

光场横向效应导致 CO₂ 激光器混沌 运转的实验研究*

陈南鹏 张立根 吕可诚 傅汝兼 巴恩旭
(南开大学 现代光学研究所,天津)

提 要

对横向效应导致单纵模多横模 CO₂ 激光器失稳进行了实验研究。观测到了经各种途径到达的激光混沌态,并对其物理机制进行了探讨。

关键词: 激光混沌,光场横向效应。

一、引 言

近年来,关于连续运转 CO₂ 激光器不稳定性的研究已有不少报道^[1~7]。最近,人们开始认识到激光场的横向变化可能是引起激光不稳定性的一个重要原因,因为引入横向自由度会使平面波麦克斯韦-布洛赫(Maxwell-Bloch)方程发生显著变化。高锦岳^[8]、Abrabam^[9]和 Hollinger^[10]等人分别用不同的简化模型对横向效应进行了初步的理论探讨,但迄今未见充分的实验论据。本文在没有外加调制的情况下,对单纵模多横模直流放电 CO₂ 激光器的横向效应进行了一系列的实验研究,首次发现该系统能达到混沌运转。在调节激光参数的过程中,系统由稳态逐步发展到混沌态。其演化过程主要表现为 Ruelle-Takens 途径和阵发混沌途径。在某些参数范围内,Ruelle-Takens 途径和倍周期途径混杂出现,最后达到混沌。分析表明,光场和反转粒子数布居(以下简称反转布居)的横向分布是产生激光不稳定性的主要根源。

二、实验装置

实验装置如图1所示。自制的半内腔 CO₂ 激光器的谐振腔长 L 约为 1 m, 输出波长为 10.6 μm , 基模输出功率为 20 W。激光器由花岗岩基座、石英放电管(管长 800 mm, 内径为 7.8 mm)、可调孔径光阑、可调节支架、压电陶瓷、平面光栅和凹面反射镜等组成。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,作为输出镜的平面光栅固定在压电陶瓷上,压电陶瓷的长度调节范围是 10 μm , 相应的纵模频率变化范围约为 300 MHz; 全反射镜为凹面镀金反射镜,其反射率为 96%, 曲率半径为 1.7 m; 腔内放入可变光栅,其口径在 3.44~10.14 mm 范围内可调,用来获得所需的横模输出; 放电管内总气压为 20 Torr, 相应

收稿日期: 1989年3月8日; 收到修改稿日期: 1989年8月30日

* 国家自然科学基金会资助的课题。

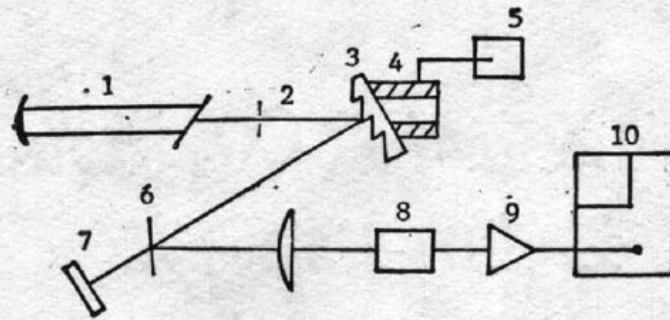


Fig. 1 Experimental arrangement

1. discharge tube; 2. aperture; 3. grating; 4. piezoelectric crystal; 5. DC power source; 6. beam splitter; 7. thermal sensitive paper; 8. detector; 9. amplifier; 10. spectrum analyser

的压力展宽约为 130 MHz, 而谐振腔的纵模间约为 150 MHz, 从而保证激光器单纵模运转。

输出光信号被分束器分为两束, 一束照射到热敏记录纸上, 以记录横模结构; 另一束经透镜扩束后, 入射到碲镉汞高频红外探测器 (type HGF-1) 上, 其输出电信号经高频前置放大器放大后输入到射频频谱分析仪 (Marconi TF2370), 以观测输出光的功率谱。

三、实验结果

在实验中首先将腔内光阑孔径调至适当大小, 以控制横模结构。仔细调节激光参数 (腔长、腔倾角和放电电流), 观测到系统通过不同途径到达混沌。



Fig. 2 Light spot

(1) 放电电流 9.9 mA, 腔内光阑孔径 7.48 mm。横模结构如图 2 所示。精细调节压电陶瓷的伸缩从而实现腔长 L 的精细调节, 图 3 是频谱分析仪显示的激光功率谱。表 1 给出了其中各尖峰的测量及相互关系。由图 3 可知, 当压电陶瓷上未加电压、腔长变化 $\Delta L=0$ 时, 系统为稳态运转; 当腔长增长至 $1.4 \mu\text{m}$ (相当于 42 MHz 的变化), 频率为 f_1 的尖峰开始出现, 如图 3(b) 所示; 进一步增大腔长 ($\Delta L=51 \text{ MHz}$), 出现第二个频率为 f_2 , 如图 3(c) 所示; 并在 $\Delta L=75 \text{ MHz}$ 时, 产生 f_1 与 f_2 的混频, 如图 3(d) 所示; 当腔长变化量为 81 MHz

开始出现, 如图 3(b) 所示; 进一步增大腔长 ($\Delta L=51 \text{ MHz}$), 出现第二个频率为 f_2 , 如图 3(c) 所示; 并在 $\Delta L=75 \text{ MHz}$ 时, 产生 f_1 与 f_2 的混频, 如图 3(d) 所示; 当腔长变化量为 81 MHz

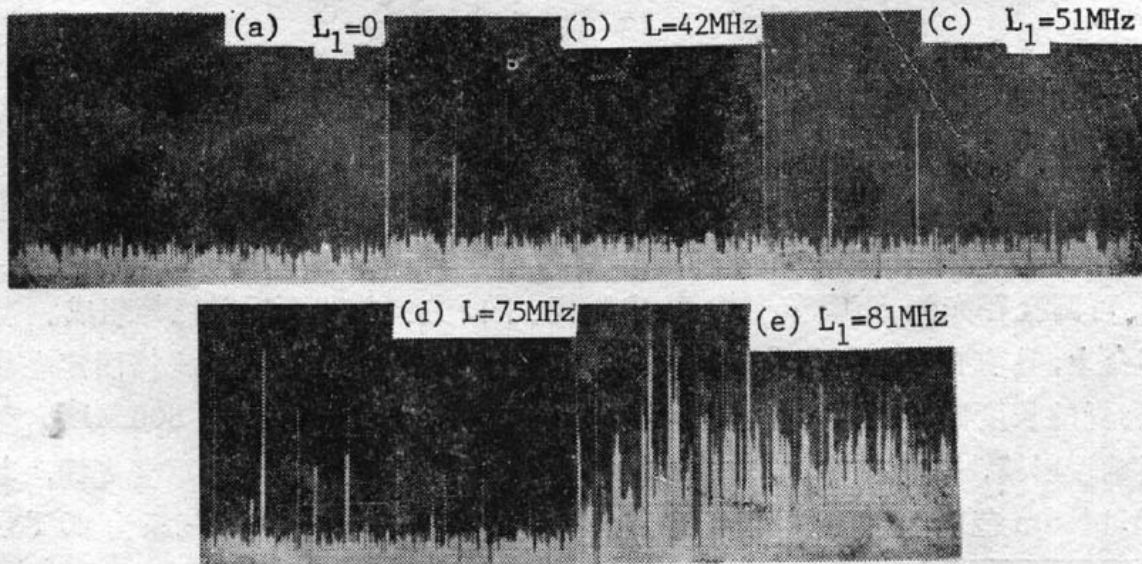


Fig. 3 Frequency spectrum of output light evolves along Ruelle-Takens route
(a)~(e) corresponds to the process of finely increasing cavity length

table 1 frequency of peaks in Fig. 3(a)-3(d)

photo number	peak number (from left to right)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	measurement data												
(a)	frequency(MHz)		0										
	relationship												
(b)	frequency(MHz)		0	10.4									
	relationship			f_1									
(c)	frequency(MHz)		0	10.4	20.9	28.2	56.1						
	relationship			f_1	$2f_1$	f_2	$2f_2$						
(d)	frequency(MHz)		0	7.6	10.4	17.6	20.9	28.2	38.7	46.0	49.2	56.1	66.7
	relationship			f_2-2f_1	f_1	f_2-f_1	$2f_1$	f_2	f_1+f_2	$2f_2-f_1$	$2f_1+f_2$	$2f_2$	f_1+2f_2

table 2 frequency of peaks in Fig. 5(a)-5(e).

photo number	peak number (from left to right)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	measurement data																			
(a)	frequency(MHz)		0	20.1																
	relationship			f																
(b)	frequency(MHz)		0	16.0	20.1	36.1														
	relationship			f_1-f_1	f_1	f_2														
(c)	frequency(MHz)		0	6.2	16.0	20.1	22.4	36.1	42.3											
	relationship			f_2	f_1-f_1	f_1	$f_2+f_1-f_1$	f_2	f_2+f_1											
(d)	frequency(MHz)		0	3.0	6.2	12.3	16.0	20.1	22.4	23.9	30.1	33.1	36.1	39.3	42.3					
	relationship			$\frac{1}{2}f_1$	f_1	$2f_1$	f_1-f_1	f_1	$f_2+f_1-f_1$	f_2-2f_1	f_2-f_1	$f_1-\frac{1}{2}f_1$	f_2	$f_2+\frac{1}{2}f_1$	f_2+f_1					
(e)	frequency(MHz)		0	3.0	6.2	9.3	12.3	16.0	20.1	22.4	23.9	27.0	30.1	33.1	36.1	39.3	42.3	45.5	48.7	
	relationship			$\frac{1}{2}f_1$	f_1	$\frac{3}{2}f_1$	f_2-f_1	f_2-f_1	f_1	$f_2+f_1-f_1$	f_2-2f_1	$f_2-\frac{2}{2}f_1$	f_2-f_1	f_2-f_1	$f_2-\frac{1}{2}f_1$	f_2	$f_2+\frac{1}{2}f_1$	f_2+f_1	$f_2+\frac{3}{2}f_1$	f_2+2f_1

时, 频谱变得复杂, 表现为混沌态所特有的展宽带, 如图 3(e) 所示。这一实验结果清楚地表明, 在精细调节腔长过程中, 激光输出从稳态经由 Ruelle-Takens 途径到达混沌态。它的特点是, 由单个周期振荡过渡到双周期振荡(即有两个不可约的振荡频率), 随后出现该两频率的混频, 最终发展到混沌态。图 2 的复杂光斑花样表明, 上述演化过程是在多横模叠加的前提下实现的。

(2) 当系统各参数被调节到一定状态并固定不变时, 观测到激光输出强度时而周期变化, 时而呈现混乱状态, 随机地在两者之间跳跃, 表现为阵发型混沌状态。



Fig. 4 Light spot

(3) 腔内光阑孔径 8.44 mm, 横模结构如图 4 所示, 放电电流 11 mA。精细调节腔长观测到如图 5 所示的变化过程。表 2 为其中各尖峰的频率值及相互关系。从中可以看到, 随着腔长的单向变化依次出现下列过程: $\Delta L=0$ 时, 显示 f_1 如图 5(a) 所示; $\Delta L=54$ MHz 时, 显示 f_1, f_2, f_2-f_1 如图 5(b) 所示; $\Delta L=72$ MHz 时, 显示 $f_1, f_2, f_3, f_2+f_1, f_1+f_2+f_3$ 如图 5(c) 所示; $\Delta L=93$ MHz 时, 显示 $f_2, f_3, f_3/2$ 及各阶和差频, 如图 5(d) 所示; $\Delta L=108$ MHz 时, 显示 $f_1, f_2, f_3, (f_3/2), (3f_2/2)$

及各阶和差频, 如图 5(e) 所示。 $\Delta L=120$ MHz 时, 显示展宽带如图 5(f) 所示。其中 f_1, f_2, f_3 三个频率依次出现, 并不断产生和频与差频, 最后到达混沌态, 是明显的 Ruelle-Takens 途径; 而 $f_3, (f_3/2), (3f_3/2)$ 则表现为倍周期道路。两条道路同时出现, 不妨称之为“混合道路”。至于倍周期道路表现得不完整, 是由于此时系统沿 Ruelle-Takens 途径已发展到混沌态, 展宽的功率谱将更完整的倍周期演化过程淹没掉了。

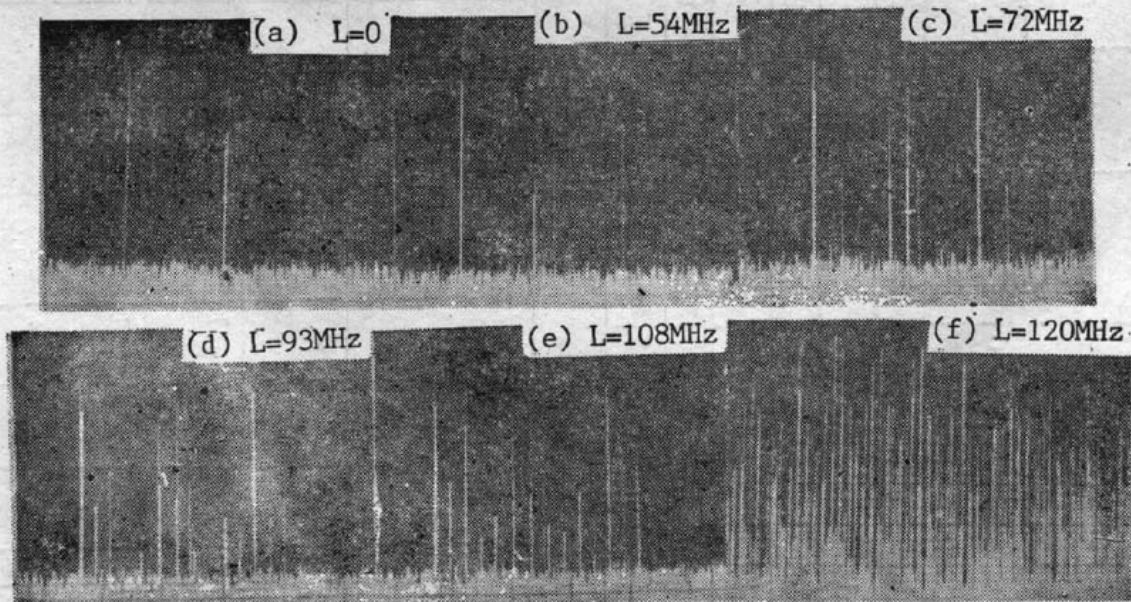


Fig. 5 Frequency spectrum of output light evolves along “mixing route”

(a)~(f) corresponds to the process of finely tuning cavity length

(4) 只调节放电电流, 其它参数固定不变, 依然可观测到如(1)和(2)节所叙述的现象。但由于放电电流的调节无法达到腔长调节的精细度, 激光系统演化过程的重复性和状态的稳定性远不如前者。

(5) 将腔长、放电电流和腔内光阑孔径仔细调到某一定值, 并使其固定不变, 只调节腔镜的倾角, 使激光输出的横模结构发生变化。图 6 表示出横模光斑的变化过程(图 6(a))

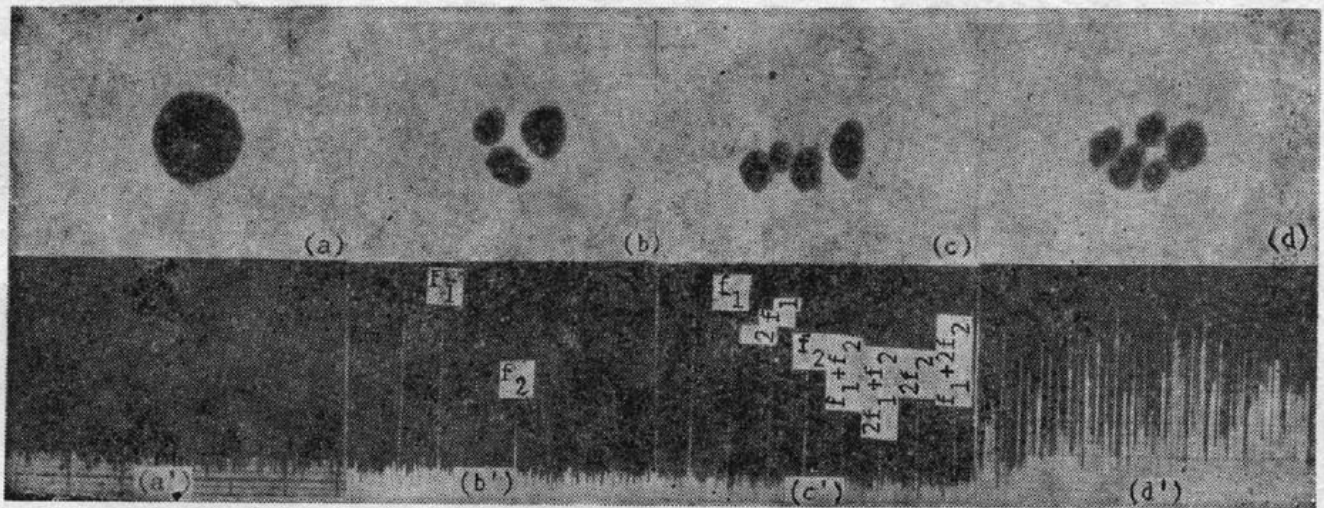


Fig. 6 Light spot (a~d) and the relevant frequency spectrum (a'~d')

~图 6(d)) 和与之对应的频谱图(图 6(a')~图 6(d'))。可以看出,当基模运转时激光输出是稳定的,随着横模结构由简单向复杂的变化,激光输出由稳态经 Ruelle-Takens 途径发展到混沌态。当激光系统为单一高阶横模运转时,作者没有观测到激光输出的不稳定性。只有多横模运转(呈叠加状态)才导致系统失稳乃至混沌运转。

(6) 为进一步观测激光场的横向分布对激光输出特性的影响,曾用一挡板代替光阑插入腔内,挡掉部分光场。发现挡掉光斑不同部分,则激光脉动频率也不同;挡掉某一部分,频率变小;而挡掉另一部分,频率变大。频率变化为 1 MHz 左右,其情况如图 7 所示。

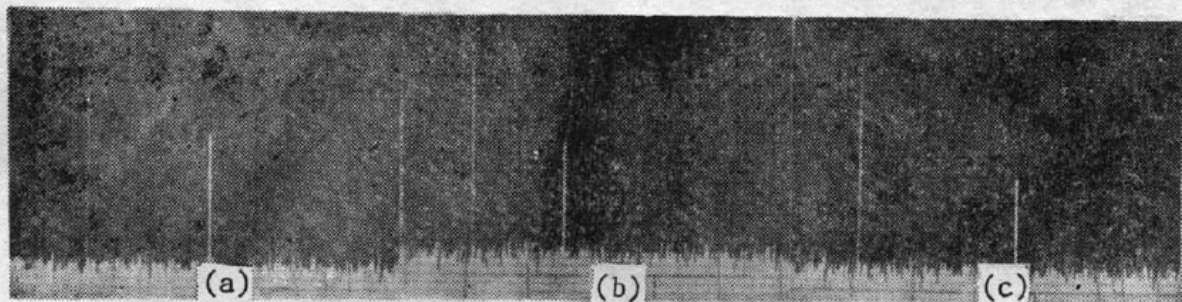


Fig. 7

(a) not insert the light shield; (b) shut out left part of the light spot;
(c) shut out right part of the light spot

(7) 考虑到实际应用的 CO₂ 激光器多不带有光栅,为此,作者又以反射率为 30% 左右锗平面代替平面光栅作为输出镜,重复上述实验。观测到的现象与上述各点基本相同。所以在实际应用中,可通过控制横模输出或调节腔长和放电电流等措施,以获得稳定的 CO₂ 激光输出。

四、讨 论

(1) 作者认为光场横向分布与反转布居间的某种耦合作用是本文报道的混沌现象产生的根源。实验观测表明,多个横模同时运转(表现为光斑花样的多横模叠加)是激光系统失稳的前提条件。径向光场的不均匀分布和复杂变化必然会导致横向反转布居的密度和相位的复杂变化;反过来反转布居又会对光场的横向分布产生影响。而调节腔长,腔镜倾角和放电电流等参量会引起光场横向状态的变化。当这种变化发展到一定程度,便会发生质变——

呈现混沌运转。

作者在另一篇报道中^[11]用不同的手段进行了实验观测, 所得到的结果进一步证实了上述分析。

(2) 相空间中不同的区域有可能属于不同的吸引盆, 一个吸引盆对应一个吸引子。Eckmann 认为^[12], 当系统的某一参数变化时, 各吸引子的演变可以遵循不同的途径。按此观点, 在实际物理过程中, 不同的演化途径应该可以混杂出现, 作者关于“混合道路”的实验观测证实了这一预言。

郭转运副教授对于实验工作给予了帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] D. Dangoisse *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1987, **A36**, No. 10 (Nov), 4775~4791.
- [2] Dhruva J. Biswas *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1987, **A35**, No. 1 (Jan), 456~458.
- [3] G. P. Puccioni *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, No. 4 (Jnl), 339~342.
- [4] T. Midavaine *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, No. 19 (Nov), 1989~1992.
- [5] D. Dangoisse *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**, No. 21 (Nov), 2657~2660.
- [6] J. R. Treticce, F. T. Arecchi *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1986, **A34**, No. 3 (Sep), 2073~2081.
- [7] Li-Xue Chen, Chun-Fei Li *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **B5**, No. 5 (May), 1160~1165.
陈历学等,《光学学报》, 1989, **9**, No. 11 (Nov), 989~994.
- [8] 高锦岳, L. M. Narducci 等;《量子电子学》, 1987, **4**, No. 3 (Sep), 189~201.
- [9] G. L. Lippi, N. B. Abraham *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1987, **A35**, No. 9 (May), 3978~3981.
- [10] F. Hollinger, C. Jung; *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **B2**, No. 1 (Jan), 218~225.
- [11] 张立根, 陈楠鹏, 巴恩旭;《物理学报》, 1990, **39**, No. 1 (Jan).
- [12] J.-P. Eckmann; *Rev. Mod. Phys.*, 1981, **53**, No. 4 (Oct), 643~654.

Experimental research on chaos operation in CO₂ laser caused by transverse effects

CHEN NANPENG, ZHANG LIGEN, LU KECHENG, FU RULIAN AND BA ENXU

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

(Received 8 March 1989; revised 30 August 1989)

Abstract

Instabilities of single-longitudinal, multi-transverse-mode CO₂ laser caused by transverse effects of optical field have been studied experimentally. Chaos which is approached by different routes were observed. The mechanism of the phenomena observed was discussed.

Key words: laser chaos; transverse effects.