

文章编号:1001-5078(2007)05-0432-03

固体激光折叠腔稳定特性研究

刘红斌¹, 王大平¹, 胡德金¹, 王裕民²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:利用谐振腔的失调量作为参数,对典型的折叠腔的稳定性进行了分析、推导,得出谐振腔的稳定判据。在不考虑像散的情况下,从基本的往返变换矩阵出发,推导得到直接以失调量 δ_1, δ_2 作为参数的三镜折叠腔的稳定判据,通过传统的 g^* 参数方法加以验证,并给出了计算实例。结果表明以失调量为参数得到的稳定区为两个,并不是通常认为的一个。该结果与传统的 g^* 参数等价法表示的稳定区是等价的,同时克服了传统的 g^* 参数判定方法物理意义不清晰的缺点,使折叠腔稳定性判别更直观。

关键词:折叠腔; 稳定性; 失调量

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Research on the Stability of a Solid Laser Fold Resonator

LIU Hong-bin¹, WAN Da-ping¹, HU De-jin¹, WANG Yu-min²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Stability conditions expressed by the misadjustments of the resonator of the typical fold resonator are derived and analyzed. Misadjustments δ_1, δ_2 of the resonator are used to give the stability criterion of the three-mirror folded cavity based on round-trip transformation matrixes without consideration of astigmatic compensation of the resonator and the deduced conditions are validated by traditional g^* parameter method, and examples are also given. The results show that there are two stable areas shown by the misadjustments, but not one area which was normally considered. The results are equivalent to the results gained through the g^* parameter method while they have clearer physical meanings and stability criterion of folded cavity becomes more directly.

Key words: fold resonator; stability; regulated quantity

1 引言

在固体激光器中,例如钛宝石透镜锁模或内腔倍频等,为满足长腔和小腰束的要求,常常需要使用折叠腔^[1-2]。谐振腔稳定问题,是折叠腔设计计算过程中必须考虑的一个问题。镜腔失调导致激光稳定性的变化直接影响了激光器的使用效果,特别是在振动环境中^[3]。目前,主要使用等价腔法,将折叠腔等效为多元件线性腔,通过矩阵光学的方法,计算光束的单程以及往返变换矩阵 $ABCD$ 值,利用矩阵公式 $|A + D| < 2$ 计算^[4]或者利用矩阵的特征值

和约定标准型理论进行推导^[5],也可使用 g^* 等价法分析谐振腔的稳定^[4,6]。前两种方法推导比较繁琐但却是后面方法的基础,而 g^* 参数法计算简单,是计算谐振腔稳定性的常用方法。但这种通过 g^* 因子表示的稳定性条件,缺乏明显的物理意义。本文在变换矩阵计算的基础上,以三镜折叠腔为对象,不

基金项目:上海市科委光科技专项基金资助(No. 05DZ22002)。

作者简介:刘红斌(1981-),男,上海交通大学2005级博士研究生,现从事高功率激光器及激光加工等方面的研究。E-mail: hunking2008@yahoo.com.cn, hongbingliu@sjtu.edu.cn

收稿日期:2006-10-30

考虑像散的情况下,直接以失调量 δ_1, δ_2 作为参数,推导获得以该参数表示的稳定性条件,计算了基模参数,结果表明该稳定区为两个,并不是通常地如文献[2]和[4]认为的一个。该方法表示的稳定性有了明确的物理意义,这对于设计激光器有重要的指导意义。

2 折叠腔稳定条件

设如图1所示的折叠腔的镜 M_1, R, M_2 的曲率半径分别为 R_1, f, R_2 , 臂长为 d_1, d_2 , 折叠腔可以等效为带有焦距为 f 的透镜的线性腔^[7]。

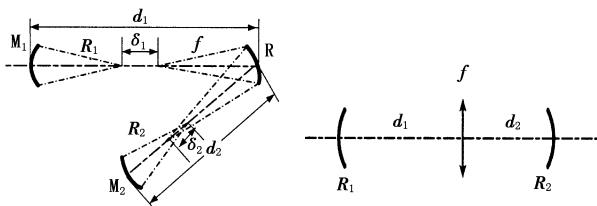


图1 折叠腔及其等效光路

以 M_1 为参考面,有:

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $a = (1 - d_2/f)$, $b = (d_1 + d_2) - d_1 d_2/f$,
 $c = -1/f$, $d = 1 - d_1/f$

$$A = (d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f}) (\frac{2d_1}{R_1 f} - \frac{1}{f} - \frac{2}{R_1}) + (1 - \frac{d_2}{f} - \frac{2(d_1 + d_2)}{R_1} + \frac{2d_1 d_2}{R_1 f}) (1 - \frac{d_1}{f} - \frac{2(d_1 + d_2)}{R_2} + \frac{2d_1 d_2}{R_2 f})$$

$$D = (d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f}) (\frac{2d_2}{R_2 f} - \frac{1}{f} - \frac{2}{R_2}) + (1 - \frac{d_2}{f} - \frac{2(d_1 + d_2)}{R_2} + \frac{2d_1 d_2}{R_2 f}) (1 - \frac{d_1}{f})$$

由谐振腔的稳定性条件 $|A + D| < 2$, 可得失调量 $\delta_1 = d_1 - f - R_1$, $\delta_2 = d_2 - f - R_2$, 表示的临界值 ($i, j = 1, 2, i \neq j$, 下同)

$$\Delta_{ia} = \frac{f^2}{(\delta_j + R_j)}, \Delta_{ib} = \frac{f^2}{\delta_j},$$

$$\Delta_{ic} = \frac{f^2}{(\delta_j + R_j)} - R_i, \Delta_{id} = \frac{f^2}{\delta_j} - R_i \quad (2)$$

令 $R_i' = R_i/f$, $R_j' = R_j/f$, $\delta_i' = \delta_i/f$, $\delta_j' = \delta_j/f$

对 $R_1, R_2, \delta_1, \delta_2$ 进行归一化处理, 于是

$$\delta_i'(\delta_j' + R_j') = 1, \delta_i(\delta_j + R_j) = 1$$

$$(\delta_i' + R_i')(\delta_j' + R_j') = 1, (\delta_i' + R_i')\delta_j' = 1$$

稳区分两个区域, 即:

$\Delta_{ia} < \delta_i < \Delta_{ib}$ 和 $\Delta_{ic} < \delta_i < \Delta_{id}$, 这两个子区域的大小为

$$\Delta = \Delta_{ib} - \Delta_{ia} = \Delta_{id} - \Delta_{ic} = f^2/\delta_j - f^2/(\delta_j + R_j)$$

根据式(2)可以得到四条临界曲线可以作以失调量 δ_1, δ_2 为变量的稳定图(如图2所示)。

由图2可见, 每个腔存在两个稳定区, δ_1, δ_2 互相配合可以得到四个稳定区, 图中所示的阴影部分就是谐振腔的稳定范围。实际上, g^* 参数等效方法和 δ 参数方法都是建立在光学往返变换矩阵上的, 二者在实质上是等价的。另外, 由于稳区表达式中的 $\delta_1, \delta_2, R_1, R_2$ 的对称性, 当腔1满足稳定性条件时, 腔2也满足稳定性条件, 反之, 腔2满足稳定性条件时, 腔1满足稳定性条件。这样, 我们就可以按照一个腔来设计这类Z形折叠腔了。这对于此类折叠腔的设计具有指导作用。对于大于三镜的多镜腔也可以使用类似的方法进行。

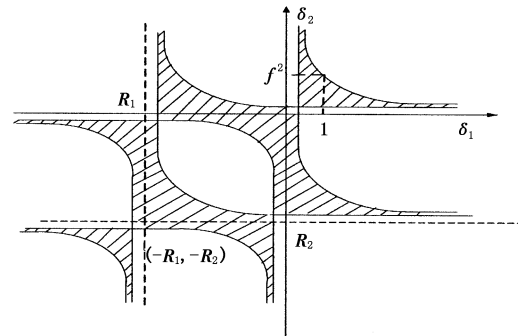


图2 稳定腔图

3 方法的等价性

上面的结果可以由 g^* 因子等价法得到。由于

$$g_i^* = g_i - \frac{d_j}{f} (1 - \frac{d_i}{R_i}), \text{ 其中 } g_i = 1 - \frac{d_i + d_j}{R_i}$$

根据谐振腔稳定性条件 $0 < g_i^* g_j^* < 1$ (3)

式(3)可以表示为:

$$g_i^* g_j^* = \frac{[\delta_i(\delta_j + R_j) - f^2][\delta_j(\delta_i + R_i) - f^2]}{R_i R_j f^2} > 0 \text{ 且}$$

$$1 - g_i^* g_j^* = \frac{(\delta_i \delta_j - f^2)[f^2 - (\delta_j + R_j)(\delta_i + R_i)]}{R_i R_j f^2} > 0$$

解之可以得到如式(2)所示的四条临界曲线。

同样, 也可由 g^* 因子表示的束腰宽度和位置公式推导得到由 δ_1, δ_2 表示的相应计算公式:

$$\omega_{0i}^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{(R_i + \delta_i - \Delta_{ia})(R_i + \delta_i - \Delta_{ib})(\delta_i - \Delta_{ib})(\Delta_{ia} - \delta_i)}{(R_i + 2\delta_i - \Delta_{ia} - \Delta_{ib})^2} \quad (4)$$

$$L_{0i} = \frac{(R_i + \delta_i - \Delta_{ia})(R_i + \delta_i - \Delta_{ib})}{(R_i + 2\delta_i - \Delta_{ia} - \Delta_{ib})}$$

为使光腔工作在稳定区中心, 可选择调整量^[6]

$\delta_i = (\Delta_{ia} + \Delta_{ib})/2$ 或者 $\delta_i = (\Delta_{ic} + \Delta_{id})/2$ (此时, 式

(4)要做相应变化)。

若 $R_i \gg \max(\Delta_{ia}, \Delta_{ib})$, 这样可得到:

$$L_{0i} = R_i - \frac{(\Delta_{ia} - \Delta_{ib})^2}{4R_i} \approx R_i$$

$$\omega_{0i}^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \left(1 - \frac{(\Delta_{ia} - \Delta_{ib})^2}{4R_i^2}\right) \frac{(\Delta_{ia} - \Delta_{ib})^2}{4} \approx \left(\frac{(\Delta_{ia} - \Delta_{ib})\lambda}{2\pi}\right)^2 \quad (5)$$

4 计算实例

例1:求 $d_1 = 1.7\text{m}$, $d_2 = 0.2\text{m}$, $f = 0.1\text{m}$, $R_1 = 15\text{m}$ 时,谐振腔的稳定条件。

由式(2)计算 δ_2 稳定区为 $(-0.0067, 0.0625)$, $(-0.9767, -0.9075)$, 进而得 $\omega_{02} = 0.108\text{mm}$, $L_{02} = 0.097\text{m}$ 。取 $\delta_2 = 0.0028\text{m}$, 可以得到 δ_1 有两个稳定区 $(1, 33)$, $(-149, -117)$, 计算可得 $\omega_{01} = 2.31\text{mm}$, $L_{01} = 0.16\text{m}$ 。

例2:求 $d_1 = 1.7\text{m}$, $d_2 = 0.3\text{m}$, $f = 0.15\text{m}$, $R_1 = +\infty$ 时,谐振腔的稳定条件。

根据式(2)和式(3),在 R_2 的稳定区 $(0.1354, 0.1498)$ 中取 $R_2 = 0.14$, 得到 δ_2 的稳定区为 $(0, 0.0145)$ 和 $(-0.140, -0.125)$, $\omega_{02} = 0.15\text{mm}$, $L_{02} = 0.14\text{m}$, 进而可以得到 δ_1 的稳定区为 $(0.15, 2.25)$ 和 $(0.15 - R_1, 2.25 - R_1)$, $\omega_{01} = 1.83\text{mm}$ 。

可以看到 δ_1 的前一个区域正是通常所认为的区域,这一区域只是谐振腔稳定区域的其中一部分,是不完全的,实际上,从上面计算可知,当 (δ_1, δ_2) 分别取其他稳定区组合(对应图2中的第三像限区

域)时,谐振腔仍然是稳定的。

5 结论

本文以三镜折叠腔为对象,完整地得到了直接以失调量 δ_1, δ_2 作为参数表示的谐振腔稳定性判据,并相应地计算了光腰半径和位置等基模参数,完善了稳定区的范围,同时能更加直观地了解失调对于谐振腔稳定性的影响。推导的方法对于多镜折叠腔的推广也有借鉴作用。所得结果表明该稳定区为两个,并不是通常认为的一个。该方法表示的稳定性有了明确的物理意义,这对于设计激光器有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 郑权,赵岭,檀慧明,等. LD 泵浦高效率折叠腔 YAG/LBO 蓝光激光器[J]. 激光与红外, 2001, 31(3): 145 - 147.
- [2] P K Datta, S Mukhopadhyay, A Agnesi. Stability regime study of a nonlinear mirror mode-locked laser[J]. Optics Communications, 2004, 230(4): 411 - 418.
- [3] 谈宜东,张书练,刘静华. 折叠腔 He - Ne 激光器中角锥棱镜直角误差分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 345 - 350.
- [4] 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1986.
- [5] 盛家铁, 有关光学谐振腔稳定条件的讨论[J]. 湘潭大学学报, 1985, 2(2): 94 - 102.
- [6] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [7] G Hetzinger, H Weber. Equivalent optical resonator[J]. Appl. Opt., 1984, 22(10): 1450 - 1456.

(上接第431页)

峰值功率为 2.7kW。实验中虽然绿光的输出功率较低,但是所得到的脉冲波形稳定、脉宽窄、峰值功率高、模式好。如果能对倍频晶体进行温控,有望进一步提高绿光的输出性能。

参考文献:

- [1] Yuang-fu Chen. High-power diode-pumped Q-switched intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with a sandwich-type resonator[J]. Opt. Lett., 1999, 24(15): 1032 - 1034.
- [2] Eric C Honea, Christopher A Ebbers, Raymond J Beach, et al. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100W of power at 0.532μm[J]. Opt. Lett., 1998, 23(15): 1203 - 1205.
- [3] He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli, et al. 8.8W green

laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese J. Laser, 2000, 27(6): 481 - 484. (in Chinese)

- [4] Hou Xueyuan, Li Yufei, Sun Yuming, et al. LD pumped Nd:GdVO₄/KTP intracavity-frequency-doubling Lasers[J]. Acta photonica sinica, 2004, 33(1): 11 - 13. (in Chinese)
- [5] Feng Yan, Bi Yong, Zhang hongbo, et al. 20W diode dumped external frequency-doubled Nd:YAG green laser[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(4): 469 - 471. (in Chinese)
- [6] Li Jian, Lu Xingqiang, Hou Wei, et al. High-power diode-pumped high repetitive acousto-optic Q-switched intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄/KTP green laser[J]. Chinese J. Lasers, 2000, 27(12): 1063 - 1066. (in Chinese)