

# 无腔自散焦全光学双稳系统的实验与理论

谢常德 吴东东 郜江瑞 彭堃堃  
(山西大学光电研究所, 太原)

## 提 要

利用激光在吸收介质中的非线性像差自散焦效应, 设计了一种具有负逻辑功能的无腔全光学双稳系统。本文描述了实验装置和实验结果。给出系统状态的解析公式, 得出的理论曲线与实验曲线基本一致。

关键词: 自散焦; 无腔; 双稳。

## 一、引 言

迄今为止, 尚未见到自散焦型双稳的实验装置<sup>[1~3]</sup>。许多材料, 特别是吸收溶液都具有  $\frac{\partial n}{\partial T} < 0$ , 在基模高斯光束的作用下, 造成横向温度梯度和一定的折射率分布, 出现负透镜效应, 导致光束自散焦。出射光束具有爱里 (Airy) 函数所描述的环形角分布, 大部分光能集中于  $m=1$  的最外环<sup>[4, 5]</sup>。我们利用这一效应, 采用中心带输出小孔的反射镜作为反馈元件, 用品红的丙酮溶液作非线性介质, 首次实现了无腔自散焦型全光学双稳, 系统具有负逻辑功能。虽然由于吸收溶液的热对流等原因, 使实验曲线与理论计算之间有一定差异, 但两者开始出现滞后的阈值基本一致, 这种设计原理无疑可以推广至其它类型的非线性散焦介质。

## 二、实验装置与实验结果

图1是实验装置示意图。采用  $\text{Ar}^+$  激光器作光源 ( $\lambda=5145 \text{ \AA}$ ), 由偏振器  $P_1, P_2$  和可旋转的  $1/2$  波片构成光强调制器, 用  $1/4$  波片进行光学隔离, 阻止反馈光束返回激光器。  $M$  为一中心带孔的平面反射镜, 中心小孔半径  $a=0.36 \text{ mm}$ , 镜面反射率  $R \approx 90\%$ 。  $L_1, L_2$  为会聚透镜, 其焦距分别为  $F_1=500 \text{ mm}$ ,  $F_2=200 \text{ mm}$ 。  $S$  为散焦介质, 我们选用丙酮溶液, 液层厚度为  $5 \text{ mm} \ll l_1$  和  $l_2$ 。为降低自散焦阈值功率, 在丙酮中加入微量品红, 以增加吸收。  $SP$  为分束板,  $D_1$  和  $D_2$  为光电探测器, 分别测量输入功率  $P_{\text{in}}$  和输出功率  $P_{\text{out}}$ , 3036 型 XY 记录仪, 精度  $\pm 0.25\%$ 。

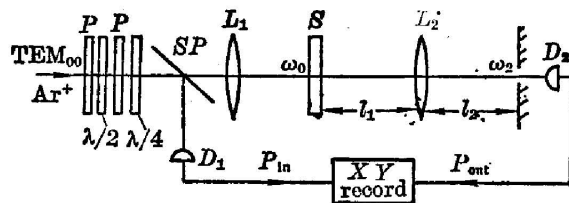


Fig. 1 Experimental setup

经透镜  $L_1$  变换后的入射光束腰光斑位于样品  $S$  的前表面, 其半径  $\omega_0 \approx 0.18 \text{ mm} = \frac{a}{2}$ , 共焦参量  $Z_0 \approx 198 \text{ mm}$ 。取  $a = 2\omega_0$  是由于当光束发散角增大到初始值的两倍, 即  $\theta = 2\theta_0$  时,

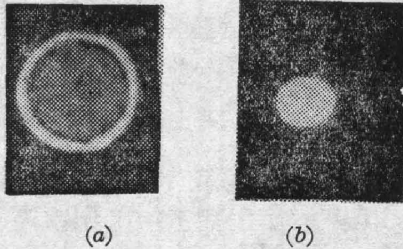


Fig. 2 Photographs of laser spots in far field

(a) before aberrational defocusing  
(b) after aberrational defocusing

开始出现非线性像差型散焦<sup>[4,5]</sup>。此时, 光束径向强度分布发生变化, 远场形成环状光斑, 环的中心区域呈现亮度均匀的圆斑, 其角半径近似为  $2\theta_0$ , 中心平均功率密度明显下降, 外环功率密度急剧上升, 大部分光功率集中于最外环。图 2 为产生像差型散焦前后远场光斑的照片, 由此可以明显看出光斑功率密度分布的变化。若取小孔的半径等于  $2\omega_0$ , 则在未产生像差散焦之前, 光功率几乎完全通过小孔, 系统处于高输出态, 当达到像差自散焦阈值功率以后, 外环光斑大于输出小孔, 开始出现反馈, 从而使介质内光功率增加, 从而又加剧了散焦, 反馈量进一

步增加, 系统很快进入低输出态。这时若减小输入光功率, 由于强的散焦作用, 反馈光将继续使系统维持于低输出态, 直到介质内的总光功率小于非线性像差散焦的临界功率时, 再重新回到高输出态。

为使反射光束经平面镜  $M$  和  $L_2$  变换后返回样品, 增强散焦, 必须精确调节  $M$  镜的位置和倾斜度, 确保反馈光束与入射光束严格共轴。实验中发现, 这一点对获得滞后效应是至关重要的。适当调节间距  $l_1$  和  $l_2$ , 使开始像差散焦时, 反馈光束腰的光斑恰好回至样品中, 以达到最佳反馈效果。

图 3(a) 为样品吸收  $\delta l = 0.05$  时, 将  $M$  换为小孔光阑 ( $a = 0.36 \text{ mm}$ ), 即不加反馈时的输入-输出非线性关系曲线, 在扫描过程中曲线按原路返回。图 3(b) 为加反馈镜后的实验曲线, 滞后效应十分明显。扫描速度约为  $5 \text{ sec/cyc}$ 。由于热效应响应速度较慢, 所以开关时间较长, 约几百  $\text{m sec}$ , 与热透镜稳定时间同数量级。双稳曲线的下开关点与非线性关系曲线的下拐点接近一致, 这正是产生像差型散焦的阈值功率点。实验还测定了其它不同  $\delta l$

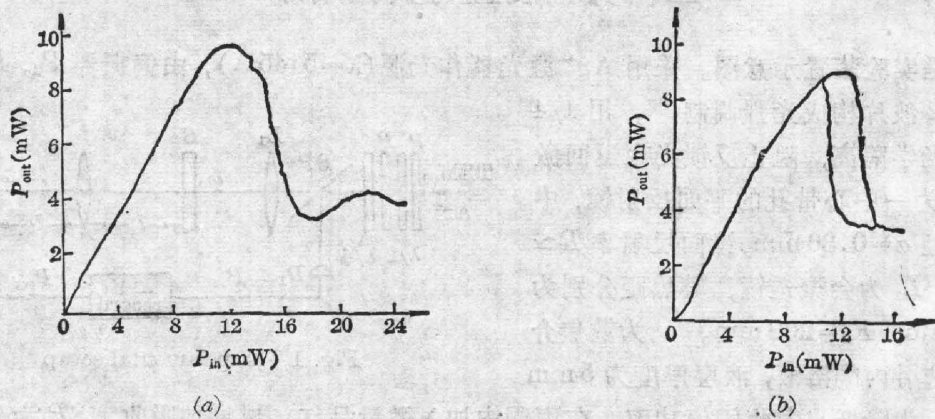


Fig. 3 Experimental curves of output vs input power absorption  $\delta l = 0.05$ ; radius of central aperture  $a = 0.36 \text{ mm}$

(a) without mirror feedback  
(b) with mirror feedback

时的双稳曲线,发现吸收愈大,双稳所需阈值功率愈低,但双稳区域变窄,当  $\delta l$  超过某一阈值时,由于反馈量太小,双稳消失(见图 5、6)。

应该注意的是,当吸收溶液的品红浓度过高时,出现强的热对流,破坏环的对称性和实验的可重复性,因此应在较低浓度下进行实验。

### 三、理论模型及计算结果

当入射光束具有高斯型径向强度分布时,若介质内激光功率为  $P_0$ , 则所产生的热透镜焦距  $F_N$  由下式表示<sup>[4]</sup>:

$$F_N = \frac{\Pi n_0^2 \omega_0^2 \alpha}{P_0 \frac{\partial n}{\partial T} [1 - \exp(-\delta l)]}, \quad (1)$$

其中  $\omega_0$  为介质内的平均光斑半径;  $n_0$  为未散焦时介质的折射率;  $\frac{\partial n}{\partial T}$  为介质折射率随温度的变化率;  $\alpha$  为介质的热导率;  $\delta$  为介质的吸收系数;  $l$  为介质的长度。对于丙酮溶液  $\alpha = 0.18 \text{ mW/mm} \cdot \text{K}$ ,  $n_0 = 1.36$  和  $\frac{\partial n}{\partial T} = -0.00054/\text{K}$ , 若已知  $\delta l$  就能按(1)式计算出与不同  $P_0$  相应的  $F_N$ 。

按图 1 的光路,由高斯光束的变换公式,很容易计算输出镜面  $M$  上的光斑半径  $\omega_2$ , 一般而言它应由  $\omega_0$ ,  $F_2$ ,  $F_N$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  及样品厚度  $l$  等参量决定。如果忽略样品厚度,采用薄透镜近似,并取  $F_2 = l_1 = l_2 = Z_0 = \frac{\Pi \omega_0^2}{\lambda}$ , 则在无热透镜效应时 ( $|F_N| = \infty$ ), 经  $L_2$  变换后的光束腰  $\omega_{20}$  恰好位于输出镜  $M$  的小孔中心,且  $\omega_{20} = \omega_0$ ; 热透镜出现之后,腰斑位置将向后移动,而输出镜面  $M$  上的光斑半径  $\omega_2$  为:

$$\omega_2 = \omega_0 \left( 1 + \frac{Z_0^2}{F_N^2} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

随着介质内光功率  $P_0$  的增加,  $|F_N|$  减小,  $\omega_2$  增大。实验装置的安排基本符合  $F_2 \approx l_1 \approx l_2 \approx Z_0$ , 为简单起见就采用公式(2)计算  $\omega_2$ 。

只要  $\omega_2 < a$ , 入射光就几乎完全透过,输出功率随输入功率线性增加,而入射到反射镜面上的光强度  $I_R \approx 0$ 。当达到  $\omega_2 = a$  时,若继续增加输入功率,由于像差散焦的作用,  $\omega_2 > a$  的外环功率密度将高于内环,且随输入增大而逐渐增高,最后趋于稳定。采用针孔扫描法测出  $\omega_2 > a$  时外环平均功率密度  $I_R$  与中心平均输出功率密度  $I_{out}$  之比随  $\omega_2/a$  的函数关系曲线而变化(图 4), 该曲线可近似地由下列函数来表示:

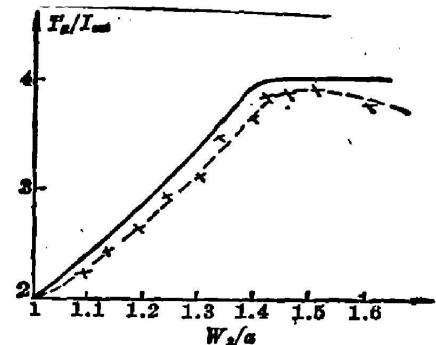


Fig. 4 The curves of  $I_R/I_{out}$  vs  $W_2/a$  when  $W_2 > a$

- $I_R$ ——average intensity of external rings
- $I_{out}$ ——output intensity from central aperture
- $W_2$ ——radius of laser spot at mirror  $M$
- $a = 0.36 \text{ mm}$ ——radius of central aperture
- solid curve——function curve used in the calculation
- Dash curve——experimental curve

$$\left. \begin{aligned} I'_R/I_{out} &= 0, & \text{当 } \omega_2 < a; \\ I'_R/I_{out} &= 2\left(\frac{\omega_2}{a}\right)^2, & \text{当 } 1.4a \gg \omega_2 > a; \\ I'_R/I_{out} &\simeq 4, & \text{当 } \omega_2 > 1.4a. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

而总输出光功率为:

$$P_{out} = I_{out} \Pi a^2, \quad (4)$$

入射到反射镜面上的总光功率为:

$$P'_R = I'_R \Pi (\omega_2^2 - a^2). \quad (5)$$

设系统输入功率为  $P_{in}$ , 由于吸收, 从介质出射后的光功率应为:

$$P'_{in} = P_{in} e^{-\delta l}, \quad (6)$$

且有:

$$P_{out} + P'_R = P'_{in}. \quad (7)$$

将(3)、(4)和(5)式代入(7)式, 得

$$T = \frac{P_{out}}{P'_{in}} = \begin{cases} 1 & \text{当 } \omega_2 < a; \\ \left[1 + 2 \frac{\omega_2^2 - a^2}{a^2} \left(\frac{\omega_2}{a}\right)^2\right]^{-1} & \text{当 } a < \omega_2 < 1.4a; \\ \left[1 + 4 \frac{\omega_2^2 - a^2}{a^2}\right]^{-1} & \text{当 } \omega_2 > 1.4a. \end{cases} \quad (8)$$

介质内的总光功率为输入功率与由镜面  $M$  的反馈功率  $P_R = RP'_R$  之和,  $R$  为镜面反射率, 即

$$P_0 = P_{in} + P_R = P_{in} [1 + R(1 - T)e^{-\delta l}]. \quad (9)$$

由(6)、(8)、(9)式可得系统输入, 输出功率与  $P_0$  的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{in} &= P_0 [1 + R(1 - T)e^{-\delta l}]^{-1}, \\ P_{out} &= P_0 T e^{-\delta l} [1 + R(1 - T)e^{-\delta l}]^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

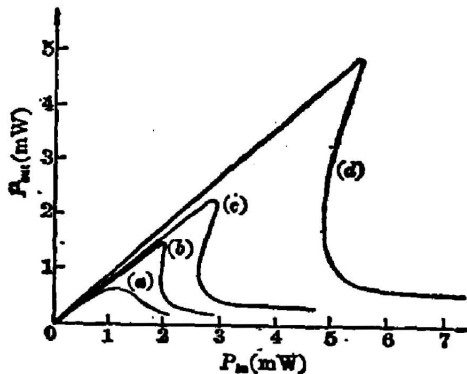


Fig. 5 Theoretical curves of  $P_{out}$  vs  $P_{in}$   $\alpha = 0.36$  mm

(a)  $\delta l = 0.5$ ; (b)  $\delta l = 0.3$ ; (c)  $\delta l = 0.2$ ;  
(d)  $\delta l = 0.1$

此即以介质内总功率  $P_0$  为考虑的双稳方程。给定  $P_0$ , 由(1)式可计算出相应的热透镜焦距  $F_N$ , 再由(2)式算出  $\omega_2$ , 代入(8)式算出  $T$ , 则可由(10)式得出  $P_{in}$  和  $P_{out}$ 。作出  $P_{out}$  相对于  $P_{in}$  的函数曲线, 则能找出双稳滞后区域。图5为  $\alpha = 0.36$ ,  $\delta l = 0.5, 0.3, 0.2, 0.1$ , 各种情况下由上述计算所得出的  $P_{out} - P_{in}$  函数曲线。可以看出,  $\delta l$  愈小, 阈值功率愈高, 而当  $\delta l > 0.3$  时, 吸收太大, 反馈量减小, 将不出现双稳, 这与实验观察结果一致。

图6给出  $\delta l = 0.05$  和  $0.1$  时, 系统的  $P_{out} - P_{in}$  关系曲线, (a), (b) 为计算值, (c), (d) 为与之相应的实验结果。理论计算的下开关功率与实验

下拐点基本一致, 这也正是开始产生像差型散焦的阈值功率。

在  $\delta l$  较低时, 理论与实验符合较好,  $\delta l$  愈高, 偏差愈大。理论与实验不完全一致的原因是:

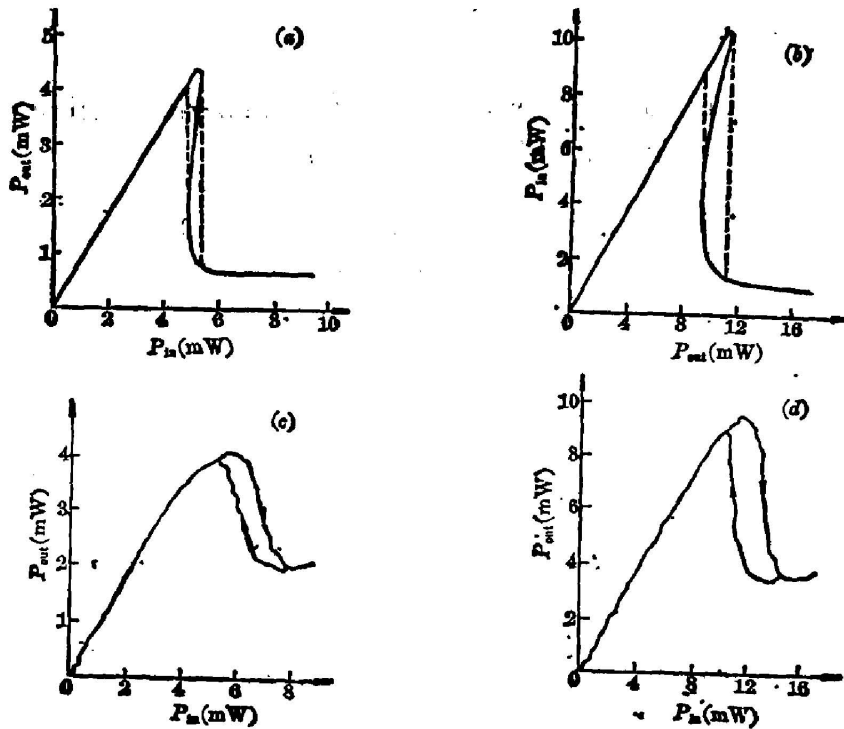


Fig. 6 Theoretical and experimental curves of  $P_{out}$  vs  $P_{in}$   
 $a=0.36\text{mm}$ ; (a) and (c)  $\delta l=0.1$ ; (b) and (d)  $\delta l=0.05$ ;  
 (a) and (b)—theoretical curves  
 (c) and (d)—experimental curves

1. 热散焦有一定的时间常数(约 100 ms),在理论计算中未予考虑。
2. 介质中热对流的存在,使光斑略有畸变,吸收愈高畸变愈显著。
3. 我们所选用的计算像差散焦后功率密度变化的函数关系式(3)是根据低浓度下的实验曲线得到的,它不一定完全符合各种浓度下功率密度分布的变化规律。
4. 随着散焦效应增强,外环干涉级次将会增加,呈现亮暗相间的同心圆环,理论计算中只考虑平均功率密度,未考虑强度分布的影响。虽然实验中滞后区域仅在前一、二环出现的功率范围,影响不大,但也可能产生一些影响。

本实验采用液体介质,热对流难以避免,同时品红溶液在强光作用下可能产生光化学反应,稳定性差,开关速度慢。但我们由此系统证明的设计原理,完全适用于其它类型的散焦介质,若采用响应速度快,且具有自散焦特性的其它固体材料,避免热对流,可能获得更好双稳效果。

#### 参 考 文 献

- [1] J. E. Bjorkholm *et al.*; *Opt. Lett.*, 1981, 6, No. 7 (Jul), 345~347.
- [2] I. C. Khoo; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, 41, No. 10 (Nov), 909~911.
- [3] M. R. Taghizadeh *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, 46, No. 4 (Feb), 331~333.
- [4] S. A. Akhmanov *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1968, QE-4, No. 10 (Oct), 568~575.
- [5] S. A. Akhmanov *et al.*; "Nonlinear Defocusing of Laser Beam", (Presented at the 3rd Symp. on Nonlinear Optics, Erevan, USSR, 1967).

## Experiments and theory of cavity-free self-defocusing optical bistable system

XIE CHANGDE, WU DONGDONG, GAO JIANGRUI AND PENG KUNCHI

*(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan)*

*(Received 3 January 1987; revised 30 March 1987)*

### Abstract

A new cavity-free optical bistable system with negative logical operating character based on aberrational self-defocusing in absorbing medium is designed. The experimental methods and results are presented, the analytical formulas for this system are given. Theoretical calculations are in good agreement with the experimental curves.

**Key words:** self-defocusing; cavityless; bistability.