

含热透镜的非稳腔 CPM 固体激光器分析

王加贤 张文珍

(电气技术系)

摘要 本文考虑到 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 棒在工作中的热效应,把含热透镜的 CPM 非稳腔等效为平凸空腔,以此分析 CPM 非稳腔的结构参数对激光器输出能量、光束远场发散角和抗干扰能力的影响,得出的结论与实验相符。

关键词 热透镜,非稳腔,对撞脉冲锁模(CPM)

0 引言

近年来我们进行了非稳腔对撞脉冲锁模(简称 CPM) $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器的研究^[1]. 这种激光器由于采用抗共振环结构来实现对撞脉冲锁模,并利用平凸非稳腔具有模体积大、横模鉴别能力强、输出耦合方式容易控制的优点,所以输出的激光能量高、脉冲时间宽度窄,在较佳的工作条件下可得到能量近 100mJ、脉宽 8PS 的单脉冲序列^[1]. 它仍以透射耦合输出取代非稳腔惯用的衍射耦合或偏振耦合输出,所以光束具有良好的空间质量[2]. 进一步的实验研究发现,当激光器以 1PPS 以上的重复率运行时,其热效应不可忽略. 本文在考虑工作物质 YAG 棒的热透镜效应的情况下,分析非稳腔 CPM 激光器的腔结构参数对激光输出和微扰稳定性的影响,这对于优化激光器工作条件、改善激光器性能具有指导意义。

1 含热透镜的非稳腔 CPM 固体激光器

图 1 是非稳腔 CPM $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器实验装置. M_1 是全反射(对波长 $1.06\mu\text{m}$,下同)凸面镜; M_2 、 M_4 、 M_5 组成抗共振环(ARR),其长度 $L_3=430\text{mm}$,可饱和吸收体 D 置于 M_4 与 M_5 中间处; M_3 是有一定反射透射比的介质膜片,它靠近 YAG 棒端,作为耦合输出镜. YAG 棒的尺寸为 $4.5\times 80\text{mm}$,它的二个端面与凸面镜 M_1 、分束镜 M_3 的距离分别是 L_1 和 L_2 , $L_2=335\text{mm}$, L_1 在实验中调整。

● 本文 1991-07-12 收到

●● 福建省 1991 年自然科学基金资助课题。

图1中的抗共振环实质上是环路干涉仪,可等效为平面全反射端镜(设为 M_{2e}),⁽³⁾ M_{2e} 与YAG棒端的距离为 $L_2 + (1/2)L_3$,输出镜 M_2 只引起光程微小变化,在分析腔结构时可以忽略.由于非稳腔内传输的光束是近似均匀的球面波(非高斯光束),所以各光学元件和可饱和吸收体被光照射的部分所产生的热效应会引起光程微变,但并不形成热透镜,这样CPM非稳腔就可简化为图2所示含YAG棒的平凸非稳腔.当激光器以1PPS的重复率运行时,闪光灯泵浦YAG棒,棒的边缘比内部吸收的光能较多,由此引起的温升也较高.因为YAG棒的折射率随温度的变化率 dn/dT 为正值,所以呈现负透镜效应.文献[4]介绍了在低重复率(5PPS以下)下,测得YAG棒的热透镜焦距 f_T 为负值.

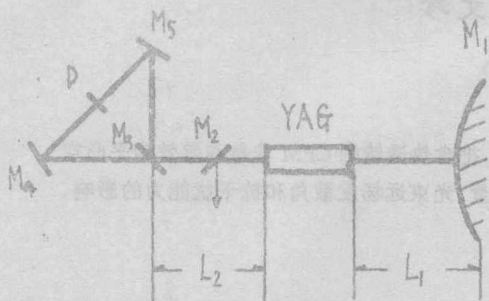


图1 非稳腔 CPM 固体激光器

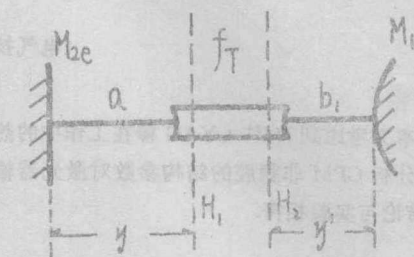


图2 含热透镜的非稳腔

考虑到YAG棒的热效应,棒的二端面在工作时实际上是凹面(近似地认为是球面,且曲率半径 r 相同),这样YAG棒就是厚度 l 、折射率 n 的双凹厚透镜.在 $(n-1)l \ll 2nr$ 的条件下(实际上满足),厚透镜等效为焦距 f_T 的光学系统,它的两主平面 H_1 、 H_2 与YAG棒两端面距离分别为 $h_1 = h_2 = h = l/2n$,与等效平面镜和凸面镜的距离分别是 $y = a + h = L_2 + (1/2)L_3 + l/2n$, $y' = L_1 + h_2 = L_1 + l/2n$,如图2所示.对于含厚透镜的非稳腔,可以用以矩阵光学方法为基础的等效 G 参数法⁽⁵⁾,也可以用成像法进行分析,但这二种方法的主要缺点是计算量大,且非稳腔的一些重要特征量(如几何参量 g 、几何放大率 M 等)和腔结构参数之间没有关系明显的解析式,不易看出结构参数变化对系统性能的影响趋势.

本文采用等效像镜法,即把凸面镜 M_1 对厚透镜成像,得一镜像 M_{1e} ,把含厚透镜的平凸非稳腔等效为腔长 d 、凸面镜曲率半径 R_{1e} 的平凸空腔,如图3所示.这样就可以直接引用计算平凸非稳腔特征量的一些公式,以此平凸空腔为媒介,分析激光器的性能.

设凸面镜 M_1 经厚透镜成像后镜像 M_{1e} 的位置与主平面 H_1 的距离是 S' (像在 H_1 的左边 $S' < 0$,在 H_1 的右边 $S' > 0$),以镜 M_{2e} 和镜像为参考平面成像系统的变换矩阵为

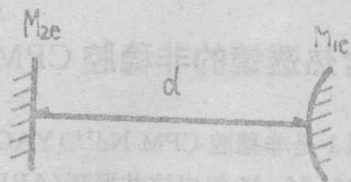


图3 等效平凸空腔

$$\begin{aligned} T &= \begin{bmatrix} 1, & -S' \\ 0, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1, & 0 \\ -\frac{1}{f_T}, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1, y' \\ 0, 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 + \frac{S'}{f_T}, & \frac{y' f_T + S'(y' - f_T)}{f_T} \\ -\frac{1}{f_T}, & \frac{f_T - y'}{f_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1, B_1 \\ C_1, D_1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{1}$$

令上式中矩阵元素 $B_1=0$, 得 $S'=-y'f_T/(y'-f_T)$, 平面镜 M_2 与镜像 $M_{1'}$ 的距离就是等效平凸空腔的腔长 d , 显然

$$d = y + S' = y - y' f_T / (y' - f_T). \tag{2}$$

镜像的曲率半径 $R_{1'}$ 与 M_1 镜的曲率半径 R 有下面关系

$$R_{1'} = \frac{A_1 R + B_1}{C_1 R + D_1} = \frac{f_T^2 R}{(y' - f_T)(y' - R - f_T)}, \tag{3}$$

其中, A_1, B_1, C_1, D_1 为式(1)的矩阵元素. 式(3)中, 由于 $f_T < 0, R < 0$ (M_1 是凸面镜), 所以有 $R_{1'} < 0$, 镜像必定是凸面镜.

当 $f_T \rightarrow \infty$, 时, 式(2)和式(3)化为

$$d = y' + y = L_1 + L_2 + (1/2)L_3 + (l/n) = L, \quad R_{1'} = R,$$

这就是不考虑 YAG 棒的热透镜效应, 认为棒端面是平面的情况下的解, L 是等效腔长.

光束在平凸腔内传输, 其往返矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2d}{R_{1'}}, & 2d - \frac{2d^2}{R_{1'}} \\ -\frac{2}{R_{1'}}, & 1 - \frac{2d}{R_{1'}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2g - 1, & 2gd \\ \frac{2g - 2}{d}, & 2g - 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中

$$g = g_1 g_2 = g_2 = 1 - (d/R_{1'}), \quad (\text{平凸腔 } g_1 = 1) \tag{5}$$

当 $|(A+D)/2| < 1$, 即 $g_1 g_2 < 0$ 或 $g_1 g_2 > 1$ 为非稳腔, 腔内发散的球面波满足在腔内往返一次后的自再现条件. 由于 $d > 0, R_{1'} < 0$, 所以图3空腔自然满足 $g_1 g_2 > 1$ 的非稳腔条件(若激光器工作的重复率较高, YAG 棒形成正的热透镜, $f_T > 0$, 要成为非稳腔须有 $f_T > |R| + y'$, 这不属本文讨论范围).

2 腔结构参数 L_1, R 对激光器输出的影响

平凸腔内的球面波往返一周后波面的几何放大率为

$$M = 2g - 1 + 2\sqrt{g(g-1)} = 1 - (2d/R_{1'}) (\sqrt{1 - R_{1'}/d} + 1), \tag{6}$$

光轴上共轭像点 P_1 (位于 $M_{1'}$ 右边) 与凸面镜 $M_{1'}$ 的距离为

$$\gamma_1 = d(\sqrt{1 - R_{1'}/d} - 1)^{(2)}. \tag{7}$$

由于 M, γ_1 决定了激光器的输出能量、光束的空间发散角和微扰稳定性, 所以有必要先讨论 M, γ_1 随腔参数 R, L_1 的变化规律 (R, L_1 分别为 CPM 非稳腔凸面镜 M_1 曲率半径和它到 YAG 棒端距离)。

把式(2)和式(3)分别对 L_1 ($L_1 = y' - l/2n$) 和 $|R|$ 求偏导数得

$$\begin{aligned}\frac{\partial I}{\partial L_1} &= \frac{f_T^2}{y' + f_T^2} > 0, \quad \frac{\partial I}{\partial |R|} = 0, \\ \frac{\partial |R_{1c}|}{\partial L_1} &= \frac{f_T^2 \cdot R \cdot (y' - R - 2f_T)}{(y' - f_T)^2 (y' - R - f_T)} < 0, \\ \frac{\partial |R_{1c}|}{\partial |R|} &= \frac{f_T^2}{(y' - f_T - R)^2} > 0.\end{aligned}$$

再结合式(6)和式(7)进行讨论, 有

$$\frac{\partial M}{\partial L_1} > 0, \quad \frac{\partial M}{\partial |R|} < 0, \quad \frac{\partial \gamma_1}{\partial L_1} > 0, \quad \frac{\partial \gamma_1}{\partial |R|} > 0, \quad (8)$$

上面各偏导数的符号为我们研究非稳腔 CPM 激光器性能与腔结构参数之间的关系提供了依据。

我们设计的 CPM 非稳腔激光器采用透射耦合输出(从 YAG 棒与环路之间的介质膜片反射输出, 相当于从腔端镜 M_2 透射), 几何损耗和衍射损耗不是有用输出, 希望它尽可能小。而光束在腔内往返一次后所保留的能量比例为 $1/M^2$, M 越小, 一次往返后保留的能量比例越大, 输出能量越高。从式(8)看出, 增大凸面镜的曲率半径 $|R|$ 可减小 M , 则可提高激光器输出能量。 L_1 与输出能量的关系要复杂一些, 减小 L_1 , M 也减小, 从损耗的角度看可以提高输出能量; 但另一方面, 锁模激光器的输出能量与纵模数 q 成比例, q 又与腔长成正比, 所以减小 L_1 , 从锁模的角度看是要降低输出能量。因此在分析 L_1 与输出能量之间的关系时, 应综合考虑这二方面的因素。

为了验证上述结论, 我们进行了二组实验。(1)凸面镜到 YAG 棒端的距离 $L_1 = 900\text{mm}$, 输出耦合镜 M_2 的反射透射比为 70%:30%, 可饱和吸收体采用五甲川溶于 1,2-二氯乙烷溶液, 其小信号透过率 $T_0 = 32\%$, 激光器以 1PPS 重复率工作, 泵浦能量 90J。在同一位置安放不同曲率半径的全反射凸面镜, 分别测量激光器的输出能量 E , 其数值分别为: (i) $R = -4000\text{mm}$, $E = 38.1\text{mJ}$; (ii) $R = -3000\text{mm}$, $E = 36.4\text{mJ}$; (iii) $R = -2000\text{mm}$, $E = 26.2\text{mJ}$ 。(2)工作条件不变, 选凸面镜的曲率半径 $R = -4000\text{mm}$, 改变凸面镜到 YAG 棒的距离 L_1 , 分别测量输出能量 E 。(i) $L_1 = 300\text{mm}$, $E = 40\text{mJ}$; (ii) $L_1 = 560\text{mm}$, $E = 44\text{mJ}$; (iii) $L_1 = 900\text{mm}$, $E = 38.1\text{mJ}$ 。可见上述实验结果与理论相符。

CPM 非稳腔固体激光器输出光束的远场发散角由纯几何分量和衍射分量两部分组成, 即

$$\theta^2 = (\omega/h)^2 + (\lambda_0/\pi\omega)^2,$$

ω 视为 YAG 棒半径, h 是像点 P_1 到输出耦合镜 M_2 的距离。由图 1 和图 3 可看出, $h = \gamma_1 + d - a$, 所以增大 L_1 和 (或) $|R|$ 可使 h 增大, 发散角减小, 实验也证实了这一点。

3 腔结构参数 L_1, R 对微扰稳定性的影响

激光器工作时, 由于机械振动或各光学元件、可饱和吸收体的热效应, 会造成光轴上的球

面波虚中心发生偏离. 设该虚中心经历了某一扰动后在光轴上偏离了 $\Delta\gamma$, 光束在腔内往返一次新的偏离量 $\Delta\gamma^1$. 若 $(\Delta\gamma/\Delta\gamma^1)>1$, 则该腔是微扰稳定的; 反之若 $(\Delta\gamma/\Delta\gamma^1)<1$, 则是微扰不稳定的. 对于平凸腔内发散的球面波, 经运算其稳定性因子为

$$S = \sqrt{\frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma^1}} = 2g - 1 + 2 \sqrt{g(g - 1)} = M > 1,$$

所以是微扰稳定的. M 越大(即 S 越大), 发散球面波抗干扰能力越强, 结合式(8)可知, 增大 L_1 和(或)减小 $|R|$, 可使 M 增大, 则可以提高激光器的抗干扰能力.

下面的实验结果与上述理论相符: (1) 把激光器的输出通过快速光电探测器输入到 500MHz 示波器进行较长时间的观察, 可看到, 当 $|R|=9000\text{mm}$ 时屏幕上显示的锁模脉冲波形较 $|R|=4000\text{mm}$ 时不稳定; 而 $L_1=300\text{mm}$ 时的脉冲波形也较 $L_1=560\text{mm}$ 时不稳定. (2) 把激光器的工作重复率从 1PPS 提高到 2PPS, 这时热透镜焦距稍有改变, 各光学元件热效应也增大. 在此情况下比较激光器取不同的 R 和 L_1 , 当重复率从 1PPS 变到 2PPS, 其输出能量的改变值. 若这个改变值大, 则激光器的抗干扰能力较差; 反之若改变值小, 则激光器的抗干扰能力较强. 实验结果见表 1 (第一组 $L_1=900\text{mm}$, 改变 R ; 第二组 $R=-4000\text{mm}$, 改变 L_1). 可以看出, 较小的 $|R|$ 和较大的 L_1 对于提高激光器的抗干扰能力是有利的.

表 1 L_1 、 R 对激光输出稳定性的影响

输出能量(mJ)	结构参数				
	$R(\text{mm})$			$L_1(\text{mm})$	
	-4000	-3000	-2000	900	1300
1PPS 时	58.1	36.4	26.2	38.5	29.8
2PPS 时	56.0	35.5	26.0	36.0	28.0
差 值	2.1	0.9	0.2	2.5	1.8

4 结论

本文考虑到 CPM 非稳腔 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器在低重复率工作时 YAG 棒产生的负热透镜效应, 通过等效平凸空腔, 分析 CPM 非稳腔结构参数 L_1 、 R 对激光器输出能量、光束空间发散角和微扰稳定性的影响. 得出, CPM 非稳腔的凸面镜的曲率半径(绝对值)越大, 输出能量越大, 但微扰稳定性越差; 凸面镜与 YAG 棒的距离 L_1 越大, 微扰稳定性越好, 而 L_1 与输出能量的关系要受腔损耗和纵模数二方面因素的制约. 这些结论对实验有指导意义.

参 考 文 献

[1] 林 星等, *Optics Comm.*, 71, 6(1989), 367—369.
[2] 王加贤等, 非稳腔对撞脉冲锁模 YAG 激光器输出耦合研究, *光电子. 激光*, 1, 2(1990), 66—70.
[3] 盛国平等, 对撞脉冲锁模 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器的若干运转特性, *光学学报*, 6, 2(1986), 104—107.
[4] 张春平等, 固体激光棒热透镜焦距的测量, *物理*, 11, 11(1982), 678—689.
[5] 卢亚雄、吕百达, *矩阵光学*, 大连理工大学出版社, (1989), 221.

Analysis of CPM Unstable Resonator Solid Laser with Thermal Lens

Wang Jiexian Zhang Wenzhen
(*Department of Applied Physics*)

Abstract Taking the thermal effect of $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ rod in laser operation into account, the authors equate the colliding pulse mode-locking unstable resonator with thermal lens to a plane-convex cavity. Based on which the influences of the structural parameters of CPM unstable resonator on energy output, far-field divergence angle of optical beam, and anti-jamming ability of this solid laser are analysed, and a conclusion in conformity to experiment result is drawn.

Key words thermal effect, unstable resonator, colliding pulse mode-locking