

·激光技术·

## 增益系数对环形腔激光器输出特性的影响

苏敏<sup>1</sup>, 金雨晴<sup>1</sup>, 任晗<sup>1</sup>, 吕翎<sup>1</sup>, 邹家蕊<sup>2</sup>

(1. 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029; 2. 昌图县第四高级中学, 铁岭 112000)

**摘要:**采用数值仿真的方法研究了增益系数对环形腔激光器输出特性的影响。首先给出了考虑横向效应后环形腔激光器模型的光强方程。进一步通过模拟仿真 Lyapunov 指数随增益系数的演化确定了激光系统的动力学行为, 并展示了考虑到光场的横向效应后环形腔激光器激光斑图的形成。最后, 通过模拟不同增益系数下的激光斑图来说明增益系数对环形腔激光器输出特性的影响。

**关键词:**增益系数; 激光斑图; 数值仿真; 环形腔激光器

中图分类号: O415.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-03-0017-04

## Influence of Gain Coefficient on Output Characteristics of Ring Cavity Laser

SU Min<sup>1</sup>, JIN Yu-qing<sup>1</sup>, REN Han<sup>1</sup>, LV Ling<sup>1</sup>, ZOU Jia-rui<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. Changtu County fourth high school, Tieling 112000, China)

**Abstract:** The influence of gain coefficient on the output characteristics of ring cavity laser is researched by numerical simulation. At first, the light intensity equation of the ring cavity laser model after transverse effect is given. And then, the dynamical behaviors of the laser system are determined by simulating the evolution of the Lyapunov exponent with the gain coefficient, and the formation of laser pattern of ring cavity laser after light transverse effect is demonstrated. At last, the influence of gain coefficient on the output characteristics of ring cavity laser is illustrated by simulating the laser patterns under different gain coefficients.

**Key words:** gain coefficient; laser pattern; numerical simulation; ring cavity laser

近年来, 环形腔激光器以其损耗低、输出功率高以及结构简单等优势而受到人们的广泛关注, 并在光学精密测量、光通信、光纤传感器和光谱测量等领域有着广泛的应用。随着研究的不断深入, 进一步发现具有横向效应的环形腔激光器的激光输出可以呈现合作频率锁定、准周期振荡以及时空斑图等动力学行为<sup>[1-4]</sup>。尤其是其中激光斑图的研究在信息编码以及光通信方面显现的巨大应用潜力, 使斑图的形成和特性研究成为光学领域中的热点之一, 许多理论分析、数值仿真以及实验结果被纷纷报道<sup>[5-9]</sup>。

研究发现, 环形腔激光器斑图的形成主要源于光场的横向效应。当考虑到光场的横向效应时, 首先要考虑来自空间的衍射效应。其次要考虑波形畸变和增益变化。采用数值仿真的方法研究了增益系数对环形腔激光器输出特性的影响。首先给出了考虑横向效应后环形腔激光器模型的光强方程。进一步通过模拟仿真 Lyapunov 指数随增益系数的演化确定了激光系统的动力学行为, 并展示了考虑到光场的横向效应后环形腔激光器激光斑图的形成。通过模拟不同增益系数下的激光斑图来说明增益系数对环形腔激光器输出特性的影响。

收稿日期: 2018-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(11747318)资助

作者简介: 苏敏(1999-), 女, 辽宁省朝阳市人, 本科, 从事非线性物理理论研究; 吕翎(1960-), 女, 教授/博导, 从事非线性理论研究。

## 1 环形腔激光器的结构以及激光方程

环形腔激光器的结构简图如图1所示<sup>[3]</sup>。激光环形腔由确定的曲率半径和一定透射率的两个球面镜1和2以及两个全反射平面镜3和4组成。腔内有长度为 $L_A$ 的两能级原子组成的增益介质,环形腔的总长度为 $L$ ,两球面镜之间的距离为 $L$ 。

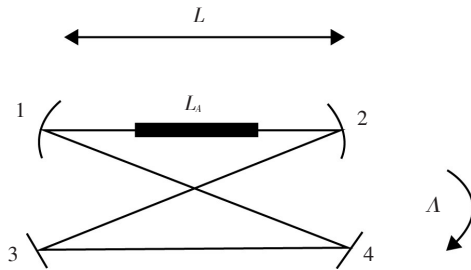


图1 环形腔激光器的结构简图

考虑激光的横向效应后,文献[10]详细研究了考虑增益介质的环形腔激光器的特性,获得如下激光输出方程

$$I_{n+1} = I_n \exp\left(\frac{a}{1+I_n} - \Gamma\right) \quad (1)$$

其中,状态变量 $I_n$ 为归一化的光场强度;参量 $a$ 和 $\Gamma$ 分别为增益系数和腔损耗。

在此之后,文献[11]报道了考虑衍射效应且在慢变振幅条件下的光强方程

$$\frac{\partial I}{\partial t} = F(I) + D\nabla^2 I \quad (2)$$

其中, $F(I)$ 为描述光强的非线性函数; $D$ 为空间衍射耦合系数; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。

将式(2)离散化后,可以得到考虑横向效应后环形腔激光器模型的光强方程

$$I_{n+1}(i, j) = (1-D)f(I_n(i, j)) + \frac{D}{4}[f(I_n(i-1, j)) + f(I_n(i+1, j)) + f(I_n(i, j-1)) + f(I_n(i, j+1))] \quad (3)$$

这里 $i$ 和 $j$ 是离散化的空间格点坐标, $n$ 为离散化的时间。局域函数 $f(I_n(i, j))$ 是式(1)。

## 2 模拟仿真分析

Lyapunov指数表征了系统在相空间中相邻轨道间收敛或发散的指数率,它是衡量系统动力

学特性的有效指标。对于环形腔激光器模型系统是否存在时空混沌,可以利用其最大Lyapunov指数的数值是否大于零加以判断。若激光系统的最大Lyapunov指数大于零,意味着在相空间中,两条轨线的间距随着时间的演化其差别会不断增加达到具有随机性的变化,以此可以判定激光系统中时空混沌行为的存在。这里,利用环形腔激光器模型的最大Lyapunov指数来描述其动力学特性。取系统的空间尺寸为 $100 \times 100$ ,空间衍射耦合系数 $D=0.2$ ,腔损耗 $\Gamma=11$ ,数值计算方程(3)的最大Lyapunov指数 $\lambda_{\max}$ 随增益系数 $a$ 的演化如图2所示。

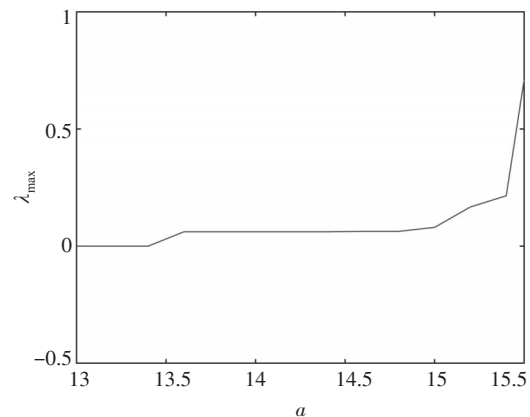


图2 最大Lyapunov指数 $\lambda_{\max}$ 随增益系数 $a$ 的演化

由图2可以看出,最大Lyapunov指数 $\lambda_{\max}$ 随增益系数 $a$ 的演化的数值是不同的。在增益系数 $a=13.4$ 附近出现一个临界点。当 $a < 13.4$ 时,系统的最大Lyapunov指数没有达到零值以上,此时,激光系统表现为稳定的定态输出。为了验证其动力学行为,取增益系数 $a=13$ ,在空间100个格点中任取第30个格点模拟仿真了激光系统的输出如图3所示。

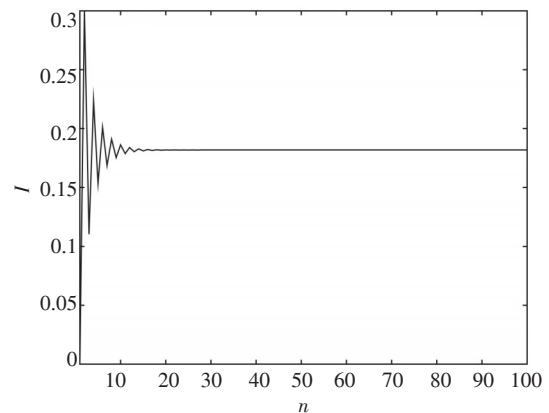


图3 增益系数 $a=13$ 时,激光系统的输出

可以看到,除了激光输出曲线开始的部分因任取的初始值有所波动以外,很快便呈现稳定的直线,表明此时激光系统为稳定的定态输出。由此可以判断出,若将激光输出投影到二维空间坐标中所显现的应该是一个平面。

当  $a > 13.4$  时,激光系统表现为稳定的振荡输出。取增益系数  $a = 14$ ,仍在空间 100 个格点中任取第 30 个格点模拟仿真了激光系统的输出如图 4 所示。

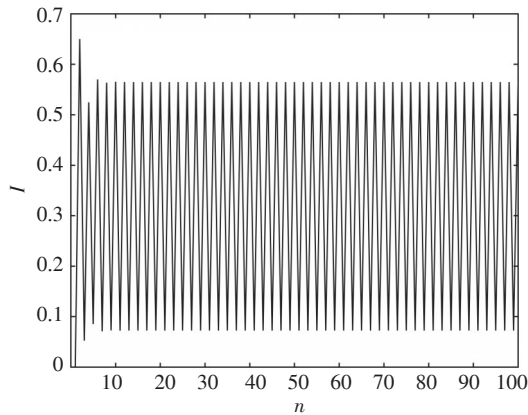
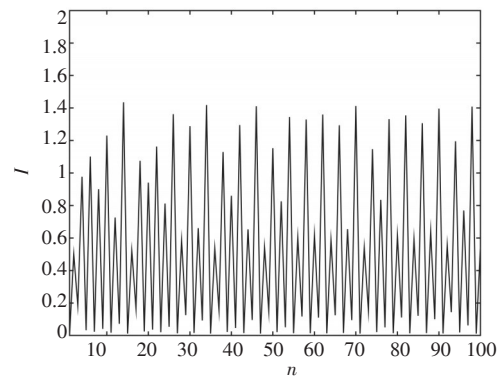


图4 增益系数  $a = 14$  时,激光系统的输出

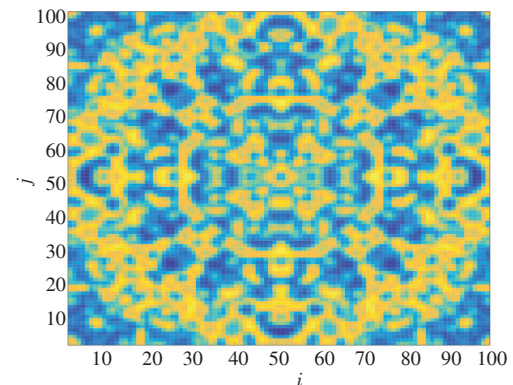
可以看到,激光输出曲线呈现稳定的周期振荡行为。由于激光输出曲线呈现稳定的等幅周期振荡,振荡周期很小并且振荡曲线非常密集,所以,激光输出投影到二维空间坐标中看起来仍似一个平面。

当增益系数  $a = 15$  附近时出现了新的临界点。在这个临界点之后,激光系统的输出为时空混沌态,即激光系统随时间和空间演化均呈现具有随机性的混沌行为。通过模拟仿真分别给出  $a > 15$  时不同增益系数的激光输出曲线和对应的激光斑图。

图 5 是增益系数  $a = 15$  时的激光输出曲线和对应的激光斑图,其中激光输出曲线仍是在空间 100 个格点中任取第 30 个格点模拟仿真的。由激光输出曲线图 5a 可以看出,此时的激光输出随时间的演化呈现具有随机性的混沌行为。模拟研究中,所取的空间尺寸为  $100 \times 100$ ,其中任一个格点的激光输出随时间的演化均呈现与图 5a 类似的具有随机性的混沌行为。任取时间演化  $n = 500$ ,将空间所有格点的激光输出  $I$  投影到二维空间格点坐标  $i$  和  $j$  中便是对应的激光斑图如图 5b 所示。可以看到,尽管激光输出呈现时空混沌行为导致激光斑图的图形结构十分复杂,但激光斑图中的对称结构却非常明显。



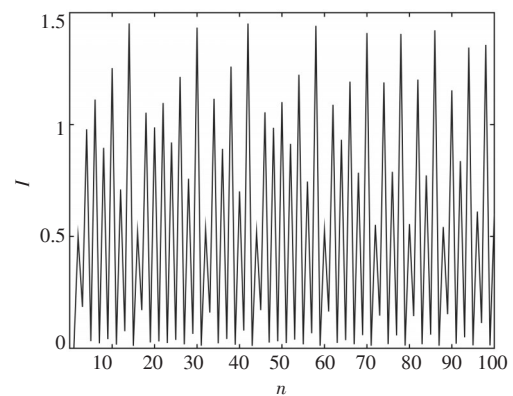
(a)激光输出随时间的演化曲线



(b)激光斑图

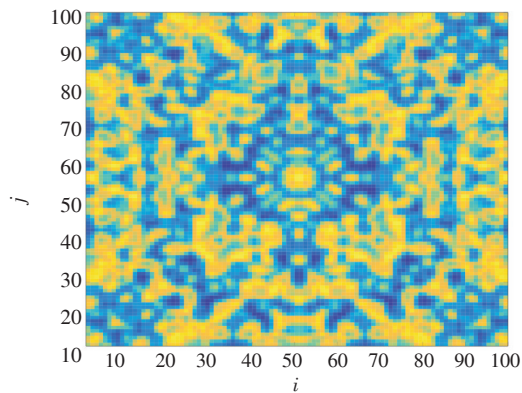
图5 增益系数  $a = 15$  时,激光系统的输出

图 6 和图 7 是增益系数  $a = 15.01$  和  $a = 15.2$  时的激光输出曲线和对应的激光斑图。可以看出,尽管激光斑图中的对称结构依然非常明显,但已经不同于增益系数  $a = 15$  时的激光斑图。由此发现,激光斑图的图形变化依赖于增益系数的改变极其敏感。增益系数的微小改变会导致激光斑图的图形具有很大的变化。

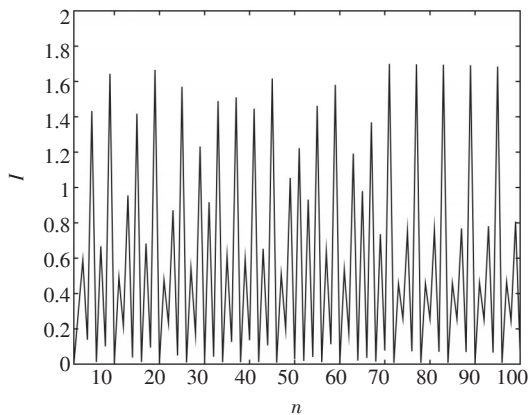


(a)激光输出随时间的演化曲线

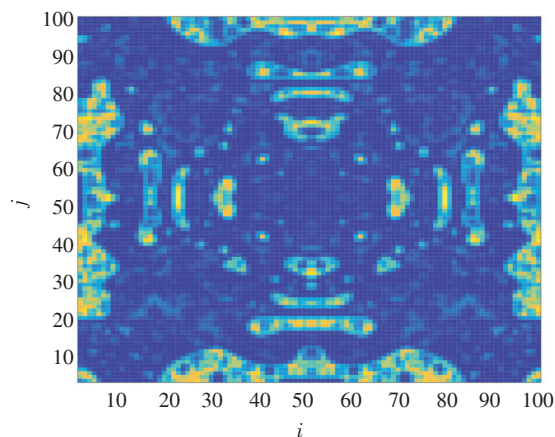




(b)激光斑图

图6 增益系数  $a=15.01$  时,激光系统的输出

(a)激光输出随时间的演化曲线



(b)激光斑图

图7 增益系数  $a=15.2$  时,激光系统的输出

腔激光器输出特性的影响。研究结果显示,环形腔激光器模型系统的最大 Lyapunov 指数随增益系数  $a$  的演化其数值是不同的,分别对应激光系统稳定的定态输出、稳定的振荡输出以及复杂的时空混沌输出。获得的激光斑图虽然图形结构十分复杂,但激光斑图中的对称结构却非常明显。并且,激光斑图的图形变化依赖于增益系数的改变极其敏感。增益系数的微小改变会导致激光斑图的图形具有很大的变化。激光斑图的特性研究为信息编码以及光通信等实际领域的应用提供了有益的借鉴。

### 参考文献

- [1] Lugiato L A, Milani M. Disappearance of laser instabilities in a Gaussian cavity mode[J]. Opt Commun, 1983, 46:57-60.
- [2] Kolpakov S A, Khashi H, Sergeyev S V. Dynamics of vector rogue waves in a fiber laser with a ring cavity[J]. Optica, 2016, 3:870-875.
- [3] 于兴启,汪凯戈.轴对称激光系统的静态和旋转横向斑图[J].物理学报,2000,49:898-903.
- [4] 裴小娜,梁英敏.环形腔激光器中的双脉冲现象[J].激光与红外,2016,46:1064-1067.
- [5] Suzuki K, Imai Y. Decryption characteristics in message modulation type chaos secure communication system using optical fiber ring resonators[J]. Opt Commun, 2006: 88-93.
- [6] 孙宏海,刘艳滢.改进的盲解卷积技术在远距离激光光斑图像复原中的应用[J].中国光学,2013,6:868-875.
- [7] 王庆.云计算环境下环形腔激光器构成的激光网络稳定性控制[J].激光杂志,2017,38:100-103.
- [8] Bliznyuk V V, Berezovskaya N V, Brit M A, et al. Analysis of the radiation pattern of laser diode radiation based on experimental data[J]. Physics of Wave Phenomena, 2017, 25: 214-218.
- [9] 张红钰,金玉苹.改进盲卷积的远场激光光斑图像快速恢复[J].激光杂志,2017,38:104-107.
- [10] 谭维翰,陆伟平.激光振荡输出的分岔与混沌[J].科学通报,1988,33:17-21.
- [11] Wang P Y, Xie P, Dai J H, et al. Stabilization, selection, and tracking of unstable patterns by weak spatial perturbations[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80: 4669-4672.

### 3 结论

采用数值仿真的方法研究了增益系数对环形