

文章编号 1000-5013(2000) 03-0239-04

不同腔型 Cr^{4+} YAG 被动调 Q 激光器

吴逢铁 张文珍

(华侨大学电气工程与自动化系, 泉州 362011)

摘要 以新型可饱和吸收体 Cr^{4+} YAG 晶体作为调 Q 开关, 在平-凸非稳腔和平-平介稳腔中实现被动调 Q 运转. 分别获得能量为 70.5 mJ 和 29.7 mJ, 脉宽为 23 ns 和 20 ns, 能量起伏为 1.9% 和 3.8% 的调 Q 单脉冲输出. 实验结果表明, 非稳腔有利于输出能量和稳定性的提高, 理论分析和实验结果相符.

关键词 Cr^{4+} YAG, 调 Q 激光器, 非稳腔

中图分类号 TN 248.3+4

文献标识码 A

调 Q 巨脉冲在实际应用和科学研究中具有相当重要的地位. 问题的关键, 是如何以简单的方法获得稳定的高能量调 Q 脉冲. 本文采用新型调 Q 材料 Cr^{4+} YAG, 在非稳腔激光器中实现被动调 Q 输出, 较好地解决以上提出的问题.

1 新型调 Q 晶体 Cr^{4+} YAG

被动调 Q 因其技术简单, 又能获得较大单脉冲能量和较窄脉宽而被广泛使用. 相比于各种主动式调 Q 方法, 被动调 Q 具有结构简单、不需外加驱动装置、价格便宜和使用方便等特点, 可做到“即插即用”. 主要问题是要选取稳定可靠、高质量的被动调 Q 材料. 目前, 以新型饱和吸收体 Cr^{4+} YAG 作为被动 Q 开关的研究已引起人们的极大兴趣^[1,2]. 掺铬钇铝石榴晶体 (Cr^{4+} YAG) 是一种新型光学晶体. 它不但可作 1.34 ~ 1.58 μm 范围内的可调谐激光晶体而获得飞秒超短光脉冲^[3], 而且在 0.9 ~ 1.2 μm 范围内具有显著的可饱和吸收特性, 非常适合作为掺钕激光器(如 Nd YAG)的被动调 Q 开关. 与其它常用的 Nd 激光器被动 Q 开关(如有机染料 BDN, 色心晶体 $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$ 等)相比, Cr^{4+} YAG 晶体具有稳定、可靠、耐用、热导性好、掺杂浓度高、饱和光强小、损伤阈值高和无褪化现象等优点. 因此, 近几年得到广泛应用.

2 非稳腔结构

目前, Cr^{4+} YAG 被动调 Q 激光器的研究已有不少报导. 然而, 大多数作者采用平-平介

收稿日期 2000-01-21

作者简介 吴逢铁(1958-), 男, 副教授

基金项目 福建省自然科学基金资助项目; 福建省优秀留学回国人员科研资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

稳腔或平-凹稳定腔, 结果输出能量受到限制, 在 $3\% \sim 5\%$ 起伏^[6]. 由于非稳光学谐振腔具有大而均匀的模体积, 可充分利用增益介质中的反转粒子数, 因而获得比同类稳腔激光器高得多的能量输出. 它被认为是高功率固体激光器的最佳腔型. 现对平-凸非稳腔型作进一步的理论分析, 平-凸非稳腔型如图 1 所示.

设图 1 中凸面全反镜 M_1 的曲率半径为 $-|R_1|$, 有效腔长为 L . 由于 $g_1 g_2 > 1$, 此腔属于正分支非稳腔, 腔内无焦点. 在低重复率(1PPS)情况下, YAG 棒及可饱和吸收体的热透镜效应可忽略. 光线在腔内往返 7 d 的传输矩阵为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{|R_1|} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 + \frac{2L}{|R_1|} & 2L(1 + \frac{L}{|R_1|}) \\ \frac{2}{|R_1|} & 1 + \frac{2L}{|R_1|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2g - 1 & 2Lg \\ \frac{2(g-1)}{L} & 2g - 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

参数 $g = 1 + \frac{L}{|R_1|} > 1$. 按照腔模往返 7 d 应满足自再现条件, 距镜面为 hL 的球面波往返 7 d 后应满足方程

$$hL = \frac{A(hL) + B}{C(hL) + D}.$$

经变换后, 得

$$C(hL)^2 + (D - A)hL + B = 0, \quad (2)$$

式中 h 是一个无量纲实数, 把式(1)中的矩阵元代入式(2), 得到 h 的两个解为

$$h_1 = \frac{-g}{g-1} \quad (\text{对应于发散球面波}),$$

$$h_2 = -\frac{g}{g-1} \quad (\text{它对应于会聚球面波}).$$

虽然 h_1 和 h_2 两个模均为方程(2)的解, 但由于它们对抗扰的敏感性不同, 因而并不一定都能形成稳定模. 激光工作时腔内各元件产生热效应, 原始发光虚中心总会发生偏移. 设其偏移量为 Δh , 往返 7 d 后的偏移量为 Δh . 如果 $\Delta h / \Delta h < 1$, 则该模抗扰能力强, 能形成稳定模. 如果 $\Delta h / \Delta h > 1$, 则这种偏移经过 7 d 后变得更大, 表明对抗扰很敏感, 不能在腔内形成稳定模, 或说它不能存在. 由光学传输矩阵, 可得

$$(h + \Delta h) = \frac{A(h + \Delta h) + B}{C(h + \Delta h) + D}. \quad (3)$$

对式(3)进行展开, 略去二级小量($\Delta h \Delta h$)并利用方程(2), 可得

$$\frac{\Delta h}{\Delta h} = \frac{A - ChL}{D + ChL}. \quad (4)$$

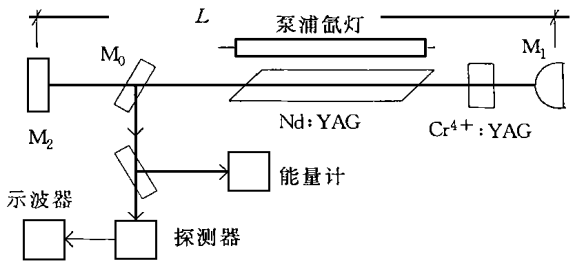


图1 实验装置

式中 A, B, C, D 为矩阵元. 由式(1)可知, $A = D$ 且 C 为正值, 因而对会聚球面波 $h < 0$, 有 $\Delta h / \Delta h > 1$, 不能形成稳定模. 对发散球面波 $h > 0$, 有 $\Delta h / \Delta h < 1$, 表明它是稳定的. 因此上述平-凸非稳腔中仅存在发散球面波的传播.

3 实验装置和结果

实验装置如图 1 所示, 对非稳谐振腔 M_1 为凸面全反镜, 曲率半径 R_1 为- 2 000 mm. 对平-平价稳腔 M_1 为平面全反镜. M_2 为平面全反镜, M_0 为 50/50 的输出耦合镜. 调 Q 晶体 Cr⁴⁺ YAG 置于镜 M_1 前, 尺寸为 6 mm × 6 mm × 4.75 mm, 通光长度为 4.75 mm, 对 1.06 μm 的小信号透过率 T_0 为 33%. 激光工作物质为 Nd YAG 晶体, 尺寸为 ∅ 4.5 mm × 80 mm, 采用双脉冲氙灯泵浦, 工作重复率为 1 Hz. 谐振腔腔长 L 为 500 mm. 激光输出能量由 PT-1 型激光能量计测定, 用 PIN 管构成的探测器接收激光并由 HP54502A 型 400 MHz 数字式存储示波器观察脉冲波形和测定脉宽. 实验时, 控制泵浦电压并由示波器监测激光的输出波形以获得单个调 Q 脉冲输出. 测定其输出能量和输出脉宽, 并计算其平均值, 进而求出能量起伏 ($\Delta E / E$).

主要实验结果列于表 1. 表中 \bar{E} 为 10 次测定的平均值, $\bar{\tau}$ 为平均脉宽, 能量起伏由 $\Delta E / \bar{E} = [\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 / n \bar{E}]^{1/2}$ 求得. 其中, n 为测量次数, E_i 为单次测量的能量值. 图 2 为调 Q 脉冲的示波器照片, 其脉冲宽度约为 20 ns.

表 1 主要实验结果

激光器腔型	L/mm	E/mJ	$\bar{\tau}/\text{ns}$	$\Delta E \cdot E^{-1/2}(\%)$
平-凸非稳腔	500	70.5	23	1.9
平-平价稳腔	500	29.7	20	3.8

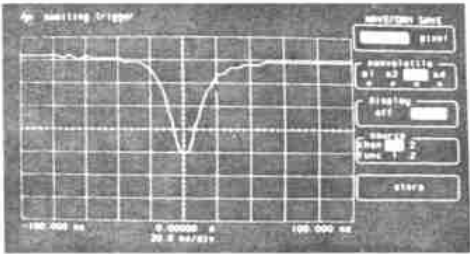


图 2 调 Q 示波器照片 (20 ns/div)

4 讨论

从实验结果可以看出, 相同腔长的两种不同腔型激光器的输出脉宽大致相同, 均为 20 ns. 对非稳腔激光器, 输出能量为 70.5 mJ, 远远大于平-平腔激光器的 29.7 mJ. 非稳腔的能量起伏为 1.9%, 远小于平-平腔的 3.8%. 平-平腔的能量起伏与文献值相同, 均在 3.0% ~ 5.0% 范围内. 这些实验结果和理论分析是一致的. 上述理论分析指出, 平-凸非稳腔中传播的是发散球面波, 它具有更大的模体积, 可更有效地利用增益介质中的反转粒子数, 因而获得更大的能量输出. 至于稳定性方面可作如下解释, 非稳腔结构具有良好的横模鉴别和控制能力, 易于获得单横模激光输出. 这对改善激光输出的稳定性是有利的. Nd YAG 激光的增益较高, 若不采用相应技术抑制高阶横模, 就容易出现多模振荡. 由于模式间的竞争, 各横模的强度此起彼伏、随机变化, 这是造成激光输出不稳定的因素之一^[7]. 因此采用非稳腔结构可有效提高激光的稳定性. 此外, 为保持高能量输出的同时进一步提高激光的稳定性, 可在非稳腔中引入抗共振环 (ARR) 结构, 将 Cr⁴⁺ YAG 置于 ARR 中心. 等值反向传播脉冲在可饱和吸收体中对撞形成拉子数瞬态光栅效应, 可进一步稳定激光输出. 该效应我们已在对撞脉冲锁模 (CPM) 激光器中得到理论和实验的验证^[8,9], 在调 Q 激光器中也得到实验证实. 另外, 缩短腔长, 可进一步压缩脉宽. 减小 Cr⁴⁺ YAG 晶体的小信号透过率, 也可进一步提高激光的输出能量.

参 考 文 献

- 1 Zayhowski J J, Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip laser [J]. Opt. Lett., 1994, 19(18): 1 427 ~ 1 429
- 2 Shimony Y, Burshtein Z A, Baranga B A, et al. Repetitive Q-switching of a CW Nd YAG laser using Cr⁴⁺ YAG saturable absorbers [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1996, 32(2): 305 ~ 310
- 3 Conlon P J, Tong Y P, French P M, et al. Passive mode locking and dispersion measurement of a sub-100-fs Cr⁴⁺ YAG laser [J]. Opt. Lett., 1994, 19(18): 1 468 ~ 1 470
- 4 欧阳斌, 丁彦华, 万小珂等. Cr⁴⁺ 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): 1 665 ~ 1 670
- 5 姜东升, 周寿恒, 刘盛纲等. 二极管抽运高重复率被动调 Q Nd YAG 激光器[J]. 中国激光, 1999, A26(11): 961 ~ 964
- 6 张行愚, 赵圣之, 王青圃等. Cr⁴⁺ YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1180 ~ 1185
- 7 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, A24(3): 197 ~ 201
- 8 吴逢铁, 张文珍. 不同皮秒非稳腔中的 KTP 晶体的腔内倍频效应[J]. 光学学报, 1999, 19(1): 141 ~ 144
- 9 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. A highly efficient SHG in CPM, Nd YAG/LBO laser[J]. Chinese J. of Lasers, 1999, B8(1): 29 ~ 33
- 10 赵圣之, 张行愚, 王青圃等. NYAB 晶体 Cr⁴⁺ YAG 被动调 Q 的激光特性研究[J]. 中国激光, 1998, A26(1): 6 ~ 10

Cr⁴⁺ YAG Passively Q-Switched Laser in Different Cavity Configurations

Wu Fengtie Zhang Wenzhen

(Dept. of Elec. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract By using a new saturable absorber Cr⁴⁺ YAG crystal as Q-modulated switch, passively Q-modulated operation is realized in a plane-convex unstable resonator and a plane-plane critical stable resonator. The Q-modulated single pulse output with energy of 70.5 mJ and 29.7 mJ, pulse width of 23 ns and 20 ns, and energy fluctuations of 1.9% and 3.8% are obtained respectively. As shown by experimental results, unstable resonator is beneficial to the enhancement of output energy and stability. Theoretical analysis is in agreement with experimental results.

Keywords Cr⁴⁺ YAG, Q-switched laser, unstable resonator