

正交增益型被动调 Q 激光器的设计与实现

李 阳, 李述涛, 李 耀, 王 超

(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为了改善被动调 Q 激光器输出不稳定的现象, 利用 Nd:YVO₄ 具有增益方向性的特点, 使用电光晶体将线偏振光光矢量方向旋转 90°, 实现腔内增益突变, 进而实现被动调 Q 稳定输出。利用该方法, 在 LD 连续泵浦 Nd:YVO₄ 被动调 Q 实验中, 当耦合输出镜反射率为 80%, 饱和吸收体初始透射率为 83.06%, 泵浦功率为 22 W 时, 输出功率为 4.68 W, 调 Q 序列脉冲的重复频率为 49.16 kHz, 脉冲宽度为 26.28 ns。并且在泵浦功率从 10~22 W 的情况下, 获得了稳定的被动调 Q 激光输出。脉冲幅度波动性低于±2.4%, 脉冲时间波动性低于±5%, 重复频率的不稳定性低于 1%, 光光转换效率斜效率达到 21.27%, 斜效率为 34%。

关键词: 稳定性; 被动调 Q; 增益开关

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0606003

Design and implementation of orthogonal gain type passively Q-switched laser

Li Yang, Li Shutao, Li Yao, Wang Chao

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

Abstract: In order to improve the stability of the passively Q-switched pulses, the gain orientation of the Nd:YVO₄ was taken advantage and an electro-optic crystal was used to rotate the line polarized light vector by 90°, then the intracavity gain mutation can be realized, thereby stable output of the passively Q-switched was realized. Through this method, when the reflectivity of the coupling output mirror was 80% and the initial transmittance of the saturated absorber was 83.06%, the output power reached 4.68 W at a given pump power of 22 W, high repetition rate output with repetition frequency of 49.16 kHz and the pulse width of 26.28 ns was obtained in the experiment of LD continuously pumped Nd:YVO₄ passively Q-switched. In the case of the pump current from 10 W to 22 W, a stable passive Q laser output was obtained. The pulse-to-pulse amplitude fluctuation was less than ±2.4%. The inter-pulse timing jitter of the Q-switched pulse train was found to be less than ±5%. The instability of repetition rate was less than 1%. For a slope efficiency of 34%, the corresponding optical-to-optical conversion efficiency reached 21.27%.

Key words: stability; passively Q-switched; gain switch

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-20

作者简介: 李阳(1992-), 女, 硕士生, 主要从事激光物理与新型激光器等方面的研究。Email: 89214914@qq.com

导师简介: 王超(1980-), 男, 助理研究员, 主要从事全固态激光及非线性频率变换技术方面的研究。Email: wangchaoopt@163.com

0 引言

激光二极管抽运的被动调 Q 激光器相对于连续抽运的其他调 Q 激光器,特别是电光调 Q 而言,具有结构简单、成本低、使用方便、不需要外加复杂的驱动电源装置等特点,具有较好的发展前景^[1-10]。但由于目前被动调 Q 激光器在运行时却往往会出现频率和光强起伏较大、热效应严重、易跳模以及光轴漂移等现象,其宏观表现为输出激光的空间稳定性差(能量稳定性、模式稳定性、光轴稳定性)和时间稳定性差(脉宽稳定性、重频精度稳定性);此外,由于脉冲产生时刻无法控制,当可饱和吸收体的初始透过率较高时,调 Q 主脉冲后往往会出现子脉冲现象,这些使被动调 Q 技术在军用激光测距、制导、雷达等应用中受到限制。在连续抽运工作方式下,影响被动调 Q 固体激光器频率的因素很多,其中主要因素有:泵浦源抽运功率、输出镜透过率、谐振腔长、被动调 Q 晶体的初始透过率,除此之外,激光横模结构、纵模结构以及激光泵浦速率起伏,都是引起被动调 Q 不稳定的重要因素^[11-14]。

近年来,被动调 Q 激光器的稳定性研究以及设计优化日益引起人们重视。在 1997 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的丁彦华认为模式间的竞争导致各横模在强度上此起彼伏,后采用选模技术,用孔径光阑抑制高阶横模振荡^[15],得到了频率和脉冲峰值稳定度优于 5%,脉冲波形光滑的 TEM₀₀ 单基模脉冲序列输出。2000 年清华大学的王为宇首次提出了增益预泵浦技术,针对泵浦功率的起伏以及饱和吸收体的响应时间的影响,进行了详细的分析,减小调 Q 开关开启时间的不确定度,从而提高调 Q 脉冲的稳定性^[16]。2003 年华侨大学的吴逢铁从激光腔型切入,将抗共振环(ARR)引入调 Q 激光器中,从理论上分析 ARR 稳定被动调 Q 激光的作用,在 ARR 相向传播的两光脉冲在可饱和吸收体中精确对撞引起强烈的瞬态光栅效应对稳定激光输出起着至关重要的作用^[17]。2007 年,河北大学张秋琳报道了 LD 抽运 Cr,Nd:YAG 被动调 Q Nd:YVO₄ 1 064 nm 激光输出,谐振腔采用长腔,激光介质放置于谐振腔的中间位置,实验获得了稳定调 Q 激光输出。在最高注入泵浦功率为 17.5 W 时,脉冲重频达到 71.3 kHz,脉宽为

0.4 μs。调 Q 脉冲幅度不稳定性低于±10%,脉冲时间波动性低于±3.5%。文中采用正交偏振转换增益开关的方法,通过改变腔内增益,使被动调 Q 输出的稳定性得到了改善,与电光调 Q 激光器的不同之处在于,正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器通过调节腔内增益实现调 Q 激光稳定输出,而电光调 Q 通过调节腔内损耗实现调 Q 激光输出。

1 实验装置

正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器实验装置如图 1 所示。实验中使用的抽运源为 808 nm 的激光二极管,使用纤芯半径 200 μm,数值孔径 0.2 的光纤输出。采用凹平腔结构,曲率 300 mm 的平凹镜 M1 镀有高反(High Reflection,HR)1 064 nm 膜系,实验测得对泵浦光的透过率为 82%。M2 是透过率 20%的 1 064 nm 输出镜。实验选用的激光晶体沿着 a 轴切割且掺杂浓度为 0.3 at.%,尺寸为 3 mm×3 mm×(3+8+3) mm 块状 Nd:YVO₄ 晶体,并在晶体前端和后端键合了 3 mm 的 YVO₄。激光晶体包裹了 0.1 mm 厚铝箔,放置在紫铜热沉中,并通过水冷却系统将温度控制在 15 ℃。当泵浦光的焦平面位于激光晶体键合面后 1 mm 位置时,此时激光晶体端面距全反镜的位置为 6 mm,得到稳定的最大输出功率,把泵浦光焦平面固定好后,调节 Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收体在腔内的位置,为了增强被动调 Q 的调制深度,将其调至腔内的束腰位置。Cr⁴⁺:YAG 可饱和吸收体的初始透过率为 83.06%,其尺寸为 φ10×2.4,也通过水冷却系统将温度控制在 15 ℃。铌酸锂电光晶体的尺寸为 7 mm×7 mm×15 m,其 λ/4 电压为 1 969.2 V。腔体光学长度为 160 mm。

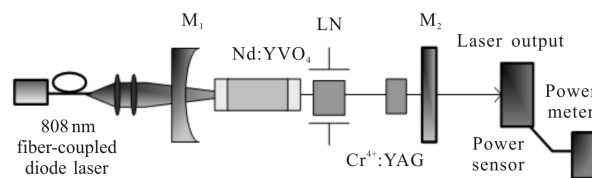


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of experimental installation

对于不同偏振的泵浦光来说,Nd:YVO₄ 晶体吸收 π 偏振光和 σ 偏振光吸收系数分别为 33.6 cm⁻¹

和 18.3 cm^{-1} ，也就是说对于同一偏振光在水平和竖直通过 Nd:YVO_4 晶体时，激光增益是不同的。当使用泵浦光来泵浦 Nd:YVO_4 晶体时，由于增益竞争的缘故，只有 π 方向可以获得大于损耗的增益，因此 σ 方向不能形成激光振荡。而对于 π 方向产生的光，利用电光晶体使 Nd:YVO_4 晶体产生的 π 偏振光光矢量方向旋转 90° ，当该偏振光再次通过 Nd:YVO_4 时激光增益降低，这时没有激光产生，但是增益介质中的粒子反转数不断地在积累，为下一阶段的被动调 Q 的 Q 开关开启，积累足够的反转粒子数，强制在每次调 Q 开关打开之前，使激光器系统迅速恢复至相似的初始条件(粒子反转数接近阈值)，克服了饱和和吸收体反应速度慢、剩余粒子反转数不一致的问题。当需要输出激光脉冲时，突然撤去电光晶体上的 $\lambda/4$ 电压，此时腔内的增益提高了将近一倍，粒子反转数将迅速通过初始粒子反转数的临界区域，被动调 Q 的 Q 开关开启，这大大减小了粒子反转数通过阈值临界区域的不确定度，最终实现提高脉冲输出稳定性的目的。

2 实验结果与分析

实验测得正交偏振转换增益开关型被动调 Q 的输出特性，并与普通被动调 Q 作对比。首先，用 NOVAII+30 A 型激光功率计 (Ophir Optonics 公司，以色列) 测出两种情况下被动调 Q 的平均输出功率随泵浦功率的变化情况。当实验给定最大泵浦功率 22 W 时，得到普通被动调 Q 激光器的输出功率为 3.56 W，正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器的输出功率 4.68 W，与普通被动调 Q 相比，高出了 1.12 W，光光转换效率达到 21.27%，而普通被动调 Q 激光器的光光转换效率只有 16.18%。从图 2 中可以看出，随着泵浦功率的增加，输出的平均功率随之增加，并且呈近线性增长趋势，由于电光晶体加压时，腔内损耗变大，所以正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器的激光阈值高于普通被动调 Q 的阈值。从整体来看，采用正交偏振转换增益开关技术后被动调 Q 的平均功率随泵浦功率稳定增长。经曲线拟合后，可得正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器的斜效率为 34%，而普通被动调 Q 激光器的斜效率只有 22.3%。

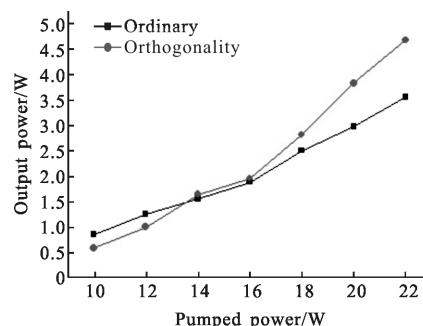


图 2 平均功率随泵浦功率的变化关系

Fig.2 Relationship between average power and pump power

图 3、图 4 给出了调 Q 脉宽和重频随泵浦功率的变化关系。不难看出，调 Q 脉宽随泵浦功率的增加而减小，重频随泵浦功率的增加而增加，这是由于随着泵浦功率的增大，激光晶体中的增益也变大，腔内光子数增加的速度也加快，可饱和吸收体的漂白时间相应缩短，导致在更短的时间内建立了激光脉冲，这同被动调 Q 理论分析的结果是一致的。

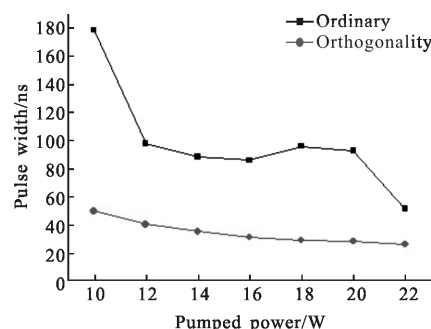


图 3 脉宽随泵浦功率的关系

Fig.3 Relationship between pulse width and pump power

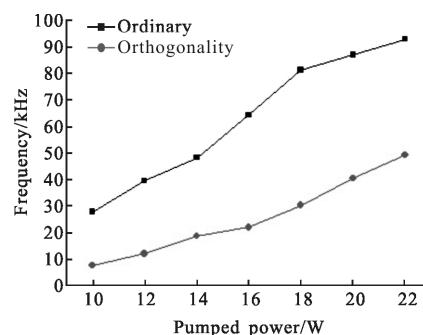


图 4 重复频率与泵浦功率的关系

Fig.4 Relationship between frequency and pump power

加压时，腔内的损耗变大，所以正交偏振转换增益开关型被动调 Q 的重频小于相同泵浦功率情况下普通被动调 Q 的重频。从图 3、图 4 可以看出当泵浦

功率达到 22 W 时,正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器调 Q 重频达到 49.16 kHz,脉宽达到 26.28 ns,小于在普通被动调 Q 情况下的重频和脉宽。

通过脉冲激光的重频、平均功率和脉宽就可以通过公式(1)、(2)得到调 Q 激光输出 D 的单脉冲能量和峰值功率,

$$E = P_{av} / f \quad (1)$$

$$P_{peak} = E / t_p \quad (2)$$

式中: P_{av} 为脉冲激光的平均功率; f 为脉冲激光的重复频率; t_p 为脉冲激光的脉冲宽度。

图 5 和图 6 为两种被动调 Q 激光器的单脉冲能量以及峰值功率随泵浦功率的变化关系。

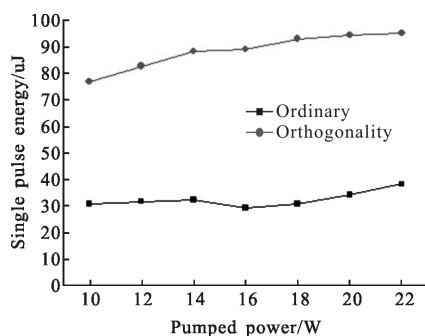


图 5 单脉冲能量和泵浦功率的关系

Fig.5 Relationship between single pulse energy and pump power

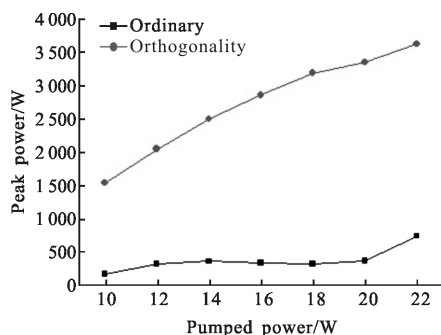


图 6 峰值功率和泵浦功率的关系

Fig.6 Relationship between peak power and pump power

相同泵浦功率情况下,正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器输出的单脉冲能量大于普通被动调 Q 机制下的单脉冲能量,当泵浦功率大于 16 W 时,正交偏振转换增益开关的重复频率增长速率变大,导致单脉冲能量略微下降,总体来说,单脉冲能量随泵浦功率的增长呈线性增长趋势。

由于正交偏振转换开关型被动调 Q 激光器输出的单脉冲能量大于普通被动调 Q,脉宽又小于普通

被动调 Q,所以正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器输出的峰值功率大于普通被动调 Q。从总体上看,峰值功率随泵浦功率的增加而增加。

正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器各个输出参数随泵浦功率的变化趋势相对于普通被动调 Q 时较为稳定。可见采用正交偏振转换增益开关的方法后,整个激光系统产生的脉冲激光稳定性增强。

下图是泵浦功率为 18 W 情况下,普通被动调 Q 和正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器输出的脉冲序列图和单脉冲图。

图 7 和图 8 为相同泵浦功率下,普通被动调 Q 和正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光脉冲序列,图 9 正交偏振转换增益开关型被动调 Q 输出激光光强分布及光束质量图,光束质量因子为 $M_x^2=1.41$, $M_y^2=1.46$ 。其中,图 8 中指示 3 为正交偏振转换增益开关型被动调 Q 脉冲波形,指示 1 为加载在电光晶体上的电源的脉冲波形,电光晶体加载的电压频率与被动调 Q 脉冲序列的重频相匹配,退压时释放出一个调 Q 脉冲。可以看出:采用普通被动 Q 开关对激光器进行调 Q 时,激光脉冲序列很不稳定,一个脉冲和一个脉冲的时间间隔基本不相同,而且脉冲序列的幅值很难调节一致,相比之下,采用正交偏振转换增益开关型被动调 Q 时,调 Q 序列比较稳定,并且当泵浦功率小于 22 W 时,调 Q 脉冲幅度不稳定性低于 $\pm 2.4\%$,脉冲时间波动性低于 $\pm 5\%$,重复频率的不稳定性低于 1%。

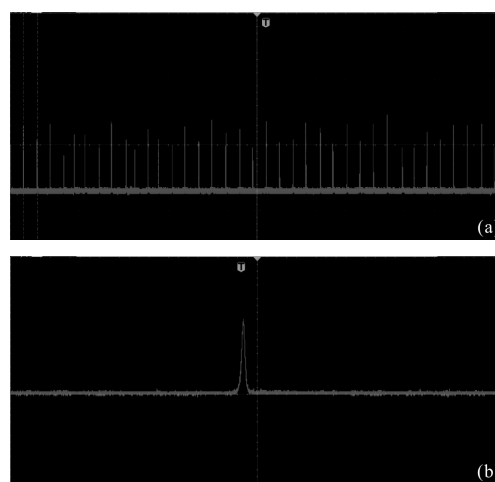


图 7 普通被动调 Q 激光脉冲序列及单脉冲波形(泵浦功率为 18 W)

Fig.7 Ordinary passively Q-switched laser pulse sequence and single pulse waveform(Pump power is 18 W)

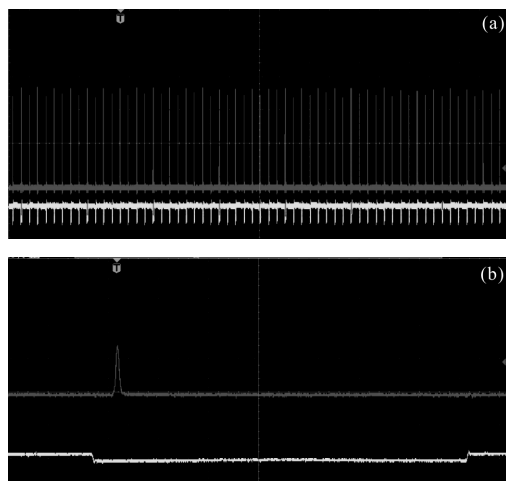


图 8 正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光脉冲序列及单脉冲波形(泵浦功率为 18 W)

Fig.8 Orthogonal polarization conversion gain switch passively Q-switched laser pulse sequence and single pulse waveform(Pump power is 18 W)

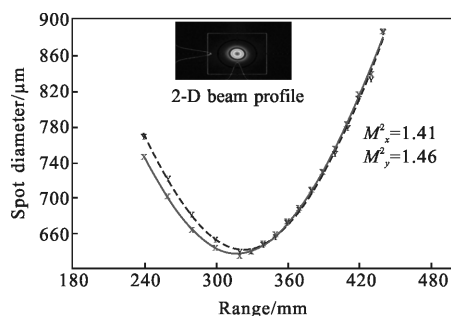


图 9 正交偏振转换增益开关型被动调 Q 输出激光光强分布及光束质量图(泵浦功率为 18 W)

Fig.9 Intensity distribution and beam quality (M^2) of orthogonal polarization conversion gain switch passively Q-switched laser(pump power is 18 W)

3 结论

文中提出了一种新的改善被动调 Q 稳定性的方法, 首先从理论上分析了正交偏振转换增益开关型被动调 Q 改善调 Q 激光器输出稳定性的原理及可行性, 进一步搭建实验装置, 对比了普通被动调 Q 激光器和正交偏振转换增益开关型被动调 Q 激光器的输出特性, 普通被动 Q 开关对激光器进行调 Q 时, 激光脉冲序列很不稳定, 一个脉冲和一个脉冲的时间间隔基本不相同, 而且脉冲序列的幅值很难调节一致。相比之下, 采用正交偏振转换增益开关型被

动调 Q 时, 调 Q 序列比较稳定, 其脉冲幅度波动性低于 $\pm 2.4\%$, 脉冲时间波动性低于 $\pm 5\%$, 重复频率的不稳定性低于 1%, 光光转换效率达到 21.27%, 斜效率为 34%, 重复频率的可调范围为 7.8~49.16 kHz, 脉宽在 26.28~49.79 ns 范围之内, 单脉冲能量高达 95.2 μJ , 峰值功率高达 3 622.5 W。

参考文献:

- [1] Marziyeh E J, Mahdi D B. Pulsed Nd:YAG passively Q-switched laser using Cr³⁺:YAG crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(3): 522-527.
- [2] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Li Jing, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(5): 1279-1286. (in Chinese)
刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1279-1286.
- [3] Li Guiqiu, Zhao Shengzhi, Yang Kejie, et al. Study on the characteristics of LD pumped Nd:GdVO₄ crystal Cr³⁺:YAG passively Q-switched laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(6): 810-813. (in Chinese)
李桂秋, 赵圣之, 杨克建, 等. LD 泵浦 Nd:GdVO₄ 晶体 Cr³⁺:YAG 被动调 Q 激光特性研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(6): 810-813.
- [4] Li Hongbin, Dong Yi, Wang Pengfei, et al. Passively Q-switched high power burst laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 762-765. (in Chinese)
李宏斌, 董怡, 王鹏飞, 等. 被动调 Q 高功率脉冲串激光器[J]. *激光与红外*, 2012, 42(7): 762-765.
- [5] Zhou Weihua, Ding Lei, Wang Yawei, et al. A visual inspection system for on-line measurement application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(4): 851-856. (in Chinese)
周维虎, 丁蕾, 王亚伟, 等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 851-856.
- [6] Han Baozhang, Li Yijun. Laser micro angular deviation measurement system[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 234-240. (in Chinese)
韩宝章, 李亦军. 激光微角偏移测试系统研究 [J]. *中国光学*, 2017, 10(2): 234-240.
- [7] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国*

- 光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [8] Yang Xingbing, Wen Jianguo, Wang Shiyu, et al. Study on parameters of pre-pumping technology for passively Q-switched DPL laser[J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 15-17. (in Chinese)
杨星冰, 文建国, 王石语, 等. 被动调 Q DPL 激光器预抽运技术的参数研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 15-17.
- [9] Huang Feng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong. Study on thermal effects of LD end-pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 358-361. (in Chinese)
黄峰, 汪岳峰, 牛燕雄. LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的热效应研究 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 358-361.
- [10] Tuan P H, Chang C C, Chang F L, et al. Modelling end-pumped passively Q-switched Nd-doped crystal lasers: Manifestation by a Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG system with a concave-convex resonator [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1710-1722.
- [11] Wei Guang, Guo Zhen. Study on frequency stability of gain pre pumped passively Q-switched DPL laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 212-217. (in Chinese)
韦光, 过振. 增益预泵浦被动调 Q DPL 频率稳定性研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 212-217.
- [12] Yang Yubing, Wang Shiyu, Cai Defang, et al. Experiment on output instability of passively Q-switched laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 60-65. (in Chinese)
杨昱冰, 王石语, 蔡德芳, 等. 被动调 Q 激光器输出波动因素的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 60-65.
- [13] Wang Pengfei, Jin Yujian, Pan Hu. Diode pumped Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched laser[J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(8): 560-562. (in Chinese)
王鹏飞, 金焯坚, 潘虎. 二极管泵浦被动调 Q 激光器[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 560-562.
- [14] Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali, et al. LD pumped passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip lasers and its stability[J]. *Acta Optical Sinica*, 2002, 22(12): 1465-1469. (in Chinese)
欧攀, 闫平, 巩马理, 等. 激光二极管抽运的被动调 Q Nd₃₊:YAG 微晶片激光器及其稳定性 [J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1465-1469.
- [15] Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun, et al. Stability and power improvement in passively Q-switched of cw Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(3): 197-201. (in Chinese)
丁彦华, 欧阳斌, 徐军, 等. 连续 Nd:YAG 激光器中 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高 [J]. 中国激光, 1997, 24(3): 197-201.
- [16] Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Zhanxing, et al. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping Mechanism[J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(2): 74-77. (in Chinese)
王为宇, 巩马理, 刘占兴, 等. 被动调 Q 固体激光器的稳定性及增益预泵浦技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 74-77.
- [17] Wu Fengtie, Zhang Wenzhen, Yao Guanqing. High stability and high energy passive Q laser [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, 14(3): 234-234. (in Chinese)
吴逢铁, 张文珍, 姚关清. 高稳定高能量被动调 Q 激光[J]. 光电子·激光, 2003, 14(3): 234-234.