

波前扰动产生空间暗光孤子 及孤子演化的实验研究*

陈险峰 陈英礼 李 劬 张家纲 黄建东

(上海交通大学应用物理系光学及光子学研究所, 上海 200030)

摘 要 报道实验上观测到用波前扰动法的空间暗光孤子的产生及演化规律。实验测量表明: 首先, 产生的空间暗孤子的空间轮廓是双曲正割型的函数, 这与逆散射理论上的空间暗孤子解是一致的; 其次, 观测了空间暗光孤子在自散焦介质中的演化过程, 实验结果与非线性薛定谔方程计算机数值模拟的结果是一致的。结果表明, 空间暗光孤子随着光束传输过程逐渐演化并在演化过程中逐渐形成了多个孤子对; 最后, 测量了不同细丝宽度、非线性系数与光强下空间暗孤子的产生及演化规律。改变实验参数, 将改变空间暗孤子对数, 以及同一阶空间暗孤子的横向速度, 与逆散射理论预言一致。这些规律对于发展可驾驭(steerable)波导全光器件具有重要意义。

关键词 空间暗光孤子, 自诱导波导。

1 引 言

空间暗光孤子由于其在全光开关及光计算上潜在应用前景, 近年来, 引起人们广泛注意^[1~4]。空间暗光孤子在三维情况下能稳定传输, 产生空间暗光孤子只需较低的激光功率, 空间暗光孤子能形成“自诱导波导”, 通过位相、强度等全光控制方法可以较容易改变“诱导波导”的方向、形态等^[2, 4]。Andersen等^[1]首先报道了利用波前扰动法在掺入少量染料的汽油溶液里观测到空间暗孤子的产生, 并测量了空间暗孤子横向传播速度, 与逆散射方法得到的结果很好吻合。文献^[1]报道了已形成的空间暗光孤子横向速度的直接测量, 并与逆散射理论比较, 但并未涉及孤子的演化过程。本文在演示暗孤子产生的基础上, 观测了空间暗光孤子演化过程。改变产生空间暗孤子的实验条件, 如细丝宽度、背景光强度、介质非线性系数等, 观测对空间暗光孤子性质的影响。以上实验结果均与逆散射理论符合。上述研究为波前扰动法实现可控诱导波导提供了实验根据, 并为发展空间暗光孤子全光器件提供了有用的背景知识。

2 数学模型

空间暗孤子由非线性薛定谔方程描述^[5, 6]:

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年7月8日; 收到修改稿日期: 1995年11月3日

$$2ik \frac{\partial E}{\partial Z} + \frac{\partial^2 E}{\partial X^2} - 2 \frac{k}{n_0} n_2 |E|^2 E = 0 \quad (1)$$

其中 k 为波矢, n_2 为介质的非线性折射率。经过无量纲的线性变换:

$$z = \frac{\pi}{2L_f} Z, \quad x = \frac{\pi}{a_0} X, \quad U = \frac{\lambda_0}{2a_0} \frac{1}{(n_0 n_2)^{1/2}} E \quad (2)$$

式中 $L_f = 2a_0^2 n_0 / \lambda_0$, a_0 为长度量纲。于是得到了如下的归一化的非线性薛定谔方程。

$$i \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - |U|^2 U = 0 \quad (3)$$

利用逆散射方法, 在某些特殊的初始条件下, 对于归一化的非线性薛定谔方程, 文献[7]给出了解析解。

一种特殊的箱型初始条件为:

$$\begin{cases} U|_{t=0} = 0, & |x| < a \\ U|_{t=0} = 1, & |x| > a \end{cases} \quad (4)$$

式中 a 为箱型暗波形的半宽。

根据逆散射理论, 这种初始条件下孤子的本征值, 即归一化横向传播速度 λ_n 与归一化线宽 a 的关系为^[8]:

$$\lambda_n = \cos(2\lambda_n a) \quad (5)$$

λ_n 与实验测量的横向速度 v 的关系为:

$$\lambda_n = v \left(\frac{2n_0}{|n_2| E_0^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

归一化线宽与实际遮挡的细丝宽度关系为:

$$a = \left(\frac{|n_2| E_0^2}{2n_0} \right)^{1/2} n_0 k_0 \frac{\chi_\omega}{2} \quad (7)$$

3 实验装置

图 1 是空间暗孤子的产生及演化的实验装置示意图。激光器为 Ar^+ 激光器, 输出的激光波长为 $0.5145 \mu\text{m}$, 光斑直径为 1 mm , 最大输出功率为 140 mW 。液槽长度为 200 mm , 在入射面和出射面镶嵌的玻璃较薄, 约 0.1 mm , 以减少损耗。槽里盛放的是非线性热散焦介质——酒精, 并加入少量红色染料, 以增强在激光器工作波长处的介质的非线性效应。

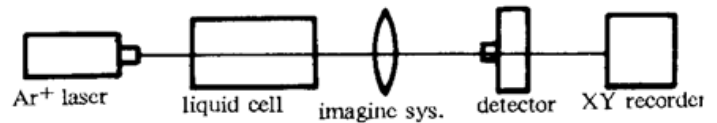


Fig. 1 Experimental setup

箱型初始条件用金属丝模拟, 置于入射面处, 激光束在入射面上被细丝分割后在介质中传播。由于介质的自散焦和衍射, 光束形状逐渐发生变化, 最后在出射面上形成经过 200 mm 演化距离的空间暗光子图像。由于在出射面上的像较小, 所以将其放大并投影到观察屏上进行观测。本实验采用了一系列不同焦距的透镜, 并加入小孔光阑, 用来遮挡干扰信号。

探测器采用能自动进行横向扫描的光电转换装置, 从光电池输出的信号接到 XY 记录仪上, 即可得到直观的光强横向分布曲线。

4 结果及讨论

4.1 空间暗孤子的验证

图 2 示出观测屏上观测到的图像。光斑内表征空间暗孤子的条纹在头尾部有明显的“扩展”现象，这是由于空间暗孤子条纹半宽的平方 κ^2 与局部背景强度 E_0^2 的乘积 $\kappa^2 E_0^2$ 是一个守恒的常数，而实际的激光束是非均匀背景的高斯光束，以致背景较亮的中央处条纹窄而在自散焦介质中产生了具有一定横向速度的空间暗孤子。

表征空间暗孤子强度分部空间轮廓的数学表达式是^[3]：

$$|u(\zeta)|^2 = |u_0|^2 [1 - B^2 \operatorname{sech}^2(k\zeta)] \quad (8)$$

其中 $|u_0|^2$ 为背景强度， B^2 表征空间暗孤子的灰度。

图 3 为实验测出的空间暗孤子的空间轮廓与理论上的空间暗孤子曲线进行拟合的结果，拟合参数是： $|u_0|^2 = 63.28$ ， $B^2 = 0.765$ ， $k = 0.211$ ，理论与实验吻合很好，这证明产生的暗条纹的确是空间暗孤子条纹。



Fig. 2 Photography of typical dark spatial soliton

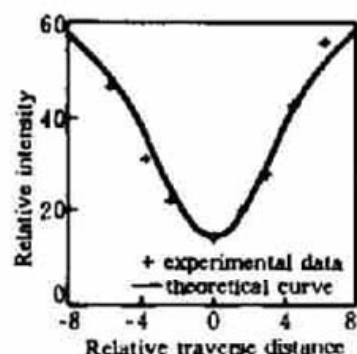


Fig. 3 Theoretical curve and experimental results of near-field intensity profile at the output face of the sample cell. The theoretical parameters are: $|u_0|^2 = 63.28$, $B^2 = 0.765$, $k = 0.211$

4.2 演化规律的观测

对于波前扰动法形成箱型初始条件，逆散射方法给出了产生的暗孤子的非常简明的孤子横向传播速度，如方程(5)所示，但空间暗孤子是如何演化，如何从一个中间凹陷的波形演变成多对具有横向传播速度的孤子，实验上还未见报道。为了得到空间暗孤子在自散焦介质中的演化规律，本文从实验上测量了孤子随传输方向的空间演化过程并用计算机数值模拟了在有限高斯背景下的空间暗孤子随传输方向的空间演化规律。两者符合的非常好。

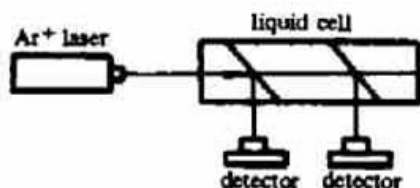


Fig. 4 Experimental setup of measuring process of soliton developing

图 4 为测量空间暗孤子随传输方向的空间演化过程的示意图。

所得的结果如图 5 所示。

用计算机数值模拟的结果如图 6，图中相对长度由(2)定义。

通过比较可以看出，实验与理论吻合很好。当然，理论模拟时仅考虑了非线性介质对空间暗孤子的影响，实际上，介质对于暗孤子的亮背景存在一定的吸收和散焦作用。因此，随着演化距离的增加，光斑的强度越来越弱，光斑的半径越来越大。不难看出空间暗孤子的演化规律：空间暗孤子不是一进入自散焦介质就已产生，而是随着传输过程逐渐演化；多对孤子也不是同时产生的，而是沿着传输过程依次产生并演化的。

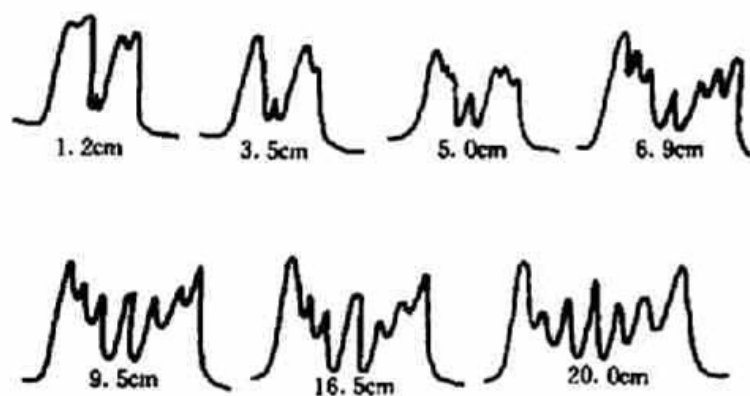


Fig. 5 Experimental measurement of dark spatial soliton evolution along propagation direction. The wire width is $147 \mu\text{m}$

4.3 不同细丝宽度、非线性系数、光强下空间暗孤子的产生及演化

从本征方程(5)看,当细丝宽度、非线性系数、光强不同时,空间暗孤子的产生及演化将不同,即产生不同对数的空间暗孤子和不同的空间暗孤子横向传输速度。也就是说,在细丝宽度、非线性系数、光强不同的情况下将产生不同的空间暗孤子,这对于发展空间暗光孤子自诱导波导有着很重要的意义。

4.3.1 不同细丝宽度下空间暗孤子的产生及演化

用图解法解本征方程(5),如图7。显然 α 的大小决定余弦函数曲线的疏密程度, α 越大,曲线越密,则与直线的交点也越多,也就是方程的解越多。所以较宽的金属丝产生的空间暗孤子数目较多,而且空间暗孤子的横向传输速度也将不同。图8是两幅在不同细丝宽度下空间暗孤子的照片。

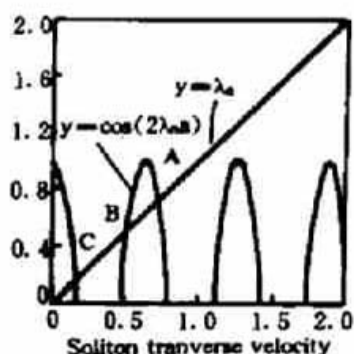


Fig. 7 Diagrammatic solution of dark spatial solitons A, B and C are three solutions as $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

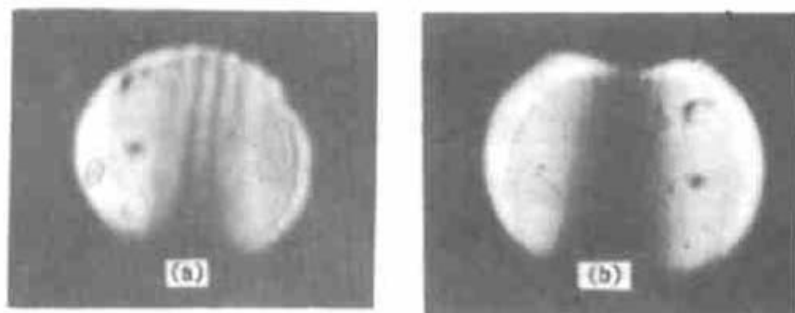


Fig. 8 Evolution of dark spatial solitons with different wire width, (a) $73 \mu\text{m}$, (b) $147 \mu\text{m}$. The generated pairs of solitons are 2 and 4, respectively

4.3.2 不同非线性系数下空间暗孤子的产生及演化

将(6)式、(7)式代入本征方程(5)式,可得:

$$\left(\frac{2n_0}{|n_2|E|\delta|} \right)^{1/2} v = \cos(n_0 k_0 \lambda_0 v) \quad (9)$$

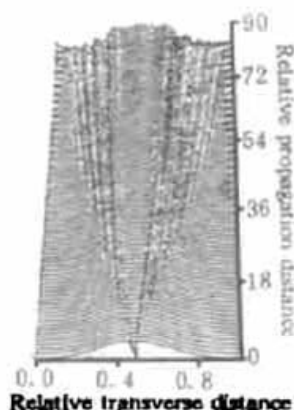


Fig. 6 Computer simulation of dark spatial soliton evolution along propagation direction according to NL Schrödinger equation

由此可见介质的非线性系数 n_2 增加, 将导致直线斜率的减小, 而不影响余弦曲线, 所以方程解的数目将增加。这说明了如果增加介质的非线性系数 n_2 , 将观测到空间暗孤子对数的增加, 同一阶空间暗孤子的横向速度也将改变。

在实验中, 用改变染料的浓度来改变介质的非线性系数。将一定浓度的红色酒精溶液逐滴加入未经染色的酒精中, 待充分扩散后, 用 XY 记录仪记录下非线性系数增加过程中空间暗孤子的图像, 如图 9 所示。

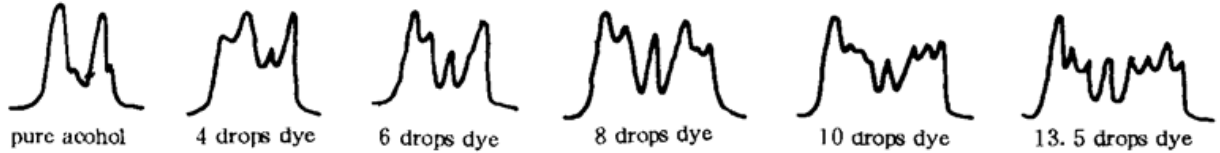


Fig. 9 Evolution of dark spatial solitons with different nonlinear optical coefficient. With increase of nonlinear optical coefficient, the pairs of dark spatial solitons increase

4.3.3 不同激光强度下空间暗孤子的产生及演化

从方程(9)可知, 激光强度对空间暗孤子的影响同介质的非线性系数 n_2 是一样的。因此, 改变激光的光强, 得到的空间暗孤子的对数也将增加。

在光源前加不同的衰减片来改变入射到介质中的光强, 图 10 是不同光强下, 空间暗孤子的图像。



Fig. 10 Evolution of dark spatial solitons with different laser intensity. With increase of laser intensity, the pairs of dark spatial solitons increase

从图中可以看到, 随着输入激光强度的增加, 空间暗孤子对数增加, 而且同一阶空间暗孤子的横向速度也改变。这与理论上预期的结果是一致的。

5 结 论

1) 利用波前扰动法在热散焦介质中观测了空间暗孤子的产生。产生的空间暗孤子的空间轮廓是双曲正割型的函数, 与逆散射理论上的空间暗孤子解是一致的。

2) 通过实验观测了空间暗孤子在自散焦介质中的演化过程, 它与空间暗孤子满足的非线性薛定谔方程的计算机数值模拟结果是一致的。结论是: 空间暗孤子不是一进入自散焦介质就已产生, 而是随着传输过程逐渐演化; 多对孤子也不是同时产生的, 而是沿着传输过程依次产生并演化的。

3) 测量了在不同细丝宽度、非线性系数、光强下空间暗孤子的产生及演化规律, 改变实验条件, 将使空间暗孤子对数, 以及同一阶空间暗孤子的横向速度发生变化。由于每个空间暗孤子都能形成“自诱导”波导, 能支持信号光同轴地传输, 所以改变产生空间暗孤子的条件, 即能改变“自诱导”波导的数目和输出出口(由于传播速度不同), 从而成为可“驾驭”的波导, 这对今后发展全光器件有着较大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] David. R. Anderson, Duane. E. Hooton, *et al.*, Direct measurement of the transverse velocity of dark spatial solitons. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(14) : 783~785
- [2] X. Yang, B. L. Davies, *et al.*, On the properties of waveguide X-junctions written by spatial solitons. *International J. of NL Optics Physics*, 1993, **12**(3) : 339~352
- [3] B. Lather-Davies, X. Yang, Steerable optical waveguides formed in self-defocusing media by using dark spatial solitons. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(24) : 1755~1757
- [4] C. Bosshard, G. I. Stegeman, *et al.*, All-optical steering of dark spatial soliton arrays and the beams guides by them. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2) : 90~92
- [5] P. A. Belacger, P. Mathicn, Dark soliton in a Kerr defocusing medium. *Opt. Lett.*, 1987, **26**(1) : 111~113
- [6] S. Maneuf, R. Desailly *et al.*, Stable self-trapping of laser beams; Observation in a nonlinear planar waveguide. *Opt. Comm.*, 1988, **65**(3) : 193~198
- [7] S. A. Gredeskul, Y. S. Kivshar *et al.*, Dark-pulse soliton in nonlinear optical fibers. *Phy. Rev. A*, 1990, **41**(7) : 3394~4008
- [8] V. E. Zakharov, A. B. Shabat, Interaction between solitons in stable medium. *Sov. Phys. JETP.*, 1973, **37**(5) : 823~828

Experimental Study of Dark Spatial Soliton Generation and Evolution Using Method of Wavefront Perturbation

Chen Xianfeng Chen Yingli Li Qu Zhang Jiagang Huang Jiandong

(*Institute of Optics and Photonics, Department of Applied Physics,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

(Received 8 July 1995; revised 3 November 1995)

Abstract This paper reports the experiments of dark spatial soliton generation and evolution using method of wavefront perturbation. Generation of dark spatial solitons are confirmed. Evolution of dark spatial solitons are observed and are consistent with that of computer simulation. Changing experimental parameters, such as width of wires, nonlinear optical coefficient and laser intensity leads to the change of induced waveguides. These results will be valuable to all-optical steerable waveguide device.

Key words optical dark spatial soliton, self-induced waveguides