

CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器的参数特性*

张文珍

(华侨大学应用物理系, 福建, 泉州, 362011)

摘要: 阐述了 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器采用抗共振环 (ARR) 结构与一般非稳腔相结合的特点, 对使用的染料溶液最佳小信号透过率进行了分析, 还对该腔型的稳定性进行了实验研究及理论分析.

关键词: CPM, Nd:YAG 非稳腔, 抗共振环, 稳定性.

引言

超短光脉冲技术已逐渐成为研究物质微观世界超快过程不可缺少的手段, 有关超短光脉冲研究的热点是: 1) 利用各种方式压缩光脉冲宽度以及对它的测量. 目前, 人们已经用对撞脉冲锁模 (CPM) 技术及光纤—光栅压缩技术在染料激光器中得到了 6fs (10^{-15} s) 的光脉冲, 在输出红外的 CPM 固体激光器中得到了 8~10 ps (10^{-12} s) 的脉冲宽度. 2) 提高锁模脉冲的输出能量. 一般接触反射式 Nd:YAG 锁模激光器输出的单序列脉冲能量为 3~5 mJ; 目前研究的 CPM, Nd:YAG 激光器可以输出 10 mJ 的激光能量; 而我们研究的 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器输出的锁模能量达到 100 mJ 量级, 我们还没有见到此类器件更高输出能量的报道.

1 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器的激光特性

我们研究的 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器腔型如图 1 所示. 图 1 中 M_1 为对 $1.06 \mu\text{m}$ 全反凸面镜; M_2 为对 $1.06 \mu\text{m}$ 有一定反射、透射比的耦合输出镜; M_3 为分束镜 (50%:50%); M_4 、 M_5 为 22.5° 全反射介质膜片, M_3 、 M_4 、 M_5 组成抗共振环结构; CD 为可饱和吸收体 (五甲川溶于 1.2—二氯乙烷的染料溶液); N_1 、 N_2 为分束镜; P 为棱镜; f 为透镜; C 为滤光片; M 为全反射镜; E 为自相关检测器. 在我们的实验条件下, 该腔型输出的脉冲宽度为 8~10 ps, 单序列脉冲能量达到近 100 mJ, 锁模几率为 100%, 输出能量的稳定性达到 96%, 使用的较佳染料小信号透过率为 25~35%, 单脉冲序列中

本文 1993 年 7 月 13 日收到, 修改稿 1993 年 9 月 29 日收到.

* 福建省自然科学基金资助项目.

的脉冲个数为 3~5 个, 而且脉冲能量主要集中在主脉冲中. 但泵浦阈值较高, CPM, Nd:YAG 稳定腔与非稳腔激光器的激光参数比较见表 1, 从表 1 可见, CPM 非稳腔比稳定腔的激光参数有了很大的改善.

表 1 CPM, Nd:YAG 激光器的非稳腔与稳定腔的激光参数比较
Table 1 Comparison of laser parameters of CPM, Nd:YAG stable resonator laser and unstable resonator laser

项 目	最佳染料透 过率(%)	脉冲宽 度 (ps)	最佳 T_0 时输 出能量 (mJ)	输出能量稳 定性 (%)	单序列脉 冲数 (个)
CPM 非稳腔	25-35	8	98.7	96	3-7
CPM 稳定腔	50	10	10	90	> 10

2 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器几种参数的分析

2.1 抗共振环与非稳腔相结合腔型的特点

在 CPM, Nd:YAG 非稳腔中, 既有 ARR 结构的优点, 又有一般非稳腔结构的特点. 采用 ARR 结构形式中, 在可饱和吸收体内存在着同步到精确迭合的两个逆向传播的脉冲, 这两个重迭脉冲的干涉, 在吸收体中产生瞬态受激分子的周期性空间分布, 形成了衍射光栅, 这个光栅以一种特别有效的方式同步, 稳定和缩短了激光脉冲, 该理论已有比较深入的分析^[1-2].

对 ARR, CPM 腔我们总结了以下几个优点: (1) 在增益介质处只有一个环形脉冲, 这既有利于均匀展宽的空间烧孔效应, 又有利于在 ARR 中两个分脉冲始终保证得到相同的增益; (2) 每次通过谐振腔脉冲以双通增益介质, 有利于放大作用, 提高输出能量; (3) ARR, CPM 腔是研究四波混频、自泵浦相位共轭, 双光子吸收光谱学, 以及双光子相干态(压缩量子态)的有效装置. 由于 ARR, CPM 腔有这些特点, 一方面非常有效地压缩了光脉冲的宽度, 另一方面提高了输出的激光能量.

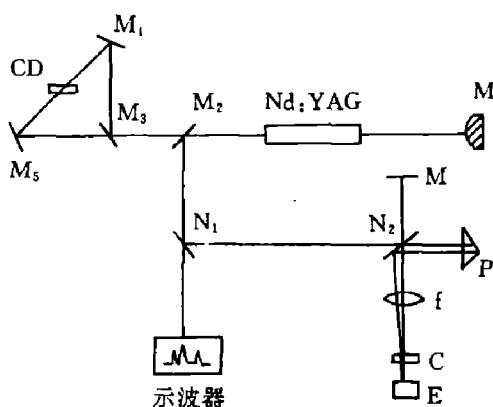


图 1 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器简图
Fig. 1 Diagram of the CPM, Nd:YAG unstable resonator laser

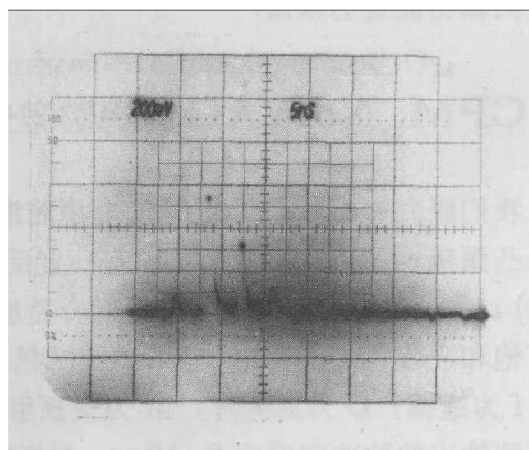


图 2 CPM, Nd:YAG 非稳腔输出的脉冲序列图
Fig. 2 Pulse train delivered from CPM Nd:YAG unstable resonator laser

对于非稳腔激光器, 由于它的模体积大, 几乎完全覆盖工作物质, 另外, 在非稳腔中, 各阶横模的损耗差别大, 可以抑制高阶横模的产生, 省掉了选单横模元件, 减少了能量的损耗, 这两个特点都有利于器件的激光输出能量. 根据上述分析, 我们把 ARR 结构与一般非稳腔结合组成了 CPM 非稳腔, 兼有二者的优点, 既压缩了锁模脉宽, 又获得比较大的激光能量输出. 在我们的实验条件下, 当输出耦合镜 M_2 采用半反半透的介质膜片, 其平面法线与光路成 45° 放置, 染料的小信号透过率为 25%, 泵浦能量为 115 J 时, 用自相关脉宽测量法测得输出的锁模激光脉宽为 8 ps, 用 PT-1 型激光能量计测出的单脉冲序列能量达到 98.7 mJ.

2.2 可饱和吸收体的最佳参数分析

从表 1 可见, 在 CPM, Nd:YAG 稳定腔激光器中使用的染料最佳透过率约为 50%, 这时激光输出稳定, 单脉冲区域较宽^[3], 染料小信号透过率较大或较小时, 都会影响激光输出的稳定性. 而 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器所使用的染料最佳透过率为 25~35%, 这时激光输出的能量较大, 序列中的脉冲个数明显减少 (见图 2), 稳定性也好, 但是泵浦阈值较高. 如上所述在 CPM 非稳腔中各阶横模的损耗差别大, 本身有很好的选模特性, 所以它在染料透过率小时, 在高泵浦能量的情况下, 仍能保证单横模振荡, 导致它的单脉冲区域较宽, 因此可使用 T_0 小的染料溶液达到既提高输出激光能量, 又保证单脉冲锁模系列的输出. 在锁模理论中, 随着染料透过率的减小, 单脉冲序列中的脉冲个数减少, 有利于选出较大能量的主脉冲.

我们对不同的染料浓度 (以对 $1.06 \mu\text{m}$ 小信号透过率表示), 测定锁模阈值, 并在泵浦阈值附近用 PT-1 型激光能量计测定输出能量, 用 500 MHz 示波器观察输出的锁模脉冲情况, 实验结果见表 2. 由表 2 可见, 染料浓度越大 (T_0 越小), 锁模阈值越高, 输出的激光能量也越大, T_0 在 30% 左右, 输出的脉冲稳定性较好.

表 2 不同染料浓度的锁模情况
Table 2 Mode-locked situation at different dye concentrations

染料透过率 T_0 (%)	泵浦阈值 (J)	平均输出能量 (mJ)	锁模几率 (%)	稳定性情况
17.8	80	51.3	100	稳定性较差 (有时有双脉冲)
31.1	76.5	40	100	稳定性好, 单脉冲
42.2	69	20.4	80~90	稳定性较差, 单脉冲
63.9	67	15.7	70~80	稳定性较差, (有少量双脉冲)

2.3 几何参量对 CPM, Nd:YAG 非稳腔激光器输出稳定性的影响

CPM 非稳腔在忽略激光棒的热透镜效应情况下, 可以简单地等效于平凸非稳腔, 光束在腔内的传输矩阵为

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

式(1)中 L 为有效腔长, $g = 1 + \frac{L}{|R_1|}$, R_1 为反射镜 M_1 的曲率半径. 谐振腔的稳定性因子为

$$f = \frac{[A + D]}{2} \pm \left[\frac{(A + D)^2}{2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

对于发散球面波 $f > 1$ (记 f_d), 所以它是稳定的, 会聚球面波 $f < 1$ (记 f_c), 它是不稳定的, 把式(1)代入式(2)得到:

$$f = (2g - 1) \pm \sqrt{2(2g - 1)^2 - 1}, \quad (3)$$

式(3)中取正号时得到发散球面波 $f_d = (2g - 1) + \sqrt{2(2g - 1)^2 - 1}$, 由上式可见, g 越大, f_d 越大, 发散球面波就越稳定; 而 $g = 1 + \frac{L}{|R_1|}$, 所以增大腔长和选用小曲率半径的凸面镜对于提高腔的稳定性是有利的. 对这个理论, 我们进行了实验验证, 取腔长 $L = 1100$ mm, 染料 $T_0 = 31\%$, M_2 镜反射透射比为 70:30, 凸面镜的曲率半径 R_1 分别采取 -4000 mm、 -3000 mm 和 -2000 mm, 泵浦能量为 70 J, 我们改变泵浦速率, 从 1 次/s 提高到 2 次/s, 分别测出它们的输出能量, 其数据见表 3. 由表 3 可见, 泵浦速率从 1 次/s 增加到 2 次/s 时, 激光输出的能量有较明显的变化, 说明了激光器各部件的热效应也有较大的变化, 但是, 采用小曲率半径的凸面镜, 激光的输出能量波动不大, 说明它的抗干扰能力是比较强的.

表 3 R_1 对激光输出能量稳定性的影响
Table 3 The effect of R_1 on the stability of output energy

R_1 (mm)	稳定性因子 f_d (计算值)	1 Hz 的输出 能量 (mJ)	2 Hz 的输出 能量 (mJ)	输出能量 波动 (%)
-4000	3.50	35.9	33.4	± 4
-3000	6.80	36.4	35.5	± 1
-2000	9.92	26	26.1	± 0.2

另一方面, 我们取凸面镜的 $R_1 = -4000$ mm, 计算出 L 为 800 mm、1000 mm、1200 mm、1400 mm 的稳定性因子分别为 3.11、3.37、3.63、3.89. 由此可见, 由于腔长的变化范围不能太大, 所以计算出的稳定性因子也变化不大. 我们按上述方法进行了 3 种不同腔长的热稳定性实验, 输出的能量波动均在误差范围之内, 但激光器的重复频率为 1 次/s 时, 测得它的输出能量稳定性不同, 腔长 L 在 1000 mm 以内时, 稳定性较差, 约 90%. 而腔长较长时, 如 L 为 1300 mm、1500 mm 时, 测得输出能量稳定性均在 96% 以上.

上述分析和实验均说明, 几何参量 (R_1, L) 对激光器的输出稳定性有一定的影响, 实际上, 几何参量也影响到激光器的基本性能, 如输出能量大小, 光束发散角等, 所以应根据实际情况综合考虑选择合适的几何参量.

3 结语

本文分析了带抗共振环 CPM, Nd:YAG 非稳腔结构的特点, 得到了 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的脉宽 $8\ \text{ps}$, 单脉冲序列能量 $98.7\ \text{mJ}$ 的输出, 对所使用的染料溶液小信号透过率进行了探讨, 认为在该腔型条件下, 最佳小信号透过率为 $25\sim 35\%$, 对 CPM 非稳腔激光器的激光输出稳定性进行了讨论与实验, 认为增加腔长或采用小曲率半径的凸面镜对提高激光器的输出稳定性有利, 但必须根据实际情况给予综合考虑, 选择合适的几何参量.

参考文献

- 1 Fork F L, Shank C V, Yen R *et al.* *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1983;QE-19:500
- 2 吴逢铁, 张文珍, 林星. *华侨大学学报*, 1986;7(4):384
- 3 林星, 张文珍, 吴逢铁, 庄辉鸣, 孙占鳌. *光学学报*, 1985;5(9):794

SOME PARAMETER CHARACTERISTICS OF CPM UNSTABLE RESONATOR Nd:YAG LASER*

ZHANG WENZHEN

(*Department of Applied Physics, Hua Qiao University,
Quanzhou, Fujian 362011, China*)

Abstract: This paper deals with the CPM unstable resonator Nd:YAG laser that uses the property of combination of antiresonant ring (ARR) structure and general unstable resonator. The optimal small-signal transmissivity of dye solution used was analyzed. And the stability of this type of resonator was experimentally studied and theoretically analyzed.

Key words: CPM unstable resonator Nd:YAG laser, antiresonant ring, stability.

*The project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China.