

C₆₀ 甲苯溶液中热致暗空间光孤子实验*

陆 宏 徐建东 刘树田 李淳飞 洪 晶

(哈尔滨工业大学应用物理系 哈尔滨 150001)

提要 设计了热致暗空间光孤子的实验光路和奇边界条件的实施方案,在 C₆₀ 甲苯溶液中实现了热致暗空间光孤子实验,讨论了样品高度和浓度对热致孤子的影响,并对基阶暗空间光孤子进行了数值模拟,发现数值结果与实验结果一致。

关键词 暗空间光孤子,热致非线性效应,C₆₀ 甲苯溶液,奇边界条件

1 引 言

自 1973 年 A. Hasegawa 和 F. Tappert 预言在 Kerr 型光学介质中存在着以非线性薛定谔方程描述的时间光孤子^[1]以来,人们不仅以实验验证了时间光孤子的存在^[2],而且预言和实现了空间光孤子^[3-5]。空间光孤子主要表现了光束的横向结构在空间不扩散的现象,它起因于光束的衍射与非线性的自聚(散)焦两种效应的平衡。空间光孤子也服从非线性薛定谔方程,所不同的只是其全部坐标皆用空间坐标描述。然而,Kerr 非线性介质的非线性折射率 n_2 一般较小,要想在这种介质中激发出暗空间光孤子则需要较高的激光光强;相反,热致非线性效应带来的等效非线性折射率 n_2 较大,暗空间光孤子易于激发。

本文将介绍在不同高度和不同浓度的 C₆₀ 甲苯溶液中热致暗空间光孤子实验,并进行了数值模拟。

2 实验装置和奇边界条件的设计

实验光路如图 1 所示,奇边界条件如图 2 所示。实验中用波长为 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;再通过薄玻璃片确定光场的奇边界条件;而后,用焦距 $f = 10$ cm 的柱凸透镜聚焦,通过反射镜把焦线

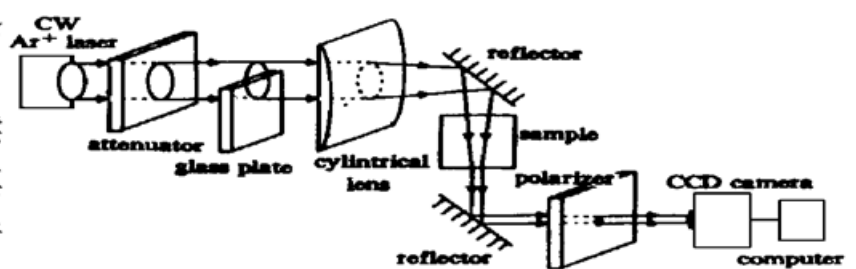


图 1 激发暗空间光孤子的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for stimulation of dark spatial optical solitons

* 哈尔滨工业大学校基金资助项目。

品中激发出孤子后,从样品盒的下表面射出,直接打在紧贴样品盒下表面的毛玻璃屏上成像;由于孤子图像的尺寸较小,所以通过检偏器调节光强后,要采用 CCD 摄像机放大成像,并用计算机进行图像处理,获取实验结果。值得注意的是,实验中使激光束竖直通过样品,是为了消除重力在热致非线性效应中的影响。

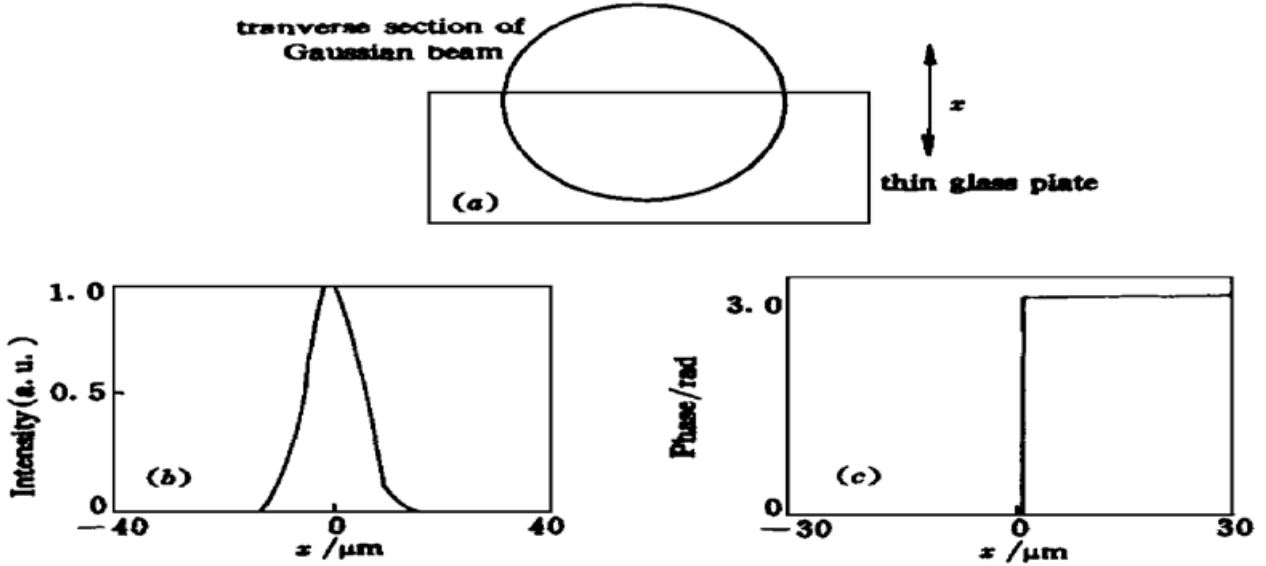


图 2 激发暗空间光孤子的奇边界条件

Fig. 2 Odd boundary condition to stimulate dark spatial optical solitons

3 C₆₀甲苯溶液中的实验

3.1 理论分析

文献[6]证明了热致非线性效应是一种类 Kerr 效应,故描述热致暗空间光孤子传播的非线性薛定谔方程(NLS)为

$$i \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \zeta^2} - 2|\epsilon|^2 \epsilon = 0 \tag{1}$$

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。这里 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方程(1)的孤子解

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

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 2λ 。

3.2 不同高度样品中的实验

从理论上讲,暗空间光孤子是光波在光学非线性介质中衍射效应和非线性自散焦效应达到平衡时的一种临界状态,这里讨论适当增加样品溶液的高度,出射光场分布的变化情况。

采用图 1 装置进行了不同样品高度的实验,C₆₀甲苯溶液的高度变化范围为 3.0~4.0 cm,变化步长为 0.1 cm,实验测得的暗带半宽度如图 3 所示。

图 3 显示实验中实测的出射光场暗带的半宽度 $\Delta_{s(FWHM)}$ 随 C₆₀甲苯溶液的高度 h 变化很小,仅有几个微米,且无规律性,显然这可以被认为是实验误差,因为我们采用的 CCD 的测量

精度仅为 μm 量级, 即实验系统的误差至少为 $1\sim 9\ \mu\text{m}$ 之间。同时, 图 3 显示实验结果暗带的半宽度比理论计算的暗空间光孤子的半宽度略大, 这可以认为是采用把热致非线性效应近似成类 Kerr 效应所带来的误差, 而且误差同样在实验设备带来的系统误差之内, 所以是可以接受的。因此可以得出结论: 当入射光强为 $47\ \text{mW}$ 时, 采用图 1 的实验布局, C₆₀甲苯溶液的高度由 $3.0\ \text{cm}$ 变化到 $4.0\ \text{cm}$, 出射光暗带的半宽度基本保持不变, 这个暗带可以被视为 $(1+1)$ 维的热致暗空间光孤子。

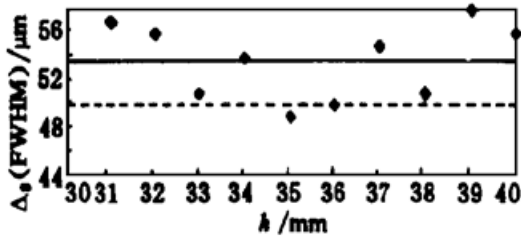


图 3 暗带的半宽度 $\Delta_{0(\text{FWHM})}$ 随 C₆₀ 甲苯溶液高度 h 的变化

◆: 实验结果; —: 实验结果线; ----: 数值计算线

Fig. 3 Width of dark belt with different heights of C₆₀ toluene, $h-\Delta_{0(\text{FWHM})}$

◆: experimental results; —: line from experimental results; ----: line from numerical computation

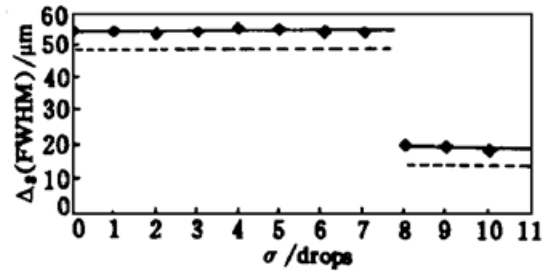


图 4 出射光场中暗带的半宽度 $\Delta_{0(\text{FWHM})}$ 随 C₆₀ 甲苯溶液浓度 σ 的变化

◆: 实验结果; —: 实验结果线; ----: 数值计算线

Fig. 4 Width $\Delta_{0(\text{FWHM})}$ of dark belt in the output field with different densities σ of C₆₀ toluene

◆: experimental results; —: line from experimental results; ----: line from numerical computation

3.3 不同浓度样品中的实验

由于 C₆₀甲苯溶液的非线性自散焦效应强弱直接由热致非线性效应的等效非线性折射率 n_2 决定, 而 n_2 与 C₆₀甲苯溶液的浓度有关, 这里研究不同浓度的 C₆₀甲苯溶液中的暗空间光孤子现象。

仍然采用图 1 的实验布局, 初始时刻 C₆₀甲苯溶液的高度为 $3.7\ \text{cm}$, 采用医用滴管向样品池内滴入高浓度的 C₆₀甲苯溶液, 由于滴入量很少, 可以认为对样品池内的溶液高度影响不大, 但由于滴入的 C₆₀甲苯溶液浓度远远高于样品池中的 C₆₀甲苯溶液, 故可以认为样品池内的 C₆₀甲苯溶液的浓度是逐渐升高的。由于需要保持整个光路不变, 没有办法每滴入一滴高浓度的 C₆₀甲苯溶液测一次样品池中溶液的浓度, 所以实验中以滴入的滴数来标记样品池中的溶液浓度, 这对于定性实验是允许的。实验结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 当滴 7 滴高浓度的 C₆₀甲苯溶液进入样品池时, 出射光场暗带的半宽度基本保持不变, 说明在这个浓度范围内激发出的暗空间光孤子的形态基本不变, 可以看作是热致基阶暗空间光孤子。当向样品池内滴入第 8 滴高浓度 C₆₀甲苯溶液时, 出射光场暗带半宽度突变为原来的 $1/3$ 左右, 且当滴入 9 滴、10 滴高浓度的 C₆₀甲苯溶液时, 出射光场暗带的半宽度相对稳定不变, 可以认为此时观察到的暗带已不是基阶暗空间光孤子, 而是二阶光孤子的中央波形。当滴入 11 滴高浓度的 C₆₀甲苯溶液时, 出射光场暗带消失, 说明此时 C₆₀甲苯溶液的浓度太高, 非线性太强, 已无法维持非线性自散焦效应和线性衍射效应间的某种平衡, 难以激发出简单的暗空间光孤子。

由理论计算可知基阶暗空间光孤子的半宽度约为 $50\ \mu\text{m}$, 二阶暗空间光孤子中央波形的半宽度约为 $15\ \mu\text{m}$ 。这与实验结果相比, 误差在几个微米量级, 是可以接受的。所以可以得到结

论:(1) 当非线性自散焦效应恰好与线性衍射效应平衡时, 介质中可以激发出基阶暗空间光孤子;(2) 当非线性自散焦效应比线性衍射效应大到一定程度时, 介质中可以激发出二阶暗空间光孤子;(3) 从基阶暗空间光孤子到二阶暗空间光孤子是个突变过程, 而非渐变过程。

4 奇边界条件下热致暗空间光孤子的数值模拟

通过数值计算可以证明高斯光束中不同大小的相位跃变 Φ 可以激发出不同黑度的热致暗空间光孤子。带有相位跃变的高斯光束的复振幅为

$$q(x)|_{z=0} = \exp(i\Phi) \exp[-(x/5)^2] \tag{3}$$

其中

$$\Phi = \begin{cases} \varphi & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases}$$

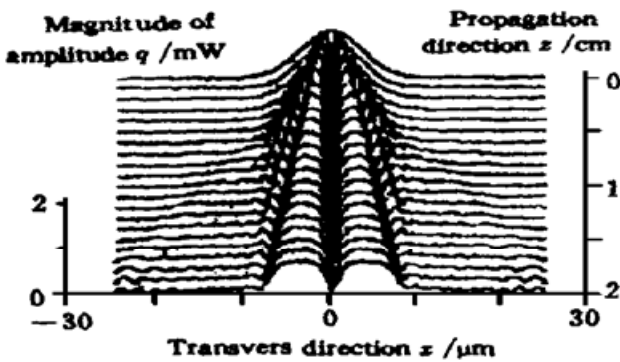


图 5 相位跃变 $\Phi = \pi$ 时, 激发出黑孤子

Fig. 5 Black soliton stimulated when the phase jump Φ is π

0, 且有横向漂移, 更为重要的是, 当相位跃变为大小相等正负相反时, 暗孤子黑度相等, 横向漂移速度大小相等, 方向相反。

采用分步傅里叶变换方法数值模拟非线性折射率系数 $n_2 = -2 \times 10^{-4}$ esu 的 C₆₀ 甲苯溶液中暗空间光孤子, 结果如图 5~ 图 7, 可以得出结论:

(1) 由奇边界条件激发出的暗空间光孤子均为奇数个, 即奇边界条件可以激发单个的暗空间光孤子;

(2) 当奇边界条件造成的光场相位跃变恰好为 π 时, 可以激发出单个的黑孤子, 凹陷最深, 中央为 0, 且无横向漂移;

(3) 当奇边界条件造成的光场的相位跃变不为 π 时, 可以激发出灰孤子, 凹陷较浅, 中央不为

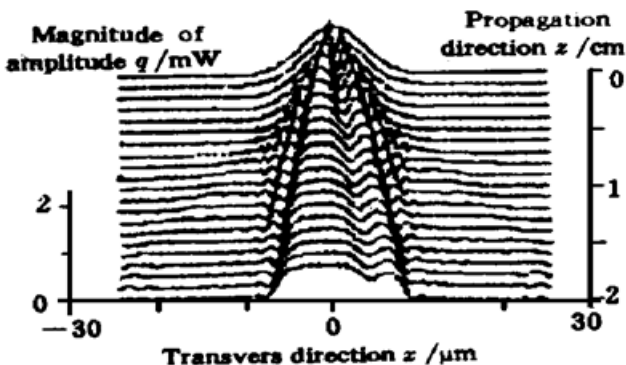


图 6 相位跃变 $\Phi = \pi/2$ 时, 激发出向右运动的黑度更小的灰孤子, 它的横向速度更大

Fig. 6 Grey soliton which moves to the right is stimulated when the phase jump Φ is $\pi/2$. The grey soliton is less black and its transverse velocity is higher

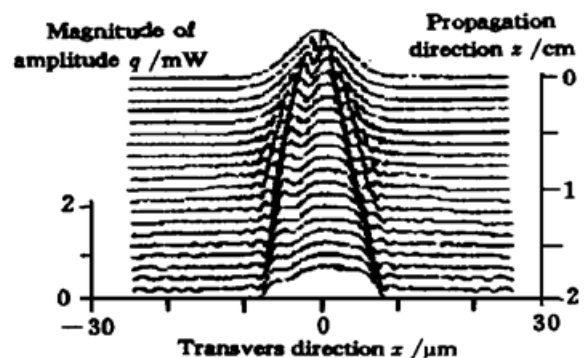


图 7 相位跃变 $\Phi = -\pi/2$ 时, 激发出向左运动的黑度更小的灰孤子, 它的横向速度更大

Fig. 7 Grey soliton which moves to the left is stimulated when the phase jump Φ is $-\pi/2$. The grey soliton is less black and its transverse velocity is higher

5 结 论

数值计算出的热致暗空间光孤子的形态与实验结果是一致的。当样品高度变大时, 激发出的孤子形态基本不变; 当样品浓度适当变大时, 孤子形态也不变, 但当样品浓度大到一定程度时, 激发出的不再是基阶孤子, 而是二阶孤子。

参 考 文 献

- 1 Akira Hasegawa, Frederick Tappert. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Normal dispersion. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(4) : 171~ 172
- 2 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13) : 1095~ 1101
- 3 Pierre-Andre Belanger, Pierre Mathieu. Dark soliton in a Kerr defocusing medium. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(1) : 111~ 113
- 4 Hubvert Jerominek, Claude Delisle, Real Tremblay. Optical branching effect in Ti:LiNbO₃ waveguides: near-field pattern studies. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5) : 732~ 736
- 5 G. A. Swartzlander, Jr., D. R. Andersen, J. J. Regan *et al.*. Spatial dark-soliton stripes and grids in self-defocusing materials. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(12) : 1583~ 1586
- 6 Li Chunfei, Hong Tao. Dark spatial optical soliton and soliton-induced flexible waveguide in C₆₀ solution. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1996, **45**(10) : 1671~ 1676 (in Chinese)

Experiment on Thermal Dark Spatial Optical Solitons in C₆₀ Toluene

Lu Hong Xu Jiandong Liu Shutian Li Chunfei Hong Jing

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract In this paper, the experimental setup and the odd boundary condition on thermal dark spatial optical solitons were designed, and the experiment with samples of different heights and different densities were realized in C₆₀ toluene. Finally, numerical results of thermal dark base solitons were simulated, in good agreement with those obtained experimentally.

Key words dark spatial optical soliton, thermal nonlinear effect, C₆₀ toluene, odd boundary condition