

# CO<sub>2</sub> 激光器光注入效应及其奇怪吸引子

常胜江 傅汝廉 巴恩旭

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**提要** 实验上对单纵模、多横模连续 CO<sub>2</sub> 激光器由注入光引起的混沌运转进行了研究。利用微分重构相空间法对系统在演化成混沌态时的相空间轨道进行了观测, 并首次观察到在注入光条件下不同横模结构所对应的形状各异的奇怪吸引子, 通过分析它们的结构对由光注入引起非稳性的物理机制进行了讨论。

**关键词** 光注入效应, 微分图相空间, 奇怪吸引子

## 1 引 言

近年来, 激光器混沌作为混沌研究的一个分支一直十分活跃, 观测到激光输出自脉动、周期和准周期以至混沌运转的实验已扩展到各种各样的激光系统, 其中单模 CO<sub>2</sub> 激光器的研究占了很大的比重。

对于属于 B 类的 CO<sub>2</sub> 激光器, 由于极化强度被绝热消去, 自由度少于 3 个, 因此要实现混沌运转需至少增加一个额外的自由度。这可以通过以下方法来实现: 1) 调制某个参数, 使激光系统成为非自治系统<sup>[1~4]</sup>。2) 增加激光模式数目, 可以通过应用双向环形激光腔来实现<sup>[5]</sup>。3) 注入外场。方法(3)是实现 CO<sub>2</sub> 激光器混沌运转的一种非常重要的方法。F. T. Arecchic 等人<sup>[6,7]</sup>对注入同频率光的激光系统进行了理论探讨, 预言了几种道路, 但却没有对其相空间图形特别是相空间中的奇怪吸引子进行相应的理论探讨, 而混沌吸引子的获得与观测又是混沌研究中极为重要的内容。本文采用单纵模、多横模连续 CO<sub>2</sub> 激光器对光注入引起的非稳性进行了详细的实验研究。对于某些不出现混沌的横模结构施加注入光, 通过改变注入光强度和注入光频率与激光器腔内光场频率的失谐量(detuning), 发现系统通过 Ruelle-Takens 道路和阵发道路到达混沌。同时我们也发现在一定的横模结构条件下, 系统可由倍周期分岔和双频过程组成的“混合道路”到达混沌。另外, 我们还利用微分重构相空间法对系统在演化成混沌态时的相空间轨道进行了观测, 并获得了几种不同结构的奇怪吸引子, 通过分析它们的结构对由注入信号所引起的非稳性进行了定性的分析。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。

收稿日期: 1993 年 7 月 5 日, 收到修改稿日期: 1993 年 8 月 30 日

实验所用的主激光器(1和2组成)是具有均匀展宽的连续输出  $\text{CO}_2$  激光器,谐振腔长 1 m,输出波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ,基模输出功率为 15 W,激光器由花岗岩基座、石英放电管(管长 800 mm,内径 7.8 mm)、凹面镀金镜(反射率 96%,曲率半径 1.7 m)、平面输出镜(透过率 50%)等组成。整个装置放在防震台上,具有良好的机械稳定性和热稳定性。放电管内总气压为 2.66 kPa,压力展宽约为 130 Hz,纵模间隔约为 150 MHz,从而保证了激光单纵模运转。通过调节腔镜 1 的倾斜度可以改变激光横模结构。用于注入信号的激光器为一台小型  $\text{CO}_2$  激光器(仅可调节放电电流),放电电流可调范围为 2.5~10 mA,最大输出功率为 2 W,它的输出光通过主激光器的 Brewster 窗注入主激光器。主激光器的输出光被分束器 4 分成两束,一束照射到热敏记录纸 5 上以记录激光的横模结构;另一束经透镜 6 扩束后,由碲铬汞高频红外探测器 7 接收,再经前置放大器 8 之后,分别输入到 TF2370 型频谱分析仪 9 和 2232 双踪存储示波器 10。由频谱仪可以随时观测激光输出的功率谱。选用双踪示波器 X-Y 显示模式,X 轴直接输入光电信号,与此同时 Y 轴输入经微分运算后的光电信号,即可观察到实时的相图。

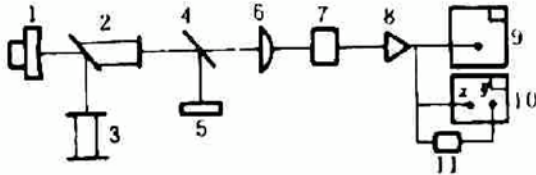


Fig. 1 Experimental set-up

1—golded convave total reflecting mirror; 2— $\text{CO}_2$  laser tube; 3— $\text{CO}_2$  laser (as an injected light source); 4—beam splitter; 5—thermal sensitive paper; 6—beam expander; 7—detector; 8—amplifier; 9—TF2370 spectrum analyser; 10—2232 storage oscilloscope; 11—RC current

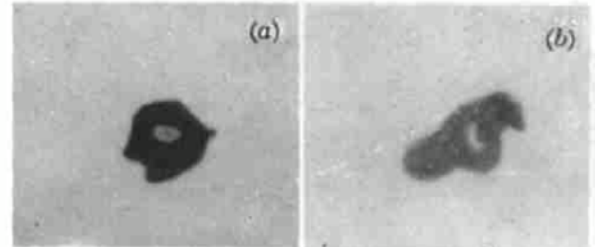


Fig. 2 Light injection changes the transverse

distribution of light field

(a) light spot without injected light;

(b) light spot with an appropriate injected light

### 3 实验结果

在实验中首先将主激光器的放电电流固定于 11.5 mA。通过调节注入光强度和注入光频率与主激光器腔内光场频率的失谐量(通过改变主激光器的腔长实现),观测到系统由稳态渐渐非稳直至发展成混沌态。

#### 3.1 “混合道路”的观察

首先,无注入光时,调节主激光器腔镜(1)的倾角,使之输出光场的横向分布具有如图 2(a)所示的结构;加上一适当强度的注入光后,光场横向分布发生了明显的变化,如图 2(b)所示,这说明外部光的注入引起腔内光场分布的变化。

在图 2(b)的横模结构下,固定注入激光器的放电电流为 6.5 mA,仅以频率失谐量为控制参数,图 3 记录了功率谱和相空间轨迹随腔长的精细调节的变化过程。

首先系统为稳态运转,相空间轨迹为一不动点[图 3(a')].随着失谐量的增大,系统失稳出现频率为  $f_1$ (14.8 MHz)的尖峰,相应的相空间轨迹为一极限环[图 3(b')].进一步增大失谐量,频谱上出现  $f_1$  的倍周期分岔(7.4 MHz)[图 3(c)],图 3(c')为其相空间轨迹,表现为有公共交点的两个环。随着失谐量的增大,出现频率  $f_2$ (6.8 MHz)及与  $f_1$  的混频[图 3(d)],频谱变

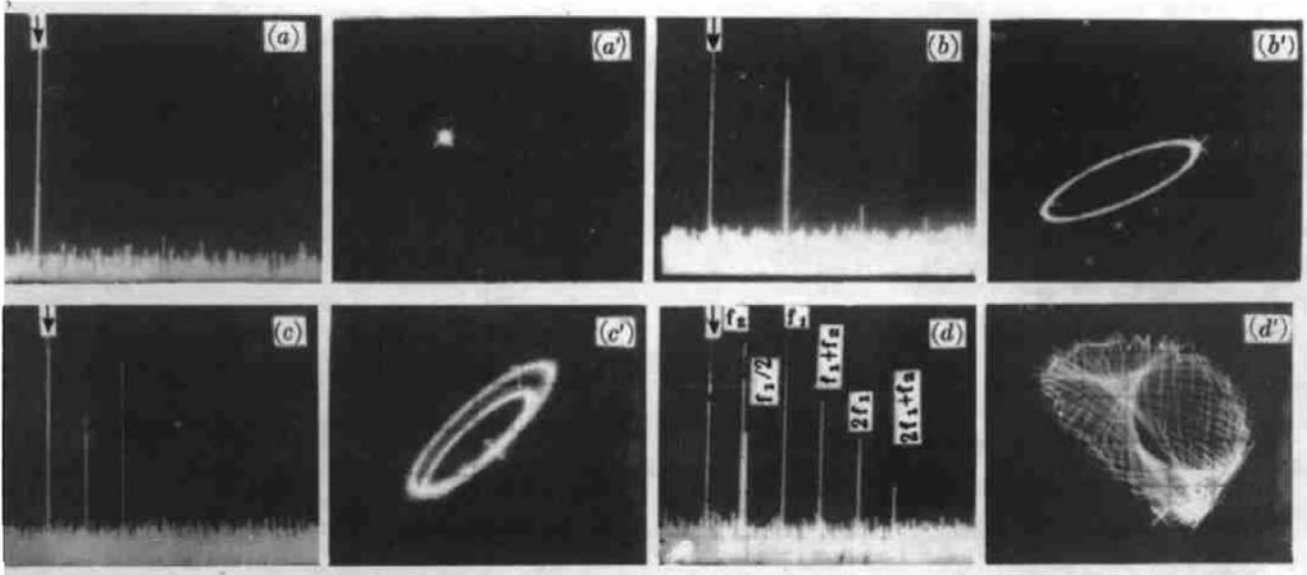


Fig. 3 Frequency spectra [(a) — (d)] and phase-space pictures [(a') — (d')] of the output light evolve along “mixed route” to chaos. (a) — (d) and (a') — (d') correspond to the process of tuning the detuning or intensity of injected light, in the above spectral pictures, “↓” marks the zero frequency

得复杂多变,表现为混沌所特有的展宽带。在相空间中得到系统的奇怪吸引子[图 3(d')],其几何结构表现为折迭扭曲、错综复杂而又不失整体的稳定,与之类似的理论计算的奇怪吸引子还未见报道。

图 3 表明系统是经 Ruelle-Takens 道路到达混沌的,但  $f_1/2$  具有倍周期分岔的特性,两种道路同时出现,我们称之为“混合道路”。

保持腔长不变,仅调节注入激光器的放电电流为控制参数,当放电电流下降至 4.7 mA 时,频率  $f_2$  消失,系统输出的频谱成份仅有  $f_1$  与  $f_1/2$ [图 3(c)]。当放电电流下降至 4.4 mA 时,  $f_1/2$  频率成份消失[图 3(b)]。继续减小放电电流至 3.9 mA 时,系统变为稳态运转[图 3(a)]。这说明注入光强度同频率失谐量一样是控制系统输出特性的一个重要参数。

### 3.2 奇怪吸引子的观测

实验中,在不同的腔镜的倾角条件下,通过调节谐振腔的腔长(相当于改变主激光器频率与注入激光器频率的失谐量)或注入光强度(调节同上),由光注入引起混沌运转,在微分图相空间中得到 CO<sub>2</sub> 激光器系统的多种奇怪吸引子,如图 4(a) ~ 4(d)。图 4(a') ~ 4(d') 为其对应的激光横模光斑花样,图 4(a'') ~ 4(d'') 为相应的功率谱。图 4(a) ~ 4(d) 的几种奇怪吸引子都是在注入光大于一强度的条件下获得的,它们对应的注入激光器的放电电流  $I$  的最低值分别为:  $I_a = 5.1$  mA,  $I_b = 4.9$  mA,  $I_c = 5.3$  mA,  $I_d = 5.1$  mA, 下标 a, b, c, d 分别对应图 4(a), 4(b), 4(c), 4(d)。

由图可知,不同的奇怪吸引子有不同的横模结构,有不同的功率谱,说明在光注入的情况下,不同的光场横向分布有着各异的动力学结构,可导致不同的奇怪吸引子。图 4(a) 类似于 Rossler 吸引子<sup>[8]</sup>,有永不封闭的近似圆周轨道。图 4(b) 类似于计算机实验的 Lorenz 吸引子<sup>[9]</sup>,运动轨道围绕两个吸引点运动,似乎很随机地在两个吸引点之间跳跃。图 4(c) 类似于强迫负阻尼振子的奇怪吸引子<sup>[10]</sup>,也存在两个吸引点。对于图 4(d),还未见报道与之类似的数学计算得出的奇怪吸引子。图 4(a) ~ 4(d) 给出的所有奇怪吸引子,皆整体稳定且总体结构比较简单,定性判断为低维吸引子( $D < 3$ )。从图 4(a''), 4(b''), 4(d'') 这些频谱结构不难看出,激光系统是

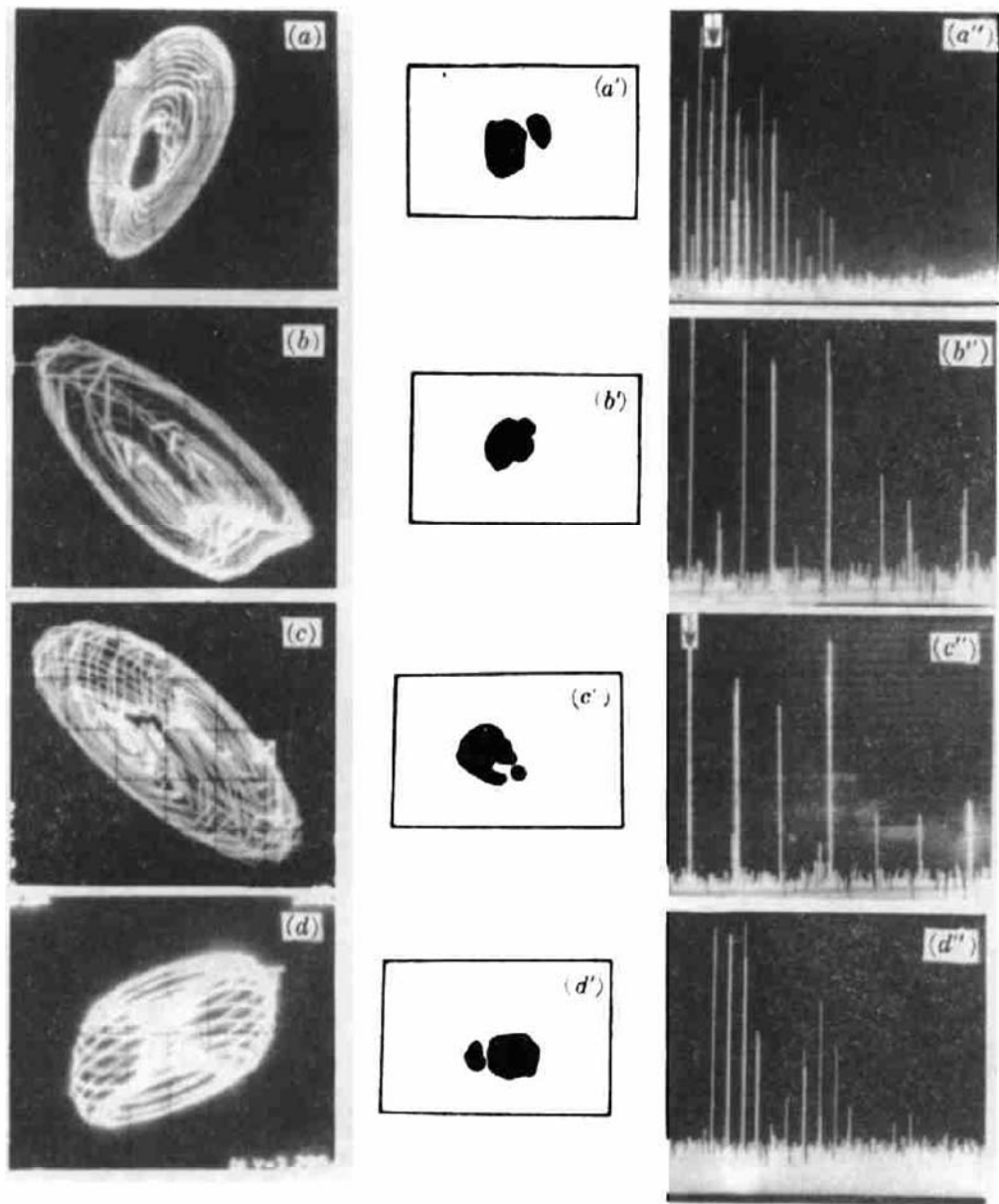


Fig. 4 (a) - (d) are the strange attractors of laser system caused by injected light with discharge current of injecting laser :  $I_a \geq 5.1 \text{ mA}$ ,  $I_b \geq 4.9 \text{ mA}$ ,  $I_c \geq 5.3 \text{ mA}$ ,  $I_d \geq 5.1 \text{ mA}$ . (a') - (d') are the light spots corresponding to (a) - (d) strange attractors. (a'') - (d'') are the frequency spectra of the output light corresponding to (a) - (d) strange attractors, in the above spectral picture, "↓" marks the zero frequency

经 Ruelle-Takens 路径到达混沌的。在实验过程中我们发现当所有的参数保持不变时,图 4 (d'') 的功率谱时而周期振荡(如图 5 所示),时而混沌运转,并随机在两者之间跳跃,表现为阵发混沌状态 (Intermittent chaos)。同时需要特别注意的是图 4 (c''),由这个功率谱图看出,系统是在基频的基础上产生 3 倍周期而到达混沌的。

#### 4 光注入导致激光器混沌运转机制的讨论

$\text{CO}_2$  激光器为典型的 B 类激光器,在绝热近似下,其 Maxwell-Bloch 方程组中,关于电极化强度的方程被绝热消去,只保留光场和粒子布居的两个自治方程,而二元自治方程组是不具备混沌现象的。无注入光时,主激光器输出的光斑花样表明,其特定横向分布的光场是不横模间

耦合的结果,加上注入光后,由于注入光的频率与激光器腔内光场的频率相差非常小,以至注入光不仅能在腔内维持振荡,而且能够与激光器的内腔场进行耦合,这种耦合导致激光场横向分布结构的变化,这一现象我们在实验中已经观察到。由于光场、粒子数反转布居、注入光强度和注入光频率与激光器腔内光场频率的失谐量之间存在着非线性的耦合。如果其中一参变量(注入光强度或失谐量)发生变化,就会引起光场、粒子数反转布居的重新分配,这种重新分配表现为光场和反转布居之间耦合条件的变化,进而改变了场的横向分布。当这种耦合满足一定的条件时,系统的输出就会发生质的变化,表现为非稳定性乃至混沌运转。在实验中,值得注意的是每个混沌频谱中都有其清晰可见的基脉冲频率。我们认为这些基频产生于激光器腔内场与注入光间的复杂耦合及竞争,所产生的包含有注入光频率与主激光器腔内场频率差拍项的周期力再施加于自身,于是激光系统成为二元非自治方程组,从而产生混沌运转。也正基于此,激光器的奇怪吸引子有相似于强迫系统的吸引子。而两光场之间的不同耦合方式,其动力学方程理当有不同的形式、不同的参数空间,也即会形成各异的奇怪吸引子。

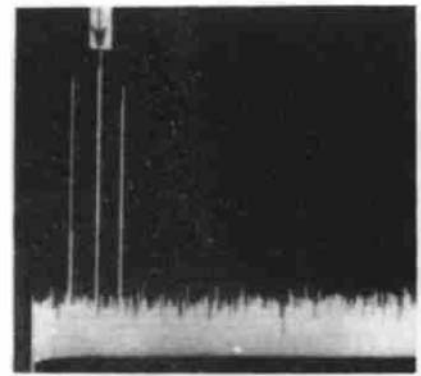


Fig. 5 Sometimes the system output appears periodic oscillation

### 参 考 文 献

- 1 F. T. Arecchi, R. Meucci, G. P. Puccioni *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**: 1217~1220
- 2 F. T. Arecchi, W. Gadomski, R. Moucci, *Phys. Rev.*, 1986, **A34**: 1617~1620
- 3 Dhruva J. Biswas, Vas Dev, U. K. Chatterjee, *Phys. Rev.*, 1987, **A35**: 456~458
- 4 Thierry Midavaine, *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**: 1989~1992
- 5 L. A. Lugiato, Presented at the Workshop on Chaotic and Pulse Instabilities, Schloss Elmau, Federal Republic of Germany, May, 1984
- 6 F. T. Arecchi, G. P. Puccioni, J. R. Tredicce, *Opt. Commun.*, 1984, **51**: 308~314
- 7 J. R. Tredicce, F. T. Arecchi *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **B2**: 173~183
- 8 O. E. Rossler, *Phys. Lett.*, 1976, **A57**(5): 397
- 9 J. Gleick, *Chaos*. Viking Penguin Inc., New York, 1988. 151~169
- 10 A. V. Holden, *Chaos*, Manchester University Press, Oxford Road Manchester M139PL, UK, 1986. 32~34

## Light Injecting Effect and Strange Attractors in a CO<sub>2</sub> Laser

Chang Shengjiang Fu Rulian Ba Enxu

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** Chaos operation in a single-longitudinal mode, multi-transverse mode CW CO<sub>2</sub> laser caused by injected light have been studied experimentally. Trajectories in phase-space, which of system evolving into chaos, are observed by differential reconstructing phase-space picture method, and some various-shape strange attractors are observed for the first time. The mechanism of laser instabilities is discussed.

**Key words** light injecting effect, phase-space picture, strange attractors