于做成小型化、集成化、组件化的产品。被动调 Q 所需的可饱和吸收体通常采用 Cr^{4+} :YAG 晶体, 它具有损伤阈值高、掺杂浓度高、饱和光强小、热导性好、无退化、稳定、耐用等优点, 近年来得到广泛应用^[1,2]。另外, 在 YAG 晶体中同时掺入 Nd^{3+} 离子和 Cr^{4+} 离子, 制成自调 Q 双掺晶体, 既作为增益介质, 又作为被动调 Q 元件, 可以进一步简化系统, 并实现激光偏振输出^[3,4]。

但是, 被动调 Q 激光器的脉冲输出稳定性较差, 远不及各种主动调 Q 激光器, 大大限制了它的

应用范围。模式间的竞争^[5]、横模之间拍频^[6]以及 Cr^{3+} 引起的光诱导附生损耗^[7]被认为是造成脉冲输出不稳定的原因, 文献^[5~7]对此采取了相应的改善措施, 如在谐振腔中加入选模元件、控制晶体的生长条件来获得高质量晶体等等。本文所采用的增益预抽运技术^[8]提供了另一种思路: 不对谐振腔内的激光振荡模式加以限制, 而是在激光振荡建立之前控制增益介质内的反转粒子数, 从根本上克服了不稳定性产生的原因, 进而改善被动调 Q 输出脉冲的频率稳定性和幅值稳定性。通过与连续抽运、脉冲抽运条件下的激光脉冲参数相比较, 验证了预抽运技术的可行性, 同时从实验上给出了预抽运参数的优化结论, 对一些实验现象给出了定性解释。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源采用 1.5 W 808

收稿日期: 2002-04-01; 收到修改稿日期: 2002-05-30

作者简介: 巩马理(1959—), 男, 主要从事新型固体激光器、非线性变频、光信息存储的研究。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

nm 单管激光二极管(LD),电源采用 SDL820 激光二极管驱动器,它带有三组输入输出端口:LD 驱动电流输出,温度测量输入和制冷器驱动输出。外接 10 k Ω 负温度系数热敏电阻可实时测量 LD 工作温度,并利用反馈信号驱动半导体制冷器,能够将 LD 的温度控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 范围内。电源的输出电流可以是连续、脉冲或连续偏置叠加脉冲电流,其中叠加脉冲电流重复频率在 1 Hz~1 kHz 可调,脉宽在 10~1000 μs 可调,为增益预抽运实验及对比实验提供了必备的条件。耦合透镜采用两片 $f=3\text{ mm}$ 的透镜,其 4 个表面均镀 808 nm 增透膜,测得耦合效率为 80%。 Cr^{4+} , $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 双掺晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 1 mm,晶体两面均为平面,镀膜后构成谐振腔,其中输出面对 1064 nm 的反射率为 90%。实验中,用最高采样率 8 GHz,带宽 1.5 GHz 的 Agilent Infiniium 高速数字存储示波器及带宽 12 GHz 的高速光电转换探头对激光器输出脉冲参数进行测量。

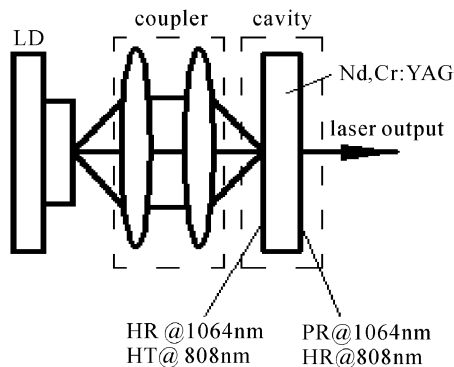


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果

3.1 预抽运的优越性

连续抽运下激光阈值 1.40 A(约 720 mW), 2.00 A 抽运(耦合后 1.18 W)调 Q 脉冲的重复频率约 18 kHz,平均功率 19.8 mW,单脉冲能量约为 1.1 μJ 。测得输出激光脉冲频率稳定性和幅值稳定性如图 2(a),(b)所示。

图 2(a)中左边第一个脉冲作为触发基准,第二个脉冲相对于第一个脉冲的时间间隔有一定的弥散范围,它标志着输出激光频率的不稳定性。用时间弥散范围除以脉冲平均间隔时间就得到连续抽运时被动调 Q 输出激光的频率稳定性,约为 10%。图 2(b)为触发点处的单个脉冲叠加图,可见幅值的稳

定性为 9.2%。稳定性不好制约了被动调 Q 激光器的广泛应用。

同样条件下采用脉冲抽运,通过调节抽运脉宽使每次抽运仅输出一个激光脉冲,从而达到控制激光输出的频率的目的。当抽运电流为 2.00 A,抽运脉宽为 315 μs ,抽运频率为 1 kHz 时叠加激光脉冲,如图 3 所示。为了保证单次抽运单脉冲输出,抽运脉宽不能很大,这就限制了注入的抽运能量,从而使激光脉冲的幅值减小,脉宽加大。实验现象表明,处于脉冲抽运工作时,激光输出状态不稳定,有时输出单脉冲,有时输出双脉冲甚至多脉冲,而有时没有激光输出。

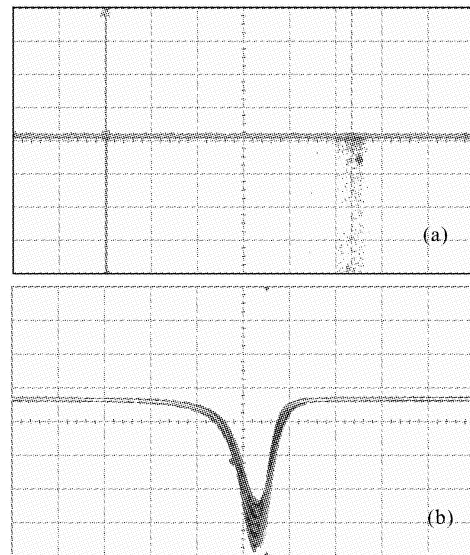


图 2 频率稳定性(a)和幅值稳定性(b)(连续抽运)

Fig. 2 Stability of frequency (a) and stability of amplitude (b) (CW pump)

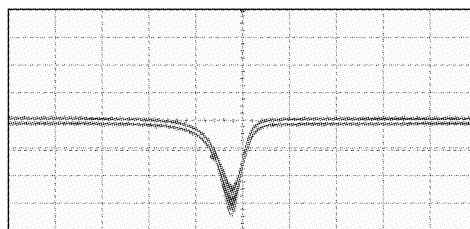


图 3 幅值稳定性(脉冲抽运)

Fig. 3 Stability of amplitude (pulse pump)

本文采用增益预抽运技术改善被动调 Q 激光器输出的幅值和频率不稳定状况,其要点是:先加一稍低于阈值的直流偏置抽运分量 I_b ,此时无激光输出,之后叠加一脉冲抽运分量 I_p ,总增益超过阈值,在激发了第一个调 Q 脉冲后,撤去脉冲抽运分量,恢复为 I_b ,进入下一个脉冲周期。增益预抽运的概念关

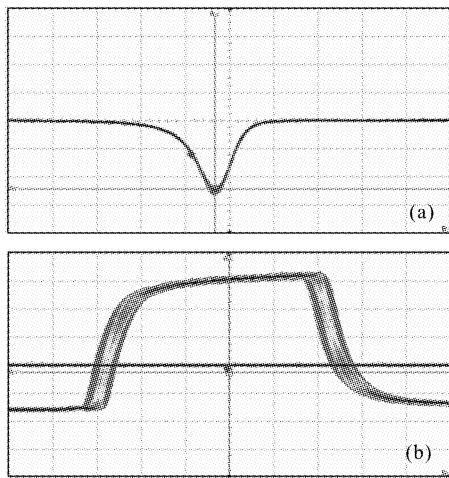


图 4 幅值稳定性(a)和频率稳定性(b)(预抽运)
Fig. 4 Stability of amplitude (a) and stability of frequency (b) (pre-pump)

键在于:直流偏置抽运分量 I_b 起到了隔离作用,它屏蔽了脉冲之间的互相干扰,减小了腔内剩余反转粒子数、饱和和吸收体初始透过率及晶体热效应对 Q 开关时间的影响,使每次激光脉冲输出之前,粒子反转数积累达到基本相近的水平。详细工作过程及分析见参考文献[8]。

实验中当直流偏置电流 $I_b = 1.35$ A,脉冲抽运电流 $I_p = 0.5$ A,抽运脉宽 $W = 50$ μ s,抽运频率 $f = 1$ kHz 时,测得的典型曲线如图 4(a),(b)所示。

图 4(a)显示了预抽运条件下的激光脉冲叠加图,其幅值的稳定性约 1.8%;图 4(b)是以激光脉冲作为触发基准,同时叠加抽运电流的波形。叠加了 5000 个脉冲始终可以保证单次抽运输出单脉冲,激光脉冲相对于抽运电流上升沿的建立时间也很稳定。通过测量抽运脉冲波形的时间弥散范围就可以得到激光脉冲相对于抽运脉冲的时间不确定度,测得脉冲的频率不确定度为 5 μ s/ 1 ms= 0.5% 。可见采用增益预抽运技术后使输出激光脉冲的幅值稳定性和频率稳定性都有显著提高;激光脉冲序列的输出也相当稳定。与连续抽运相比,预抽运可以改善脉冲输出稳定性;与脉冲抽运相比,保证了单调 Q 脉冲输出工作状态的稳定和较大的单脉冲能量,为实现被动调 Q 激光器的实用化、微型化奠定了基础。

3.2 预抽运参数的优化

增益预抽运技术含有 4 个可控参数:直流偏置抽运电流 I_b ,叠加脉冲抽运电流 I_p ,脉冲抽运的脉宽 W ,脉冲抽运的频率 f 。本文从实验上对其进行了

优化。

3.2.1 直流偏置抽运电流 I_b 变化的影响

测量中固定叠加脉冲抽运电流 $I_p = 0.65$ A,抽运频率 $f = 1$ kHz;调节抽运脉宽保证每次抽运只有单脉冲输出。由图 5 可见,随着 I_b 的增加,单脉冲输出所需的抽运脉宽下降,激光的幅值上升,脉宽下降,相对于抽运脉冲前沿的激光建立时间和抖动范围均明显下降。抽运脉宽从 200 μ s 降为 20 μ s,激光幅值由 182 mV 增加到 2181 mV,脉宽由 40 ns 减小到 9.5 ns,激光建立时间和弥散范围分别从 162 μ s 和 8.45 μ s 减小到 8 μ s 和 3 μ s,幅值和脉宽的稳定性降至 1%左右。增益预抽运技术中, I_b 所起的作用就是使反转粒子数在激光阈值以下达到稳定,从而消除了剩余粒子反转数不一致的影响。实验证明, I_b 确实可以减小激光脉冲建立的不确定度,对被动调 Q 稳定性的改善有最重要的影响。

3.2.2 叠加脉冲抽运电流 I_p 变化的影响

测量中固定直流偏置抽运电流 $I_b = 1.10$ A, 1.20 A,对应抽运脉宽 $W = 80$ μ s, 65 μ s,抽运频率 $f = 1$ kHz。从图 6 这一组曲线中可以观察到,随着 I_p 的增加,单脉冲输出所需的抽运脉宽、激光脉宽、建立时间和抖动范围均有所下降,激光的幅值上升。变化趋势与直流偏置抽运电流的影响完全一致。但从作用效果上看, I_p 的影响要小得多。与 I_b 变化的实验曲线相比,本组实验曲线自身的改变都比较平缓;另外,从每幅图中两条不同 I_b 曲线的对比中,也可以直观地观察到 I_p 的影响要小得多。造成这种明显差异的原因不难理解:为了保证单次抽运只有单个激光脉冲输出,脉冲抽运的脉宽 W 不能太大,占空比不能太高,因此 I_p 影响较小。脉冲抽运电流 I_p 的意义在于,它与抽运脉宽 W 一起控制调 Q 激光脉冲的输出; I_b 低于阈值电流,叠加 I_p 后增益超过损耗,形成调 Q 脉冲,通过 I_p 可以控制激光输出时刻,调节 W 保证单脉冲输出。

3.2.3 抽运脉宽的影响

图 7 的这一组曲线在直流偏置 $I_b = 1.35$ A,脉冲抽运峰值 $I_p = 0.65$ A,抽运频率 $f = 1$ kHz 条件下测得。抽运脉宽在保证单脉冲输出的范围内增加,激光输出的各项参数变化都不大,幅值稍有增加,脉宽基本保持不变,脉冲建立时间稍有减小,弥散范围基本不变。

3.2.4 抽运频率的影响

图 8 数据是在直流偏置 $I_b = 1.10$ A,脉冲抽运峰值 $I_p = 0.60$ A,抽运脉宽 $W = 105$ μ s 条件下测

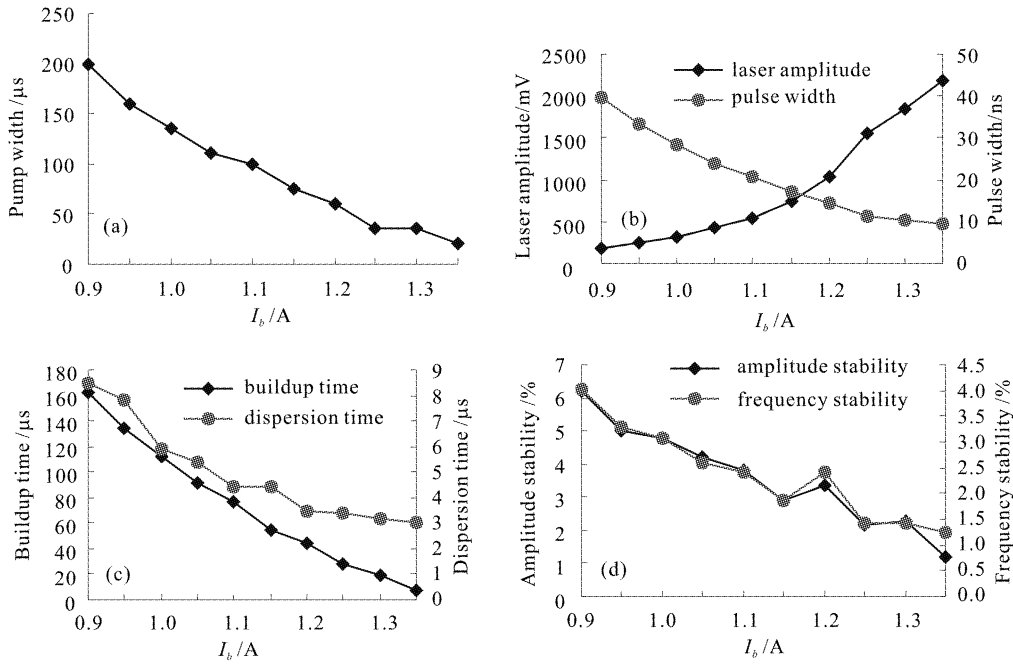


图 5 直流偏置抽运电流 I_b 的影响

(a) 单脉冲输出时的抽运脉宽; (b) 激光脉冲幅值和脉宽; (c) 激光脉冲建立时间和弥散时间; (d) 激光脉冲幅值和脉宽稳定性

Fig. 5 Influence of I_b

(a) one-pulse-output pump width; (b) laser pulse amplitude and width;
(c) laser pulse buildup time and dispersion time; (d) stability of pulse amplitude and width

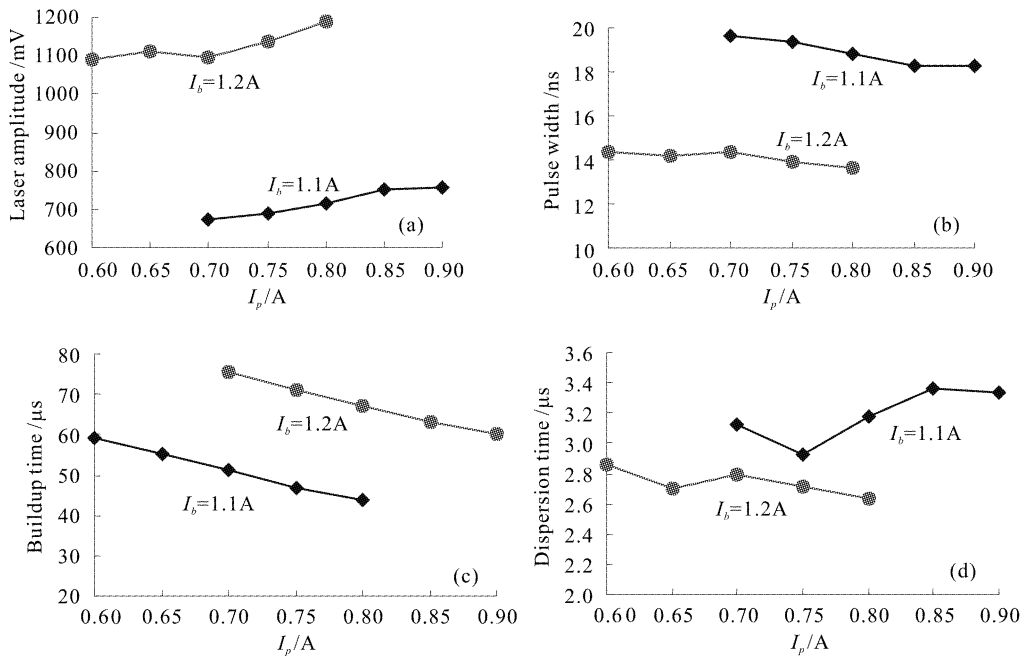


图 6 叠加脉冲抽运电流的影响

(a) 激光幅值; (b) 激光脉宽; (c) 激光脉冲建立时间; (d) 激光脉冲弥散范围

Fig. 6 Influence of overlapped pump pulse current

(a) laser pulse amplitude; (b) laser pulse width; (c) laser pulse buildup-time; (d) laser pulse dispersion time

得的。如图所示抽运频率改变对激光输出参数影响

不大,激光幅值、脉宽及其稳定性均变化不大。抽运

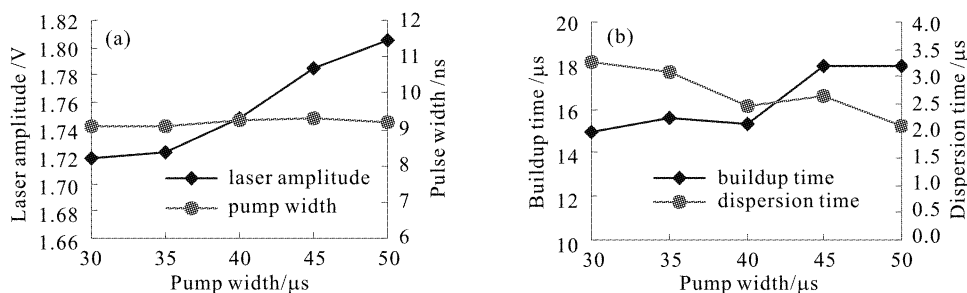


图7 脉冲抽运脉宽的影响

(a) 激光脉冲幅值和脉宽;(b) 激光脉冲建立时间和弥散时间

Fig. 7 Influence of pump pulse width

(a) laser pulse amplitude and width; (b) laser pulse buildup-time and dispersion time

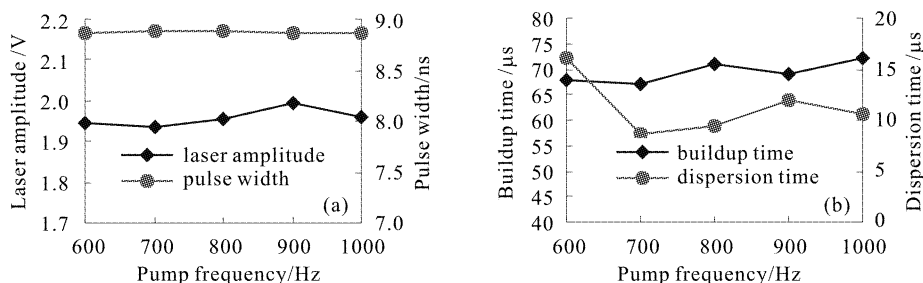


图8 脉冲抽运频率的影响

(a) 激光脉冲幅值和脉宽;(b) 激光脉冲建立时间和弥散时间

Fig. 8 Influence of pump pulse frequency

(a) laser pulse amplitude and width; (b) laser pulse buildup-time and dispersion time

脉冲的占空比很小,激光脉冲之间有充足的弛豫时间使晶体和饱和吸收体恢复初始状态,加之有直流偏置抽运电流 I_b 的存在,更减弱了抽运频率的影响。改变抽运频率 f 对激光脉冲输出参数影响不大,可以根据工作需要而设定,增加了选择的自由度。

4 结 论

实验表明,采用预抽运技术后,调Q脉冲的幅值稳定性和频率稳定性分别由连续抽运的10%,9.2%提高到1.8%,0.5%,同时保证了单调Q脉冲的稳定输出。实验中对预抽运的4个可调节参数进行了研究,为了得到高频稳定和时间稳定的调Q脉冲,直流偏置抽运电流 I_b 应尽量接近阈值而不超过阈值。脉冲抽运电流 I_p 和抽运脉宽 W 综合选取,以保证调Q单脉冲输出,抽运频率 f 可根据实际要求而定。

参 考 文 献

1 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption character of Cr^{4+} :YAG and its performance as passive Q-switches [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12):1665~1670 (in Chinese)

2 Duan Xiu-lan, Yuan Duo-rong, Xu Dong *et al.*. The research progress in passive Q-switched materials [J]. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2001, **31**(5):266~268 (in Chinese)

3 Shiqun Li, Shouhuan Zhou, Pei Wang *et al.*. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr, Nd:YAG laser with polarized output [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):203~204

4 Dong Jun, Deng Pei-zhen, Zhang Ying-hua *et al.*. LD pumped Cr^{4+} :Nd³⁺:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(6):484~486 (in Chinese)

5 Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun *et al.*. Stability and power improvement in passive Q-switching of CW Nd:YAG laser using Cr^{4+} :YAG [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(3):197~201 (in Chinese)

6 Wang Mingwei, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Experimental study on a CW Nd:YAG laser Q-switched by Cr^{4+} :YAG absorber [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(10):872~876 (in Chinese)

7 Chen Wei, Xu Jun, Yang Xiangchun *et al.*. Passive Q-switching for CW Nd:YAG laser by using Cr^{4+} :YAG [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(1):7~11 (in Chinese)

8 Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Xingzhan *et al.*. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism [J]. *Chinese J. Laser & Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(2):74~77 (in Chinese)