

文章编号: 0258-7025(2004)05-0531-04

稳定的简单结构被动调 Q 单脉冲 单纵模激光器

王衍勇^{1,2}, 刘俭辉¹, 李世忱¹, 隋展², 李明中², 丁磊², 唐军², 罗亦鸣², 梁樾²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 以激光二极管(LD)环形阵列侧面抽运 Nd:YLF 棒高增益放大器模块为基础,在经典的平凹驻波腔中加入一片 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动 Q 开关,利用被动 Q 开关本身所具有的振荡选模功能以及两端不镀膜的 Nd:YLF 棒所具有的标准具效应,简便地实现了稳定的单脉冲、单纵模调 Q 输出。振荡器输出脉冲平均宽度为 9.3 ns,脉冲宽度稳定性达到 8%(RMS);输出脉冲平均能量为 1.218 mJ;单脉冲能量稳定度优于 3%(RMS),对应峰值功率达到 0.13 MW。同时该振荡器长时间工作过程中单纵模输出几率始终优于 99%,这种单纵模振荡器结构简单,性能稳定可靠,适合于实际应用以及产品化。

关键词 激光技术;固体激光器;单纵模;被动调 Q;标准具;Cr⁴⁺:YAG

中图分类号 TN 241 **文献标识码** A

Stable and Simple Structure Passively Q-Switched Single-Longitudinal-Mode Laser

WANG Yan-yong^{1,2}, LIU Jian-hui¹, LI Shi-chen¹, SUI Zhan²,
LI Ming-zhong², DING Lei², TANG Jun², LUO Yi-ming², LIANG Yue²

(¹Laboratory of Optoelectronics Information Science & Technology, Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(²Laser Fusion Research Center of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900 China)

Abstract Based on the ring-shaped laser-diode array side-pumped Nd:YLF high gain amplifier and the conventional plan-concave resonator, a simple structure single-longitudinal-mode single-pulse Q-switched oscillator is demonstrated by taking advantages of mode-selecting property of passive Q-switches (Cr⁴⁺:YAG crystal) and etalons (formed by two end of uncoated Nd:YLF rod). The average pulse width is 9.3 ns, the average energy is 1.218 mJ, the pulse width stability is 8% by RMS and the pulse energy stability is 3% by RMS and the output pulse reaches the peak-power of 0.13 MW. This kind of oscillator holds the excellent single-longitudinal mode probability great than 99% in long running time. Keep in mind of its simplicity and unsensible to the change of working condition, it is preferred to put this kind of oscillator into practical usage in these situations where accurate time sequence is not required.

Key words laser technique; solid-state laser; single-longitudinal-mode; passively Q-switched; etalon; Cr⁴⁺:YAG

1 引 言

单纵模脉冲激光器以其单色性好、时域无调制

的特点在能量放大系统中常作为脉冲种子源。实现单纵模运转可采用色散法, F-P 标准具法, 复合腔法, 环形腔法以及上述方法的组合方法^[1,2]。单纵

收稿日期: 2003-01-16; 收到修改稿日期: 2003-04-14

作者简介: 王衍勇(1976—), 男, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要从事全固态激光器和光通信器件研究。E-mail: yanyongwang@263.net

模激光器结构一般较复杂且输出功率(能量)较小。为了提高单频脉冲峰值功率可采用调 Q 方法,主动调 Q 所需的器件体积大,构成复杂;被动 Q 开关结构简单、使用方便,因此在对输出脉冲没有严格时序要求的情况下,可优先考虑用被动调 Q 方法实现单纵模运转^[3,4],国内已有环形腔结构被动调 Q 方案实现单纵模运转的报道^[5,6]。本实验采用平凹直线腔型,将 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动 Q 开关,通过对腔内器件参数的优化设计,实现了稳定可靠的单脉冲,单纵模, P 偏振调 Q 脉冲种子源。

2 理论基础

2.1 选模原理

在激光工作物质已定的条件下,实现单纵模的关键是利用不同纵模之间的增益差异,并对腔内损耗进行调制,通过模式竞争实现单纵模振荡。W. R. Sooy^[7]认为被动 Q 开关选模就是一种自然模式竞争的结果。在振荡建立的过程中, Q 开关处于不完全关闭状态,腔内损耗较大,只有少数靠近中心频率的纵模具有较高增益,其强度增大速度比其他模式而使损耗变得比其他模式小,这实际增强了模式竞争效果,最终得到良好的单频输出。根据 Sooy 的理论,相邻纵模 m 和 n 在腔内经历 q 次往返后,对应功率 P_m 和 P_n 的关系可以用下式描述

$$\frac{P_m}{P_n} = \left(\frac{1-L_m}{1-L_n} \right)^q (1-L_m)^{q[(g_n/g_m)-1]} \quad (1)$$

其中 L_m, g_m, L_n 和 g_n 分别为模式 m 和 n 在腔内的往返损耗和增益系数。从(1)式可以看到,若实现选模应使等式左端比值尽量大,即 L_m 和 L_n 以及 g_m 和 g_n 之间的差别尽量增大。由于激光工作物质增益特性决定了 g_m 和 g_n 之间的差别很小,因此一般都在腔内加入标准具对相邻纵模损耗实现调制,以进一步增大 L_m 和 L_n 的差别。从这个角度来看采用慢饱和吸收体被动调 Q 开关比采用主动调 Q 的方法更容易实现单纵模运转(被动调 Q 选模要求的相邻模式间增益差别仅为主动调 Q 的二十分之一)^[7],进一步得到如下表达式

$$\frac{P_n}{P_m} = \left(\frac{R_n}{R_m} \right)^q \quad (2)$$

其中 R_n, R_m 为相邻纵模对应的反射率。根据单模运转条件^[2],实验中利用了不镀膜 Nd:YLF 棒自身的标准具效应提高相邻模间损耗差,根据实验参数(Nd:YLF 折射率为 1.47,腔长为 24 cm)进行理论计算的结果为:实现单模运转至少需要的往返次数

为 232 次,即脉冲建立时间为 394 ns(远小于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的开关时间 3.4 μs),因此理论上完全可以实现单纵模运转。

2.2 输出镜最佳反射率的确定

根据 Degnan 的结论^[8],由下式计算在给定抽运功率和被动 Q 开关初始透过率条件下的最佳输出透过率

$$z = \frac{2\ln G_0}{L} \quad R_{\text{opt}} = \exp(-x_{\text{opt}}L)$$

$$E_{\text{max}} = \left(\frac{h\nu Al}{2\sigma\gamma} \right) x_{\text{opt}} \ln \left(\frac{n_i}{n_f} \right) \quad (3)$$

其中 x_{opt} 为最佳耦合输出参数,它可由 z 给出, G_0 为小信号单程增益, $h\nu$ 为振荡光子能量, A 为激光截面积, l 为激光介质长度, L 为谐振腔往返损耗, γ, σ 分别为简并因子和受激辐射截面, n_i 和 n_f 分别为调 Q 初始时刻和最终时刻的反转离子数密度。取 $G_0 = 10$, 被动 Q 开关初始透过率 $T_0 = 25\%$, $L = 0.84$ 进行理论计算,得到 $z = 5.6$, $R_{\text{opt}} = 0.38$, $E_{\text{max}} = 1.8$ mJ。

3 实验系统与实验结果

3.1 实验光路及设备

如图 1 所示,在平凹腔中加入了被动调 Q 开关 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体(厚度 2.5 mm)和一个薄膜起偏器 TFP。采用平凹腔的优点有两个:腔的调节失谐容许度比平平腔大,模式好,输出稳定;利用晶体棒本身的光阑效应对横模进行控制,不必外加小孔就能在腔内实现基横模输出。薄膜偏振片作为 P 方向起偏器,并置于靠近输出镜的一侧。Y. Shimony^[4]指出,如果 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体可以实现布氏角放置,则不需外加其他起偏器件就能实现 P 方向线偏振,这为以后进一步简化激光器结构提供了思路。为了获得尽可能大的往返次数,将 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体置于束宽较大、功率密度较低的全反镜的一侧。抽运模块由环形 LD 阵列, Nd:YLF 棒以及温控系统组成^[9],在不同抽运功率下,可提供 10~20 倍单程小信号增益。LD 阵列工作频率 1 Hz,最大输出功率 2.5 kW, Nd:YLF 热导率比 Nd:YAG 小,但由于其自然双折射比热致双折射更明显,因此热退偏效应较小。实验使用直径 3 mm,通光长度 10 mm,两端不镀膜的 Nd:YLF 棒,棒左端面 and 输出平平镜 M_1 (在 1053 nm 处透过率为)之间的距离为 10 cm,薄膜起偏器(TFP)与 M_1 的间距为 4 cm;棒右端面和 平凹全反镜(在 1053 nm 处反射率为 99.9%)之间

的距离为 14 cm, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体与 M_2 的间距为 4 cm; 谐振腔总长约 24 cm。输出光脉冲经过分束镜 BS(在 1053 nm 处 $T=45\%$) 分成两束, 一束直接进入能量计, 另一束光进入高速光电管(带宽 8 GHz), 由高速数字示波器记录脉冲波形(带宽 3 GHz)。

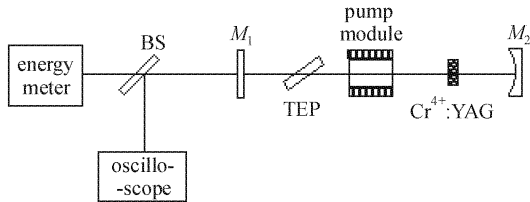


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experiment setup

3.2 实验过程与结果

3.2.1 单纵模的实现

根据理论分析, 在腔内实现单纵模运转的关键有两点: 其一是尽量提高相邻纵模间的损耗差, 其二是尽量增加各纵模在腔内的往返次数。实现第一点的关键是利用腔内器件产生标准具效应^[3,10], 实验选用了两端不镀膜的 Nd:YLF 棒作为 F-P 标准具, 对相邻纵模损耗实现调制, 加速选模进程。实现第二点的关键在于尽量增大脉冲建立时间, 这就要求一方面对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体初始透过率作适当选择^[9](或使用双调 Q 的方法), 另一方面要尽量缩短腔长(24 cm 是实验中可实现的最小腔长), 以减小往返时间。得到输出脉冲波形如图 2(a), (b) 所示。图 2(a) 是相邻横模叠加所形成的拍频图像, 相应横模间隔约为 43.5 MHz; 图 2(b) 是微调 Nd:YLF 棒俯仰(移动 F-P 透过峰位置)后得到的单纵模干净平滑脉冲波形。长时间对输出脉冲进行观测, 单纵模几率达到 99%(连续 1000 个)。

3.2.2 参数选取及结果

分别采用 $R=40\%$, 50% , 60% 的输出耦合镜, 对初始透过率分别为 25.44%, 49.6%, 59.6% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在单脉冲输出的近阈值工作条件下进行测量。结果显示初始透过率越小的调 Q 晶体得到的单脉冲能量越大, 脉宽越窄; 设定抽运电流为 55 A(对应 $G_0=10$)^[9], 根据上述理论计算, 选用输出镜透过率 $T=60\%$, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率 $T_0=25.44\%$ 作为实验参数, 得到稳定的单脉冲输出, 其平均能量为 1.218 mJ, 能量稳定度 3%(RMS), 脉宽 9.3 ns, 脉宽稳定性 8%(RMS)。

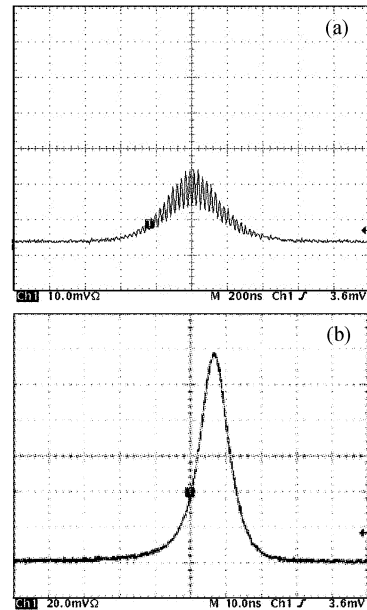


图 2 (a) 相邻横模叠加的拍频图像;
(b) 稳定的单纵模脉冲图像

Fig. 2 (a) Beat frequency of two transverse mode;
(b) Stable single-longitudinal-mode output pulse

3.2.3 多脉冲现象及其应用和抑制

对于慢恢复可饱和吸收体被动调 Q 激光器, 抽运功率较大时将不可避免地出现多脉冲输出现象^[1]。此特性对于不同的应用目的有不同的意义。一方面可以利用它来实现高重复频率激光器^[11], 另一方面若要实现单脉冲种子源激光器就必须对多脉冲进行抑制, 其一: 控制抽运功率, 尽量使激光器工作在近阈值附近, 与此等效的方法还有减小抽运电脉冲宽度^[12]。其二: 控制 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的初始透过率。采用初始透过率较小的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体(10%~25%)较易实现稳定单脉冲输出^[13]。此外, 为了避免激光介质本身产生寄生振荡, 晶体棒的侧面应打毛; 在调节过程中也应注意避免输出平面镜和晶体棒端面可能产生的寄生振荡, 应将晶体棒端面和输出平面镜之间故意引入一定偏离。

3.2.4 输出偏振态和能量稳定度分析

设计要求输出为 P 方向偏振度 ≥ 0.99 , 实测结果为 0.99, 使用格兰棱镜可得到更高的偏振度, 但由于格兰棱镜容易产生寄生振荡, 因此采用薄膜起偏器完全可以满足要求。对于种子源而言, 稳定性是最重要的, 对该激光器的能量稳定度进行长时间观测表明其稳定度优于 3%(RMS)。此外国产二极管工作稳定性, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的漂白稳定性, 激光工作物质冷却控制, 外界机械振动的干扰等方面还

有一些不确定因素。

4 结果和讨论

在 LD 侧面抽运平凹腔 Nd:YLF 激光器中使用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动 Q 开关,通过对输出镜透过率理论优化,获得了脉冲宽度为 9.3 ns,单脉冲能量 1.218 mJ,峰值功率 0.13 MW 的稳定的单脉冲、单纵模调 Q 脉冲输出。该激光器结构紧凑、调节简单、性能稳定,适合工程应用。

在对脉冲时序有要求的情况下,必须使用主动调 Q 方式。如果能够实现模拟被动调 Q 开关的主动电光 Q 开关,保留被动 Q 开关在选模上的优点,将是一种很好的解决方案。

参 考 文 献

- Lan Xinju, Wei Guanghui, Xinjianguo (editors). Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000. 171~182
蓝信钜,魏光辉,辛建国 编著. 激光技术[M]. 北京:科学出版社, 2000. 171~182
- Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 411~448
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 411~448
- M. Hercher. Single-mode operation of a Q-switched ruby laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, 7(2):39~41
- Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, 31(10):1738~1741
- Chen Jun, Zhu Qi, Bao Chengfang *et al.*. A unidirectional Nd:YAG ring laser resonator with a $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passive Q-switch [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, A26(2):97~100
陈 军,朱 琦,包成芳 等. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的单内环形腔 Nd:YAG 激光器研究[J]. 中国激光, 1999, A26(2):97~100
- Ding Lei, Jing Feng, Sui Zhan *et al.*. Development of ring cavity Q-switch single-longitudinal mode oscillator [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 1998, 10(3):335~339
丁 磊,景 峰,隋 展 等. 环形腔 Q 单纵模振荡器的研制 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(3):335~339
- W. R. Sooy. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, 7(2):36~37
- J. J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, 31(11):1890~1901
- Luo Yiming, Li Mingzhong, Qin Xingwu *et al.*. Study on ring-LD side-pumping solid laser [J]. *High Power Laser and Particl Beams*, 2002, 14(3):331~333
罗亦鸣,李明中,秦兴武 等. 大功率环形 LD 侧面泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 激光器的特性[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):331~333
- F. J. McClung, D. Weiner. Longitudinal mode control in giant pulse lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1965, 1(1):94~99
- Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wang 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
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调 Q 开关性能研究[J]. 光学学报, 1996, 16(12):1665~1670
- Fan Anfu, Yang Chenglong, Xu Tianhua *et al.*. Study of performance of a $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched QCW slab Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, A25(9):781~784
范安辅,杨成龙,王清月 等. 用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作被动调 Q 的准连续板条 Nd:YAG 激光器的性能和研究[J]. 中国激光, 1998, A25(9):781~784
- Wang Mingwei, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Experimental study on a CW Nd:YAG laser Q-switched by $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ absorber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, A25(10):872~876
王明伟,邢岐荣,王清月 等. CW Nd:YAG 激光器中 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的实验研究[J]. 中国激光, 1998, A25(10):872~876