

轴对称折叠组合 CO₂ 激光器的相位锁定及其输出特性的研究

徐勇根, 李育德, 邱毅, 冯婷, 郭伟, 付福兴
(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要: 基于注入锁定原理, 对轴对称折叠组合 CO₂ 激光器的相位锁定机制进行了分析。详尽研究了相位锁定后光束的特性。结果表明, 相位锁定能够提高光强的最大值, 并且使输出光束的能量更集中。这样的结果能应用于激光打孔、激光切割等。

关键词: 轴对称折叠组合 CO₂ 激光器; 相位锁定; 耦合系数; 光强分布; 光束整形
中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

The Research of Phase-locking and Output Behavior of Axisymmetric Folded-combined CO₂ Laser

XU Yong-gen, LI Yu-de, QIU Yi, FENG Ting, GUO Wei, FU Fu-xing
(Department of Optoelectronic Science and Technology, School of Electronic and Information Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Based on the injection-locking principle, the phase-locking mechanism of axisymmetric folded-combined CO₂ laser is analyzed. And then the characteristics of the beam phase-locked are studied in detail. It is shown that the maximum value of the light intensity could be improved significantly and the energy could be more concentrated by the phase-locking. This results could be used in the laser drilling, laser cutting, etc.

Key words: axisymmetric folded-combined CO₂ laser; phase-locking; coupling coefficient; light intensity distribution; beam shaping

1 引言

在激光技术中, 常常用光束并合来获得高功率的光束, 但是这样的光束相互之间往往没有固定的位相关系。利用相位锁定方法, 可以获得强度更大的高功率光束。关于相位锁定, 很多方法已经被提出。早在1965年, Basov等研究了多通道独立激光器的耦合和相位锁定现象^[1], 之后被 Stover 和 Steier^[2]证明; Carl J. Buczek 在1972年用种子注入锁定的方法将一台稳定的低功率激光器锁住另一台高功率 CO₂ 环形激光器的频率稳定性^[3]; E. F. Yelden 等研究了辐射形板条 CO₂ 激光器的相位锁定现象^[4], 为光束并合和板条 CO₂ 激光器的发展奠定了

理论基础。以上介绍了相位锁定方法, 以及将其用于各个不同的模型、领域, 这些方法推动了光学的进一步发展。但是, 这些方法并未对某一特定的锁相元件的参数作详细说明, 特别是控制镜的参数也没有做出具体研究, 本文将重点研究控制镜对相位锁定的影响以及相位锁定后的光束特性。

在2006年, F. R. Ruiz-Oliveras 等研究了外腔对相位锁定的影响^[5], 通过适当调节外腔的长度和

作者简介: 徐勇根(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光器件和技术, 高功率激光和光电子技术方面的研究。

E-mail: xuyonggen06@126.com

收稿日期: 2008-01-18

反馈力度,具有两个外腔的半导体激光器的特性可以完全被控制,并且外腔太长的激光器很不稳定。基于这些思想,我们给出了一种新的相位锁定方法(外部反射注入锁定),并应用于一个新的模型(轴对称折叠组合腔^[6]),这种方法简单,每个器件的参数易于控制,操作方便,并且将控制镜(如图1所示)放在不同的位置,可以对不同类型的腔进行相位锁定。因此,我们研究输出光束的远场特性,但是远场特性的研究是非常复杂的,为了使问题简化,我们做以下的假设和近似:①假设所有光束在传输过程中都满足傍轴近似和薄透镜近似;②假设这些光束都是线偏振光,这是由于光束的相干并合需要振动方向一致。

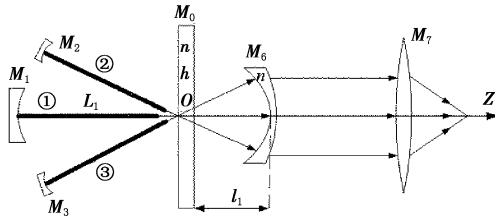


图1 二维三根放电管输出光束特性研究的几何光路图

2 相位锁定

我们以最简单的二维轴对称折叠组合腔为例来研究外腔反射注入锁定机制。如图1所示,放电管①的轴线位于系统的对称轴上,放电管②、③的轴线位于竖直平面内,镜 M_i 的曲率半径为 ρ_i ($i=1,2,3$),镜 M_i 的中心到镜 M_0 的中心的距离是 L_i ($i=1,2,3$),放电管位于 M_i ($i=1,2,3$)与 M_0 之间。镜 M_0 是平面输出镜,折射率为 n ,厚度为 h ,它的内表面中心与系统的对称 z 轴相交于点 O , M_6 是相位锁定控制镜,它的前表面的曲率半径为 ρ_{0x} ,后表面的曲率半径为 ρ_{1x} ,折射率也为 n 。 M_7 是整形镜,焦距为 f , M_6 和 M_7 组成光学会聚系统。 M_0 的后表面到 M_6 的前表面的距离是 l_1 。该模型的原理是:首先使平凹腔 M_0-M_1 受到泵浦源的激励,获得高斯光束,该光束从平面镜 M_0 输出后,被控制镜 M_6 反射,其中一部分作为控制源反射注入到折叠腔 $M_2-M_0-M_3$ 放电管内,注入光束的相位分布和占有的空间与折叠腔的本征模相同或者非常接近,因此注入光波能激发和建立折叠腔的振荡。这样注入光波就能首先在折叠腔内激发相应的模式,消耗其反转粒子数,折叠腔的模式就能被注入光波控制。从平面镜 M_0 输

出的光束,再经会聚系统聚焦后,相互之间有固定的位相关系,满足相干叠加条件。在这里首先设定各个参数, $L_i=1.4\text{m}$ ($i=1,2,3$), CO_2 激光器的波长 $\lambda=10.6\mu\text{m}$,镜 M_2, M_3 中心的距离是 80mm , M_i 的曲率半径 $\rho=2\text{m}$, $\rho_{2,3}=1.5\text{m}$,放电管的半径为 5mm 。

2.1 用于相位锁定的注入源光束的特性分析

平凹腔 M_0-M_1 的 g 参数为:

$$g_{01}=1-\frac{L_1}{\rho_1}, g_{02}=1-\frac{L_1}{\rho_0}=1, g_{01} \times g_{02}=1-\frac{L_1}{\rho_1} \quad (1)$$

腔 M_0-M_1 的稳定性条件为:

$$0 < g_{01} \times g_{02} = 1 - \frac{L_1}{\rho_1} < 1 \quad (2)$$

满足这个条件的平凹腔为稳定腔,其本征模是高斯光束,束腰在镜 M_0 处,腰斑半径为:

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} [L_1(\rho_1 - L_1)]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

相应的复参数为:

$$q_0 = i \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (4)$$

该光束从镜 M_0 输出,再经 M_6 的前表面反射,到达 M_0 的内表面中心,其复参数为:

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (5)$$

A, B, C 和 D 的值由下式决定:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_{0x}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

因此,注入光束在 M_0 的内表面中心处的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \left[B^2 + \left(A \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

和

$$R_1 = \frac{\lambda^2 B^2 + (A \pi \omega_0^2)^2}{\lambda^2 B D + A C (\pi \omega_0^2)^2} \quad (7)$$

该光束沿着对称轴再经过距离为 L_i 的自由空间后,在 M_1 所在面的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega_2 = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \left[(B + DL_i)^2 + (A + CL_i)^2 \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{和 } R_2 = \frac{\lambda^2 (B + DL_i)^2 + (A + CL_i)^2 (\pi\omega_0^2)^2}{\lambda^2 BD + AC(\pi\omega_0^2)^2 + C^2(\pi\omega_0^2)^2 L_i + \lambda^2 D^2 L_i} \quad (8)$$

2.2 注入源光束对折叠腔振荡模的相位锁定研究

以 M_2 为参考面,注入光束在折叠腔内往返一次的传输矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_i} & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其稳定性条件为:

$$0 < \left| \frac{A_1 + D_1}{2} \right| < 1 \quad (10)$$

满足这个条件的折叠腔为稳定腔,其本征模为高斯光束,且在 M_0 内表面中心处的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} [L_i(\rho_i - L_i)]^{\frac{1}{4}} \text{ 和 } R_0 = \infty \quad (11)$$

在 $M_i (i=2,3)$ 处的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega_i = \left(\frac{\lambda L_i \rho_i}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{L_i(\rho_i - L_i)} \right]^{\frac{1}{4}} \text{ 和 } R_i = \rho_i \quad (12)$$

以上介绍了折叠腔本征模的参数,为了相位锁定折叠腔的振荡,注入的模必须与折叠腔的本征模相同或者非常接近,为了确定注入源光束的特性,并且确定激发折叠腔本征模的耦合系数,设 $\rho_i = \rho$, $L_i = L (i=1,2,3)$, 镜 M_1, M_2, M_3 的中心位于同一球面 M' 上,如图2所示。

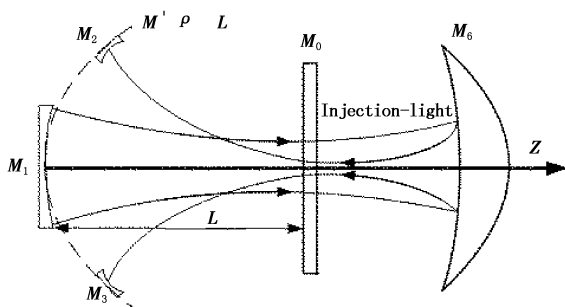


图2 用于计算注入模分别与折叠腔的本征模、平凹腔

$M_0 - M'$ 的本征模耦合系数的等效图

因此,新的平凹腔 $M_0 - M'$ 在 M_0 内表面中心处

的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega'_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} [L(\rho - L)]^{\frac{1}{4}} \text{ 和 } R'_0 = \infty \quad (13)$$

在 M' 处的光斑半径和等相位面曲率半径分别为:

$$\omega' = \left(\frac{\lambda L \rho}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{L(\rho - L)} \right]^{\frac{1}{4}} \text{ 和 } R'_0 = \rho \quad (14)$$

式(11)、(12)和式(13)、(14)完全相同,也就是激发腔 $M_0 - M'$ 和腔 $M_2 - M_0 - M_3$ 的本征的参数特性相同,并且从以上所设的参数可知, $\omega_0 = \omega'_0 = 1.124\text{mm}$, $\omega_i = \omega' = 4.3527\text{mm}$ 。因此,沿着对称轴进入腔 $M_0 - M'$ 的注入光波所激发的耦合系数实际上就是激发腔 $M_2 - M_0 - M_3$ 的耦合系数。由于高阶模的光束质量相对较差,本文仅研究基模的相位锁定,激发基模的耦合系数^[7]为:

$$c_{00} = \sqrt{\frac{2}{\omega\omega'\rho}} \quad (15)$$

其中

$$\rho = \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\omega'^2} + i \frac{k}{2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) \quad (16)$$

在这里, ω 和 R 分别是注入光束的光斑半径和等相位面曲率半径; ω' 和 R' 分别是本征光束的光斑半径和等相位面曲率半径,为方便计算,我们分别取式(8)和式(14)的值。需要特别指出的是,当式(16)中 $R' \approx R$, 其虚部的值可以忽略,当 $c_{00} \approx 1$ 时,虚部的值反映模式不完全匹配所带来的波前畸变。因此,如果我们取不同的 ρ_{0x} , 注入模与本征模的耦合效果也不一样。所以,控制镜 M_6 的前表面的曲率半径 ρ_{0x} 的合理选择,对模耦合有重要的作用,耦合系数的值反映了相位锁定的程度,即注入模对折叠腔振荡模控制的程度,在这里我们取 $\rho_{0x} = 0.35\text{m}$, $\omega_2 \approx 3\omega_i$ 来研究相位锁定效果。图3反映了耦合系数 c_{00} 与 M_6 的前表面的曲率半径 ρ_{0x} 的变化情况。

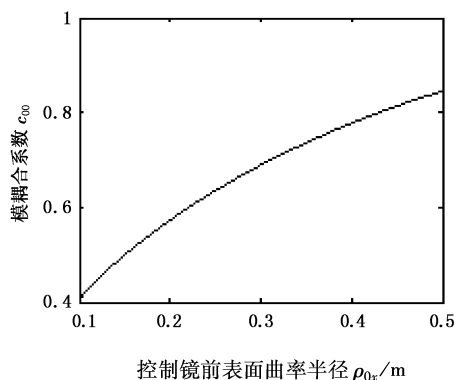


图3 耦合系数随控制镜前表面曲率半径变化的关系曲线图

3 输出光束特性分析

根据假设①和第1节、第2.2节的讨论,我们可以知道,注入模能控制折叠腔的振荡,并且来自腔 $M_0 - M_1$ 和 $M_2 - M_0 - M_3$ 的三束高斯光束经平面镜 M_0 输出,再经控制镜 M_6 聚焦后,这三束高斯光束的束腰在同一平面 a 内(如图4所示),它们的轴线都平行于 z 轴,束腰光斑的中心为 O_m ,半径为 ω_{0m} ($m=1,2,3$),并且相互之间有固定的位相关系。

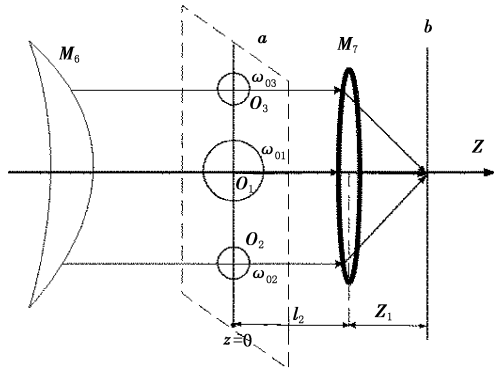


图4 用于计算输出光束光强分布的几何光路图

在这里需要特别指出的是, ω_{0m} 为平面 a 内三束高斯光束的束腰半径,该值可以通过第2节所设定的参数求解,经计算 $\omega_{01} = 1.6354\text{mm}$, $\omega_{02,3} = 0.51141\text{mm}$,因此,如果我们把 a 平面的坐标设为 $z=0$,这三束高斯光束在这个平面内的场分布的表达式很简单,而且,它们经整形镜 M_7 聚焦后,其场分布也很容易求解。

3.1 相位锁定输出光强的计算

如图4所示,来自放电管①、②、③的输出高斯光束在平面 a 内的场分布分别为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1m}(x_1, y_1, z=0) \\ = A_{0m} \exp \left[-\frac{(x_1 - d_m)^2 + y_1^2}{\omega_{0m}^2} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, A_{0m} 为高斯分布常数;为方便计算,我们取 $A_{0m} = 1$; $m=1,2,3$,且根据第1节和以上的分析可知, $d_1=0$, $d_2=-5\text{mm}$, $d_3=5\text{mm}$ 。这三束光从平面 a 分别经距离为 l_2 的自由空间、会聚透镜 M_7 聚焦后,在焦平面 b 内的场分布可以通过 Collins 积分公式^[8]表示为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2m}(x, y) = -\frac{ikL}{\lambda B'} \iint_a \varepsilon_{1m}(x_1, y_1) \cdot \exp \left\{ \frac{ik}{2B'} [A' \cdot \right. \\ \left. (x_1^2 + y_1^2) + D'(x^2 + y^2) - 2(x_1x + y_1y)] \right\} dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (18)$$

其中, L 是平面 a, b 之间的距离; k 为波数; A', B', C' 和 D' 的值由下式决定:

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z_l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

我们研究相位锁定光束被 M_7 整形后的光强分布,为方便计算,我们取 $l_2 = f = z_l = 5\text{cm}$,需要特别指出的是,我们这样取值只会改变光场的相对分布,而不会引起实质性变化。经计算,式(18)与下式等价:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2m}(x, y) = \frac{k\omega_{0m}^2 \cdot \exp(ikL - \frac{d_m^2}{\omega_{0m}^2})}{(kA'\omega_{0m}^2 + 2B'i)} \cdot \\ \exp \left[\frac{ikD'}{2B'}(x^2 + y^2) \right] \cdot \\ \exp \left[\frac{(ikx\omega_{0m}^2 - 2B'd_m)^2 + (iky\omega_{0m}^2)^2}{2B'\omega_{0m}^2(ikA'\omega_{0m}^2 - 2B')} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

根据前面的分析,这三束光满足相干叠加条件,因此,平面 b 内的光强分布为:

$$I(x, y) = (\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{23}) \cdot (\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{23})^* \quad (21)$$

图5分别展示了平面 b 内的光强分布以及光斑轮廓。

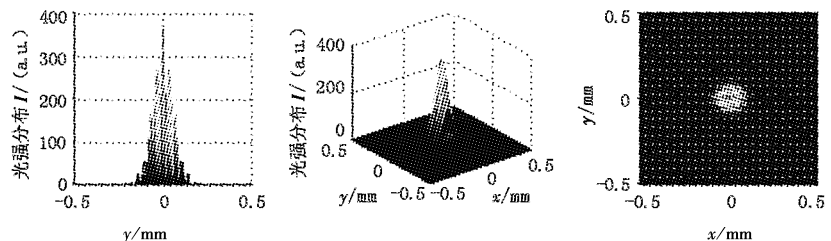


图5 相位锁定后的三束光束经会聚透镜聚焦后在焦平面上的光强分布和光斑轮廓图

从图5我们可以看出,三束高斯光束经过会聚系统后,在焦平面内的分布仍然为高斯分布,并且有干涉条纹出现,说明相位锁定能够提高输出光强的相对值,从而我们可以获得更小的光斑,从图中还可

以看出光斑半径为 $\omega = 0.15\text{mm}$, 由能量守恒可知, 光束经相位锁定后, 输出能量更加集中了。

3.2 相位锁定光束的环围能量

根据第3.1节的分析, 在这里我们把环围能量 η 定义为在光斑范围内包围的功率与总的输出功率的比值, 即:

$$\eta = \frac{\int_0^{2\pi\omega} I(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi\infty} I(r, \theta) r dr d\theta} \quad (22)$$

其中, ω 为相位锁定后的光束被 M_7 聚焦后在 b 平面内的光斑半径; $I(r, \theta)$ 是式(21)的极坐标表示式。需要特别指出的是, 这里的光斑半径 ω 是定义在场衰减到基模振幅最大值的 $1/e$ 处的光斑尺寸。对于基模高斯光束, 我们还可以用 86.5% 环围功率, 二阶矩^[9]来定义光斑半径, 对于其他光束, 用不同的定义会出现不同的结果。图6给出了环围能量随光斑半径的变化关系。

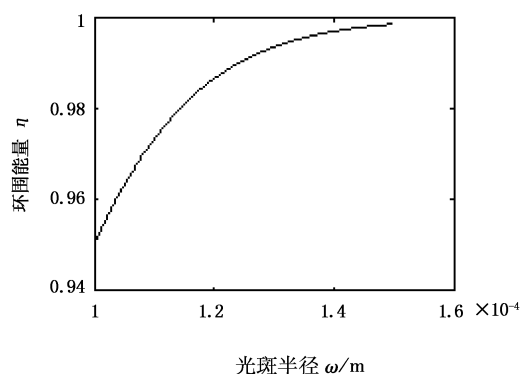


图6 环围能量随光斑半径的变化关系曲线图

从图6可知, 在半径为 $0 \sim 0.1\text{mm}$ 内的能量占总能量的95%以上。需要特别指出的是, 在图5和式(22)中的光斑半径 ω 并不是唯一的, 该值与式(19)中的 f, z_l 有关, 也就是说只要我们选择不同的整形镜 M_7 , 能量集中的范围也不一样, 景深也不一样。在激光工业技术中, 不同的应用, 我们将选择不同的整形镜。

4 结论

从以上的分析可知, 当折叠腔放电管长度为 1.4m , 凹面镜曲率半径为 1.5m , 控制镜前表面曲率半径为 0.35m 时, 这样得到的耦合系数为 0.75 左

右, 需要特别说明的是, 我们这样得到的耦合系数虽然相对较低, 但是由于注入光斑较大, 使每个放电管内的注入信号较大, 因此有更好的相位锁定效果。对于输出特性, 只要我们合理选择控制镜的焦距及其位置, 就使相位锁定后的光束经整形镜后的光强有很大的峰值和很小的光斑(如图5所示), 并且从环围能量的计算可以知道, 能量主要集中在很小的区域内(如图6所示), 选择不同的整形镜, 这个区域将不同, 这样的结果可以应用于激光打孔、焊接等工业上。

本文没有用 M^2 因子来评价相位锁定后的输出光束的特性, 是因为单独用每一束光的 M^2 因子来评价输出光束质量还是有些牵强。光束质量的评价还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] N G Basov, E M Belenov, V S Letokhov. Diffraction synchronization of lasers [J]. Sov. Phys. Tech. Phys., 1965, 10:845-850.
- [2] H L Stover, W H Steier. Locking of laser oscillators by light injection [J]. Appl. Phys. Lett., 1966, 8:91-93.
- [3] Carl J Buczek, Robert J Freiberg. Hybrid injection locking of higher power CO₂ lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 7, (8):641-650.
- [4] E F Yelden, H J J Seguin, C E Capjack, et al. Phase-locking phenomena in a radial multislot CO₂ laser array [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1993, 10(8):1475-1482.
- [5] F R Ruiz-Oliveras, A N Pisarchik. Phase-locking phenomenon in a semiconductor laser with external cavities [J]. Optics Express, 2006, 14(26):12859-12867.
- [6] Yude Li, Jinglun Liu, Mei Chen, et al. Axisymmetric-fold combination laser resonator [J]. Optical Engineering, 2005, 44(6):064204.
- [7] 魏光辉, 朱宝亮. 激光束光学 [M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1987:203-205.
- [8] 吕百达. 激光光学 [M]. 第2版. 成都: 四川大学出版社, 1992:53-55.
- [9] 吕百达. 激光光学 [M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2002:77.