

# CO<sub>2</sub> 激光器混沌运转的实验方法

叶莉华 李相银 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

摘要: 从 M-B 方程出发, 简单分析了 CO<sub>2</sub> 激光器的动力学过程。从实验角度对实现 CO<sub>2</sub> 激光器混沌运转的各种方法作了概述, 并结合多电极对 CO<sub>2</sub> 激光器提出了可行的实现混沌的方法。

关键词: CO<sub>2</sub> 激光器 混沌 不稳定性

## Experimental methods for chaotic operation of a CO<sub>2</sub> laser

Ye Lihua, Li Xiangyin, He Anzhi

(Dept. of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** Based on M-B equation, the dynamic performances of CO<sub>2</sub> laser are analyzed. From the point of experiments, various techniques used to produce chaos in a CO<sub>2</sub> laser are briefly introduced. Some feasible ways used to lead multi-electrode pair CO<sub>2</sub> laser to chaotic regime are suggested tentatively.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser chaos instability

## 引 言

1963 年, 气象学家 Lorenz 在大气对流模型中第 1 次得到混沌解(又称奇怪吸引子), 自此, 混沌运动作为非线性系统的典型动力学行为被正式确认。非线性系统的参数改变时, 系统会失稳, 出现分叉现象。经若干次分叉后系统会进入混沌。激光器输出的不稳定性——尖峰脉冲在 1960 年激光器刚问世时就已观察到, 但当时未能深入研究, 直到最近 10 年才被人们重新予以注意。激光器中的混沌运动作为光学混沌的一个分支, 引起了国内外学者的广泛兴趣。

激光系统是一个典型的远离平衡的开放体系, 对其不稳定性及混沌的研究, 不仅对激光理论本身, 而且对非平衡理论的发展和完善都有重要意义。要产生混沌, 激光器系统的自由度至少不小于 3。按照量子光学专家 Arecchi 等的分类<sup>[1]</sup>, CO<sub>2</sub> 激光器属于 B 类激光器, 由于极化强度被绝热消去, 系统的动力学由两个耦合方程描写, 不足以产生混沌。要实现 CO<sub>2</sub> 激光器混沌运转, 需至少增加 1 个额外的自由度。为此, 人们提出了不少方法, 例如外调制、注入信号、反馈等, 使原来自治系统变为依赖于时间的非自治系统, 增加激光模的数目, 利用非均匀加宽增加独立增益包络的数目等。我们对实现 CO<sub>2</sub> 激光器混沌运转的各种方法作了概述。并结合多电极对 CO<sub>2</sub> 激光器提出了可行的实现混沌的方法。通过研究 CO<sub>2</sub> 激光器的混沌现象, 最终可实现系统的混沌控制, 得到稳定的输出。

## 1 理论分析

对于高压 CO<sub>2</sub> 激光器, 有 3 个特点: (1) 因工作气压较高, 该激光器属于均匀加宽的激光器; (2) 采用选模技术, 可实现单模振荡; (3) 这种激光器属于 B 类激光器, 即  $\gamma_{\perp} \gg k \gg \gamma_{\parallel}$ 。

先考虑前两个特点, 起初, 人们用 Maxwell Bloch 方程来描述一个均匀加宽的单模激光器。

直到 1975 年, Haken 通过坐标变换将它简化成如下的非线性耦合方程组:

$$\begin{cases} dE/dt = -kE + kP \\ dP/dt = \gamma_{\perp} (ED - P) \\ dD/dt = \gamma_{\parallel} (\lambda + 1 - D - \lambda EP) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $k$  是腔场振幅的衰减率,  $\gamma_{\perp}$  为原子的线宽,  $\gamma_{\parallel}$  为粒子数衰减速率,  $\lambda$  是泵浦强度,  $E$  是腔内光场振幅,  $P$  是原子极化振幅,  $D$  是粒子数反转。

这与大气对流的 Lorenz 模型:

$$\begin{cases} dx/dt = -\alpha x + \alpha y \\ dy/dt = -xz + rx - y \\ dz/dt = xy - bz \end{cases} \quad (2)$$

在形式上完全一样。Lorenz 在数值计算中(参数  $\sigma = 10, b = 8/3, r = 28$  时)第 1 次观察到了混沌吸引子。同一数学方程描述两种完全不同物理现象的例子在物理学中已屡见不鲜, 它反映出自然现象之间的内在联系。显然, Lorenz 方程中的混沌解也必然会在 Haken 方程中存在。

考虑到 CO<sub>2</sub> 激光器属于 B 类激光器,  $k$  和  $\gamma_{\parallel}$  都远小于  $\gamma_{\perp}$ , 因此, 在 M-B 方程中可以绝热消除极化强度  $P$ , 由两个耦合非线性方程来描述其动力学过程, 即只剩下  $E$  和  $D$  的方程。引入光强  $I \equiv E^2$ , 并作适当的参数变换, 可得到共振状态下描述单模高压 CO<sub>2</sub> 激光器动力学过程的二能级速率方程为:

$$\begin{cases} dI/dt = -2kI[1 - AD/(1 + \delta_0^2)] \\ dD/dt = -\gamma_{\parallel} [D - 1 + ID/(1 + \delta_0^2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $I$  为激光光强,  $A$  为激光介质增益,  $\delta_0$  为失谐量, 它是激光跃迁谱线中心频率与最靠近它的空腔模频率之差, 并以激光介质极化强度衰减速率常数作为它的单位。为了在共振时能实现混沌运转, 至少需增加 1 个自由度。这样, 有规的激光系统才会向混沌过渡, 但其过渡途径是倍周期分叉趋向混沌或阵发混沌, 还是由奇异吸引子及准周期过渡到混沌等, 则取决于具体的实验方法。

## 2 实验方法

为实现 CO<sub>2</sub> 激光器的混沌运转, 可以从以下几个角度考虑: (1) 对某个参数进行调制, 使系统成为非自治的, 如: 对损耗(或增益)、频率等参数进行调制; (2) 注入外光场; (3) 增加激光模数, 即利用光场的横向效应; (4) 其它。

在实验过程中, 人们根据具体条件发展了各种切实可行的方法, 下面介绍其中主要的一些。

### 2.1 损耗调制

F. T. Arecchi 最早在这方面做了大量工作<sup>[2-4]</sup>。实验简图如图 1 所示。其中, M 为反射镜; EOM 为电光调制器; B. E. 为扩束镜; B. S. 为分束镜; D 为 HgCdTe 探测器; G 为光栅; 1 为放大器; 2 为高压电源; 3 为频率合成器; 4 为 Z-80A 微处理器; 5 为双通道示波器; 6 为  $x-y$  示波器; 7 为频谱分析仪; 8 为瞬态数字转换器; 9 为计算机。

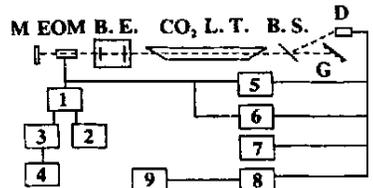


图 1 损耗调制实验装置

在此实验中, 用电光材料 CdTe 做成的损耗调制器被插入腔中。该晶体长 6cm, 镀增透膜, 吸收损耗小于 0.2%。在腔长等其它因素不变的情况下, 改变电光晶体的调制频率可得到分叉和混沌。用微机控制损耗的调制频率, 当固定调制频率, 而控制调制深度  $M$  从 1% 逐渐增加到 20%, 激光器的输出也由倍周期分叉趋向混沌。

对于共振条件的B类激光器,还可以利用电信号反馈引入第3个方程<sup>[5]</sup>,这也可能得到奇异吸引子类型的混沌。Arecchi等采用的具体方法是:在CO<sub>2</sub>激光器内放入损耗调制器,使该调制器上的电压与该激光器的输出光强成正比。调节探测器接收的光强与电压之间的耦合常数,可以观察到双稳态及经倍周期分叉得到决定性混沌。这种技术比较方便有效,已发展得相当成熟。J. M. Perez等人已成功地发展了一种延迟反馈技术<sup>[6]</sup>,即探测激光脉冲输出后,延迟1个激励周期并对其加以控制,再将控制脉冲反馈给电光调制器,从而实现了光学调制型和耦合型CO<sub>2</sub>激光器的混沌控制。关于这方面的最新研究<sup>[7]</sup>是将频率等于主振频率一半的信号反馈给系统时,激光输出的“相位依赖现象”。

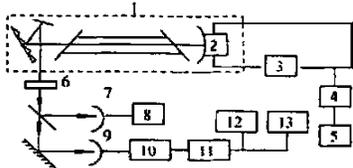


图2 频率调制实验装置

其中,1为CO<sub>2</sub>激光器;2为用作腔长调制的压电陶瓷;3为直流电源;4为放大器;5为信号发生器;6为衰减器;7为热电探测器;8为检流计;9为HgCdTe探测器;10为前置放大器;11为选频放大器;12为示波器;13为高频电压表。

压电陶瓷的激励电压发生变化时,会产生微位移,从而腔长得到小讯号调制,导致频率失谐量改变,最终得到激光器的混沌输出。利用激光器对调制讯号的非线性响应还可测量激光介质的弛豫振荡参数。

陈南鹏等人直接将光栅装在压电陶瓷上进行实验<sup>[10]</sup>,如图3所示。图中,1为放电管;2为小孔光阑;3为光栅;4为压电晶体;5为直流电源;6为分束镜;7为热敏像纸;8为探测器;9为放大器;10为频谱分析仪。

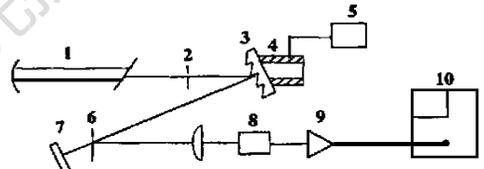


图3 实验装置

先将激光器调节至单模运转状态,然后精细调节腔长。随着失谐量的增大,系统由稳态运转开始出现尖峰。进一步增大失谐量,频谱变得复杂多变,表现为混沌特有的展宽带。在相空间得到系统的奇怪吸引子,几何结构表现为折迭扭曲、错综复杂而又不失整体的稳定。实验结果表明,在精细调节腔长的过程中,系统输出从稳态经由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。当系统各参数被调节到一定状态不变时,可观察到激光输出时而周期变化,时而呈现混沌状态,随机地在两者之间跳跃,表现为阵发型混沌状态。

### 2.3 注入光信号

Arecchi等对注入同频光信号时激光系统的非稳定性作了深入的研究<sup>[1, 11, 12]</sup>。他们对B类激光器引入与激光频率有失谐量的外部信号,改变注入信号的光强度和频率失谐量(可通过改变主激光器腔长实现)。初时,激光器的输出被锁定了,但由于注入信号相对较弱,这种状态不能持久。于是,系统输出出现周期性的解锁定。这时,继续增加外场,系统出现阵发混沌,并最终进入混沌状态。固定注入光强度,改变主激光器和注入光信号的频率失谐量,可以观察到倍周期分叉后系统进入混沌运转。在实验中还发现,相空间有多种奇异吸引子存在。不同的奇异吸引子对应不同的横模结构和不同的功率谱,说明在光注入的情况下,不同的光场分布有着各异的动力学结构,可导致不同的奇异吸引子。

注入外部光信号这种技术很早就被用于 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的选模和脉冲整形。而 Arecchi 分析的 B 类激光器就包括 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 因此, 通过注入光信号实现 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的混沌运转具有诱人的开发前景。根据上述分析, 在研究多电极对 CO<sub>2</sub> 激光器输出特性时, 可以向多电极对 CO<sub>2</sub> 激光器注入同频光信号, 通过改变注入信号的光强和频率失谐量使激光器进入混沌运转状态, 并进一步对激光器的输出实现混沌控制。

## 2.4 饱和吸收器调制

被动 Q 开关早先被用作高功率脉冲源, 其重复性和尖峰强度是主要研究的目标。最近在研究激光器非稳定性中, 被动 Q 开关引起了广泛的兴趣<sup>[13, 14]</sup>。CO<sub>2</sub> 激光器内放入气体可饱和吸收器会表现出各种周期自脉动, 即被动 Q 开关。它成为激光的非稳定性是由于增益介质相应能级上的瞬态变迁。被动 Q 开关的瞬态结构敏感地依赖于分子系统的动力学特性。激光下能级的振动弛豫是产生复杂脉冲的重要步骤。系统地改变饱和吸收器的相应参数, 各种脉冲形状详尽地得到再现。实验中发现, 系统的输出取决于激发状态和吸收分子的特性, 被动 Q 开关的行为取决于可饱和吸收器的饱和状态。随着饱和度系数的增加, 先出现了 1 个尖峰。接着出现了第 2 个尖峰。此时, 每个脉冲都有两个尖峰。继续增加饱和度, 被动 Q 开关脉冲的两个尖峰合并成了 1 个, 但脉宽是原来单个尖峰的两倍。当饱和度很强时, 被动 Q 开关状态消失, 系统进入双稳态。从相位图上可见, 经倍周期途径得到了混沌脉动。

进一步分析表明, 插入饱和吸收器的激光器进入了多模运转状态。随着饱和参数的变化, 横模结构由简单趋向复杂, 系统输出也趋向混沌态。

## 2.5 其它

改变系统的横模结构, 可以使之趋向混沌。从这一角度出发, 可以通过调节激光腔腔镜的倾角, 观察系统的非稳定性<sup>[10]</sup>。有实验表明, 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。

另一种情况下, 对某些本不出现混沌的横模结构加横向磁场<sup>[15]</sup>, 则粒子除受到电场作用外, 还受到一个洛伦兹力的作用。后者使粒子有转动的趋势, 对反转粒子数起着周期性调制的作用, 使得原来两个自由度的自治方程组变成了非自治方程组。改变磁场的参数, 系统通过 Ruelle-Takens 道路到达混沌。

## 3 结 论

上述的各种实现 CO<sub>2</sub> 激光器的实验手段, 都是为了实现 1 个目的, 即增加系统的自由度。使系统的动力学方程由两个耦合方程变为 3 个或 3 个以上的非线性方程组, 而系统也由自治转化为非自治。在此过程中, 适当地改变参数设置, 最终使系统进入混沌运转状态。

就多电极对 CO<sub>2</sub> 激光器混沌研究有积极意义的是调和延迟反馈技术、注入外部光信号和加饱和吸收器技术, 关于这方面的工作正在进一步深入。

## 参 考 文 献

- 1 Arecchi F T, Lippi G L, Puccioni G P *et al.* Opt Commun, 1984; 51(5): 308
- 2 Tredicce J R, Arecchi F T. Phys Rev A, 1986; 34(3): 2073
- 3 Dangoisse D, Glorieux P, Hennequin D. Phys Rev Lett, 1986; 57(21): 2657
- 4 Beswas D J, Dev V, Chatterjee U K. Phys Rev A, 1987; 35(1): 456
- 5 Arecchi F T, Meucci R, Puccioni G *et al.* Phys Rev Lett, 1982; 49(10): 1217

## 球差透镜对超高斯光束光束质量影响的研究\*

季小玲<sup>a, b</sup> 吕百达<sup>a</sup>

(<sup>a</sup>四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

(<sup>b</sup>重庆师范学院物理学与信息技术系, 重庆, 400047)

**摘要:** 根据束宽的传输方程, 采用双曲线拟合的方法, 计算了超高斯光束通过球差透镜后的  $M^2$  因子。同时还研究有球差的超高斯光束在透镜几何焦面 and 实际焦面上的桶中功率 (PIB)。以  $M^2$  因子和 PIB 作为光束质量评价的参数, 进行了详细的数值计算来说明球差对超高斯光束光束质量的影响, 并与有球差的高斯光束做了比较。得出了一些有实际应用意义的结果。

**关键词:** 球差 光束质量  $M^2$  因子 桶中功率 超高斯光束

## Effect of spherically aberrated lens on the quality of super-Gaussian beams

Ji Xiaoling<sup>a, b</sup>, L Baida<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(<sup>b</sup> Dept. of Physics and Information Technology, Chongqing Teachers College, Chongqing, 400047)

**Abstract:** Based on the beam propagation equation, the hyperbolic-fit method is used to calculate the  $M^2$  factor of super-Gaussian beams passing through a spherically aberrated lens. The power in the bucket (PIB) at the geometrical and real focal planes of super-Gaussian beams with spherically aberration is also studied. With  $M^2$  factor and PIB as the criteria for laser beam quality, detailed numerical calculations are performed to illustrate the effects of the spherically aberrated lens on the beam quality of super-Gaussian beams. The result is useful for some practical application.

**Key words:** spherical aberration beam quality  $M^2$  factor power in the bucket (PIB) super-Gaussian beam

\* 激光技术国家重点实验室资助。

- 6 Perez J M, Steinshneider J, Stallcup R E *et al.* A P L, 1994; 65(10): 1216
- 7 Glorieux P, Lepers C, Corbalan R *et al.* Opt Commun, 1995; (118): 309
- 8 高锦岳, 张汉壮, 国秀珍 *et al.* 光学学报, 1990; 10(3): 220
- 9 Balestri S, Ciofini M, Meucci R *et al.* Phys Rev A, 1991; 44(9): 5894
- 10 陈南鹏, 张立根, 吕可诚 *et al.* 光学学报, 1990; 10(3): 239
- 11 Tredice J R, Arecchi F T. Optical Society America B, 1985; 2(1): 173
- 12 常胜江, 傅汝廉, 巴恩旭. 中国激光, 1994; 21(3): 193
- 13 Tachikawa M, Tani K, Shimizu T. Optical Society America B, 1988; 5(5): 1077
- 14 Barsella A, Alcantara P Jr, Guidoni L *et al.* Opt Commun, 1995; (117): 455
- 15 黄勇林, 巴恩旭. 物理学报, 1993; 42(6): 930

作者简介: 叶莉华, 女, 1974年9月出生。博士研究生。现主要从事激光技术及应用方面的研究工作。