

基于热致非线性效应的暗空间 光孤子实验研究*

陆 宏 徐建东 洪 涛 李淳飞 洪 晶
(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

摘 要 实验研究了热致非线性效应作用下, C_{60} 甲苯溶液中强连续激光激发暗空间光孤子的过程, 并给出了数值模拟结果。

关键词 暗空间光孤子, 热致非线性效应, C_{60} 。

1 引 言

1987 年 Belanger 等人第一次从自散焦的克尔型非线性介质中光场的非线性薛定谔方程 (NLS) 出发, 证明了在自散焦的克尔型非线性介质中可能存在 TE 模线偏振的 (1+1) 维暗空间光孤子^[1], 1991 年 Swartzlander 等人在 Na 蒸汽中用连续激光第一次观察到以暗带和暗网格形式存在 (1+1) 维暗空间光孤子^[2]; 1992 年 Tran 采用线性分析的方法分析了 (1+1) 维暗空间光孤子的稳定性^[3]; 1993 年 McDonald 等人用数值计算方法分析了准 (1+1) 维暗空间光孤子的三维不稳定性^[4]

本文研究了在热致非线性效应作用下, 采用连续的 Ar^+ 激光激发 C_{60} 甲苯溶液产生暗空间光孤子的实验。

2 实验装置

2.1 总体设计

实验光路如图 1 所示。实验中采用波长为 514.5 nm、直径为 2 mm 的线偏振连续 Ar^+ 激光束, 首先通过衰减器调节其强度, 再通过位相跃变片 A 产生位相跃变。而后, 用焦距为 $f = 10$ cm 的柱凸透镜聚焦, 通过提升器的垂直反射镜把光线会聚在 C_{60} 甲苯溶液样品的上表面: C_{60} 甲苯溶液装于长度为 4 cm 的样品池中; 激光束在 C_{60} 甲苯溶液中激发出孤子后, 从样品池下表面射出, 直接在样品池下表面的毛玻璃上成像。因为孤子图像的尺寸比较小, 所以通过检偏器调节光强后, 要采用 CCD 相机放大成像, 并利用计算机将图像的光强分布记录下来。值得指出的是, 实验中为了消除重力作用在热致折射率变化效应中的影响, 在柱面透镜后使用了光

* 哈尔滨工业大学校基金资助。

收稿日期: 1996 年 7 月 20 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 21 日

学提升器,从而使光束竖直通过 C₆₀ 甲苯溶液,再水平通过偏振片进入 CCD 相机,为了简化光路,这部分在图 1 的原理图中被略去了。

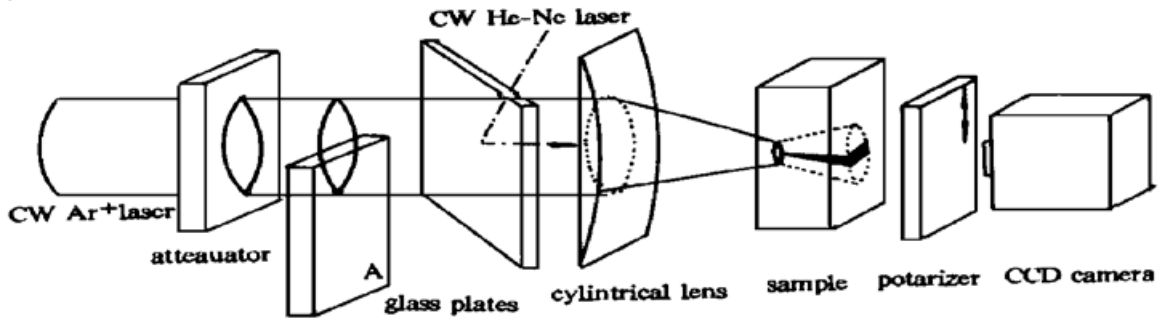


Fig. 1 The experimental light roal to stimulate dark spatial optical solitons

2.2 位相跃变的实现

如图 2 所示,通过薄玻璃片将高斯光束亮背景一半的位相延迟,而另一半的位相不变。这样就在光束的中心处产生一个位相跃变,然而光强分布却不发生变化。因为光场中电场分量的复振幅具有奇函数特征,所以称之为奇边界条件。这种边界条件,在位相跃变为 π 时,经过亮辐射,能激发出单一的黑孤子。这是因为黑孤子本身的位相分布具有中心位相跃变为 π 的特征,与边界条件最为接近。奇边界条件的特点是,通过转动玻璃片可以连续地改变位相跃变的大小,这样就可以激发出黑度连续可调的暗空间光孤子。暗空间光孤子的黑度发生连续变化的同时,它的横向速度也发生相应的变化,在空间上表现为暗带的横向移动。

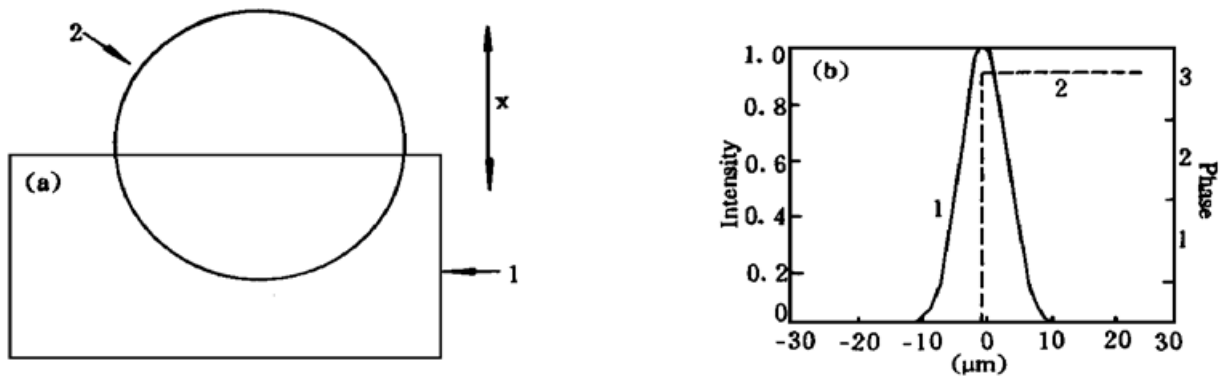


Fig. 2 Relalization of odd boundary condition

(a) 1: thin glass; 2: Gaussian beam; (b) 1: optical intensity; 2: phase

本文实验采用奇边界条件,位相跃变片 A 是这样构成的:将厚度为 250 μm 的薄玻璃片的直边卡在三维调节架上梁的窄槽中,玻璃片可以绕此直边自由摆动。当玻璃片的摆角小于 5° 时,它的转轴对边偏轴距离小于 20 μm ,能使波长为 514.5 nm 的光位相变化 $0 \sim \pi$

3 理论分析

光强 I 为连续激光射入 C₆₀ 溶液时,溶液温升 ΔT 将导致介质折射率的变化:

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + (dn/dT) \Delta T \tag{1}$$

式中 dn/dT 为折射率温度系数。在单位体积的介质中热量 q 随时间的变化主要取决于吸热作用与热传导作用:

$$(dq/dt) = \alpha I - \kappa \nabla^2 T \tag{2}$$

式中 α 为吸收系数, κ 为热传导系数。如果激光束是稳定的,可认为光强 I 是横向慢变的,即有

$$\nabla^2 I \ll I \quad (3)$$

此时存在:

$$\Delta T = CI \quad (4)$$

C 为介质的固有常数。把(4)式代入(1)式就有:

$$n = n_0 + (dn/dT)CI \quad (5)$$

(5)式也可写为:

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 \quad (6)$$

其中, n_2 为介质的非线性折射率。暗空间光孤子传播的非线性薛定谔方程为:

$$i\partial \epsilon / \partial \xi + \partial^2 \epsilon / \partial \zeta^2 - 2|\epsilon|^2 \epsilon = 0 \quad (7)$$

上式忽略了介质的损耗, 其中 $\epsilon = E/E_0$ 为归一化场振幅, $\xi = z/z_0$ 为归一化纵向坐标, $\zeta = x/x_0$ 为归一化横向坐标。 E_0 为场的最大振幅, z_0 为孤子传播的特征尺度, x_0 为孤子宽度的特征尺度。用逆散射法可以求得(7)式的孤子解:

$$\epsilon(\xi, \zeta) = \frac{(\lambda + i\nu)^2 + \exp Z}{1 + \exp Z} \exp(-2i\xi) \quad (8)$$

其中, $Z = 2\nu(\zeta - 2\lambda\xi)$, $\nu^2 = 1 - \lambda^2$, ν 和 λ 分别表征孤子的黑度和横向速度。当 $\lambda = 0, \nu = 1$ 时, 位相跃变为 π , 称为黑孤子; 当 $\lambda \neq 0, \nu < 1$ 时, 称为灰孤子, 具有横向速度, 其大小为 2λ 。

4 实验结果和数值模拟

4.1 实验过程与现象

首先, 用衰减片将 Ar^+ 激光入射功率调节到 $P \ll 10 \text{ mW}$, CCD 相机摄到的图像出现较宽的暗带, 其光强半宽度为 $285 \mu\text{m}$ (可以认为是线性衍射效应); 然后, 逐渐增加 Ar^+ 激光入射功率, 发现暗带逐渐变窄 (随着光强的增加, 介质折射率的非线性效应逐渐明显); 当入射激光功率 $P = 47 \text{ mW}$ 时, 使 C_{60} 甲苯溶液的厚度增减 5 mm , 发现介质厚度变化前后暗带的宽度基本不变, 可见暗带就是准(1+1) 维的暗空间光孤子, 测得其光强半宽度为 $\Delta_S(\text{FWHM}) = 57 \mu\text{m}$, 如图 3 所示。这时调节相跃变片 A 的偏角, 发现暗带在光斑中上下移动, 这说明由于位相跃变不同, 激发出的暗空间光孤子的黑度不同, 横向速度也不同。

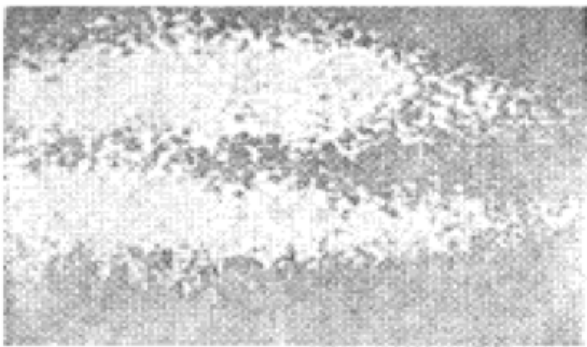


Fig. 3 The experimental photo of dark spatial optical soliton

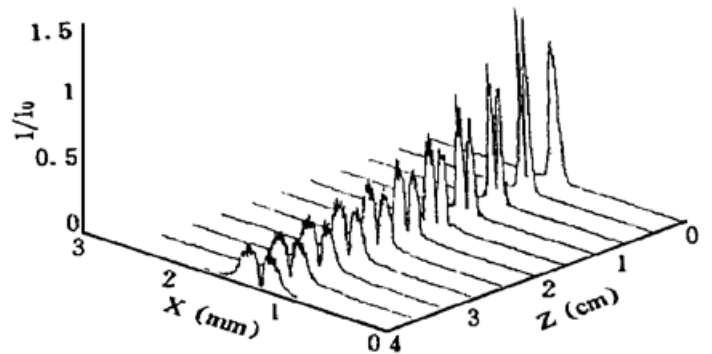


Fig. 4 Numerical computation of dark spatial optical soliton in C_{60} toluene soliton

4.2 数值模拟

利用传播束法进行数值模拟, 高斯光束的束腰半径为 0.08 mm , 理论模拟所得暗空间光孤子的宽度为 $50 \mu\text{m}$, 可见实验和理论模拟相吻合。图 4 为 C_{60} 甲苯溶液中暗空间光孤子形成

过程的数值模拟结果。

结 论 从上面的实验可知,在热致非线性效应作用下,用强的连续激光照射三阶非线性介质,可能激发出暗空间光孤子。这种暗空间光孤子可以广泛地应用于柔性波导、光开关、方向耦合器等光子器件中,为全光计算及全光通讯提供了可能。

参 考 文 献

- [1] Pierre Andre Belanger, Pierre Mathieu, Dark soliton in a Kerr defocusing medium. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(1) : 111~ 113
- [2] G. A. Swartzlander, Jr., D. R. Anderson, J. J. Regan *et al.*, Spatial dark soliton stripes and grids in self-defocusing materials. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(12) : 1583~ 1757
- [3] H. T. Tran, Stability of dark solitons: linear analysis. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **46**(11) : 7319~ 7321
- [4] G. S. McDonald, K. S. Syed, W. J. Firth, Dark spatial soliton break-up in the transverse plane. *Opt. Commun.*, 1993, **95**(4~ 6) : 281~ 287

Experimental Study on Dark Spatial Optical Soliton Based on Thermal Nonlinear Effect

Lu Hong Xu Jiandong Hong Tao
Li Chunfei Hong Jing

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001)

(Received 20 July 1996; revised 21 October 1996)

Abstract Based on thermal nonlinear optical effect, the dark spatial optical solitons stimulated with a strong CW laser in the toluene solution of C₆₀ are studied. The results of the experiment and numerical computation are given.

Key words dark spatial optical soliton, thermal nonlinear effect, C₆₀.