

带有共焦光学延迟系统的长腔 CPM 染料激光器的稳定性研究

石国春 邢岐荣 王清月

(天津大学精仪系, 300072)

摘要: 本文对带有共焦光学延迟系统的 8 镜环形激光器的稳定域及腔内光束参数进行了系统的计算和分析, 得到不同腔长时的最佳大曲率半径、腔长一定时的稳定域宽度以及腔内光束参数随大曲率半径的变化规律。

关键词: 碰撞锁模, 共焦延迟, 稳定域

Study on stable zone of a long ring cavity for CPM dye laser with optical delay system

Shi Guochun, Xing Qirong, Wang Qingyue

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin)

Abstract: The stable zone and waist size of an eight mirror long ring cavity with optical delay system in a colliding pulse mode-locked (CPM) dye laser is first calculated and analysed. The optimal large radius of curvature for various cavity length and the dependence of the stable zone of cavity and the beam waist size on the large radius of curvature for a fixed cavity length are obtained.

Key words: colliding pulse mode-locking (CPM) confocae delay, stable zone

自从 CPM 环形染料激光器出现以来, 为了提高此类激光器的稳定性, 人们利用各种方法对光腔的稳定域进行了计算和分析, 得到了很多有意义的补偿方法。1984 年, 邢岐荣等人得到了简明的解析解^[1], 但由于光腔的稳定域很小, 激光的稳定运转很难用机械调整的办法来实现。1986 年, 赵新苗等人提出用大曲率的球面镜代替平面镜以提高光腔的稳定性的新方案^[2], 但只是给出了个别提高的结果。本文对带有共焦光学延迟系统 8 镜环形激光器进行了数值计算, 得到了腔长一定时, 不同大曲率镜对光腔稳定域及其腔内光束参数的连续改善情况; 同时在保证稳定域面积最大的条件下, 得到了最佳大曲率半径应等于腔长一半的结果。本文中, 光学延迟系统中的光线往返次数为零, 其结果可直接用于 6 镜环形腔。另外, 这种结构的光腔因采用了光学延迟器, 在腔长一定的条件下, 腔的空间结构可以安排得很紧凑。故有利于用铜蒸气激光器作泵浦源和对超短光脉冲进行同步均匀放大。

一、带有共焦光学延迟器的光学谐振腔

在图 1 所示的谐振腔结构中, R_1, R_2, R_3, R_4 分别是 M_1, M_2, M_3, M_4 四反射镜的曲率半径; L 是由 M_4 所组成的共焦光学延迟器的长度; l_1, l_2, l_3, l_4 为如图所示的镜间距离; δ_1, δ_2 为可调量。该腔型下的光学传输矩阵 T 为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & R_1 + \delta_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_2 + \delta_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

上式中, $M_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 是光学延迟器的光学传输矩阵, 且有^[3]

$$M_n = 1/\sin \alpha \cdot \begin{pmatrix} \sin n \alpha - \sin(n - \alpha) & L \sin \alpha \\ -\frac{2}{R_4} \sin n \alpha & \left(1 - \frac{2L}{R_4}\right) \sin n \alpha - \sin(n - 1) \alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

M_n 中的 α 由 $\cos \alpha = (1 - L/R_4)$ 确定。 n 是延迟器中的反射次数。

为了便于比较, 对以上给定的参数作以下四点假设: (1) $R_3 \rightarrow \infty$; (2) 延迟器为共焦延迟器; (3) $R_1 = R_2 = R$; (4) $l_1 + l_2 = 2K_2 R, l_3 + l_4 = 2K_1 R$, 且 $K_1 > K_2$ 。

根据 CPM 激光器所要求的四比一关系^[4], 采用与 [1] 相同的处理方法, 可得稳定域的两实半轴

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}(1 - K_1 - K_2)}{2(2K_1 - 1)(2K_2 - 1)} \quad \text{及} \quad a_2 = \frac{\sqrt{2}(K_1 - K_2)}{2(2K_1 - 1)(2K_2 - 1)}$$

所以,

$$\Delta a = a_2 - a_1 = \sqrt{2}/2 \cdot (2K_2 - 1) \quad (3)$$

当光学延迟器中的光线延迟为零时, 可得

$$a_2 - a_1 = 1/\sqrt{2} \cdot (6K_1 + 1) \quad (4)$$

共焦延迟器的采用, 一方面使稳定域随总腔长的增加而减小的趋势有所缓解, 同时利用其往返传输矩阵的负单位矩阵性质, 亦使问题分析大大简化。但是, 在腔长很长时, 并不能指望延迟器使光线无限地延迟, 因为不仅调整困难, 而且由于反射面的增多, 损耗过大。鉴此, 将输出平面镜换成大曲率球面反射镜。

欲获得稳定的锁模脉冲, 不仅要求谐振腔有较宽的稳定域, 而且对腔内光束参数亦有一定要求, 根据 G. H. O. New 曾定义的稳定参数 S ^[5], 这里选择 $R_1 = 10 \text{ cm}, R_2 = 5 \text{ cm}$, 以保证两小束腰处即有较小的光斑面积, 又有较大的 S 值。

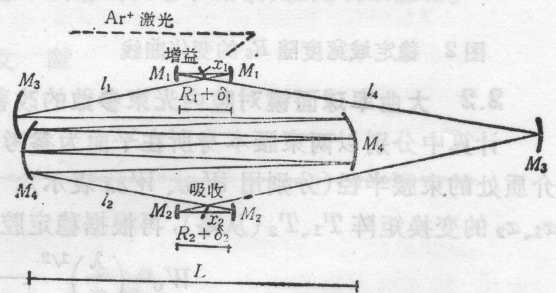


图 1 带有共焦光学延迟器的长腔 CPM 染料激光器

二、数值计算结果及分析

2.1 大曲率球面镜 R_3 对光腔稳定域的改善

图 2 是在 $R_1=10\text{ cm}$, $R_2=5\text{ cm}$, $R_4=1\text{ m}$, $L=1\text{ m}$, $n=6$, $l_1=l_2=75\text{ cm}$, $l_3=l_4=125\text{ cm}$ 时, 稳定域宽度随 R_3 的变化情况。从图 2 可以看出: 在 R_3 连续改变时, 稳定域的宽度经历了三个极值点, 而且存在最大值点: $R_3=2\text{ m}$ 。由此说明: 即便在长腔情况下, 在 R_3 选择合适时, 稳定域同样可以得到很大改善, 且有最佳改善值。

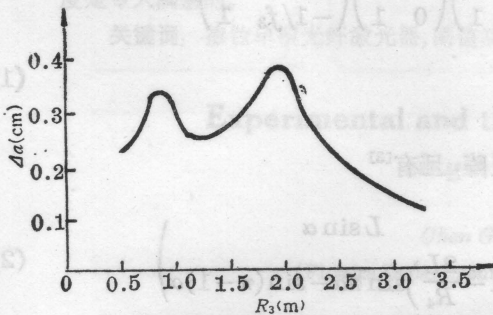


图 2 稳定域宽度随 R_3 的变化曲线

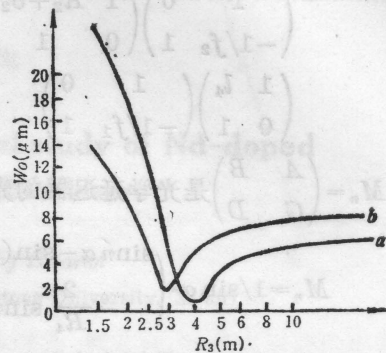


图 3 增益介质和吸收介质处的光斑半径 (W_{0G} 、 W_{0A} 分别由 a、b 曲线表示)

2.2 大曲率球面镜对腔内光束参数的改善

计算中分别以两束腰本身所在平面为参考平面(以 x_1 、 x_2 分别表示)计算增益介质和吸收介质处的束腰半径(分别用 W_{0G} 、 W_{0A} 表示)。根据光学传输矩阵理论分别写出对于参考平面 x_1 、 x_2 的变换矩阵 T_1 、 T_2 (从略), 再根据稳定腔的束腰半径计算公式:

$$W_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} \frac{|B|^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{1/4}}$$

就可以计算出 W_0 随 R_3 的变化情况。图 3 是谐振腔处于稳定域内中线位置时, 两小曲率镜间的最小束腰半径 W_{0G} 、 W_{0A} 随大曲率半径 R_3 的变化曲线, 其横坐标为 R_3 的对数坐标。具体参数同图 2。

由图 3 可知: 随 R_3 的变化, 两束腰变化都很剧烈, 而且两者都有极小值。当 $R_3 > 3.6\text{ m}$ 左右以后, 虽然 W_{0G} 、 W_{0A} 值都比较小, 但其比值始终比 1 小, 这对稳定锁模运转是很不利的。当 $R_3 < 3\text{ m}$ 时, W_{0G}/W_{0A} 始终大于 2, 且在 $R_3 < 2.4\text{ m}$ 逐渐趋于 2。这说明: 在 $R_3 < 3\text{ m}$ 后, 光腔总有较宽的锁模范围。在 $R_3 = 2\text{ m}$ 附近, 既有较宽的稳定域, 又有较宽的锁模范围。

三、环形谐振腔中最佳大曲率镜的选择

图 4 是 $l_5 = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ 随最佳大曲率半径 R_3 的关系曲线, 其它条件同图 2。从图上可以看出: 最佳大曲率半径同 l_5 成线性关系, 且直线斜率约为 0.5。这样大曲率半径只需根据谱

(下转第 105 页)

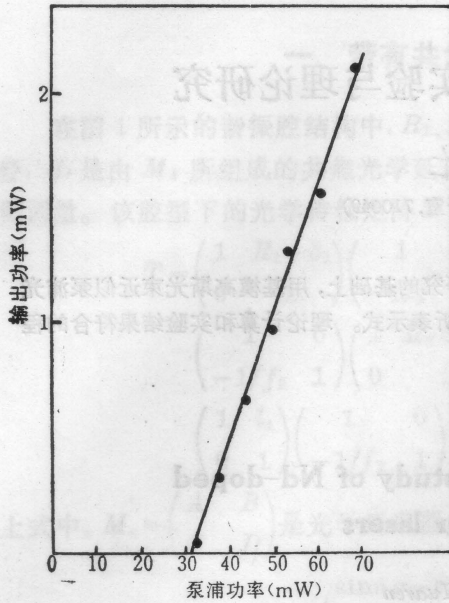


图 4

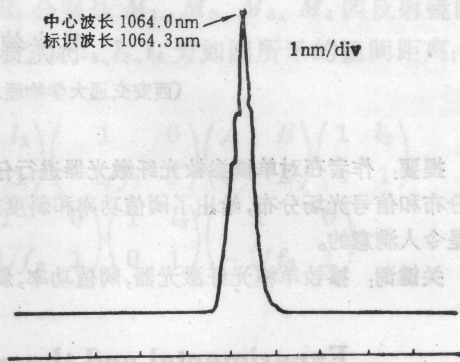


图 5. 单晶光纤 Nd:YAG 激光器的输出光谱

本工作得到夏学江教授、高玉波、陈抗美、吴念乐同志的关心和帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 J. L. Nightingale et al., *Opt. Lett.*, **11**(7), 437 (1986)
- 2 T. M. Bear, *Laser Focus/Electr. Opt.*, **22** (6), 82 (1986)

(上接第 112 页)

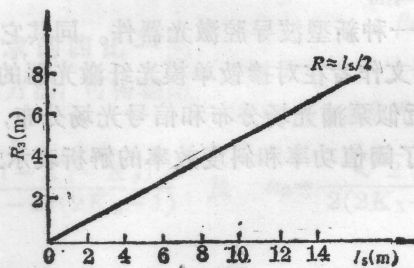


图 4 最佳大曲率镜同腔长的关系曲线

振腔的几个臂长就可定量选择。在仅从稳定域角度考虑的情况下,大曲率球面反射镜的半径只需取各臂之和的 1/2。如图 2 中 $l_5=4\text{m}$, $R_3=2\text{m}$, 它同该结论吻合得很好。这样就大大简化了环形谐振腔的设计。

参 考 文 献

- 1 邢岐荣 et al., *光学学报*, **4**(6), 558(1984)
- 2 赵新苗 et al., *中国激光*, **15**(5), 260(1988)
- 3 吕百达著, *激光光学*, 四川大学出版社, 1986, 53
- 4 R. L. Fork et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(5), 500(1983)
- 5 G. H. C. New, *IEEE J. Quant., Electr.*, **QE-10**(2), 910(1974)