

消象散四镜驻波腔和环型腔的设计

梁晓燕 王军民 李瑞宁

(山西大学电子信息技术系, 太原 030006)

摘要 我们通过传输矩阵, 分析并设计了消象散四镜驻波腔和四镜环型腔, 讨论了腔中各参数对稳定性和腔内传输光束束腰的影响。

关键词 象散补偿, 子午面, 弧矢面, 稳区

中图分类号 TN 24

0 引言

对激光器腔型的最基本要求, 是尽可能降低内腔损耗, 使光束在腔中的往返损耗小于它的非饱和增益, 才有可能实现激光运转。在兰宝石激光器中, 由于晶体荧光波段和吸收波段都很宽, 不可能在晶体表面镀制如此宽波段增透膜, 为减少表面反射损耗, 我们采用的晶体两端面切成布儒斯特角, C 轴垂直于晶体中的通光方向, 以使 P 偏振泵浦光和振荡光几乎无损耗地透射, 同时自动抑制 R 偏振。但随之带来的问题就是象散, 若采用两镜驻波腔, 由传输矩阵求得, 光束子午面和弧矢面的稳区基本互不重叠, 若不进行补偿, 谐振腔只能工作在非稳状态, 所以象散补偿成为我们设计腔型时必须考虑的重要问题。

腔内振荡光束的补偿原则就是利用凹面腔镜的象散, 合理设计腔型, 使得光束在整个腔中往返一次后, 子午面和弧矢面的光程差趋于零, 从而尽可能地扩大谐振腔的稳区范围。最简单的象散补偿腔常为三镜折迭腔, 但与四镜腔相比, 虽然象散的补偿效果好, 但其稳区是四镜腔的一半, 且对腔长、介质位置要求都比较苛刻。所以, 我们通过计算设计了四镜驻波腔与四镜环行腔两种腔型。

1 四镜折迭驻波腔

采用传输矩阵法, 讨论腔内各参数对稳区的影响, 可以选择最佳腔型, 对如图四镜折迭腔, 以 M_4 为参考面, 其传输矩阵为:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d-t+l_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1\ddot{o}f_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d - t + l_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1\ddot{o}f_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$i = t$ 时上式为子午面传输矩阵, $i = s$ 时为弧矢面传输矩阵, f_t, f_s, l_t, l_s, t 分别由(1)、(2)、(3)式得出⁽¹⁾, d 为两腔镜 M_1, M_2 间的长度, R 为 M_1, M_2 的曲率半径(本文中 $R = 102\text{mm}$), l_1, l_2 分别是两臂长, 取值相等, H 为腔内传输光束与凹面腔镜光轴的夹角。

$$f_t = (R \cos H \ddot{o}2 \quad f_s = R \ddot{o}2 \cos H \quad (1)$$

与晶体表面成布儒斯特角入射的光束, 在晶体中子午面与弧矢面的实际光程分别为:

$$l_t = hn^2 + l\ddot{o}n^4 = l\ddot{o}n^3 \quad l_s = hn^2 + l\ddot{o}n^2 = l\ddot{o}n \quad (2)$$

h 为晶体厚度, l 为晶体通光长度, n 为晶体折射率(本文中 $n = 1.76, l = 20\text{mm}$), 有:

$$h = n l \ddot{o} (n^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \quad t = 2h (n^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由稳定性判据 $BA + DB < 2$, 可分别对 M_t, M_s 求出在 R 给定的条件下 d 的取值范围, 解出 H 但由于方程复杂, 求不出 d 的解析表达式, 所以, 只能取 H 的最佳近似解。由三镜驻波腔的补偿角公式近似推广到四镜环型腔的解 H 为^[2]:

$$R \sin H \cos H = h (n^2 - 1) (n^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \ddot{o} n^4 \quad (4)$$

由下图得知, 对四镜驻波腔而言, 只有 d 取在大于 R 的一定范围内, 腔才是稳定的。将(4)式用于四镜驻波腔中, 如图 2, $H \neq H$ 时, 约以 $(A + D) \ddot{o} 2 - 1$ 为分界点, 弧矢面与子午面的稳区在曲线的前半段基本完全重合, 只在后半段才逐渐分开, 因此 d 常取在稳区内的较小值, 即 R 附近, 而 H 仍不失为一最佳近似值。如图 3, d 取值较小时, L ($L = l_1 = l_2$) 的取值范围很宽, 随 d 增大, L 的取值范围缩小, 与图 2 对比, L 对腔稳定性的影响远小于 d 。

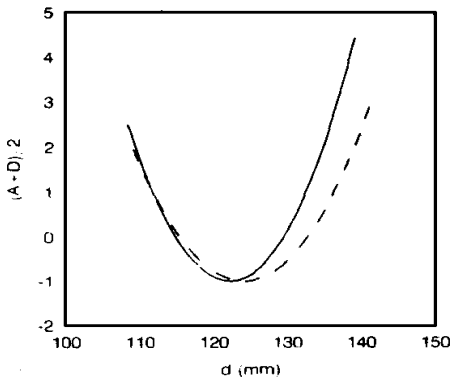


图 2 $H = 15.6^\circ, L = 300\text{mm}$, 弧矢面与子午面的稳区随 d 的变化特性, “o” 为弧矢面稳区, “—” 为子午面稳区。

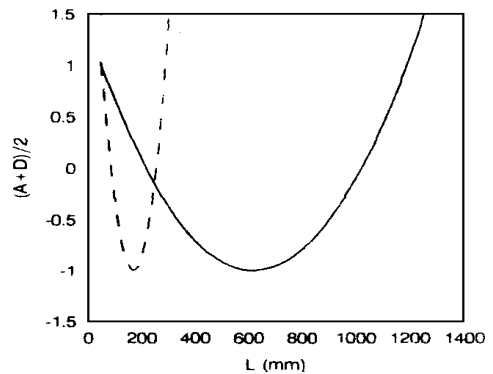


图 3 d 取值不同, 子午面稳区随 L 的变化特性 “o” 为 $d = 132\text{mm}$, “—” 为 $d = 116\text{mm}$

综合上述计算结果, 在驻波腔中, d 取值偏小时, L 的调节范围较大, 且稳区曲线基本重合, 致使 W_{os} 与 W_{ot} 近似相等, 所以, 选取适当的腔参数 (H, d, L), 即可保证驻波腔工作在稳区中心, 同时, 象散又得到最佳补偿。我们采用 $H = 15.6^\circ, d = 116\text{mm}, L = 350\text{mm}$ 的腔型, 得

到较好的输出。

2 四镜环型腔

单向运转的环型腔激光器消除了空间烧孔效应,相干泵浦形成的增益孔径有效地抑制高级横模,易于实现稳频输出。下面分别从环型腔稳区和光束特性讨论各腔参数的影响,以选择最佳环形腔型。

(1) 稳区:

同驻波腔类似,以输出耦合镜 M_4 为参考面,其传输矩阵如下,其中 f 、 d 、 l_1 、 l_2 、 t 、 l_r 、 l_s 与驻波腔中的定义一致, l_3 是 M_3 、 M_4 间的臂长。

a. 不考虑象散的空腔:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & l_2 + l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

由 $RA + DB = 2$ 得: $R = d$ $L = L_1 + L_2 + L_3$ (5)

$$d = R + D \text{ 时: } R = L \quad R + R^2/D$$
 (6)

若仅从稳区来考虑, d 与 L 的取值范围在 d 大于 R 的前提下,互相制约, L 取值很大时, d 只能取在 R 附近,而 L 接近 R 时,(5)式为: $R = d$, d 有很宽的取值范围。但一个谐振腔参数的选定必须在稳区内同时考虑光束特性。

b. 考虑象散时的有源腔,补偿角 H 由下式决定:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & l_2 + l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d - t + l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$d - t$ 是 M_1 、 M_2 之间不包含晶体的空间距离,对子午面和弧矢面一致。

由图5,子午面与弧矢面的稳区随 d 的变化曲线都近似为直线,当不进行补偿时,它们在稳区几乎没有重叠部分,激光器根本不可能运转。由图6, $H = H$ 时,两曲线约在 $d = 112\text{mm}$ 处相交,但此时为临界腔,所以, d 应取在大于 112mm 的一段范围内。

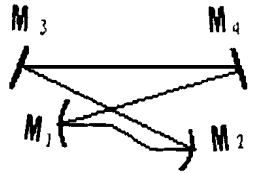


图4

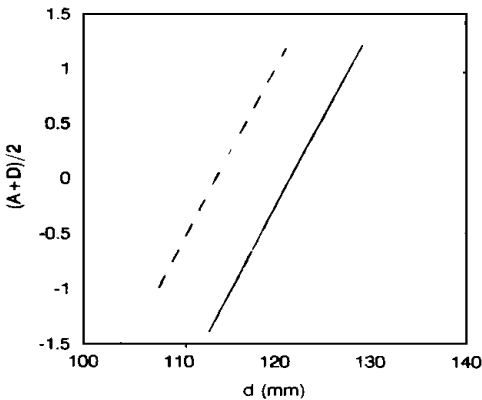


图5 $H = 0, L = 1\text{mm}$,子午面与弧矢面的稳区随 d 的变化曲线,“o”为弧矢面,“—”为子午面。

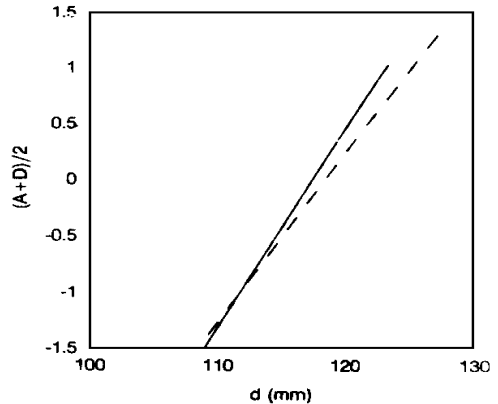


图6 $H = H, L = 1\text{m}$,子午面与弧矢面的稳区随 d 的变化曲线,“o”为弧矢面,“—”为子午面。

(2) 腰斑:

象散补偿得较好时,子午面腰斑半径 W_{or} 与弧矢面腰斑半径 W_{os} 基本相等,近似有 $W_{or} \approx W_{os} \approx W_o$, W_o 随 d, L 的变化特性就反映了补偿腔中腰斑的变化特性。下面我们就讨论空腔中传输光束的变化特性。

对四镜环型腔而言,腔中共存在两腰斑: W_{o1}, W_{o2} ,分别位于 M_1, M_2 之间和 M_3, M_4 之间。晶体位于 M_1, M_2 中间,当其中心与 W_{o1} 及泵浦光束腰 W_p 近似重合,并且泵浦光与激光模体积基本重叠时,激光器的转换效率最高。因而我们只关心 W_{o1} 。

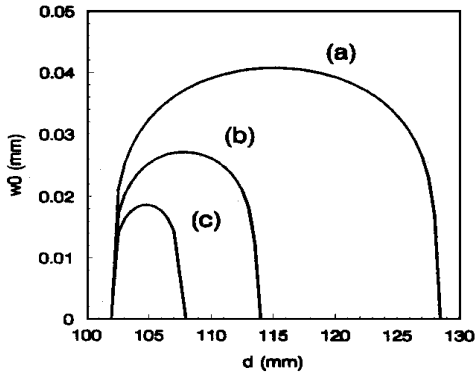


图7 空腔中, L 取不同值时, W_o 随 d 变化曲线
 a, b, c 分别为 $L = 500\text{mm}, 1\text{m}, 2\text{m}$ 时的值。

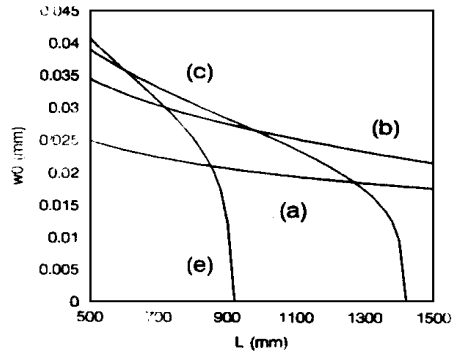


图8 空腔中, d 取不同值时, W_o 随 L 的变化曲线
 a, b, c, e 分别为 $d = 103, 106, 110, 115\text{mm}$ 的值

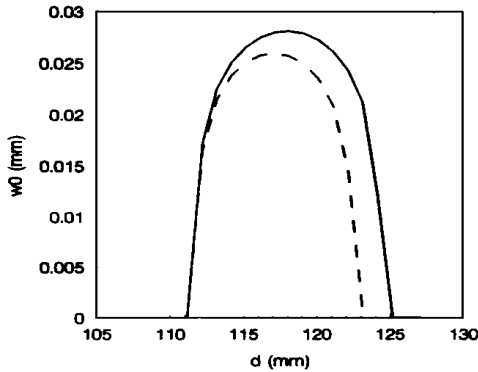


图9 H=15.64°, $L = 1\text{m}$ 时, W_{os} 与 W_{or} 随 d 的变化曲线,“o”为 W_{os} ,“-”为 W_{or} 。

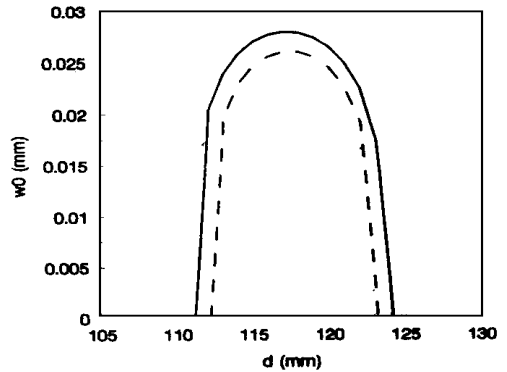


图10 H=14.6°, $L = 1\text{m}$ 时, W_{os} 与 W_{or} 随 d 的变化曲线,“o”为 W_{os} ,“-”为 W_{or} 。

由图7得知, d 取在稳区的边沿时, W_o 随 d 的变化非常快,在稳区中心时,则相对平缓,随 L 取值增大,稳区中 d 的取值范围逐渐缩小,腰斑 W_o 也随之减小。

由图8得知, d 在稳区内的取值越小, W_o 越小,随 L 的变化越缓慢, L 的取值范围也越宽,随着 d 增大, W_o 随 L 的变化逐渐加快, L 的取值范围逐渐缩小。

由图9、10得知,H=15.64°(由(9)式解得)时, W_{os} 与 W_{or} 在 $d = R$ 附近重叠,随 d 增大,逐渐分开。H=14.6°时, W_{os} 与 W_{or} 相差约 $2L\text{m}$,但同步变化。

综合上述分析, d 在稳区中取较小值为好, L 的取值范围较宽,但 L 太大和太小都影响到 W_o 与 W_p (泵浦光焦斑半径)的匹配,从而降低转换效率,又带来调整困难的问题,所以 L 常取在 1m 附近,有利于系统调整。

参 考 文 献

- 1 Kogelnik H W. A stigmatically Compensated Cavities fo CW Dye Lasers *IEEE, J. Q. E* 8, No. 3 March 1972, E- 8(3): 373~ 379
- 2 张国轩, 刘玉璞等. Ar⁺ 泵浦连续波染料激光器谐振腔的设计与分析. *中国激光*, 1985, 12: 366~ 369

Design of Four- Mirror Standing Wave Resonator and Ring Resonator for Eliminating Astigmatism

Liang Xiaoyan Wang Junmin Li Ruining

(Department of Electronic & Information Technology, Shanxi University, Taiyuan, 030006)

Abstract

By method of propagation matrix, the design and analysis of four- mirror standing wave cavity and ring cavity for eliminating astigmatism are described. The effects of the cavity parameter on cavity stability and intra- cavity beam waist are emphasized.

Key words eliminating astigmatism, tangential plane, sagittal plane, stability range

Classification Code of Chinese Literatures TN 24