

# 非线性腔中横模的时空不稳定

庄军

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

谭维翰

(上海大学物理系, 上海 201800)

**摘 要** 通过数值模拟研究了非线性腔的横向效应, 非线性表现在光场通过放大介质时所引起的相位变化与强度有关。模拟结果显示, 随着非线性系数的变化, 腔中的光场分布表现出丰富的时空不稳定行为, 其中包括横模跳变、时空周期行为以及光学涡旋的出现。

**关键词** 时空不稳定。

## 1 引 言

在时空域上, 非线性光学系统在一定条件下所固有的不稳定现象(包括混沌)将表现为一系列新的横向效应。其中有以激光器为代表的非线性振荡系统、光折变振荡器、以及一些无源非线性光学系统等等。而且陆续发表的实验结果表明, 在其它非线性领域中所出现的横向效应在光学中也同样存在, 例如与流体中相对应的光学涡旋、时空光学湍流等<sup>[1~3]</sup>。理论上则考虑了对光场分布起关键作用的衍射效应, 并且在平均场近似下采用线性本征模展开的方法处理, 从而解释了一些横向效应, 如激光器中的相位奇点、自发对称性破裂等<sup>[1]</sup>。但是对于光学涡旋、时空湍流现象, 仅考虑空腔本征模间的非线性相互作用则似乎还不能从根本上解决问题<sup>[1, 4]</sup>, 这一点在光折变振荡器中则尤为突出。在这种非线性放大系统中, 线性本征模上展开分析的结果仅给出了横模间的基本竞争过程, 但实验中却表现出了丰富的横向效应<sup>[2, 5]</sup>, 尤其是向时空湍流过度时所出现的横模巡游现象<sup>[2]</sup>。

为寻求其它可能的物理机制, 本文研究了具有自聚焦或自散焦特性的放大介质对谐振腔中光场横向分布的影响。通过两波相互耦合的光折变增益介质就具有这种非线性效应<sup>[5]</sup>。为简化计算, 本文暂采用较简单的非线性介质模型, 但得到的结果却与在光折变振荡器中所观察到的实验现象相似<sup>[2, 5]</sup>。

## 2 物理模型

当放大介质具有自聚焦或自散焦的非线性特征时, 光场通过介质所引起的相位变化  $\Delta\phi_{NL}$  将与强度  $I$  有关, 即

$$\Delta\phi_{NL} = \epsilon I \quad (1)$$

其中  $\epsilon$  为非线性系数,  $\epsilon > 0$  和  $\epsilon < 0$  分别体现为自聚焦和自散焦的作用。当谐振腔中存在非线性放大介质时, 光强在横向空间分布上的变化将转化为相位的差异, 而在衍射效应的作用下这种相位差异最终又将进一步影响强度的分布<sup>[3]</sup>, 从而可能改变腔中光场的分布或引起时空不稳定。由于通常的平均场近似反应不出这种反馈过程, 本文直接采用了 Fox-Li 在研究线性腔模时的模拟方法, 所不同的是在原空腔模型的基础上, 加入了归一化的放大介质以及满足 (1) 式的非线性介质。研究这种非线性谐振腔的横向效应, 一般需要进行横向空间与轴向的三维数值模拟, 但由此却带来了很大的计算量。因此对上述模型进行了简化, 即非线性放大介质为一薄片并附在腔片上, 从而可近似不考虑光场在其中的衍射效应, 而光在空间中的传输由快速傅里叶变换完成, 即非线性与衍射效应分开处理。对于自聚焦和自散焦的情况分别作了模拟。

### 3 数值模拟与结果

#### 3.1 自聚焦 ( $\epsilon > 0$ ) 的情况

为减少计算量, 希望取较小的菲涅耳数, 从而可相应地减少计算网格数, 但菲涅耳数的减少将严重地抑制高阶模的振荡, 从而影响横向效应的出现, 并且也与实际情况不符。为在小的菲涅耳数条件下增加高阶模在腔中的竞争优势, 模拟中可通过适当增加基模的损耗来实现。计算中菲涅耳数取为  $N_F = 1.5625$ , 腔面为正方形, 边长为  $a = 25\lambda$ , 相应的网格数为  $128 \times 128$ , 腔长为  $b = 400\lambda$ 。

调节  $TEM_{00}$  模的损耗, 使得在线性腔 ( $\epsilon = 0$ ) 条件下,  $TEM_{00}$  模的优势略大于  $TEM_{10}$  模, 在此基础上取非线性系数  $\epsilon = 0.2$ , 模拟初值为平面波。图 1(a) 给出了腔镜中心处光强随渡

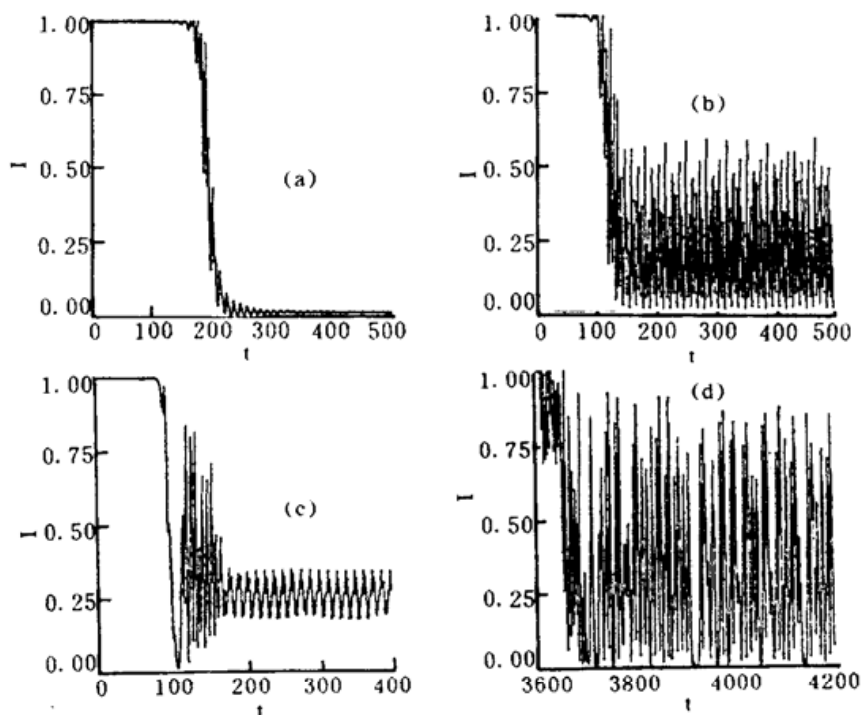


Fig. 1 Relative intensity as a function of transit number at the center point of rectangular mirror with different nonlinear coefficient (a)  $\epsilon = 0.2$  (b)  $\epsilon = 0.8$  (c)  $\epsilon = 1.4$  (d)  $\epsilon = 2.8$

越次数的变化, 最终趋于稳定, 但不再是  $TEM_{00}$  模, 如图 2(a) 所示。增加  $\epsilon$ , 腔中光场分布出现不稳, 图 1(b) 是  $\epsilon = 0.8$  时, 腔镜中心处光强随时间的变化, 具体表现为图 2(a) 中两个波峰的竞争, 图 2(a) 是横向空间上相应的光场振幅分布, 与线性腔中的  $TEM_{10}$  模相比, 恰好转了  $45^\circ$ , 即随着非线性系数的增加, 稳定光场分布由  $TEM_{00}$  模转向了  $TEM_{10}$  模。而当  $\epsilon = 1.4$  时, 这种不稳定变化趋于周期化(如图 1(c))。在光场振幅分布的三维图中可以发现, 原来在  $\epsilon = 0.2$  时所出现的稳定  $TEM_{10}$  模的两个峰值经竞争 ( $\epsilon = 1.4$  时) 变成了一个, 并且偏离中心位置, 如图 2(b) 所示。图 1(c) 中周期变化则近似对应该波峰绕腔镜中心的转动。这种运动维持到  $\epsilon = 2.4$ ; 而当  $\epsilon$  增加到 2.8 时, 腔中光场分布的不稳定性在时空域上表现出更为无规的行为, 如图 1(d) 所示。

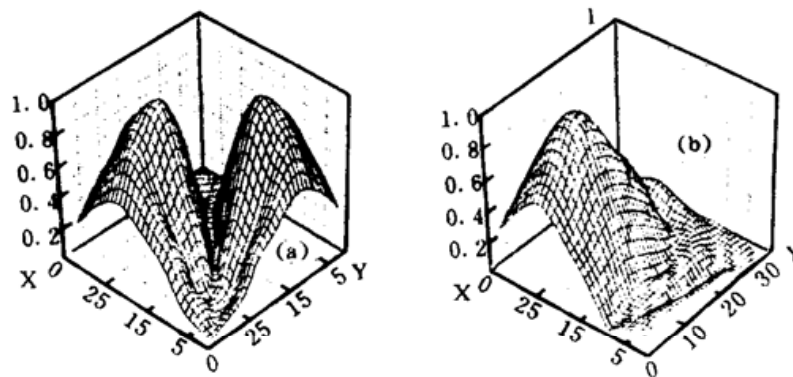


Fig. 2 Relative intensity distribution on mirror (a)  $\epsilon = 0.2$  (b)  $\epsilon = 1.4$

当增加  $TEM_{00}$  模的损耗, 使得在线性腔条件下  $TEM_{10}$  模略占优势, 计算的结果与上面相似。

### 3.2 自散焦 ( $\epsilon < 0$ ) 的情况

除非线性系数  $\epsilon$  外, 其它参数与自聚焦情况相同, 并且模拟初值仍取成平面波, 但模拟的结果却与自聚焦情况完全不同。如果在线性腔中 ( $\epsilon = 0$ )  $TEM_{00}$  模略占优势, 结果发现  $\epsilon$  在很大的范围内 ( $\epsilon = 0 \sim -1.5$ ) 腔中仍有稳定的光场分布, 图 3 给出了  $\epsilon = -1.4$  时光场的空间分布, 类似于  $TEM_{00}$  模, 镜面上相位的分布也近似为平面(图中没有给出); 如继续增加非线性系数  $|\epsilon|$ , 则腔内光场分布出现不稳, 如图 4 为  $\epsilon = -2.0$  时镜面上某一点的光强随叠代次数的变化, 由图中可以看出, 系统最终在两种不同的光场分布(与图 3 相比, 分布不再对称)间来回振荡。

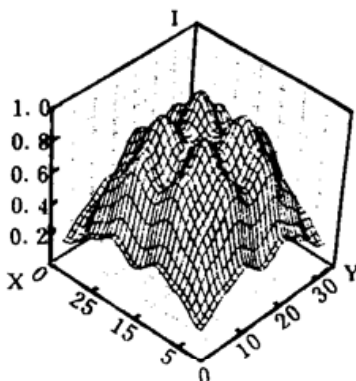


Fig. 3 Same as in Fig. 2 but  $\epsilon = -1.4$

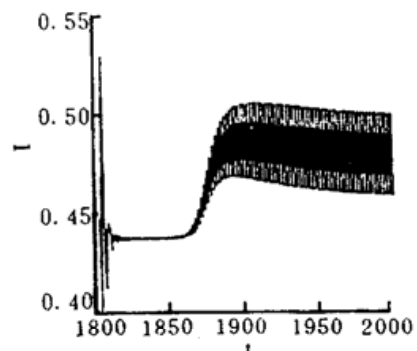


Fig. 4  $\epsilon = -2.0$ , the variation of relative intensity with transit number at the certain point of mirror

增加  $TEM_{00}$  模的损耗, 使得在线性腔条件下  $TEM_{10}$  模略占优势, 重复以上计算可以发

现, 当  $|\epsilon|$  增加到一定值时, 系统出现了稳定的圈状模式, 图 5(a)、(b) 分别给出了  $\epsilon = -0.6$  时光场的振幅与相位的分布, 从图中可以看到在腔镜中心处光场振幅为零, 相位图上则对应一个相位奇点(或拓扑缺陷), 其特点是围绕该点的相位积分为  $2\pi$ , 并且由于空间传输相位的存在, 相位分布[图 5(b)]将随叠代次数的变化而绕该点作旋转, 表现出与流体中涡旋相似的性质, 因此这种光场分布被称为光学涡旋<sup>[1]</sup>; 当继续增加  $|\epsilon|$  时,  $\epsilon = -0.8 \sim -1.4$ , 稳定的圈状模消失, 而代之以图 3 所示的稳定场分布; 当  $\epsilon = -1.8$  时, 稳定分布被打破并出现了类似于图 4 所示的双稳振荡现象。

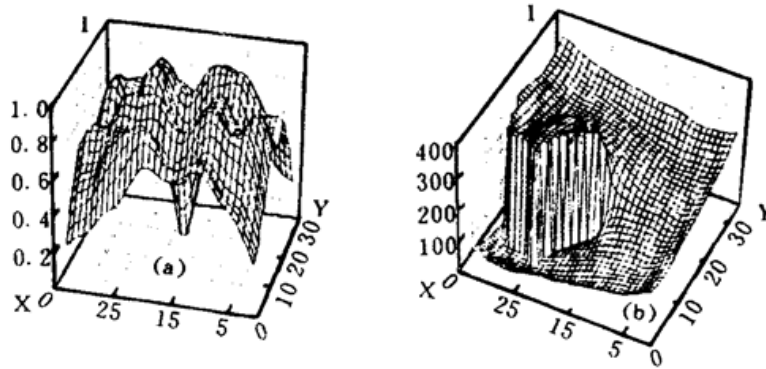


Fig. 5 The stable field pattern containing one topological defect (a) intensity distribution (b) phase distribution

数值模拟还显示, 不论是自聚焦还是自散焦, 线性腔中 ( $\epsilon = 0$ ) 基模与高阶模的优势相差越大, 出现不稳定所要求的非线性系数  $|\epsilon|$  也越大, 但变化的规律基本相似。

## 4 结 语

由于计算量较大, 本文仅给出了较为粗略的数值模拟结果, 但足以说明光场相位与强度的这种非线性关系在一定条件下与衍射效应相互作用, 不仅可以影响横向稳定光场的分布, 而且也可以导致系统的时空不稳定。但这种不稳定现象还不能完全定量地反应实际谐振腔中光场的变化规律, 理论上还有待于寻找一种更有效的方法, 来揭示这种光场横向空间上所出现的一些类似于流体的现象。

在实验上, 本文的数值计算模型本质上可以在光折变振荡器中实现<sup>[5]</sup>。在这种非线性系统中, 人们已观察到了丰富的时空不稳定现象<sup>[2]</sup>, 并且在一定条件下也可以出现光学涡旋, 文献[6]中给出了光学涡旋的相位分布实验结果, 与本文的数值模拟结果[图 5(b)]完全相同。

感谢朱健强博士在计算方面的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] L. A. Lugiato, V. Penna, F. Prati *et al.*, Transverse laser patterns, I. phase singularity crystals. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(9): 5090~5113
- [2] F. T. Arecchi, G. Giacomelli, P. L. Ramazza *et al.*, Experimental evidence of chaotic itinerancy and spatiotemporal chaos in optics. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(20): 2531~2534
- [3] G. D' Alessandro, W. J. Firth, Spontaneous hexagon formation in a nonlinear optical medium with feedback

- mirror. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20) : 2597~2600
- [4] Giampaolo D' Alessandro, Giam-Luca Oppo, Gauss-Laguerre modes; a sensible basis for laser dynamics. *Opt. Commun.*, 1992, **88**(2, 3) : 130~136
- [5] F. T. Arecchi, G. Giacomelli, P. L. Ramazza *et al.*, Vortices and defect statistics in two-dimensional optical chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(27) : 3794~3752
- [6] Pochi Yeh, Theory of unidirectional photorefractive ring oscillators. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1985, **2**(12) : 1924~1928

## Spatiotemporal Instability of Transverse Modes in a Nonlinear-Cavity

Zhuang Jun

(National Laboratory on High Power Laser and Physics,  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Tan Weihan

(Physics Department, Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 26 January 1995)

**Abstract** The transverse-effect of a light field in a nonlinear-cavity is studied by numerical simulation. The nonlinearity behaved the phase variation being related to light intensity as it passing through an amplification medium. The results shows that when the nonlinear coefficient is changed, the ditribution of light field in the cavity exhibits various spatiotemporal instabilities, such as the transitions of transverse modes, periodical spatiotemporal phenomena and optical vortices.

**Key words** spatiotemporal instability.