

带非谐振环激光谐振腔的特性

盛国平 林礼煌

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文中分析了带非谐振环激光谐振腔的光学对称性、稳定性和光束腰位置,可以据此选择谐振腔参数。

关键词: 激光谐振腔; 非谐振环; 对撞脉冲锁模。

一、引 言

由 Siegman 提出的用于实现对撞脉冲锁模的带非谐振环激光谐振腔^[1], 已被利用在固体和染料激光器的对撞脉冲锁模中^[2~4]。本文从理论上分析了这种激光谐振腔的光学对称性、稳定性和光束腰的位置, 为合理选择带非谐振环激光谐振腔的参数提供了具体的准则。

二、光学对称性

带非谐振环激光谐振腔的光学对称性, 指非谐振环中各光学元件相对于分束板 BS 的光学对称性。一般化的带非谐振环激光谐振腔结构如图 1 所示, 非谐振环由分束板 BS 、全反射镜 M_1 和 M_2 组成, 代替驻波腔中的一个端镜。激光工作物质置于 M_2 与 BS 之间, 可饱和吸收体置于 M_1 与 M_2 之间。工作物质发出的光波入射到分束板 BS 上, 被分成强度相等的两束光波, 以相反方向绕环行进, 然后再在 BS 上叠加。入射波原则上能 100% 地反射回工作物质^[5], 但由于分束板 BS 的分光能力难于严格地达到 0.5/0.5, 非谐振环不合适的设计和调整所引起光学不对称, 使返回到 BS 的两束光波, 其强度, 波面曲率和波面大小不再相同, 在损耗端(图 1 中虚线箭头所指端)产生非完全相消相干作用, 引起腔内损耗增大, 扰乱腔内光束的横模结构^[6], 从而影响激光的锁模效果。

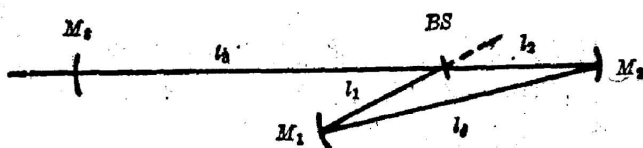


Fig. 1 Structure of the laser cavity with an antiresonant ring

M_1 , M_2 and M_3 are spherical mirrors, whose curvature radii are R_1 , R_2 and R_3 , respectively; BS is a 50% beam splitter. Distances between optical elements are shown in the diagram

在讨论非谐振环的光学对称性时, 假设 BS 的分束能力为 0.5/0.5, 且厚度为零, 将 BS

绕垂直于纸面的轴旋转 $\frac{\pi}{2}$ 。以 BS 为光线的初始出发位置, 以顺时针方向绕环传播, 回到 BS , 传播矩阵为

$$t = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 f_1 、 f_2 和 f_3 分别为 M_1 、 M_2 和 M_3 的焦距, 如果光束在 M_1 和 M_2 上的入射角较小, 则有: $f_1 \approx R_1/2$, $f_2 \approx R_2/2$, $f_3 \approx R_3/2$ 。完成(1)式的矩阵乘法, 得

$$a = 1 - \frac{l_1 + l_4}{f_2} - \frac{l_1}{f_1} + \frac{l_1 l_4}{f_1 f_2}, \quad (2a)$$

$$b = l_1 + l_3 + l_4 - \frac{l_1(l_2 + l_4)}{f_1} - \frac{l_2(l_1 + l_4)}{f_2} + \frac{l_1 l_2 l_4}{f_1 f_2}, \quad (2b)$$

$$c = \frac{-1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{l_4}{f_1 f_2}, \quad (2c)$$

$$d = 1 - l_2/f_2 - \frac{l_2 + l_4}{f_1} + \frac{l_2 l_4}{f_1 f_2}. \quad (2d)$$

令 $g = \frac{1}{2}(a+d)$, $\Delta = d - g$, 由式(2a)和(2d), 得

$$g = 1 - \frac{l_1 + l_3 + l_4}{2f_1} - \frac{l_1 + l_3 + l_4}{2f_2} + \frac{l_4(l_1 + l_2)}{2f_1 f_2}, \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{l_1 - l_2 - l_4}{2f_1} + \frac{l_1 - l_2 + l_4}{2f_2} + \frac{l_4(l_2 - l_1)}{2f_1 f_2}. \quad (4)$$

这时矩阵 t 可写成

$$t = \begin{pmatrix} g - \Delta & b \\ c & g + \Delta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

将(1)式中的符号脚标 1 与脚标 2 对调, 得逆时针方向绕环传播矩阵 t'

$$t' = \begin{pmatrix} g + \Delta & b \\ c & g - \Delta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

量 Δ 为光束以相反方向绕环传播的光学不对称量度*, Δ 值越大, 在损耗端引起的损耗越大。当非谐振环中各光学元件相对于 BS 对称时, Δ 值为零, 损耗端无损耗^[6]。令(4)式等于零, 得光学对称条件为

$$\frac{l_1 - l_2 - l_4}{f_1} + \frac{l_1 - l_2 + l_4}{f_2} + \frac{l_4(l_2 - l_1)}{f_1 f_2} = 0. \quad (7)$$

很显然, 方程(7)有三个简单解:

$$f_1 = f_2 = \infty, \quad (8a)$$

$$f_1 = f_2, \quad l_4 = f_1 + f_2, \quad (8b)$$

$$f_1 = f_2, \quad l_1 = l_2. \quad (8c)$$

* Siegman 在[6]中, 认为(4)式中的 Δ 为光学不对称量度, 这只有当 M_3 为平面镜时才正确; 当 M_3 为球面镜时, 应按(2)式或本文中(5)式计算 Δ 。

如果 $f_1 \neq f_2$, $l_1 \neq l_2$, 令 $\delta \equiv l_1 - l_2$, $\alpha \equiv f_1 - f_2$, 代入式(7), 得

$$f_1 + f_2 = (1 - \alpha/\delta)l_4, \quad (9)$$

l_4 为正数, 所以要求 $\alpha/\delta < 1$ 。

在设计非谐振环时, 为了保证光学对称性, 各光学元件的参数及它们之间的距离必须满足(8a)~(8c)式或(9)式。

三、激光谐振腔稳定性

对撞脉冲锁模时, 在可饱和吸收体中对撞的脉冲是由两个以相反方向传播的模提供的, 为了保证正反向模在可饱和吸收体中的光斑相同, 要求谐振腔为稳定腔^[7]。在图1中, 选 M_3 为光线的起始出发位置, 向 BS 行进, 以顺时针方向绕环传播, 再回到 M_3 , 传播矩阵 T 为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}. \quad (10)$$

其中 a, b, d, c 的表达式为(2a)~(2d)。完成(10)式的矩阵乘法, 得

$$A = 1 - \frac{l_2 + l_3 + l_4}{f_1} - \frac{l_2 + l_3}{f_2} + \frac{l_4(l_2 + l_3)}{f_1 f_2}, \quad (11a)$$

$$B = l_1 + l_3 + 2l_3 + l_4 - \frac{(l_1 + l_3)(l_2 + l_3 + l_4)}{f_1} - \frac{(l_2 + l_3)(l_1 + l_3 + l_4)}{f_2} \\ + \frac{l_4(l_1 + l_3)(l_2 + l_3)}{f_1 f_2}, \quad (11b)$$

$$C = \frac{-1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} + \frac{l_4}{f_1 f_2} + \frac{l_2 + l_3}{f_2 f_3} + \frac{l_2 + l_3 + l_4}{f_1 f_3} - \frac{l_4(l_2 + l_3)}{f_1 f_2 f_3}, \quad (11c)$$

$$D = 1 - \frac{l_1 + l_3}{f_1} - \frac{l_1 + l_3 + l_4}{f_2} - \frac{l_1 + l_3 + 2l_3 + l_4}{f_3} + \frac{l_4(l_1 + l_3)}{f_1 f_2} \\ + \frac{(l_2 + l_3)(l_1 + l_3 + l_4)}{f_2 f_3} + \frac{(l_1 + l_3)(l_2 + l_3 + l_4)}{f_1 f_3} - \frac{l_4(l_1 + l_3)(l_2 + l_3)}{f_1 f_2 f_3}. \quad (11d)$$

下面对几种常用的带非谐振环激光谐振腔的稳定性进行分析。

1. $f_1 = f_2 = \infty$, 这时由式(11a)~(11d), 得

$$A = 1, \quad B = 2L, \quad C = \frac{-1}{f_3}, \quad D = 1 - \frac{2L}{f_3}, \quad (12)$$

其中 $L = \frac{1}{2}(l_1 + l_2 + 2l_3 + l_4)$ 为等效腔长。由稳定性判据 $|A + D| < 2$, 得到稳定性条件

$$2f_3 > L \quad \text{或} \quad R_3 > L, \quad (13)$$

与普通平凹腔的稳定性条件相同。

2. $f_3 = \infty$, 这时由式(11a)~(11d), 得

$$A = 1 - \frac{l_2 + l_3 + l_4}{f_1} - \frac{l_2 + l_3}{f_2} + \frac{l_4(l_2 + l_3)}{f_1 f_2}, \quad (14a)$$

$$B = 2L - \frac{(l_1 + l_3)(l_2 + l_3 + l_4)}{f_1} - \frac{(l_2 + l_3)(l_1 + l_3 + l_4)}{f_2} + \frac{l_4(l_1 + l_3)(l_2 + l_3)}{f_1 f_2}, \quad (14b)$$

$$C = -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{l_4}{f_1 f_2}, \quad (14c)$$

$$D = 1 - \frac{l_1 + l_3}{f_1} - \frac{l_1 + l_3 + l_4}{f_2} + \frac{l_4(l_1 + l_3)}{f_1 f_2}. \quad (14d)$$

由 $|A+D| < 2$, 得

$$\left| 1 - \frac{L}{f_1} - \frac{L}{f_2} + \frac{l_4(2L - l_4)}{2f_1 f_2} \right| < 1. \quad (15)$$

解不等式(15), 得

$$f_1 + f_2 < \frac{L}{2}, \quad f_1 > 0, \quad f_2 > 0, \quad (16)$$

$$L + \sqrt{L^2 - 2L(f_1 + f_2)} < l_4 < L + \sqrt{(L - 2f_1)(L - 2f_2)}, \quad (17)$$

或

$$L - \sqrt{(L - 2f_1)(L - 2f_2)} < l_4 < L - \sqrt{L^2 - 2L(f_1 + f_2)}. \quad (18)$$

因为 $l_4 < L$, 所以舍去不合理的(17), 得稳定性条件

$$\begin{cases} f_1 + f_2 < \frac{L}{2}, \quad f_1 > 0, \quad f_2 > 0, \\ L - \sqrt{(L - 2f_1)(L - 2f_2)} < l_4 < L - \sqrt{L^2 - 2L(f_1 + f_2)}. \end{cases} \quad (19)$$

$$L - \sqrt{(L - 2f_1)(L - 2f_2)} < l_4 < L - \sqrt{L^2 - 2L(f_1 + f_2)}. \quad (20)$$

当 $f_1 = f_2 = f$ 时, 稳定性条件为

$$\begin{cases} 0 < f < L/4, \\ 2f < l_4 < L - \sqrt{L^2 - 4Lf}. \end{cases} \quad (21)$$

$$2f < l_4 < L - \sqrt{L^2 - 4Lf}. \quad (22)$$

很显然, 光学对称性条件之一(8b)与稳定性条件(20)相矛盾, 因此, 在设计带非谐振环激光谐振腔时, 必须同时考虑光学对称性条件和稳定性条件。

对于 $f_1 = f_2 = f$, 按(21)、(22)式作稳定图。图2为 f 取 20 cm 时, l_4 与等效腔长 L 的允许取值范围(阴影部分); 图3为 L 取 150 cm 时, l_4 与 f 的允许取值范围。

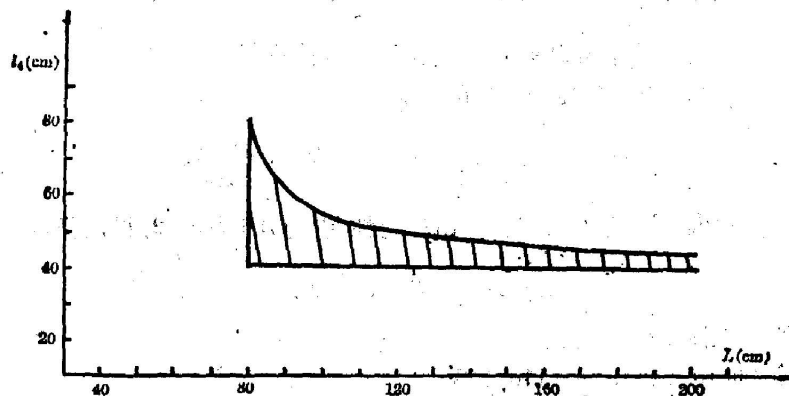


Fig. 2 $f_1 = f_2 = 20$ cm, permissible range of the value of l_4 and L meeting the stability conditions (21) and (22)

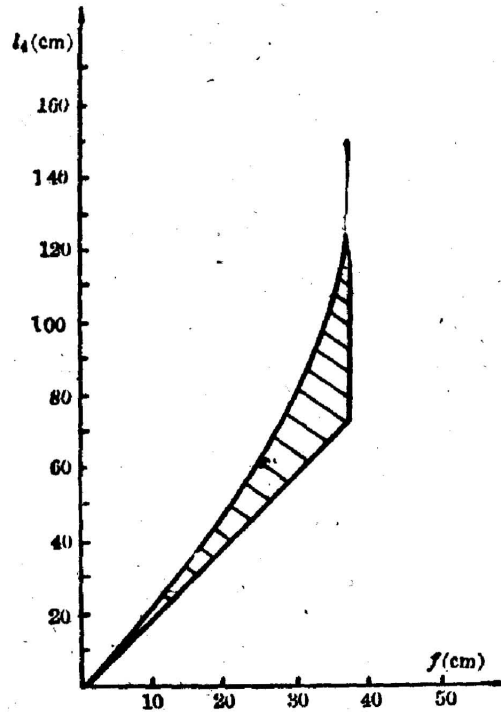


Fig. 3 $L=150$ cm, permissible range of the value of l_4 and f meeting the stability conditions (21) and (22)

3. $l_4 = f_1 + f_2$, 这时非谐振环等价于一个望远镜系统。如果 $f_1 = f_2$, $l_1 = l_2$, 则有

$$A = -1, B = 4f_1 - 2L, C = \frac{1}{f_2}, D = -1 + \frac{2(L - 2f_1)}{f_2}. \quad (23)$$

由 $|A+D| < 2$, 得稳定性条件

$$\begin{cases} R_1 < L, \\ R_1 + R_2 > L. \end{cases} \quad (24)$$

四、光束腰的位置和大小

知道了腔内光束腰的位置和大小, 对于改变激光束通过激光工作物质的截面与通过可饱和吸收体的截面之间的比值具有指导作用。选 M_2 处为参考平面, 光束腰与参考平面之间的距离和光束腰的尺寸分别为^[8]

$$X = \frac{D-A}{2C}, \quad (25)$$

$$\omega^2 = \frac{2}{k} \cdot \frac{2B}{\sqrt{4-(A+D)}}, \quad (26)$$

其中 k 为波矢。

1. $f_1 = f_2 = \infty$, 将 (12) 式代入 (25)、(26) 式, 得

$$X = L, \quad (27)$$

$$\omega^2 = \frac{4\sqrt{2}L}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+L/f_3}} \quad (28)$$

光束腰位于 M_1 与 M_2 之间等光程位置。

2. $f_3 = \infty$, M_3 与 M_1 (或 M_2)、 M_1 与 M_2 之间各有一个光束腰。由式(14a)~(14d)可求出 M_3 与 M_1 (或 M_2) 之间的光束腰与 M_3 之间的距离为

$$X = \frac{l_1 - l_2}{2} + \frac{l_4(f_1 - f_2)}{2(f_1 + f_2 - l_4)} \quad (29)$$

如果 $l_1 = l_2$, $f_1 = f_2$, 则 $X = 0$, 即光束腰位于 M_3 上; 如果 $l_4 = f_1 + f_2$, 则 $X = \infty$, 即 M_3 与 M_1 (或 M_2) 之间没有光束腰。

M_1 与 M_2 之间的光束腰位置, 由另一传播矩阵 T' 求得, T' 为以 M_2 为光线起始位置, 向 M_1 行进, 在腔内传播一周的传播矩阵

$$T' = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix},$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A' &= 1 - \frac{l_1 + l_2 + 2l_3}{f_1}, \\ B' &= 2L - \frac{l_4(l_1 + l_2 + 2l_3)}{f_1}, \\ C' &= -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{l_1 + l_2 + 2l_3}{f_1 f_2}, \\ D' &= 1 - \frac{2L}{f_2} - \frac{l_4}{f_1} + \frac{l_4(l_1 + l_2 + 2l_3)}{f_1 f_2}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

由(25)式求得 M_1 与 M_2 之间的光束腰与 M_2 之间的距离为

$$X' = \frac{D' - A'}{2C'} = \frac{l_4}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{f_2 - f_1}{1 - \frac{f_1 + f_2}{l_1 + l_2 + 2l_3}} \quad (31)$$

如果 $f_1 = f_2$, 则 $X' = \frac{l_4}{2}$, 即光束腰位于 M_1 与 M_2 之间的中点。因为 $A + D = A' + D'$, 所以位于 X 的光束腰尺寸与位于 X' 的光束腰尺寸之比为

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2} = \frac{B}{B'} \quad (32)$$

3. $f_1 = f_2$, $f_3 \neq \infty$, $l_1 = l_2$, $l_4 = f_1 + f_2$, 这时 M_3 与 M_1 (或 M_2) 之间的光束腰与 M_3 的距离为

$$X = L - R_1 \quad (33)$$

如果 $l_3 > l_4$, 光束腰位于 M_3 与 BS 之间; 如果 $l_3 < l_4$, BS 与 M_1 之间、 BS 与 M_2 之间各有一光束腰。 M_1 与 M_2 之间的光束腰, 从 2 中的分析可知位于 M_1 与 M_2 之间的中点。

本工作得到郑锡铭研究员的指导, 并与方洪烈同志进行了有益的讨论, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] A. E. Siegman; *Opt. Lett.*, 1986, 6, No. 7 (Jul), 334.
 [2] H. Vanherzeele *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, 20, No. 20 (Oct), 3484.

- [3] J. M. Buchert *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1984, 55, No. 3 (Feb), 683.
[4] H. Vanherzeele *et al.*; *Opt. Lett.*, 1984, 9, No. 12 (Dec), 549.
[5] A. E. Siegman; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, 9, No. 2 (Feb), 247.
[6] S. C. Sheng, A. E. Siegman; *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66, No. 10 (Oct), 1032.
[7] 方洪烈;《光学学报》, 1984, 4, No. 5 (May), 385

Characteristics of a laser cavity with an antiresonant ring

SHENG GUOPING AND LIN LIHUANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 14 April 1986; revised 12 August 1986)

Abstract

The optical symmetry, stability and position of light beam waists of a laser cavity with an antiresonant ring are analysed in this paper. The results obtained are available for selecting parameters of the cavity.

Key Words: Laser cavity; Antiresonant ring; Colliding pulse modelocking.