

文章编号: 0258-7025(2007)09-1217-05

一种激光折叠腔稳定性分析及设计的新方法

王大平¹, 王裕民², 归振兴², 胡德金¹, 刘红斌¹

(¹ 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为了对激光谐振腔进行优化设计, 运用光学传输矩阵理论, 借助 V 型折叠腔激光器的等效简化模型对该激光腔的稳定性进行了研究。分析了腔长、折叠镜焦距、反射镜曲率半径与系统稳定性的关系, 得到以失调量为参数的稳区临界曲线方程, 实现了三镜折叠腔型 CO₂ 斩光盘式调 Q 脉冲输出激光器的设计。分析结果表明, 对于子腔预先给定的参量, 只要另一子腔满足适当的失调量, 整个谐振腔就是稳定的。任一子腔内有二个稳定区而非以往研究者提出的一个稳定区, 可根据需要选取最佳的稳定点。采用失调量而非 g 因子作为参数, 直接给出稳定区范围和失调误差, 使用性好。

关键词 激光技术; 稳定性; 失调量; V 型折叠腔

中图分类号 TN 243 **文献标识码** A

A Novel Method for Stability Analysis and Design of Laser Folded Cavity

WAN Da-ping¹, WANG Yu-min², GUI Zhen-xing², HU De-jin¹, LIU Hong-bin¹

(¹ School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to optimize the design of laser resonant cavity, analytical solutions concerning Gaussian beam were derived in a three-mirror V-folded cavity by using the theory of optical propagation matrix. The cavity stability of the folded cavity laser was investigated with an equivalent simplified model. The influence of resonator parameters, such as folded mirror focus, cavity length and curvature radius, on the stability of Q-switched lasers were studied. The stable region's boundary curve expression is obtained with the off-focus amount as a design parameter. According to theoretical analysis, a mechanically chopper-typed Q-switched CO₂ pulse laser was taken as an application example. It was found that for one resonator with preset parameters, as long as the other resonator chose appropriate off-focus amount, the whole laser folded cavity was stable. Either of the resonator cavities can work with two stable regions, instead of previously supposed one. Appropriate stable position can be selected according to preset conditions. By adopting off-focus amount instead of factor g as the parameter, the stable region boundary and maladjusted error are derived directly, which is simple, straightforward and convenience for application.

Key words laser technique; stability; off-focus amount; V-folded cavity

1 引言

采用折叠腔的激光器不但输出激光光束腰很

细, 而且结构紧凑, V 型折叠腔因模参数调整灵活以及腔内有效空间大等原因, 在高功率激光器中获得了广泛应用。V 型复合腔源腔分为几个子腔, 根据

收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-04-25

基金项目: 上海市重点科技攻关项目(05DZ2202)资助课题。

作者简介: 王大平(1974—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事光机电装备技术的研究。E-mail: wdp@sjtu.edu.cn

导师简介: 胡德金(1946—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事光机电装备与特种加工技术的研究。

E-mail: djhu@sjtu.edu.cn

需要可以设计成具有不同光束腰的光束,一个子腔要求有尽量大的模体积,另一个则要求有尽量小的光腰或者是尽量高的光强,如内腔调 Q 器件或倍频器件,及腔内非线性器件参量振荡,自锁模激光等^[1,2]。谐振腔参数选择不当,不但会影响谐振腔的稳定性,而且使激光器的工作效率降低,通常的稳定性研究或设计方法,其物理意义不直观,对于特定的工程应用缺乏通用性,因此,折叠腔或多元件腔一直是研究的热点。对这类腔的稳定性分析和设计,通常采用 ABCD 腔内传输矩阵和 G 参数等价腔法进行分析和数值模拟计算^[3~7],研究或设计某种特殊的激光腔体结构,再进行实验研究^[7,8]。g 因子分析法是非常有效的方法,但往往缺乏直观性,常常通过编制计算机程序,在大量的计算结果中采用限制性条件再进行判断选择,比较繁琐。本文试着采用失调量而非 g 因子作为参数进行稳定性分析,它可直接给出稳定区的范围和调整误差,简易、直观,物理形象比较清楚。分析表明,一个子腔的参量可以根据需要任意给定,对另一个子腔适当选择参量就可使整个激光器进入稳定区;另外对给定的第一子腔参量,第二子腔存在两个稳定区,工作点具有二个稳定区而非以往研究者提出的一个稳定区^[9,10]。通过计算得到腔内光腰半径和位置的解析解,在调整光路时选择合适的参数值,使之避开稳区的分界线。我们设计了一台机械调 Q CO₂ 激光器,针对这台激光器,分析了腔参数、腔镜曲率半径对谐振腔稳定性的影响。

2 稳定性分析

2.1 分析方法

采用折叠腔型结构的激光器结构紧凑,但其工作稳定区比较小,需要进一步研究此激光谐振腔中聚焦镜位置及曲率半径的变化对激光谐振腔稳定性及输出特性的影响。把折叠镜看作一个焦距相等的薄凸透镜,这样就构成了腔内含有一个透镜的多元件光学谐振腔。在研究腔的稳定性过程中用光学传输矩阵方法处理光线在光谐振腔中的传播,得出腔的稳定性条件,然后画出此台激光器的稳定图。为了使激光器工作在稳区之内,在腔长及光路调整上,根据稳定谐振腔的本征模在腔内往返一周后,必须重现其自身,采用参数等价腔对含有一个透镜的多元件腔进行分析,由高斯光束在腔内的自再现条件,求出腰斑大小和位置。谐振腔稳定条件为^[10,11]

$$0 < g_1^* \cdot g_2^* < 1, \quad (1)$$

其中

$$g_i^* = 1 - \frac{d_i + d_j}{R_i} - \frac{d_j}{f} \left(1 - \frac{d_i}{R_i} \right), \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (2)$$

式中 R_i 为反射镜 M_i 的曲率半径, f 为折叠镜的焦距, d_i 为腔镜的间距。为了分析问题直观方便,引入调整量 $\delta_i = d_i - R_i - f$, ($i = 1, 2$), 从 g^* 参数稳定条件可直接得出以 δ 表示的稳定方程, 首先将第一子腔的基频参量根据需要先任意设定, 然后基于失调量方法给出第二个子腔的参量, 使整个腔进入稳定区, 并满足小光腰的要求。

2.2 基于失调量的谐振腔稳区理论

取失调量 δ 为参数, 可以调整 δ_i 使腔满足稳定性条件。图 1 为三镜折叠腔的结构及等效谐振腔示意图。

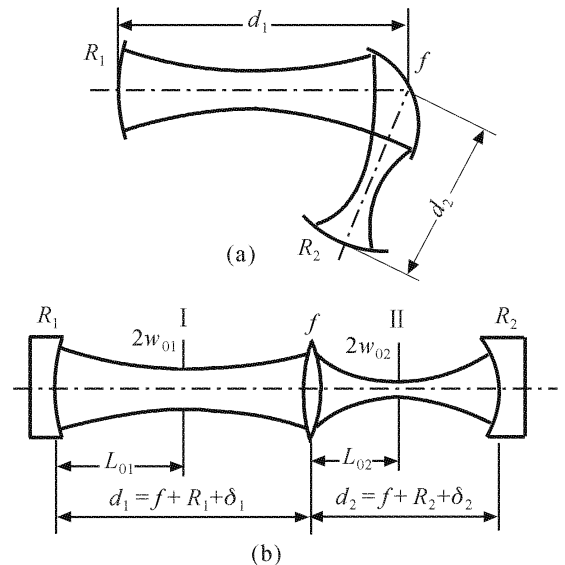


图 1 三镜折叠腔的结构(a)及等效谐振腔(b)示意图
Fig. 1 Schematic diagram (a) and equivalent cavity (b) of three-mirror V-folded resonant cavity

为了便于得出对称性的边界曲线表达式,需要进行数学处理,谐振腔稳定性条件(1)的等价不等式为

$$g_1^* \cdot g_2^* (1 - g_1^* \cdot g_2^*) > 0, \quad (3)$$

其中

$$g_1^* \cdot g_2^* = \frac{[(\delta_1 + R_1)(\delta_2 - f^2)][(\delta_2 + R_2)(\delta_1 - f^2)]}{R_1 \cdot R_2 \cdot f^2}, \quad (4)$$

由(3)式可得

$$(\delta_i \cdot \delta_j - f^2)[(\delta_i + R_i)\delta_j - f^2] \times [(\delta_j - f)\delta_i - f^2][f^2 - (\delta_i + R_i)(\delta_j - R_j)] > 0, \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (5)$$

即

$$\delta_i^2 (\delta_i + R_i)^2 \left(\frac{f^2}{\delta_i + R_i} - \delta_j \right) \left(\delta_j - \frac{f^2}{\delta_i} \right) \times \left(\delta_j + R_j - \frac{f^2}{\delta_i + R_i} \right) \left(\delta_j + R_j - \frac{f^2}{\delta_i} \right) > 0, \quad (i, j = 1, 2; i \neq j), \quad (6)$$

令

$$\begin{aligned} \Delta_{ia} &= \frac{f^2}{d_i - f} = \frac{f^2}{\delta_i + R_i}; \\ \Delta_{ib} &= \frac{f^2}{d_i - f - R_i} = \frac{f^2}{\delta_i}; \\ \Delta_{ic} &= \Delta_{ia} - R_j; \quad \Delta_{id} = \Delta_{ib} - R_j, \end{aligned} \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (7)$$

稳定性条件可写为

$$(\Delta_{ja} - \delta_i)(\delta_i - \Delta_{jb})(\delta_i - \Delta_{jc})(\delta_i - \Delta_{jd}) > 0. \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (8)$$

可见,稳定区临界点的值分别为 $\Delta_{ia}, \Delta_{ib}, \Delta_{ic}$ 和 Δ_{id} , 稳定区范围为临界点所围成的两个区域, δ_i 的稳定区间为 $(\Delta_{ib}, \Delta_{ia})$ 和 $(\Delta_{id}, \Delta_{ic})$, 如图 2 所示。当谐振腔处在稳定区边缘 (δ 趋近 $\Delta_{ia}, \Delta_{ib}, \Delta_{ic}$ 或 Δ_{id}) 时, L_{0i} 趋近 R_i , 为了使光腔工作在稳定区中心, 稳定的失调量参数 δ_i 可选择为 $\delta_i = (\Delta_{ja} + \Delta_{jb})/2$ 或 $\delta_i = (\Delta_{jc} + \Delta_{jd})/2$ 。

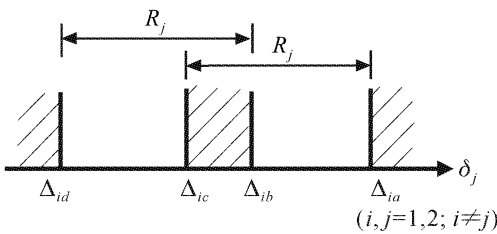


图 2 稳定区界限示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stable region boundary

由于稳定界限区间 $(\frac{f^2}{\delta_j + R_j}, \frac{f^2}{\delta_j})$ 与 $(\frac{f^2}{\delta_j + R_j} - R_i, \frac{f^2}{\delta_j} - R_i)$ 为 δ_i 的取值范围, 可得出稳定区边界方程为

$$\begin{cases} \delta_1 \cdot \delta_2 = f^2 \\ \delta_1 (\delta_2 + R_2) = f^2 \\ \delta_2 (\delta_1 + R_1) = f^2 \\ (\delta_1 + R_1) (\delta_2 + R_2) = f^2 \end{cases}, \quad (9)$$

(9) 式中四个方程互相独立, 表示了稳定区的四对边界曲线, 稳定点在边界曲线与坐标轴所围成的稳定区范围内, 工作点移动 R_1 或 R_2 后还是满足原来的稳定区, 工作点具有二个稳定区。令 $\bar{\delta}_i = \delta_i/f, \bar{R}_i$

$= R_i/f, \bar{d}_i = d_i/f$, 将(9) 式对 f 归一化后, 可得临界曲线方程为

$$\begin{cases} \bar{\delta}_1 \cdot \bar{\delta}_2 = 1 \\ \bar{\delta}_1 (\bar{\delta}_2 + \bar{R}_2) = 1 \\ \bar{\delta}_2 (\bar{\delta}_1 + \bar{R}_1) = 1 \\ (\bar{\delta}_1 + \bar{R}_1) (\bar{\delta}_2 + \bar{R}_2) = 1 \end{cases}. \quad (10)$$

以 $\bar{\delta}_1$ 为横坐标, $\bar{\delta}_2$ 为纵坐标作图可以得到四对双曲线, 因此谐振腔稳定区为四对双曲线与坐标轴所围成的区域。稳定区的 δ 参数图如图 3 所示, 根据需要, 对于任意给定的 $\bar{\delta}_1$, 可得到稳定腔 $\bar{\delta}_2$ 的范围 $(b, a), (d, c)$, 该理论分析方法可推广到多折腔。

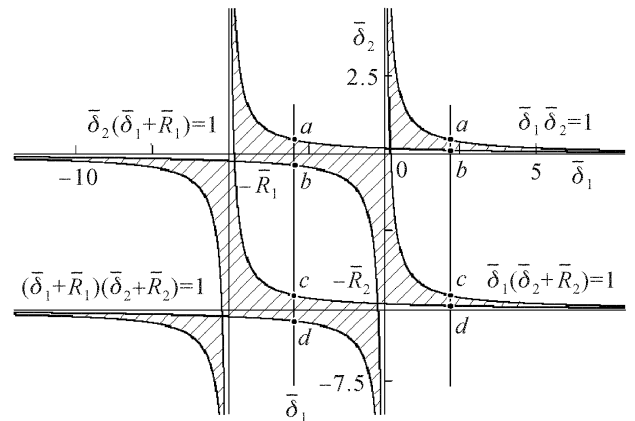


图 3 稳定区 (δ 参数) 图

Fig. 3 Sketch map of (δ parameter) stable region

对于图 1 所示的三镜折叠腔, 可求出其腰斑半径为

$$\omega_{0i}^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \times \frac{(\Delta_{ja} - \delta_i)(\delta_i - \Delta_{jb})(\delta_i - \Delta_{jc})(\delta_i - \Delta_{jd})}{(2\delta_i + R_i - \Delta_{ja} - \Delta_{jb})^2}, \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (11)$$

腰斑位置为

$$L_{0i} = \frac{(\delta_i + R_i - \Delta_{ja})(\delta_i + R_i - \Delta_{jb})}{2\delta_i + R_i - \Delta_{ja} - \Delta_{jb}}. \quad (i, j = 1, 2; i \neq j) \quad (12)$$

3 实例

3.1 机械调 Q 折叠腔设计

采用高光束质量的 CO_2 连续激光进行脉冲调制是获得高峰值功率、减小热影响区的有效方法。为了在千瓦级连续 CO_2 横流激光器上实现调 Q, 采用 V 型折叠腔, 主腔 I 是增益介质, 要求模体尽量大, 辅腔 II 中放置机械转盘, 为了提高开关速度, 被切割光束截面要尽量小。为此设计第一步要尽量

增大 R_1 的半径及活性区长 d_1 (采用平面镜多次反射);设计第二步为了保证谐振腔处在稳定区,采用本文提出的方法,选择子腔 II 的光学参量。

图 4 为所设计的机械调 Q CO₂ 三镜折叠腔结构示意图,光束被抛物镜和全反镜聚焦成较细的光腰,并被一个高速旋转的斩光盘所开断,激光器光腔内电主轴带动斩光盘以 10^4 r/min 的速度旋转,斩光

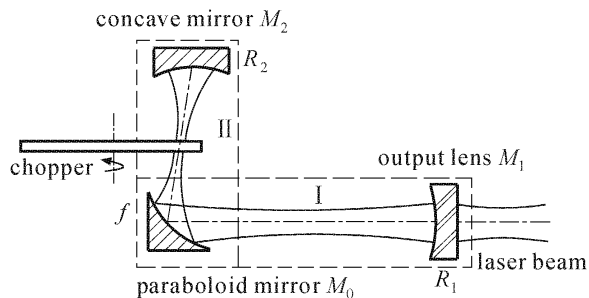


图 4 机械调 Q CO₂ 三镜折叠腔结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three-mirror V-folded resonant cavity with mechanically Q-switched chopper

盘齿数为 60,输出重复频率为 10 kHz 的以基模为主的调 Q 脉冲,平均功率为 800 W。对该折叠腔的特性参数进行计算,以选定较好的参数,并讨论稳定条件,分析该腔各参数间的关系,由此设计斩光盘开缝大小等几何尺寸。该谐振腔结构参数的意义如图 1,图 4 所示,选择适当的 R_2 ,使 w_{02} 尽量小 (< 1 mm),此处放调制盘; w_{01} 尽量大,接近或大于 10 mm,并使整个腔处在稳定区。

3.2 结果与讨论

设腔镜间距 $d_1 = 1.7$ m, $d_2 = 0.2$ m,抛物镜焦距 $f = 100$ mm, $R_1 = 15$ m 或 ∞ ,波长 $\lambda = 10.6$ μ m。由已知条件可知腔 I 的失调量 $\delta_1 = d_1 - R_1 - f$,由(7)式求得稳定区边界 Δ_{1a} 和 Δ_{1b} ,据此可得 δ_2 的最佳稳定点值 $(\Delta_{1a} + \Delta_{1b})/2$,于是求出全反镜 M_2 的设计值 $R_2 = d_2 - \delta_2 - f$,然后由(11)和(12)式算出腔 II 的束腰半径和束腰位置。同理,可算得腔 I 的有关结构参数。表 1 分别为 $R_1 = 15$ m 和 $R_1 = \infty$ 时的折叠腔设计参数计算结果。

表 1 折叠腔设计参数计算结果

Table 1 Calculated results from folded cavity design parameters

R_1 /m	R_2 /mm	Off-focus amount			Stable-region boundary				Waist radius and position			
		δ_1 /m	δ_2 /mm	$\delta_1 (\Delta_{2a}, \Delta_{2b})$ /m	$\delta_1 (\Delta_{2c}, \Delta_{2d})$ /m	$\delta_2 (\Delta_{1b}, \Delta_{1a})$ /mm	$\delta_2 (\Delta_{1d}, \Delta_{1c})$ /mm	w_{01} /mm	L_{01} /mm	w_{02} /mm	L_{02} /mm	
15	97	-13.4	2.75	(0.1, 3.3)	(-14.9, -11.7)	(-0.75, 6.25)	(-97.8, -90.8)	2.31	164	0.108	98.4	
∞	97	$-\infty$	3.12	(0.1, 3.3)	($-\infty, -\infty$)	(0, 6.25)	(-97, -90.8)	2.33	150	0.103	96.8	

由表 1 折叠腔稳定性计算结果可知,对于所采用的 $R_1 = 15$ m 的折叠腔,腔 I 的失调量 $\delta_1 = -13.4$ m,可知腔 II 的一个稳定区间为 $(-0.75$ mm, 6.25 mm),取稳定点值 $\delta_2 = (\Delta_{1a} + \Delta_{1b})/2 = 2.75$ mm,求出全反镜 M_2 的设计值 $R_2 = 97$ mm,可得腔 II 的束腰半径 $w_{02} = 0.108$ mm;对于腔 II 的另一稳定区间 $(-97.8$ mm, -90.8 mm),当取 $\delta_2 = (\Delta_{1c} + \Delta_{1d})/2 = -94.25$ mm 时,算得束腰半径 $w_{02} = 3.8$ mm,腰斑明显偏大,不合题意,故本例不取该稳定点。由 $\delta_2 = 2.75$ mm,可算得腔 I 的稳定区间为 $(0.1$ m, 3.3 m), $(-14.9$ m, -11.7 m)。对于 $R_1 = \infty$ 的折叠腔也作类似的处理。稳定区处于由(10)式所确定的双曲线与坐标轴之间,工作点具有二个稳定区,可根据需要选取最佳的稳定点,所取谐振腔的失调量 δ_1 和 δ_2 均在各自的稳定区间内,采用文献[10,11]中的有关方程对所得结果进行了验证,对任意给定腔 I 参量 δ_1 ,只要腔 II 满足条件 δ_2 ,整个腔就是稳定的。可见,采用

该方法可方便直观地得出设计结果。

4 结 论

基于失调量的等效谐振腔分析方法可以将折叠腔的动态工作特性在稳区图上清楚地表示出来,一个子腔的参量可以根据需要任意给定,对另一个子腔选择适当的参量就可使整个激光器进入稳定区,工作点具有二个稳定区而非以往研究者提出的一个稳定区。采用失调量而非 g 因子作为参数,得到简易直观的稳定区范围,直接给出失调误差,使用性好,物理形象比较清楚。通过对三镜 V 型折叠腔高斯光束动态稳定特性的分析,设计了一种新型激光束调制斩光系统,在调整光路时应选择合适的参数值,使之避开稳定区的分界线。该方法对于实际激光器的设计和光路调整具有指导意义,下一步将作更深入的理论探讨,推广到更复杂的谐振腔。

参 考 文 献

- 1 Zhang Shaojun, Wang Qingpu, Xu Xiangang *et al.*. Passively Q-switched periodically poled LiNbO₃ intracavity frequency-doubling laser pumped by diode-laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):481~484
张少军,王青圃,徐现刚等. 激光二极管抽运被动调Q周期极化铌酸锂腔内倍频激光特性的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(4):481~484
- 2 Cunfa Li, Xiangchun Shi. Dynamic analysis of V-folded cavity for TEM₀₀ operation of end-pumped solid-state laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):653~654
- 3 Wang Jian, Xu Rongqing, Xia Houqing. Theoretical and experimental research on laser cavity with wide dynamic stability zone [C]. *SPIE*, 1998, **3549**:125~127
- 4 Sun Han, Gao Jingyao, Ma Tao *et al.*. Research on stability of CO₂ laser resonant cavity [J]. *College Physics*, 2005, **25**(1):41~43
孙寒,高锦岳,马涛等. 二氧化碳激光器谐振腔稳定性的研究[J]. 大学物理, 2005, **25**(1):41~43
- 5 Ma Hongyu, Li Long, Tian Feng *et al.*. The influence of resonator parameters on the stability of Q-switched intracavity-frequency-doubled lasers [J]. *Lasers Technology*, 2004, **28**(6):645~647
马红玉,李隆,田丰等. 谐振腔参数对调Q腔内倍频系统稳定性的影响[J]. 激光技术, 2004, **28**(6):645~647
- 6 Wang Qingyue, Zheng Wei, Dai Jianming *et al.*. Stability analysis and calculation of the femtosecond laser with a multiple-pass cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):501~504
王清月,郑玮,戴建明等. 多通长腔飞秒激光器的稳定性分析与计算[J]. 中国激光, 2001, **A28**(6):501~504
- 7 Wang Xubao, Wu Qiang, Chen Jimin *et al.*. Study of beam quality and focus of frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1169~1172
王旭葆,武强,陈继民等. KTP晶体环形腔外腔倍频Nd:YAG激光光束特性的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(10):1169~1172
- 8 Hong Lei, Li Lijun, Ju Chunlei. Design of optical resonator of folded quasi-sealed-off CO₂ laser unit [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):792~794
洪蕾,李力钧,鞠春雷. 折叠式准封离型激光器的光学谐振腔设计[J]. 中国激光, 2002, **A29**(9):792~794
- 9 H. P. Kortz, R. Iffländer, H. Weber. Stability and beam divergence of multimode lasers with internal variable lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(23):4124~4134
- 10 R. Iffländer. *Solid-State Lasers for Materials Processing* [M]. Springer, 2001. 68~94
- 11 Lü Baida. *Solid-State Laser* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Communications Press, 2002. 114~123
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2002. 114~123