

密封式 CO₂ 激光谐振腔的设计

金英哲^{1,2} 何平安²

(¹ 金日成综合大学物理学院, 朝鲜 平壤; ² 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要 提出了一种新型激光谐振腔,即“非稳腔-稳腔耦合谐振腔”,其中心部分呈现出非稳定谐振腔结构,边缘部分呈现出稳定谐振腔结构。用 Fox-Li 的方法,模拟计算非稳腔-稳腔耦合谐振腔的基横模。优化出腔长 1.2 m 的密封 CO₂ 激光器的谐振腔参数。数值分析结果表明,与稳定谐振腔相比较,其基横模的输出功率可提高约 2 倍,而聚焦中心光斑输出功率可增加约 1.5 倍。最后设计了另一种用具有球差的球面透镜与球面反射镜实现的非稳腔-稳腔耦合谐振腔。

关键词 激光器;激光谐振腔;Fox-Li 方法;密封式 CO₂ 激光器

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.091404

Design of Optical Resonator for Sealed-Off CO₂ Laser

Kim Yong'chol^{1,2} He Ping'an²

(¹ School of Physics, Kim Il Sung University, Pyongyang, DPR of Korea
² School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract A novel optical resonator is proposed, so called unstable-stable coupling resonator, whose central portion acts as unstable resonator and edge portion acts approximately as stable resonator. Using Fox-Li method, the fundamental transverse modes of unstable-stable coupling resonator are computed. An optimization of the unstable-stable coupling resonator is given for a sealed-off CO₂ laser with length of 1.2 m. Results show that output power of fundamental transverse mode can be increased about 2 times and central core output power on the focus plane can be increased about 1.5 times in comparison to stable resonators. And a design of unstable-stable coupling resonator is presented, which consists of a flat mirror, a spherical lens with aberration and a spherical mirror with aberration.

Key words lasers; laser resonator; Fox-Li method; sealed-off CO₂ laser

OCIS codes 140.3410; 140.3470; 230.5750

1 引言

激光谐振腔以球面谐振腔为主,分为稳定谐振腔和非稳定谐振腔^[1]。稳定谐振腔基横模光束质量好,但光束半径小,激活介质的利用率低。而非稳腔基横模光束半径大,激活介质的利用率高。因此,将非稳定谐振腔和稳定谐振腔结合起来,就有可能把基模的光束半径变大,提高激活介质的利用率。

针对这种情况,设计了一种新型的激光谐振腔,即“非稳腔-稳腔耦合谐振腔”,其中心部分呈现出非稳定谐振腔结构,边缘部分呈现出稳定谐振腔结构。利用 Fox-Li 的方法^[2],模拟计算非稳腔-稳腔耦合谐振腔的基横模,在对长度为 1.2 m 的密封式 CO₂ 激光器输出功率和聚焦中心光斑输出功率进行模拟分析的基础上,得出了两种新型谐振腔,与稳定谐振腔^[3]相比较,这两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔的基横模的输出功率可提高约 2 倍,而其聚焦中心光斑输出功率可增加约 1.5 倍。

收稿日期: 2013-03-22; **收到修改稿日期**: 2013-04-26; **网络出版日期**: 2013-08-02

作者简介: 金英哲(1970—),男,博士,高级进修生,主要从事激光器、激光谐振腔等方面的研究。E-mail: ksa1014@163.com

导师简介: 何平安(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测试技术、光电检测系统和图像视觉测量等方面的研究。E-mail: hpa@whu.edu.cn

2 理 论

如图 1 所示,这种非稳腔-稳腔耦合谐振腔由平面镜反射镜、非球面透镜和凸球面反射镜组成。其中非球面透镜中心部分不折光,边缘部分向其中心折光。因此,其中心部分呈现为非稳腔,而边缘部分近似为稳定腔。

假设透镜 L 为非球面平凸透镜,透镜的厚度及其与腔镜 M2 的间距远小于谐振腔的腔长 d 。进一步假设腔镜 M2 是无球差的抛物面反射镜。在柱坐标系下,平面腔镜 M1 上任意一点和 M2 上某点之间的最短光学距离 ρ 可以表示为

$$\rho \approx \left[\left(d - \frac{r_2^2}{2R} \right)^2 + (r_1 \cos \varphi_1 - r_2 \cos \varphi_2)^2 + (r_1 \sin \varphi_1 - r_2 \sin \varphi_2)^2 \right]^{1/2} + (n-1)(d_L - y), \quad (1)$$

作一阶近似,得

$$\rho \approx d + (n-1)d_L + \frac{1}{2d} \left[r_1^2 + \left(1 - \frac{d}{R} \right) r_2^2 \right] - (n-1)y - \frac{r_1 r_2}{d} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2)$$

式中 d 是谐振腔的腔长, d_L 是透镜的厚度, R 是腔镜 M2 的曲率半径, n 为透镜的折射率, y 为非球面矢高。

非稳定谐振腔的放大率为^[1]

$$M = (2g_1 g_2 - 1) + 2g_1 g_2 [1 - (g_1 g_2)^{-1}]^{1/2}, \quad (3)$$

式中 g_1 和 g_2 分别为

$$g_1 = 1 - \frac{d}{R_1}, g_2 = 1 - \frac{d}{R_2}, \quad (4)$$

式中 R_1 和 R_2 分别是腔镜 M1 和 M2 的曲率半径。因为 $R_1 = \infty, R_2 = R$, 所以放大率 M 满足表达式

$$1 - \frac{d}{R} = \frac{(M+1)^2}{4M}. \quad (5)$$

最简单的非球面矢高函数可表示为

$$y = \frac{\beta}{n-1} r_2^4, \quad (6)$$

式中 β 是一个新参数。

由(5)式和(6)式,(2)式可写为

$$\rho \approx d + (n-1)d_L + \frac{1}{2d} \left[r_1^2 + \frac{(M+1)^2}{4M} r_2^2 \right] - \beta r_2^4 - \frac{r_1 r_2}{d} \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

在柱坐标系下,横模可表示为^[2-4]

$$u(r, \varphi) = R_n(r) \exp(-jn\varphi), \quad (n \text{ 为整数}). \quad (8)$$

引入归一化径向坐标 $x = r/a$, 则场的相对径向分布函数 $R_n(x)$ 满足简化积分方程^[2-4]

$$\begin{cases} \gamma_n^{(1)} R_n^{(1)}(x_1) \sqrt{x_1} = \int_0^1 K_n(x_1, x_2) R_n^{(2)}(x_2) \sqrt{x_2} dx_2 \\ \gamma_n^{(2)} R_n^{(2)}(x_2) \sqrt{x_2} = \int_0^1 K_n(x_1, x_2) R_n^{(1)}(x_1) \sqrt{x_1} dx_1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $R_n^{(1)}$ 和 $R_n^{(2)}$ 分别是在腔镜 M1 和 M2 上的场径向分布, $\gamma_n^{(1)}$ 和 $\gamma_n^{(2)}$ 定义为光从腔镜 M2 传播到 M1 或者从腔镜 M1 传播到 M2 时的振幅衰减和相位延迟, 积分核 $K_n(x_1, x_2)$ 为

$$K_n(x_1, x_2) = j^{m+1} 2\pi N \sqrt{x_1 x_2} J_n(2\pi N x_1 x_2) \exp \left\{ -j\pi N \left[x_1^2 + \frac{(M+1)^2}{4M} x_2^2 \right] \right\} \exp(jk\beta a^4 x_2^4), \quad (10)$$

式中 N 是非涅耳数, k 是波数, J_n 是 n 阶贝塞尔函数。

运用 Fox-Li 方法, 假设反射镜上初始光场为均匀平面波, 由(9)式计算基横模, 进行超过 300 次往返迭代运算^[2]。

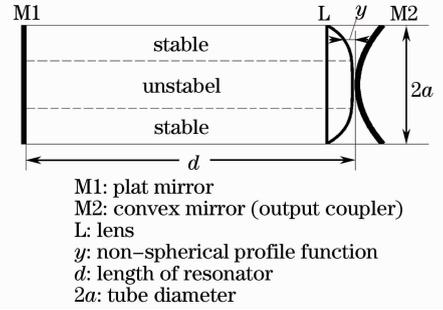


图 1 谐振腔原理图

Fig. 1 Schematic diagram of resonator

在均匀展宽的连续激光器中,归一化的输出强度(输出强度 I_o 与饱和强度 I_s 的比)表示为^[5-6]

$$\frac{I_o}{I_s} = T \frac{\gamma_0 L + \ln[R_e^{(1)} R_e^{(2)}]^{1/2}}{\{1 + [R_e^{(2)}/R_e^{(1)}]^{1/2}\} \{1 - [R_e^{(1)} R_e^{(2)}]^{1/2}\}}, \quad (11)$$

式中 T 是输出镜(M2)的透射率, γ_0 是小信号增益, L 是增益介质的长度, $R_e^{(1)}, R_e^{(2)}$ 是反射镜 M1, M2 的有效反射率。如果忽略反射镜的散射和吸收损失,有效反射率 $R_e^{(1)}, R_e^{(2)}$ 可写为

$$R_e^{(1)} = R_1 |\gamma_n^{(1)}|^2, \quad R_e^{(2)} = (1 - T) |\gamma_n^{(2)}|^2, \quad (12)$$

式中 R_1 是反射镜 M1 的反射率。

对于密封的 CO₂ 激光器,小信号增益可表示为^[5]

$$\gamma_0 = 0.012 - 0.0025 \times 2a(\text{cm}^{-1}), \quad (13)$$

式中 $2a$ 是管直径。

由于输出功率与激活介质的利用率 η 和输出强度成正比^[7],所以归一化输出功率[输出功率 P_o 与饱和功率 P_s ($P_s = \pi a^2 I_s$) 的比]可写为

$$\frac{P_o}{P_s} = \frac{\eta T \{ \gamma_0 L + \ln[|\gamma_n^{(1)} \gamma_n^{(2)}| \sqrt{R_1(1-T)}] \}}{[1 + |\gamma_n^{(2)}/\gamma_n^{(1)}| (1 - T/R_1)^{1/2}] [1 - |\gamma_n^{(1)} \gamma_n^{(2)}| \sqrt{R_1(1-T)}]}. \quad (14)$$

激活介质的利用率可写为

$$\eta \approx \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{4a^2}, \quad (15)$$

式中 ω_1 和 ω_2 是反射镜 M1 和 M2 上的二阶矩光束半径^[7],满足

$$\left(\frac{\omega_i}{a}\right)^2 = \frac{2 \int_0^1 |R_n^{(i)}(x_i)|^2 x_i^3 dx_i}{\int_0^1 |R_n^{(i)}(x_i)|^2 x_i dx_i}, \quad i = 1, 2. \quad (16)$$

此种非稳腔-稳腔耦合谐振腔 M2 上的基横模是“非高斯”型的,因此其远场光强分布(即聚焦光强分布)有主极大和次极大。其中心光斑输出功率 P_f 与饱和功率 P_s 的比,即归一化中心光斑输出功率可写为

$$\frac{P_f}{P_s} = \frac{\int_0^{\theta_0} |U(\theta)|^2 \theta d\theta}{\int_0^\infty |U(\theta)|^2 \theta d\theta} \frac{P_o}{P_s}, \quad (17)$$

式中 θ 是角半径, θ_0 是第一暗环的角半径, U 是在腔镜 M2 上的基横模 $[R_{00}^{(2)}(r_2)]$ 的相对远场分布,满足表达式

$$U(\theta) = \int_0^1 R_{00}^{(2)}(x_2) J_0\left(\pi x_2 \frac{\theta}{\lambda/2a}\right) x_2 dx_2. \quad (18)$$

3 计算结果

首先,模拟计算了 $N = 4, M = 2.5, \beta = 0.5\lambda a^{-4}$ 的非稳腔-稳腔耦合谐振腔的基横模。图 2(a)和(b)分别给出了第一次往返和 150 次往返后腔镜 M2 上场的振幅和相位的径向分布(腔镜 M2 上初始的场取均匀

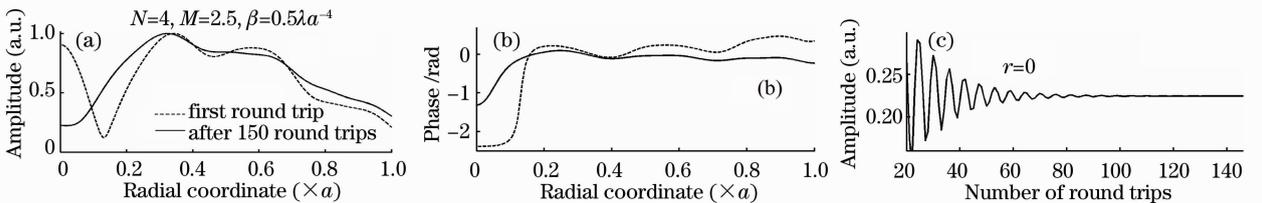


图 2 腔镜 M2 上场的径向振幅分布(a)和相位分布(b)(反射镜上初始场均匀分布,

且 $n=0$); (c) 腔镜中心场振幅随往返次数的波动

Fig. 2 Radial distribution of amplitude (a) and phase (b) of field over M2 (the initially launched wave has $n=0$ and a uniform distribution); (c) fluctuation of field amplitude at center point of mirror as a function of number of round trips

分布,且 $n=0$)。图 2(c)给出了腔镜中心振幅接近其稳定状态的归一化值。150 次往返后稳定状态的场(即基横模)具有“非高斯”分布,其最大值偏离中心,其径向相位在腔镜面上几乎均匀。

运用上述方法模拟计算基横模后,对长度 $L=1.2$ m 的密封 CO_2 激光器作优化。令增益介质长度与谐振腔长度相等,腔镜 M1 的反射率为 1。

在(10)式中, N 分别是 2、4、6、8 和 10 时,令 M 以 $8/50$ 的间隔从 1 变化到 8, β 以 $\lambda a^{-4}/50$ 的间隔从 0 变化到 λa^{-4} ,进行优化计算。图 3 给出了输出镜透射率 $T=0.3$ 和菲涅耳数 $N=4$ (对应于管直径 1.43 cm)时计算点的分布。其中横坐标是基横模的归一化输出功率,纵坐标是归一化中心光斑输出功率。从图 3 可知,对于给定的透射率和管径,基横模归一化输出功率存在一个最大值,归一化中心光斑输出功率也存在一个最大值。

图 4 给出了菲涅耳数 $N=2, 4, 6, 8, 10$ (对应于管直径 $d=1.01, 1.43, 1.75, 2.02, 2.26$ cm)时基横模的归一化中心光斑输出功率的最大值与输出镜透过率的关系,图 5 给出了基横模的归一化输出功率的最大值与输出镜透过率的关系。分析图中曲线,得到两组最佳结果:1) $d=1.43$ cm、 $T=0.26$,归一化中心光斑输出功率 0.46;2) $d=2.02$ cm、 $T=0.17$,归一化输出功率 0.60。

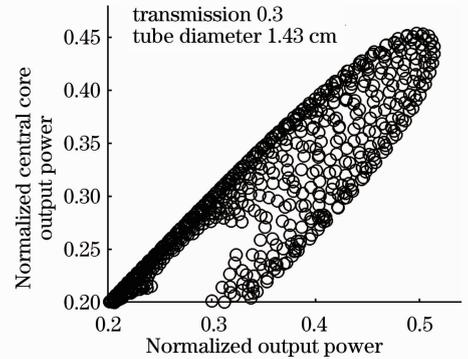


图 3 计算点的分布

Fig. 3 Distribution of computed points

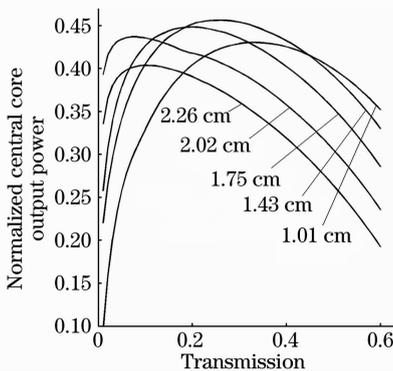


图 4 基横模的归一化中心光斑输出功率的最大值曲线
Fig. 4 Maximum value curves of normalized central core output power of far-field of fundamental transverse mode

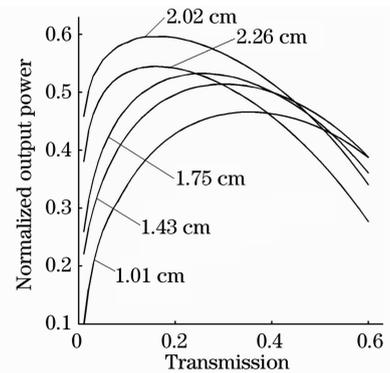


图 5 基横模的归一化输出功率的最大值曲线
Fig. 5 Maximum value curves of normalized output power of fundamental transverse mode

表 1 给出了上述两组结果对应的非稳腔-稳腔耦合谐振腔的特征值与三组稳定谐振腔^[3]的特征值。从表中可以看出,这两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔的直径约为三组稳定谐振腔(表 1 中的 1~3)的 1.5 倍和 2 倍。由(13)式可知,这将导致小信号增益减少约 12%和 25%。因此,这两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔的归一化输出强度小于三组稳定谐振腔。但是,因为激活介质的利用率高,这种非稳腔-稳腔耦合谐振腔的基横模的归一化输出功率(即基横模的输出功率)约为稳定谐振腔的 2 倍,并且基横模的归一化中心光斑输出功率(即远场中心光斑的输出功率)约为稳定谐振腔的 1.5 倍。

表 1 几种密封式 CO_2 激光器谐振腔的特征值比较(基横模,腔长 1.2 m)

Table1 Sealed-off CO_2 laser resonators (fundamental transverse mode, laser the length 1.2 m)

No.	d /cm	T /%	R /m	$\beta / \times 10^3 \text{ m}^{-3}$	η	P_o/P_s	P_f/P_s
1	1.00	49	3	0	0.27	0.21	0.21
2	1.00	49	5	0	0.33	0.25	0.25
3	1.10	28	10	0	0.37	0.31	0.31
4	1.43	26	-5.7	1.8	0.73	0.50	0.46
5	2.02	17	-4.7	1.0	0.93	0.60	0.40

图 6 给出了一组稳定谐振腔(对应于表 1 的 No. 2)和这两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔(对应于表 1 的 No. 4 和 No. 5)的反射镜 M2 上的基横模的径向振幅分布、径向相位分布和远场的径向光强分布。

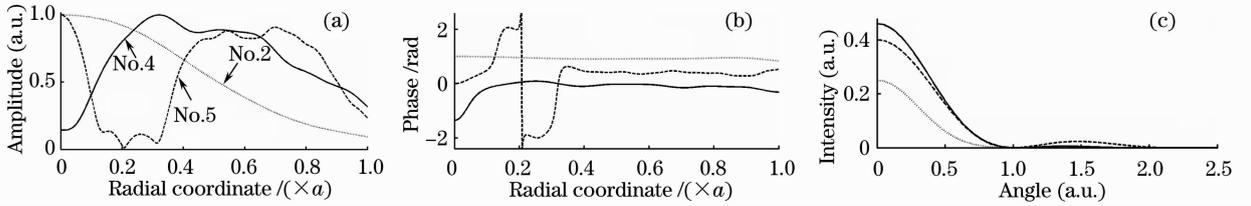


图 6 (a)腔镜 M2 上的基横模的径向振幅分布;(b)腔镜 M2 上的基横模的径向相位分布;
(c)腔镜 M2 上的基横模的远场的径向光强分布

Fig. 6 (a) Radial distribution of amplitude of fundamental transverse mode over mirror M2; (b) radial distribution of phase of fundamental transverse mode over mirror M2; (c) radial distribution of intensity of far-field of fundamental transverse mode over mirror M2

4 用透镜和反射镜的球差实现非稳腔-稳腔耦合谐振腔

(6)式表明,非稳腔-稳腔耦合谐振腔非球面透镜的矢高正比于径向坐标的 4 次方,它对应于球面透镜的球差。因此用具有球差的球面透镜可设计非稳腔-稳腔耦合谐振腔。

如图 1 所示,非稳腔-稳腔耦合谐振腔由平面反射镜、非球面平凸透镜和抛物面反射镜组成。现在将其中的非球面平凸透镜和抛物面镜换成具有球差的平凸球面透镜和球面反射镜,且假设平凸透镜与球面反射镜的距离及透镜厚度 d_L 远小于谐振腔长度 d 。在柱坐标系中,M1 上任何点到 M2 上某点之间的最短光学距离 ρ 满足关系

$$\rho \approx [(d - y_M)^2 + (r_1 \cos \varphi_1 - r_2 \cos \varphi_2)^2 + (r_1 \sin \varphi_1 - r_2 \sin \varphi_2)^2]^{1/2} + (n - 1)(d_L - y_L), \quad (19)$$

式中 n 是透镜的折射率, y_M 和 y_L 为

$$y_M = R_M^2 - \sqrt{R_M^2 - r_2^2}, y_L = R_L^2 - \sqrt{R_L^2 - r_2^2}, \quad (20)$$

式中 R_M 是球面反射镜的曲率半径, R_L 是平凸透镜球面的曲率半径。对(14)式作一阶近似,得

$$\rho \approx d - y_M + (n - 1)d_L + \frac{1}{2d}(r_1^2 + r_2^2) - (n - 1)y_L - \frac{r_1 r_2}{d} \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (21)$$

因为球面透镜和球面反射镜都具有球差,(15)式可近似为

$$y_M = \frac{r_2^2}{2R_M} + \frac{r_2^4}{8R_M^3}, y_L = \frac{r_2^2}{2R_L} + \frac{r_2^4}{8R_L^3}, \quad (22)$$

代入到(16)式,得

$$\rho \approx d + (n - 1)d_L + \frac{1}{2d}\{r_1^2 + [1 - d(\frac{1}{R_M} + \frac{n-1}{R_L})]r_2^2\} - [\frac{1}{8R_M^3} + \frac{n-1}{8R_L^3}]r_2^4 - \frac{r_1 r_2}{d} \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (23)$$

为了构建非稳腔-稳腔耦合谐振腔,(23)式必须与(7)式具有相同的形式,因此

$$\begin{cases} \frac{(M+1)^2}{4M} = 1 - d(\frac{1}{R_M} + \frac{n-1}{R_L}) \\ \beta = \frac{1}{8R_M^3} + \frac{n-1}{8R_L^3} \end{cases}. \quad (24)$$

给定 M 和 β ,可计算出相应的 R_M 和 R_L 。取 $N = 4, R = -5.7$ m (对应于 $M = 2.43$), $\beta = 1.8 \times 10^3$,即可得到如下非稳腔-稳腔耦合谐振腔的典型结构参数:激光的波长为 $10.6 \mu\text{m}$,激光管的直径为 14.3 mm,激光谐振腔长度为 1.2 m,透镜的折射率为 1.49 ,平凸透镜球面曲率半径为 29.44 mm,球面反射镜曲率半径为 59.46 mm。

5 结 论

提出了一种新型激光谐振腔,即“非稳腔-稳腔耦合谐振腔”,其中心部分呈现出非稳定谐振腔结构,边

缘部分呈现出稳定谐振腔结构。在对密封式 CO₂ 激光器进行数值分析的基础上,得出了两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔,与传统稳定谐振腔相比较,这两种非稳腔-稳腔耦合谐振腔基横模的输出功率可提高约 2 倍,而其聚焦中心光斑输出功率可增加约 1.5 倍。另外,设计了一种用具有球差的球面透镜与球面反射镜实现的非稳腔-稳腔耦合谐振腔。

致谢 作者感谢 O. Svelto 教授认真审阅了本文初稿并给予作者的工作以充分肯定。

参 考 文 献

- 1 O Svelto. *Principals of Lasers*, 5th ed. [M]. New York: Plenum Press, 2010. 175—200.
- 2 A G Fox, T Li. Resonant modes in a maser interferometer[J]. *Bell Syst Tech J*, 1961, 40: 498—508.
- 3 C Cheng C, Y W Ma, S L He. Optimization of a sealed-off laser resonator by utilizing a genetic algorithm[J]. *Optics and Laser Technology*, 2001, 33(8): 601—604.
- 4 H Kogelnik, T Li. Laser beams and resonators[J]. *Appl Opt*, 1996, 5(10): 1550—1567.
- 5 Theodore S Fahlen. CO₂ laser design procedure[J]. *Appl Opt*, 1973, 12(10): 2381—2390.
- 6 W W Rigrod. Saturation effects in high-gain lasers[J]. *J Appl Phys*, 1965, 36(8): 2487—2490.
- 7 A E Siegman. *New developments in laser resonators*[C]. SPIE, 1990, 1224: 2—14.