

文章编号: 1001-5078 (2007) 08-0722-03

主被动调 Q - 锁模 Nd YAG 激光器的实验研究

莫 霜, 曲彦臣, 任德明, 赵卫疆, 陈振雷

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:对脉冲氙灯泵浦的调 Q - 锁模 Nd YAG 固体激光器进行了实验研究。比较和分析了声光主动锁模、 Cr^{4+} YAG 晶体被动调 Q - 锁模以及这两种机制联合锁模情况下 Nd YAG 激光器的输出特性。在 Cr^{4+} YAG 晶体被动调 Q - 锁模时得到了深度 80% 以上的锁模输出, 但是锁模不完全, 且波形和能量稳定性低, 脉宽为 1.9~3.6 ns。而主被动联合锁模克服了这一缺点, 可获得幅值和能量抖动小于 $\pm 5\%$ 、锁模深度 100%、脉宽小于 650 ps、能量近 300 mJ 的超短脉冲输出。

关键词:主被动锁模; Cr^{4+} YAG; 调 Q - 锁模

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

The Experimental Research on an Active-passive Mode-locked Nd YAG Laser

MO Shuang, QU Yan-chen, REN De-ming, ZHAO Wei-jiang, CHEN Zhen-lei

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The experiment on flashlamp-pumped Q - switched and mode-locked Nd YAG laser is carried out. The output characters of Nd YAG laser are compared and analyzed: ① passively Q - switched and mode-locked by Cr^{4+} YAG crystal; ② actively mode-locked by acousto-optic mode-locker; ③ active-passively mode-locked by joint use of the two mechanisms. When using Cr^{4+} YAG crystal only, the depth of mode locking is above 80% but can not reach 100%. Pulse amplitude and energy are of low stability while the pulse width is 1.9~3.6 ns. In the active-passive mode locking, 100% mode locking is achieved with amplitude and energy fluctuation less than $\pm 5\%$, pulse width less than 650 ps and output energy near 300 mJ.

Key words: active-passive mode locking; Cr^{4+} YAG; Q - switched and mode-locked

1 引 言

相对于已有的染料等可饱和吸收材料, Cr^{4+} YAG 晶体具有稳定的物化特性、高损伤阈值、高抗应力能力、吸收截面大等特点, 是近年来受到广泛重视的新型固体可饱和吸收材料。国内外关于 Cr^{4+} YAG 晶体应用于固体 Nd YAG、Nd YVO₄ 等激光器已有大量报道^[1-4], 其中调 Q 技术较为成熟, 但是用于被动锁模的实验结果并不是很理想, 这与 Cr^{4+} YAG 晶体激发态吸收饱和光强高和损伤阈值的限制有关。其激发态吸收弛豫时间短, 只有几十皮秒, 因此可用于被动锁模当中。而激发态吸收饱和光强高达 10^9 W/cm^2 量级, 一般泵浦水平较难达到。即使泵浦水平足够, 但是考虑到 Cr^{4+} YAG 晶

体本身的损伤阈值 (约为 500 MW/cm^2), 要实现饱和也是比较困难的。

在已有的 Cr^{4+} YAG 晶体锁模相关报道中得到的多为不完全锁模^[5-6]。在文献 [5] 里, 使用了带抗共振环的对撞脉冲锁模腔结构, 作用是为了提高 Cr^{4+} YAG 晶体上的激光功率密度, 使之更易达到激发态饱和光强以提高锁模质量, 而在泵浦能量 125 J 时, 锁模几率只有 50%。在文献 [6] 中利用了平凹直腔结构, 且腔长很长, 以提供足够的时间积累腔内

作者简介: 莫 霜 (1983 -), 女, 哈尔滨工业大学光电子研究所
在读硕士研究生。E-mail: jinmymos@126.com
收稿日期: 2007-02-04

激光能量。腔长达到 2m 时才能实现锁模,而 2.8m 左右时才达到其最好的锁模效果 60%。

主动锁模可以得到稳定和完全锁模的超短脉冲序列。利用主动锁模联合 Cr^{4+} :YAG 晶体被动调 Q-锁模,可克服单独 Cr^{4+} :YAG 晶体被动调 Q-锁模输出不稳定和锁模不完全的缺点,获得高脉冲能量、高峰值功率输出^[5-7]。本文通过实验研究了 Cr^{4+} :YAG 晶体被动调 Q-锁模、声光主动锁模以及二者主被动联合锁模三种情况下 Nd:YAG 激光器的输出特性。由实验结果分析了被动锁模、主动锁模的优缺点以及联合锁模的特点。

2 实验装置

主被动锁模 Nd:YAG 激光器实验装置如图 1 所示。采用的是一个 1.5m 长的折叠式谐振腔,整个装置较为紧凑,使占用的空间横向距离大大缩短。

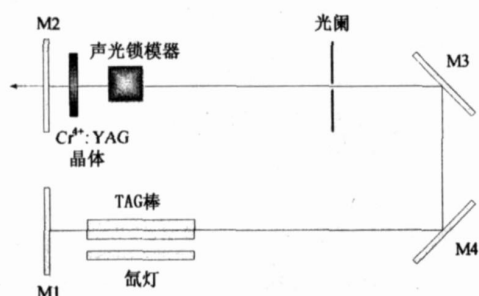


图 1 主被动锁模 Nd:YAG 激光器原理图

考虑到 Cr^{4+} :YAG 晶体损伤阈值的限制,为了不致损坏 Cr^{4+} :YAG 晶体,我们采用了平平腔的腔结构。谐振腔用三根殷钢作支架,以增加激光器的热稳定性。根据实验要求,反射镜 M1 为对 1064nm 波的平面全反镜。M2 为平面耦合输出镜。M3、M4 为 45° 放置的平面全反镜。Nd:YAG 棒尺寸为 $\phi 5\text{mm} \times 80\text{mm}$,由脉冲氙灯侧面泵浦,两个端面镀了 1064nm 波的增透膜。脉冲氙灯工作重复率为 1Hz。 Cr^{4+} :YAG 晶体置于 M2 附近,其厚度为 2mm。在谐振腔内放置了小孔光阑,以保证激光器处于基横模运转,改善输出光束质量,获得稳定输出。声光锁模器置于耦合输出镜 M2 附近,以获得最佳纵模耦合效果。声光锁模器电源驱动频率为 $(50 \pm 1)\text{MHz}$,其频率稳定度优于 $1 \times 10^{-6}/8\text{h}$ 。考虑到 Nd:YAG 棒、 Cr^{4+} :YAG 晶体及声光介质晶体折射率大于空气折射率,实际腔长为:

$$L_g = L - (n_{\text{Nd}} - n_0) l_{\text{Nd}} - (n_{\text{Cr}} - n_0) l_{\text{Cr}} - (n_{\text{sa}} - n_0) l_{\text{sa}}$$

由于 Cr^{4+} :YAG 晶体厚度仅有 2mm,可忽略其引起的变化。声光介质为熔石英,其折射率为 $n_{\text{sa}} = 1.46$,长度为 10mm。而对 Nd:YAG 棒, $n_{\text{Nd}} = 1.82$,计算得到实际腔长为 1429.8mm。

实验中采用上升时间为 500ps 的 PN 光电二极

管及 TEK TD S684A 型号的示波器来测量和显示输出脉冲波形,能量的测量使用的是 ED-500 能量计。

3 实验结果和分析

3.1 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q-锁模

Cr^{4+} :YAG 被动调 Q-锁模输出波形如图 2 所示。 Cr^{4+} :YAG 晶体被动锁模时泵浦阈值约为 6.12J。在阈值附近,出现明显的调 Q 脉冲,但是只有微弱的锁模调制现象,锁模深度约 20%,且不稳定,波形变化很大。随着泵浦电压增大,锁模深度增加,锁模现象越发明显。当泵浦能量增加到 18J 以上后,锁模深度变得较稳定,每次锁定都能达到 80% 以上。但是即使在泵浦能量接近最大值 50J 时,也不能实现完全锁模。调 Q-锁模脉冲波形幅值和能量随泵浦能量增加而增加。虽然泵浦能量达到一定程度后锁模深度变得较稳定,但是输出波形和能量稳定度差。锁模脉宽为 1.9~3.6ns。被动锁模由于存在着调 Q 机制,能量主要集中在窄的调 Q 包络脉冲列中,而尤其以中心处的几个脉冲能量最高。

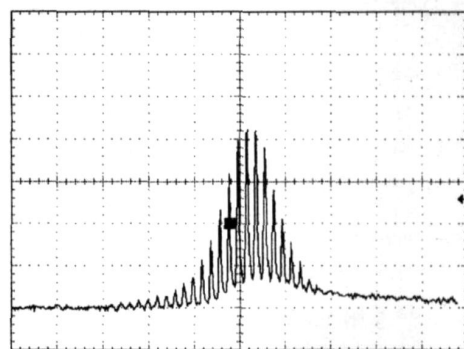


图 2 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q-锁模输出波形
($E_{\text{pump}} = 32\text{J}$, $T_{\text{out}} = 50\%$, $T_0 = 47\%$, 50ns/div)

3.2 主被动联合锁模波形

声光主动锁模波形如图 3 所示。在只有声光锁模的情况下,获得了 100% 完全锁模,锁模锁到了底部,脉冲稳定度很高,在泵浦能量不变时相邻两次泵浦得到脉冲波形几乎不变。可是能量平均分布于整个脉冲序列各个脉冲当中,因此单脉冲能量和峰值功率实际上都很低。

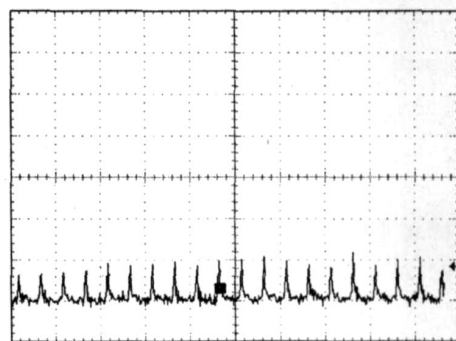


图 3 声光主动锁模输出波形
($E_{\text{pump}} = 32\text{J}$, $T_{\text{out}} = 50\%$, 20ns/div)

主被动锁模阈值为 6 J。在阈值附近,锁模深度约 80%,随着泵浦能量增加,锁模深度增加,稳定性增强,且无失锁现象。在泵浦能量增加到 12 J 时,锁模深度已接近 100%。泵浦能量大于 18 J 后,锁模深度一直保持在 100%。相邻两个脉冲间隔稳定在 10 ns,正好与腔长相匹配。由图 4(a)可见,由于被动调 Q 的作用,锁模脉冲集中于调 Q 包络内,故可得到很高的单脉冲能量和峰值功率。由展宽的图 4(b)可见,锁模脉冲很平滑,有明显的平底,且无毛刺结构,波形和能量抖动小于 $\pm 5\%$ 。测得脉冲宽度为 650 ps 附近,由于仪器的限制,实际脉宽应该是小于这一数值的。

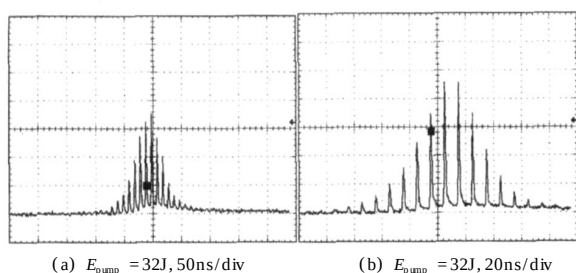


图 4 主被动锁模输出波形 ($T_{\text{out}} = 50\%$)

由实验结果可以看到,主被动联合锁模克服了单独主动锁模和被动锁模的缺点,可获得高稳定性、高脉冲能量和完全锁模的超短脉冲输出。

3.3 主被动锁模输出能量

实验中采用了两个不同的输出镜片,透过率分别为 10% 和 50%。两种情况的输出脉冲波形相似,而输出能量有所不同。其输出能量随泵浦能量的变化曲线如图 5 所示。随着泵浦能量增加,锁模输出能量也逐渐增加。由曲线可见 $T_{\text{out}} = 50\%$ 对应的输出能量要远高于 $T_{\text{out}} = 10\%$ 的数值。在泵浦能量接近最大值 50 J 时, $T_{\text{out}} = 50\%$ 输出能量近 300 mJ,而 $T_{\text{out}} = 10\%$ 相应只有 112 mJ。输出镜透过率过低时,脉冲输出能量很低。输出镜透过率高时,脉冲在腔

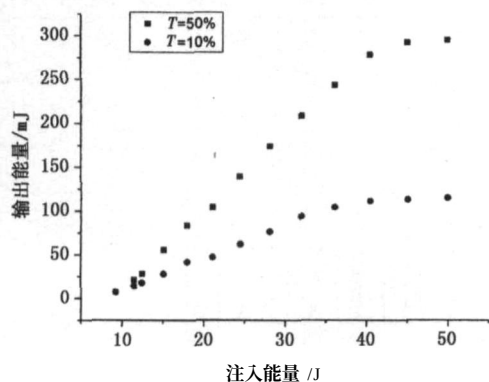


图 5 主被动锁模输出能量随泵浦能量的变化曲线

内的建立时间短,从而可获得更好的锁模输出^[8]。但是随着透过率的增加,阈值也会增加。因此,透过率的选择有一个最佳值。本文中,在保证输出锁模脉冲质量的条件下,应该选取输出镜透过率 50%,使输出尽可能的高。一般地,对于脉冲式固体激光器,输出镜最佳透过率为 50%~70%^[9],实验结果与这一经验值是相符合的。

4 结 论

我们对锁模 Nd:YAG 激光器进行了实验研究,比较和分析了 Cr^{4+} YAG 晶体被动调 Q - 锁模、声光主动锁模以及二者联合锁模三种情况下输出脉冲的特性。在 Cr^{4+} YAG 晶体被动调 Q - 锁模时得到的锁模深度达到 80% 以上,但是锁模不完全,波形和能量稳定性不高,锁模脉宽为 1.9~3.6 ns。而主被动联合锁模克服了主动锁模脉冲能量低、被动调 Q - 锁模稳定性差、锁模不完全的缺点,得到幅值和能量抖动小于 $\pm 5\%$ 、锁模深度 100%、脉宽小于 650 ps、输出能量近 300 mJ 的锁模脉冲。

参考文献:

- [1] Yung-Fu Chen, Jian-Lung Lee, Hung-Dau, et al Analysis of passively Q - switched lasers with simultaneous mode-locking[J]. IEEE J. Q - E 2002, 38(3): 312 - 317.
- [2] TM Jeong, C M Chung, H S Kim, et al Generation of passively Q - switched and mode-locked pulse from Nd:YVO₄ laser with Cr^{4+} YAG saturable absorber[J]. Electronics letters, 2000, 36: 633 - 634.
- [3] 王加贤,王清月,邓佩珍,等. Cr^{4+} YAG 在对撞脉冲锁模的 Nd:YAG 激光器中实现被动锁模的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 983 - 987.
- [4] 张行愚,赵圣之,王青圃,等. Cr^{4+} YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1180 - 1185.
- [5] Lihuang Lin, Bin Ouyang, Yuxin Leng, et al Mode-locked Nd:YAG laser using Cr^{4+} YAG crystal at 1.064 μm [C] // May, 1999, CLEO '99: 134.
- [6] 王加贤,张文珍,王清月,等. 在平凹腔 Nd:YAG 激光器中 Cr^{4+} YAG 被动锁模的特性研究[J]. 中国激光, 1999, 26(1): 1 - 5.
- [7] 殷宝璐,屠国良,黄骝,等. 高稳定度高功率密度主被动锁模 YAG 激光器[J]. 光电工程, 1995, 22(6): 28 - 34.
- [8] Yung-Fu Chen, S W Cai Simultaneous Q - switch and mode-locking in a diode-pumped Nd:YVO₄- Cr^{4+} YAG Laser[J]. IEEE J. Q - E 2001, 37(4): 580 - 586.
- [9] W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,等译. 北京:科学出版社, 2002: 456 - 457.