

文章编号 :1001-5078(2004)03-0182-04

矩形谐振腔的失调分析

郭俊平,李育德,刘静伦

(四川大学光电科学技术系,四川 成都 610064)

摘 要:文章给出矩形镜谐振腔失调后的光轴确定方法,对矩管 He-Ne 激光器、矩管 CO₂ 激光器和矩管 CO 激光器因失调引起的衍射损耗进行了分析和近似计算。计算结果表明:矩形谐振腔的衍射损耗由矩形短边的失调程序来决定;凹面镜的曲率半径的选择也对腔的衍射损耗有影响。

关键词:失调;谐振腔;矩形镜;衍射损耗

中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

Analyses of Misalignment of a Rectangle Mirror Resonator

GUO Jun-ping, LI Yu-de, LIU Jing-lun

(Department of Opto-Electronic Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Misalignment of a rectangle mirror resonator is discussed. Determination of axis and approximation of diffraction loss of the misalignment resonator are given for three lasers: the He-Ne laser, the CO₂ laser and the CO laser. It is argued by the computation that the diffraction loss of the rectangle mirror resonator is decided by the misalignment degree of the rectangle short-side. The choice of the spherical mirror's radius of curvature also affects the diffraction loss of the rectangle resonator.

Key words: misalignment; resonator; Rectangle mirror; diffraction loss

1 引言

提高单位长度激光器的激光功率历来是激光器发展的努力方向。自气体激光器问世以来,已出现了多种放电结构,如直管式,折叠式,波导式等等。其目的也就是提高单位长度的激光功率。我国凌一鸣等发明的矩形放电截面的气体激光器结构也是一种提高输出功率的方法^[1]。它是通过增加横向尺寸的方法来提高输出功率和控制矩形放电管截面宽度以获得较高的增益系数。放电管 1m 的矩管 He-Ne 激光器的输出功率在 80mW 左右,比普通圆截面放电的 He-Ne 激光器大 50% 左右^[2]。但采用矩形放电管存在两个难题:一是放电管能否正常放电,二是由于矩形放电管的特殊结构,很容易导致谐振腔的失

调从而引起较大的衍射损耗。在理论和实验中都已证实在矩管 He-Ne、CO₂ 和 CO 激光器中激光介质的放电是成功的^[3-5],而其它气体在矩形管中放电原则上也是可行的。而对结合 He-Ne、CO₂ 和 CO 三种激光器矩形谐振腔的失调分析,目前还未见有类似的报道。本文对矩管激光器谐振腔的失调特性作具体分析,从而希望有助于改进激光器的结构,减少谐振腔的损耗,提高输出功率。

2 腔镜失调分析

考虑如图 1 所示的失调矩形镜平凹腔,其中凹

作者简介:郭俊平(1978-),男,硕士研究生,现主要从事激光技术与激光器件方面的研究。

收稿日期:2004-03-01;修订日期:2004-03-08

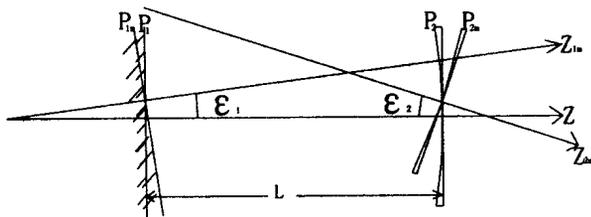


图 1 矩形镜平凹腔的示意图

面镜的曲率半径为 R , 利用增广的 4×4 阶射线变换矩阵得凹面镜 (P2) 和平面镜 (P1) 的失调矩阵^[6], 又设在 XOY 坐标系 (O 点位于矩形区中心点) 中, 设 P1 绕 Y 轴倾斜 ϵ_1 角, 由此引起 P1 处的失调线位移和角位移为 X_{11} 、 θ_{11} , 引起 P2 处的失调线位移和角位移为 X_{21} 、 θ_{21} 。同样 P2 绕 Y 倾斜 ϵ_2 角引起 P2 和 P1 处的失调线位移和角位移为 X_{22} 、 θ_{22} 、 X_{12} 、 θ_{12} 。设 P1 失调, 失调角为 ϵ_1 (绕 Y 轴), 则以 P1 为参考, 往返一周后有

$$\begin{pmatrix} X_{11} \\ \theta_{11} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2\epsilon_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{11} \\ \theta_{11} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

以 P2 为参考, 往返一周后

$$\begin{pmatrix} X_{21} \\ \theta_{21} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{21} \\ \theta_{21} \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

求得: $X_{11} = -\frac{R(R-L)\epsilon_1}{1+R-L}$, $\theta_{11} = -\frac{R\epsilon_1}{L(1+R-L)}$;
 $X_{21} = -2R\theta_{11}$, $\theta_{21} = \theta_{11}$ (3)

若 P2 失调, 失调角为 ϵ_2 (绕 X 轴), 同理可得:

$$X_{22} = R\epsilon_2, \theta_{22} = 0, X_{12} = (L-R)\epsilon_2, \theta_{12} = -\epsilon_2 \quad (4)$$

根据上述对腔镜失调的分析, 平面镜和凹面镜不同

的倾斜角度引起的失调线位移的计算值列于表 1。

表 1 不同倾斜角度引起的失调线位移的计算值

单位: mm

R = 3000, L = 1000, $\epsilon_2 = 0$					R = 3000, L = 1000, $\epsilon_1 = 0$				
ϵ_1	0	(24)	(36)	(48)	ϵ_2	0	(24)	(36)	(48)
X_{11}	0	0.2327	0.3490	0.4654	X_{22}	0	0.3490	0.5235	0.6980
X_{21}	0	0.6980	1.0470	1.3962	X_{12}	0	0.2327	0.3490	0.4654

3 腔镜失调引起的衍射损耗分析

当通过矩形的通光孔时, m, n 阶厄米-高斯光束的衍射损耗 L_{mn} 可表示为^[6]:

$$L_{mn} = \frac{\int_0^{(a-u)} H_m^2(u) e^{-u^2} du \int_0^{(b-v)} H_n^2(v) e^{-v^2} dv}{\int_0^a H_m^2(u) H_n^2(v) e^{-(u^2+v^2)} dudv} \quad (5)$$

式中 a 为高斯光束光斑半径, $H_m(u)$ 和 $H_n(v)$ 分别为 m 阶和 n 阶厄米多项式, 其中 $\mu = 2^{1/2}x/\lambda$, $v = 2^{1/2}y/\lambda$, $2a, 2b$ 分别为矩形的长边和短边边长 (如图 2 所示), 其中 $\lambda = [2L(R-L)/R^2]^{1/4} [1 + Z^2/L(R-L)]^{1/2}$ (λ 为激光器的波长, L 为腔长, R 为腔镜的曲率半径); 在平面镜端面, $z_0 = (L/R)^{1/2} [(R-L)/L]^{1/4}$; 在凹面镜端面, $z_1 = (L/R)^{1/2} [R^2/L(R-L)]^{1/4}$ 。

定义矩形谐振腔的平均单程衍射损耗为平面镜端和凹面镜端衍射损耗和的平均值。实际中, 由于贴片、热等客观原因都会使镜片偏离校准位置, 则放电管的有效面积将缩小, 从而引起谐振腔的损耗。由于本文涉及的倾斜角度都很小, 可近似认为腔镜失调引起的偏离量等于放电管横截面边长的缩小量。比如腔镜失调在放电管长边、短边引起的失调量分别为 $\Delta a, \Delta b$, 则我们近似的认为放电管横截面长边的有效长度为 $a' = a - \Delta a$, 短边的有效长度为 $b' = b - \Delta b$ (如图 2 所示)。

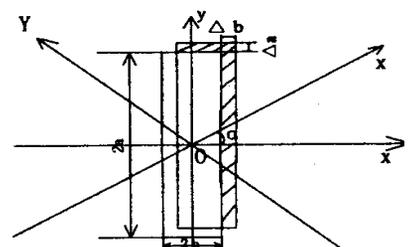


图 2 矩形放电管横截面示意图

3.1 矩管氦氖激光器的失调衍射损耗分析

实验表明矩管 He-Ne 激光器中 a/b 的最佳比例

约为 $4l$ 至 $6l^{[2]}$, 计算中采用矩管 He-Ne 激光器凹面镜的曲率半径 R 为 $3m$, 腔长 L 为 $1m$, 放电管横截面长边长 $2a$ 为 $20mm$, 放电管横截面短边长 $2b$ 为 $4mm$ 。

当腔镜失调、夹角 ϵ 等于 0 和 90° 时, 一些模式的平均单程衍射损耗随倾斜角 ϵ 变化的计算结果示于表 2。

表 2 腔镜失调引起谐振腔的平均单程衍射损耗的计算值

失调角度 衍射损耗	1			2			1			2		
	200	270	300	500	540	600	12	24	36	12	24	36
$L_{TEM_{01}}$ (%)	0	0	0.01	0	0	0.15	0	0.12	1.93	0	0	0
$L_{TEM_{02}}$ (%)	0	0	0.73	0	0	0.73	0	0.76	9.12	0	0.07	0.16
$L_{TEM_{03}}$ (%)	0	0	3.12	0	0	2.94	0.02	3.67	21.36	0	0.26	0.63
$L_{TEM_{04}}$ (%)	0	0	8.45	0	0	8.35	0.36	9.87	28.57	0.17	0.34	1.73
$L_{TEM_{05}}$ (%)	0	0	13.05	0	0	15.36	0.98	16.87	32.15	0.46	1.02	5.93
	$= 0$						$= 90^\circ$					

从表 2 可得出以下结论: (1) 当腔镜失调引起谐振腔失调时, 矩形腔内的平均单程衍射损耗随腔镜倾斜角 ϵ 的增大而增大; 同等倾斜角度高斯光束的平均单程衍射损耗高阶比低阶要大。(2) 矩形腔的平均单程衍射损耗由短边失调所决定; 其他参数相同的情况下, 平面镜失调所引起的平均单程衍射损耗比凹面镜失调所引起的大。根据矩形腔的特殊结构, 从经验可得出在平面镜或球面镜的失调角度相同的情况下, 夹角 ϵ 等于 0 时的平均单程衍射损耗最小; 夹角 ϵ 等于 90° 时的损耗最大。这与表 2 中的计算结果是相符的。

3.2 矩管 CO₂ 激光器的失调衍射损耗分析

计算中设定矩管 CO₂ 激光器放电管横截面的长边为 $32mm$, 短边 $2b$ 为 $8mm$, 其他结构参数与上节中的数据相同。从上一节分析得知, 矩形谐振腔的失调损耗由矩形放电管的短边损耗所决定。因此在矩形 CO₂ 激光器中, 只对短边失调情况进行具体分析。对一些模式的平均单程衍射损耗随倾斜角 ϵ 变化的计算结果示于图 3 和图 4 中。两图说明了在矩管 CO₂ 激光器的平均单程衍射损耗主要是因平面镜失调导致的短边失调而引起的。其另一个特点是 TEM₀₃ 模及以上的模式平均单程衍射损耗呈直线上升的趋势, 腔镜失调引起的损耗特别大; 在平均单程衍射损耗小于 5% 时, 平面镜和凹面镜失调引起的 TEM₀₂ 模的平均单程衍射损耗基本是一致的。因

此在矩管 CO₂ 激光器中低阶模式才有可能振荡。

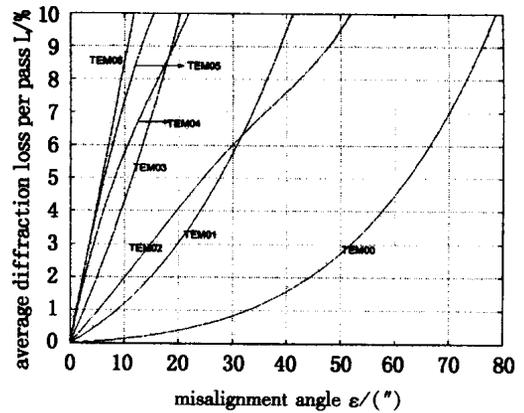


图 3 平面镜失调平均单程衍射损耗 L 随失调角度 ϵ 的变化曲线

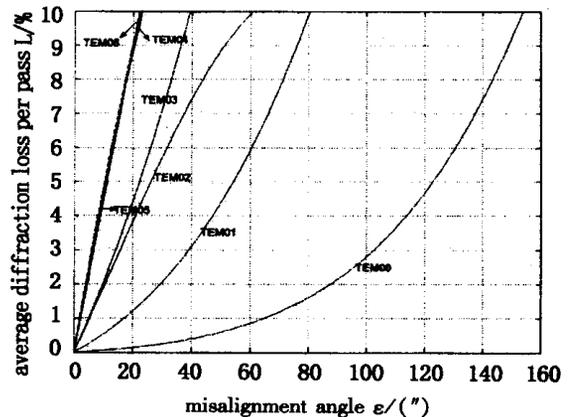


图 4 凹面镜失调平均单程衍射损耗 L 随失调角度 ϵ 的变化曲线

3.3 矩管 CO 激光器的失调衍射损耗分析

计算中设定矩管 CO 激光器放电管横截面的长边为 $30mm$, 短边 $2b$ 为 $6mm$, 其他结构参数与上节中矩管 CO₂ 激光器的数据相同。本节也只对矩管 CO

激光器短边失调腔镜失调的情况进行具体分析。对图 5 和图 6 进行分析得出与矩管 CO₂ 激光器的失调类似的结果。

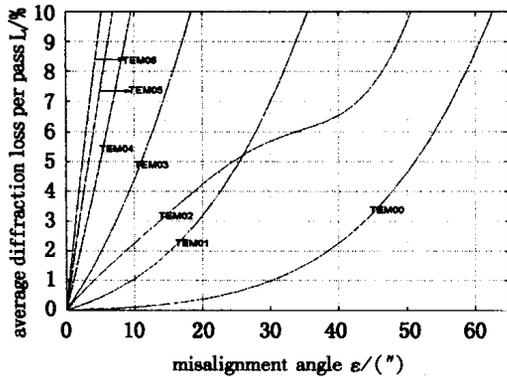


图 5 平面镜失调平均单程衍射损耗 L 随失调角度的变化曲线

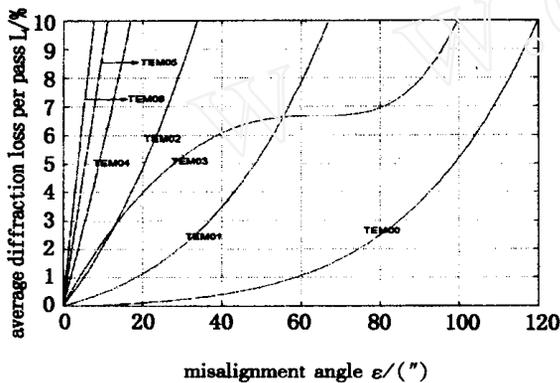


图 6 凹面镜失调平均单程衍射损耗 L 随失调角度的变化曲线

3.4 凹面镜曲率半径对矩管激光器失调的影响

在对上述三种矩管激光器的失调衍射损耗进行大量的数值计算分析中发现,凹面镜的曲率半径对矩管激光器失调引起的衍射损耗的影响很大。我们以矩管 He-Ne 激光器为例进行分析,图 7 和图 8 分别是凹面镜的曲率半径为 3m 和 5m(其它参数与 3.1 节相同)时,平面镜失调引起短边失调时的平均单程衍射损耗图,显然,曲率半径 3m 比 5m 时的衍

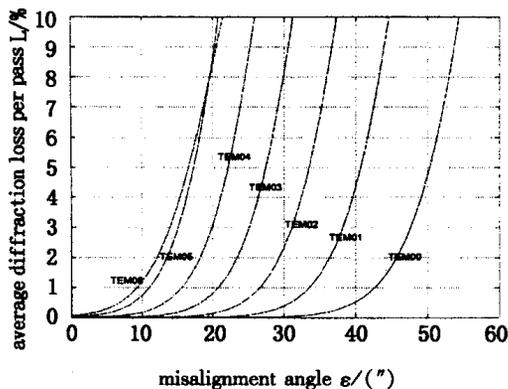


图 7 平面镜失调, R 为 3m 平均单程衍射损耗随失调角度变化曲线

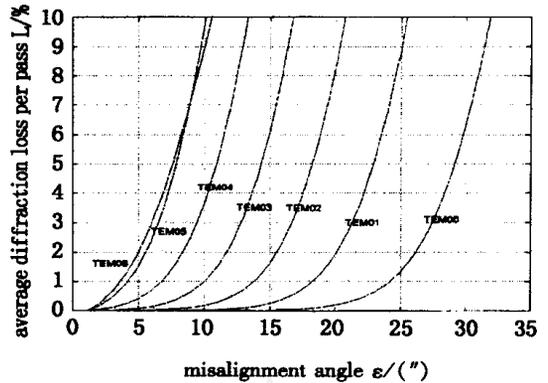


图 8 平面镜失调, R 为 5m 平均单程衍射损耗随失调角度变化曲线
射损耗要小。因此,在设计谐振腔时,在保证腔在稳定工作的需求下,凹面镜的曲率半径尽量小些。

4 结论

4.1 用厄米-高斯光束对矩形横截面放电管的平均单程衍射损耗进行数值计算,总结出在矩形平凹腔中,腔的平均单程衍射损耗主要由平面镜失调引起矩形短边有效尺寸减小的程度所决定。激光器中凹面镜的曲率半径也对腔的衍射损耗有影响。凹面镜的曲率半径越大,腔镜失调引起腔的衍射损耗就越大。

4.2 在腔长、矩形的尺寸和凹面镜曲率半径一定的情况下,高斯光束的衍射损耗与腔镜的失调角度有着极为明确的关系。本文给出了这种关系的解析表达式,并给出了图示,对矩形谐振腔结构参数的选择和腔的调整具有一定的理论参考价值。

参考文献:

- [1] Yiming Ling, Meizhen Qian, Peng Lu. Study of a High-powered He-Ne laser having rectangular discharge cross section [J]. Rev. Sci. Instrum, 1995, 66(8): 4055 - 4058.
- [2] 凌一鸣,等. 高功率扁平放电管氦氖激光器的研究[J]. 激光与红外, 1995, 26(5): 36 - 39.
- [3] 钱梅珍,等. 矩形放电管 He-Ne 激光器特性的研究[J]. 中国激光, 1988, 15(7): 391 - 394.
- [4] 凌一鸣,等. 无声放电辅助激励 CO₂ 激光器的研究[J]. 中国激光, 2000, A27(5): 385 - 389.
- [5] 王成友,等. 大功率 CO 激光器放电区等离子体特性的研究[J]. 光电子·激光, 1997, 8(2): 25 - 28.
- [6] 吕百达. 激光光学[M]. 四川大学出版社, 1992, 73 - 84.
- [7] 周炳琨,等. 激光原理[M]. 国防工业出版社, 1980, 336 - 338.