

正

⑦ 内含介质的正交柱面—柱面镜象散腔

25—28, 32

季小玲

(重庆师范学院物理系, 重庆 630047)

A

摘要: 本文用矩阵光学的方法研究了内含介质的正交柱面—柱面镜象散腔。给出了显示象散作用的腔稳定图和稳定腔模参数公式, 并作了数值计算。本文还研究了其光束传播特性, 并讨论了其象散补偿问题。

关键词: 变换矩阵, 柱面镜, 象散补偿

激光杂志

TN241

Astigmatic cavities bounded by crossed cylindrical mirrors with a piece of medium

Ji Xiaoling

(Dept. of Physics, Chongqing Normal Institute, Chongqing 630047)

Abstract: The astigmatic cavities bounded by crossed cylindrical mirrors with a piece of medium is studied by using matrix optics method. The stability diagram is given. The beam parameter formulas of the stable resonator and numerical calculations are given. The propagation characteristics and the astigmatic compensation of the beam are discussed.

Key words: transfer matrix, cylindrical mirrors, astigmatic compensation.

1 引言

众所周知, 非轴对称腔或非轴对称几何形状激光介质可产生象散椭圆高斯光束。由于象散作用不仅影响输出激光束质量, 而且使腔稳定工作区大大缩小^[1]。虽然象散椭圆高斯光束在子午和弧矢面的变换情况不会相同, 但对于光参数在子午和弧矢面无耦合的简单象散可分别在这两个面内使用矩阵光学的 ABCD 定律进行研究。文献[4]用衍射积分理论对正交柱面—柱面镜象散腔内光束模参数和传播特性进行了研究。本文将用简明而又规范的矩阵光学方法研究实际应用相当广泛的内含介质的正交柱面—柱面镜象散腔, 并进一步讨论其腔稳定工作区域和象散补偿问题。

2 稳定图

如图 1 所示, M_1 、 M_2 分别为两正交的柱面

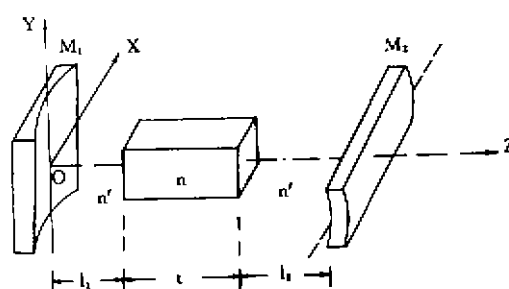


图 1

1996 年 3 月 7 日收稿

镜 ($\rho_{1x} = \rho_1, \rho_{1y} = \infty, \rho_{2x} = \infty, \rho_{2y} = \rho_2$), 其内有一块折射率为 n 的与腔共轴放置的长方体介质, 周围介质折射率为 n' 。显然此腔内光束参数在 YOZ 面(子午面)和 XOZ 面(弧矢面)无耦合。

子午和弧矢面的 M_1 与 M_2 间的变换矩阵为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n}{n'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n'}{n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & l_1 + l_2 + \frac{n'}{n}t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

由文献[2]并利用(1)式可知子午和弧矢面的 G 参数分别为

$$G_{1y} = a - \frac{b_y}{\rho_{1y}} = 1 \quad (2)$$

$$G_{2y} = d - \frac{b_y}{\rho_{2y}} = 1 - \frac{l}{\rho_2} \quad (3)$$

$$G_{1x} = a - \frac{b_x}{\rho_{1x}} = 1 - \frac{l}{\rho_1} \quad (4)$$

$$G_{2x} = d - \frac{b_x}{\rho_{2x}} = 1 \quad (5)$$

$$\text{其中 } l = l_1 + l_2 + \frac{n'}{n}t \quad (6)$$

因此, $0 \leq G_{1x}G_{2x} \leq 1$ 转化为

$$\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \leq G_{1y}G_{2y} \leq 1 \quad (7)$$

腔的稳定区为 $0 \leq G_{1y}G_{2y} \leq 1$ 与 $0 \leq G_{1x}G_{2x} \leq 1$ 的交叉区, 即 $0 \leq G_{1y}G_{2y} \leq 1$ 与 $\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \leq G_{1y}G_{2y} \leq 1$ 的公共区域。见图 2。显而易见, 由于象散使得腔稳定区域大大缩小了。

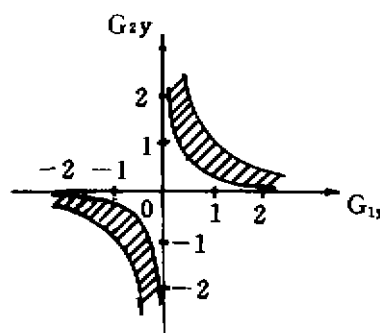


图 2

3 模参数公式及数值计算

3.1 模参数公式

子午面内, 以 M_1 和 M_2 镜为参考的光束往返一周的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} A_y & B_y \\ C_y & D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_y & b_y \\ c_y & a_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{2y}} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{1y}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{2}{\rho_2}l & 2l(1 - \frac{l}{\rho_2}) \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 - \frac{2}{\rho_2}l \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{1x}} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} d_x & b_x \\ c_x & a_x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{2x}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{4l}{\rho_2} & 2l \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

弧矢面内, 以 M_1 和 M_2 镜为参考的光束往返矩阵为

$$\begin{bmatrix} A_x & B_x \\ C_x & D_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x & b_x \\ c_x & a_x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{2x}} & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{1x}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{4l}{\rho_1} & 2l \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} A'_x & B'_x \\ C'_x & D'_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{1x}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x & b_x \\ c_x & a_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{2x}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2l}{\rho_1} & 2l(1 - \frac{l}{\rho_1}) \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 - \frac{2l}{\rho_1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(8)~(11)式的第二等式利用了(1)、(6)两式。

根据 ABCD 定律和高斯光束自再现条件⁽³⁾, 并利用(1)~(6)式和(8)~(11)式, 可得出子午和弧矢面的模参数。

镜面处等相面曲率半径为

$$R_{1y} = \frac{2B_y}{D_y - A_y} = \infty \quad (12)$$

$$R_{2y} = \frac{2B'_y}{D'_y - A'_y} = \rho_2 \quad (13)$$

$$R_{1x} = \frac{2B_x}{D_x - A_x} = \rho_1 \quad (14)$$

$$R_{2x} = \frac{2B'_x}{D'_x - A'_x} = \infty \quad (15)$$

镜面处基模光斑半径为

$$W_{1y}^2 = \frac{\lambda b_y}{\pi} \left[\frac{G_{2y}}{G_{1y}(1 - G_{1y}G_{2y})} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_2 - l}{l} \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$W_{2y}^2 = \frac{\lambda b_y}{\pi} \left[\frac{G_{1y}}{G_{2y}(1 - G_{1y}G_{2y})} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_2}{l(\rho_2 - l)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$W_{1x}^2 = \frac{\lambda b_x}{\pi} \left[\frac{G_{2x}}{G_{1x}(1 - G_{1x}G_{2x})} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_1}{l(\rho_1 - l)} \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$W_{2x}^2 = \frac{\lambda b_x}{\pi} \left[\frac{G_{1x}}{G_{2x}(1 - G_{1x}G_{2x})} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_1 - l}{l} \right]^{1/2} \quad (19)$$

经推证表明, 腔中子午和弧矢面各有一个光腰, 它们的大小和位置分别为

$$W_{oy} = \frac{\lambda b_y}{\pi} \left[\frac{G_{1y}G_{2y}(1 - G_{1y}G_{2y})}{G_{1y} + a_y^2G_{2y} - 2a_yG_{1y}G_{2y}} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_2 - l}{l} \right]^{1/2} = W_{1y} \quad (20)$$

若以 M_1 为参考, 则

$$L_{oy} = \frac{b_yG_{2y}(a_y - G_{1y})}{G_{1y} + a_y^2G_{2y} - 2a_yG_{1y}G_{2y}} = 0 \quad (21)$$

(20)、(21)两式表明, 子午光腰在 M_1 镜处, 且此处波阵面为柱面。

$$W_{ox}^2 = \frac{\lambda b_x}{\pi} \left[\frac{G_{1x}G_{2x}(1 - G_{1x}G_{2x})}{G_{1x} + a_x^2G_{2x} - 2a_xG_{1x}G_{2x}} \right]^{1/2} = \frac{\lambda l}{\pi} \left[\frac{\rho_1 - l}{l} \right]^{1/2} = W_{2x} \quad (22)$$

若以 M_2 参考, 则

$$L_{ox} = \frac{b_xG_{1x}(d_x - G_{2x})}{G_{2x} + d_x^2G_{1x} - 2d_xG_{1x}G_{2x}} = 0 \quad (23)$$

(22)、(23)两式表明, 弧矢光腰在 M_2 镜处, 且此处等相面为柱面。

远场发散角

$$\theta_{oi} = \lambda / \pi W_{oi} \quad (i = x, y) \quad (24)$$

3.2 数值计算

作为计算例, 取图 1 中各参数为 $\rho_1 = 0.8\text{m}$, $\rho_2 = 0.7\text{m}$, $l_1 = 0.2\text{m}$, $l_2 = 0.4\text{m}$, $t = 0.03\text{m}$, $n' = 1$, $n = 1.6$, 波长 $\lambda = 595.0\text{nm}$ 。对腔内光束模参数作数值计算, 所得结果见表 1。

表 1 子午面和弧矢面上的光束参数

	子午面	弧矢面
G_1G_2	0.11607	0.22656
镜 M_1 处光斑半径 $W_1(\text{mm})$	0.2061	0.5292
镜 M_2 处光斑半径 $W_2(\text{mm})$	0.6050	0.2519
镜 M_1 处光束等相面曲率半径 $R_1(\text{m})$	∞	0.8
镜 M_2 处光束等相面曲率半径 $R_2(\text{m})$	0.7	∞
光腰半径 $W_o(\text{m})$	0.2061	0.2519
光腰位置	$L_{oy} = 0$	$L_{ox} = 0$

4 光束传播特性

取 M_1 镜处为 $Z = 0$ 。由于子午光腰在 M_1 镜处, 弧矢光腰在 M_2 镜处, 故

$$W_y(Z) = W_{oy} [1 + (Z/Z_{oy})^2]^{1/2} \quad (25)$$

$$W_x(Z) = W_{ox} [1 + (Z - l_1 - l_2 - \frac{n'}{n} t)^2 / Z_{ox}^2]^{1/2} \quad (26)$$

$$R_y(Z) = Z + (Z_{oy}/Z)^2 \quad (27)$$

$$R_x(Z) = (Z - l_1 - l_2 - \frac{n'}{n} t) + \frac{Z_{ox}^2}{(Z - l_1 - l_2 - \frac{n'}{n} t)^2} \quad (28)$$

其中 $Z_{oi} = \frac{\pi W_{oi}^2}{\lambda}$ ($i=x, y$) 为瑞利尺寸。

4.1 光斑成为圆形的位置

一般情况下,象散光束在子午和弧矢面内的模参数不同,合成后为一椭圆高斯光束。但在一些特殊的平面上,光斑仍可能成为圆形,它们必须满足 $W_y(Z) = W_x(Z)$ 。为了方便起见,仍令 $l = l_1 + l_2 + \frac{n'}{n} t$, 于是有

$$W_{oy} [1 + (Z/Z_{oy})^2]^{1/2} = W_{ox} [1 + \frac{(Z-l)^2}{Z_{ox}^2}]^{1/2}$$

当 $W_{oy} \neq W_{ox}$ 时,得到

$$Z_{\pm} = \frac{W_{oy}^2}{W_{oy}^2 - W_{ox}^2} \pm \frac{W_{oy} W_{ox} \left[l^2 + \frac{\pi^2 (W_{oy}^2 - W_{ox}^2)^2}{\lambda^2} \right]^{1/2}}{W_{oy}^2 - W_{ox}^2} \quad (29)$$

4.2 光斑强度最大的位置

$$\frac{dW_y(Z)W_x(Z)}{dZ} = 0$$

为了方便起见,令 $W_{oy} = W_{ox} = w_0$, $Z_{oy} = Z_{ox} = Z_0$, 则得到光斑强度最大值的位置为

$$Z_{\pm} = \frac{l}{2} \pm \left(\frac{l^2}{4} - Z_0^2 \right)^{1/2} \quad (30)$$

4.3 等相面为球面的位置

由于象散,一般情况下,光束等相面不再为球面,只有在满足 $R_y(Z) = R_x(Z)$ 的特殊位置处为球面等相面。即

$$Z + \left(\frac{Z_{oy}}{Z} \right)^2 = (Z - l) + \frac{Z_{ox}^2}{(Z - l)^2}$$

$$\text{则 } Z_{\pm} = \frac{Z_{ox}^2 - Z_{oy}^2 + l^2}{2l}$$

$$\pm \frac{[(Z_{ox}^2 - Z_{oy}^2)^2 + 2l^2(Z_{oy}^2 + Z_{ox}^2 + \frac{1}{2}l^2)]^{1/2}}{2l} \quad (31)$$

5 象散补偿

对 M_1, M_2 镜沿子午面光束反射矩阵为

$$M_{1y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{2y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

对 M_1, M_2 镜沿弧矢面传播光束反射矩阵为

$$M_{1x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{bmatrix}, M_{2x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

为了减少损耗,以布氏角放置补偿板,在子午和弧矢面上补偿板的变换矩阵为^[2]

$$M_y = \begin{bmatrix} 1 & t' \sqrt{n'^2 + 1/n'^4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & t' \sqrt{n'^2 + 1/n'^2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

其中 n' 和 t' 分别为补偿板的折射率和板的厚度。

在子午面和弧矢面上有

$$l_1 + l_2 + \frac{n'}{n} t' + \frac{t' \sqrt{n'^2 + 1/n'^4}}{n'^4} = \frac{\rho_2}{2} + \Delta_y \quad (36)$$

$$l_1 + l_2 + \frac{n'}{n} t' + \frac{t' \sqrt{n'^2 + 1/n'^2}}{n'^2} = \frac{\rho_1}{2} + \Delta_x \quad (37)$$

其中 Δ_y, Δ_x 分别为子午面和弧矢面上的调整量。

实现象散补偿条件为子午面和弧矢面上的调整量相等

$$\Delta_y = \Delta_x \quad (38)$$

由(36)~(38)式得到

$$t' = \frac{n'^3(\rho_1 - \rho_2)}{2\sqrt{n'^2 + 1}(n'^2 - 1)} \quad (39)$$

按(39)式选择适当板厚 t' , 可以实现象散补偿。

仍取 $\rho_1 = 0.8\text{m}$, $\rho_2 = 0.7\text{m}$, 对典型介质 (n') 作数值计算, 所得结果见表 2。

表 2 $t'(n')$ 数值计算例

n'	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
$t(\text{m})$	0.1262	0.1163	0.1123	0.1113	0.1120

(下转 32 页)

主要问题之一。因此,有效解决和控制有害气体的生成,是提高激光工作寿命的必要手段。图9说明不同物质的蒸气压与温度的关系⁽²⁾⁽³⁾。

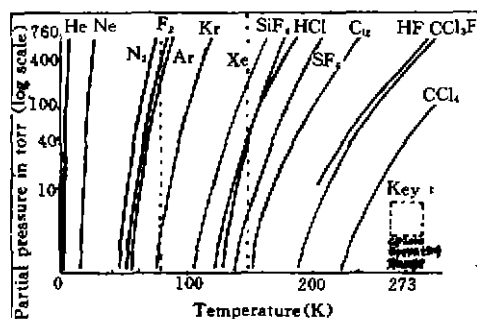


图9 不同物质的蒸气压与温度的关系⁽²⁾⁽³⁾

从图9可见,当气体处理器工作在80K—150K之间时,主要的杂质气体可以冷冻下来,因此,我们把气体循环系统中的冷阱放入液氮(77K)中,当气体通过此冷阱,杂质气体被冻下来,而工作气体(F₂, Ar, Ne和He)通过,提高了工作气体的纯度,延长了器件的气体寿命,经过这种办法处理,一次充气寿命可以提高一个量级以上。

4 讨论

ArF准分子激光器在国内过去制作比较困难,无论是在器件结构、选用材料,还是在制造工艺上都有不少难题。经过三年多的努力,我们研制的ArF准分子激光器,获得ArF激光单脉冲能量200mJ;脉宽30ns;重复频率1—20Hz可调;激光输出能量稳定性为±5.5%;一次充气,激光工作寿命达10⁵次。此器件已具有实际使用的价值。另外,更换气体,器件可在多种准分子,N₂分子和CO₂波段运转。

此器件已可用于PRK手术研究。当然,如能进一步改进器件如用MgF₂晶体作输出腔;改进器件内部材料防腐性能,就可能提高激光的输出能量,延长激光的寿命,无疑对于PRK手术来说都是需要的,这将有待于我们做进一步的努力。

参考文献

- [1] 袁才来等,“应用激光”,1984 4:57
- [2] M. C. Gower et al. IEEE Journal of Quantum Electronics, 10(2), PP231—235
- [3] A. J. Kearsley et al. OSA Topical meeting on Excimer Lasers, “Winter’83”, Lake Tahoe, Na. AIP conference proceedings No. 100

(上接28页)

参考文献

- [1] 季小玲, 内含柱面透镜的象散腔, 激光杂志, 1995 16(6):244
- [2] 卢亚雄, 吕百达, 矩阵光学, 大连:大连理工大学出版社, 1989 170—180 220—228 242—270
- [3] 吕百达, 激光光学, 第二版, 成都:四川大学出版社, 1992 120—126 234—253 284—295 325—330
- [4] R. Simon, Laser cavities bounded by crossed cylindrical mirrors, J. Opt. Soc. Am, 1987 4 (10), 1953
- [5] Baida Lü et al. A simple method for estimating the number of effectively oscillating modes and weighting factors of mixed-mode laser beams behaving like gaussian Schell-model beams. Opt. Commun, 1993 101(1,2):49
- [6] Baida Lü et al. Complex ray representation of the astigmatic Gaussian beam propagation Opt. Quantum Electron, 1993 25:275
- [7] Baida Lü et al. Matrix representation of three-dimensional astigmatic resonators. Opt. Quantum Electron, 1992 24:619
- [8] Davidc. Hanna, Astigmatic Gaussian beams produced by axially Asymmetric Laser cavities. IEEE J. Quantum Electron, 1969 5(10):463