

叶绿素丙酮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)

摘 要 设计了热致暗空间光孤子的实验光路和偶边界条件的实施方案, 在叶绿素丙酮溶液中实现了热致暗空间光孤子实验, 并采用分步傅里叶变换法进行了数值模拟, 发现两者的结果一致。

关键词 暗空间光孤子, 热致非线性效应, 叶绿素丙酮溶液, 偶边界条件, 分步傅里叶变换。

1 引 言

自从 1973 年 Hasegawa 和 Tappert 预言在克尔(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, 克尔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。

本文将介绍在叶绿素丙酮溶液中激发热致暗空间光孤子的实验, 并与数值模拟结果进行了对比。

2 实验装置和偶边界条件的设计

实验的光路如图 1 所示, 偶边界条件如图 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; 再通过细丝确定光场的偶边界条件; 而后, 用焦距 $f = 10$ cm 的柱凸透镜聚焦, 通过反射镜把焦线竖直打在样品的上表面; 激光束在样品中激发出孤子后, 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。

* 哈尔滨工业大学校基金资助项目。

收稿日期: 1996-12-20; 收到修改稿日期: 1997-4-2

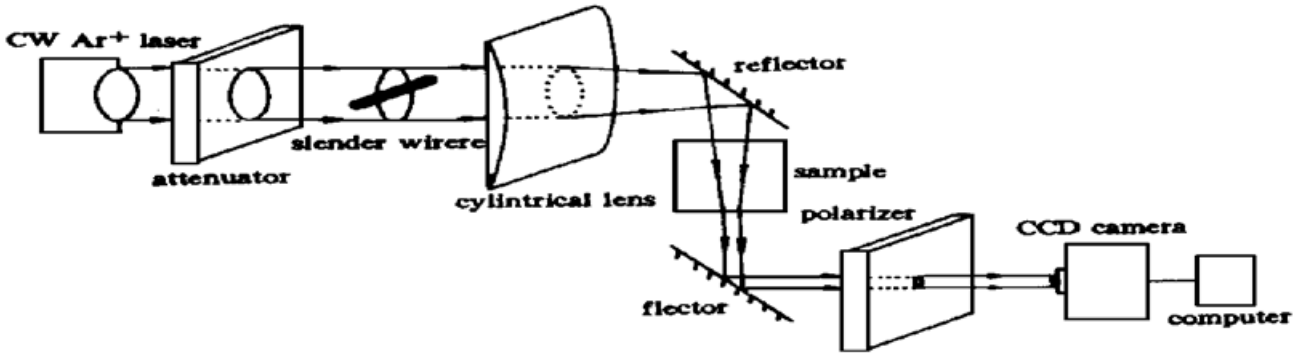


Fig. 1 Experimental setup to simulate dark spatial optical solitons

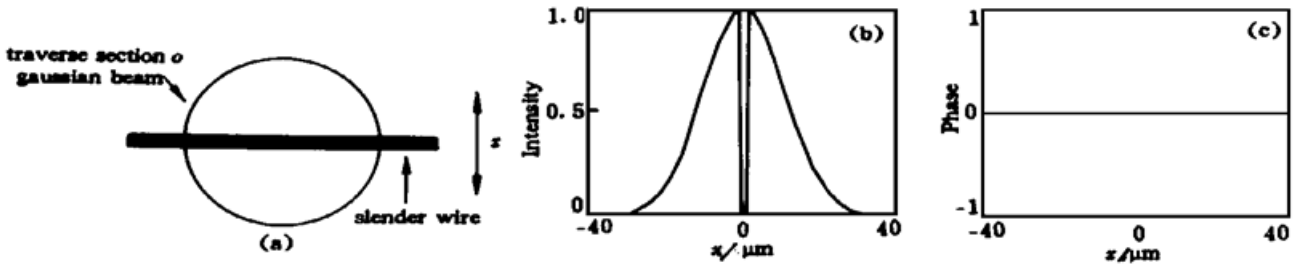


Fig. 2 Even boundary condition to stimulate dark spatial optical solitons

3 叶绿素丙酮溶液中的实验

3.1 理论分析^[6]

利用细丝形成的偶边界条件为一种特殊的箱型初始条件:

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

其中 a 为细丝的半径。

根据逆散射理论, 这种初始条件下暗空间光孤子的本征值, 即归一化横向速度 U_n 为:

$$U_n = \cos(2U_n a) \quad (2)$$

U_n 与实验测量的横向速度 v 的关系为:

$$U_n = v(2n_0 / |n_2| E_0^2)^{1/2} \quad (3)$$

归一化线宽与实际遮挡的细丝宽度关系为:

$$a = v(|n_2| E_0^2 / 2n_0)^{1/2} n_0 k_0 (x_0 / 2) \quad (4)$$

其中, n_2 为热致非线性效应造成的介质等效非线性折射率, x_0 为实际遮挡的细丝宽度。

3.2 暗空间光孤子的实验观测

利用细丝形成偶边界条件, 可观测到在出射光场中有两条暗带, 其强度分布如图 3 所示。图 3 显示的出射光场的横向分布表明, 偶边界条件激发出两个对称的暗空间光孤子, 在出射光场上出现两条对称的暗带。当沿着轴线缓慢移动 CCD 摄像机时可以清晰地观察到两条暗带逐渐分离, 但始终是对称的, 这说明偶边界条件激发出的这两个暗空间光孤子是有横向运动的, 且两个孤子的横向运动速度大小相等, 方向相反, 这两个孤子都是灰孤子。

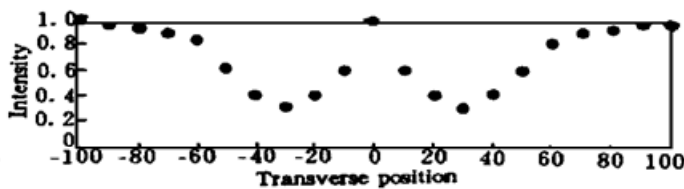


Fig. 3 Output optical field

3.3 暗空间光孤子的验证

为了证明观察到的两条暗带确是两个对称分布的暗空间光孤子, 进行了改变叶绿素丙酮溶液高度的实验研究。实验中叶绿素丙酮溶液的高度为 3.0 cm~ 4.0 cm, 步长为 0.1 cm, 则出射光场中两条暗带的宽度 $\Delta_{1s(FWHM)}$ 和 $\Delta_{2s(FWHM)}$ 的变化如图 4 所示。由图 4 可以看出出射光场中两条暗带的半宽度均不随叶绿素丙酮溶液的高度做较大变动, 且两条暗带的均值基本相等, 可以说明本文所观察到的两条暗带确实是两个对称分布的热致暗空间光孤子。

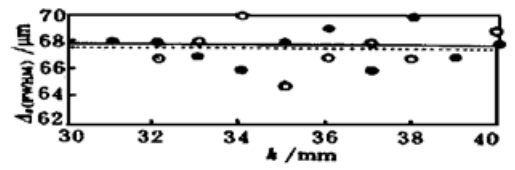


Fig. 4 Output field with different height of chlorophyll acetone
 ●: experimental results of dark belt 1; ○: experimental results of dark belt 2; —: line from experimental results of dark belt 1; —: line from experimental results of dark belt 2

4 热致暗空间光孤子的数值模拟

4.1 分步傅里叶变换法

考虑吸收项 $i\gamma U$, $(1 + \gamma)$ 维非线性薛定谔方程可写为:

$$-i \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + 2\sigma |U|^2 U = i\gamma U \quad (5)$$

设 \hat{D} 为微分算符, 包括衍射和线性吸收效应; \hat{N} 为非线性算符, 描述非线性效应。 \hat{D} 和 \hat{N} 为

$$\hat{D} = -i\partial^2/\partial X^2 = \gamma, \quad \hat{N} = -2i\sigma |U|^2 \quad (6)$$

一般说来, 衍射和非线性效应在光束传播过程中是同时起作用的。而分步傅里叶变换方法的思想是, 对于在充分小距离 h 上传播着的光场, 可以把它的衍射效应和非线性效应近似地考虑成各自独立地起作用, 从而得到传播光场的近似解。具体地说, 从 Z 到 $Z + h$ 上的传播是通过两步实现的。第一步, 让非线性项单独起作用, 即让(5) 式中的 $\hat{D} = 0$; 第二步, 只让衍射项起作用, 即让(5) 式中的 $\hat{N} = 0$ 。数学上可以表述为

$$U(Z + h, X) \approx \exp(h \cdot \hat{D}) \exp(h \cdot \hat{N}) U(Z, X) \quad (7)$$

4.2 在偶边界条件下暗空间光孤子的数值模拟

在高斯光场中, 按照分步傅里叶变换法, 数值研究了实际遮挡的细丝宽度 x_0 对暗空间光孤子激发的影响。数值计算的结果如图 5~ 图 8 所示。

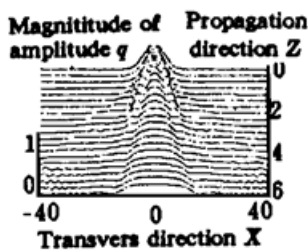


Fig. 5 Dark spatial soliton at the even boundary condition of the width $x_0 = 0.5$

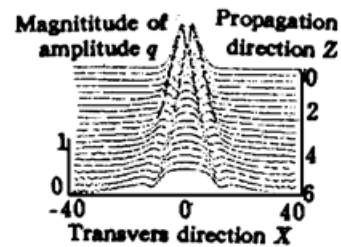


Fig. 6 Dark spatial soliton at the even boundary condition of the width $x_0 = 1$

由图 5~ 图 8 不难得出结论: 偶边界条件激发出的暗空间光孤子均为偶数个, 不能激发出单个孤子; 偶边界条件只能激发出灰孤子, 有横向漂移, 而不能激发出黑孤子; 偶边界条件激发的灰孤子对总是黑度相等, 横向漂移速度大小相等、方向相反; 偶边界的宽度 x_0 与激发出的暗空间光孤子密切相关, x_0 越大, 孤子黑度越大, 横向漂移速度越小。

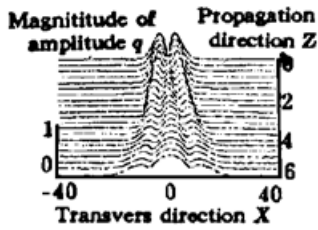


Fig. 7 Dark spatial soliton at the even boundary condition of the width $x_0 = 2$

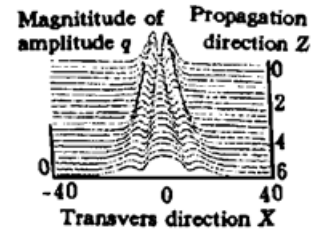


Fig. 8 Dark spatial soliton at the even boundary condition of the width $x_0 = 3$

结 论 由实验结果和数值模拟结果不难发现两者是一致的, 可见本文的实验是成功的。由于热致暗空间光孤子比克尔暗空间光孤子易于实现, 其应用前景较好, 可以被制成柔性波导、光开关、耦合器等多种光孤子器件。

参 考 文 献

- [1] Akira Hasegawa, Frederick Tappert, Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. Nomal Dispersion. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(1) : 171~ 173
- [2] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon, Experimental obsevation of picosecond pulse non-roning and solitons in optical fibers. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13) : 1095~ 1098
- [3] Pierre-Andre Belanger, Pierre Mathieu, Dark soliton in a Kerr defocusing medium. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(1) : 111~ 113
- [4] Hubvert Jerominek, Claude Delise and Real Tremblay. Optical Branching ffect in Ti·LiNbO₃ Waveguide: Near-Field Pattern Studies. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(5) : 732~ 734
- [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] 陈险峰, 陈英礼等, 波前扰动产生空间光孤子及孤子演化的实验研究. *光学学报*, 1996, **16**(7) : 952~ 957

Experiment on Thermal Dark Spatial Optical Solitons in Chlorophyll Acetone

Lu Hong Xu Jiandong Liu Shutian
Li Chunfei Hong Jing

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin150001)

(Received 20 December 1996; revised 2 April 1997)

Abstract The experimental setup and the even boundary condition of the thermal dark spatial optical solitons was designed, and the experiment was realized in chlorophyll acetone. Numerical results of thermal dark solitons were simulated by the split step Fourier method, and the results were agreement with the experiment.

Key words dark spatial optical soliton, thermal nonlinear effect, chlorophyll acetone, even boundary condition, split step Fourier method.