

偶边界条件下的热致暗空间光孤子^{*}

陆 宏 杨 昆 徐建东 李淳飞 洪 晶

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

(1997 年 5 月 7 日收到; 1997 年 9 月 8 日收到修改稿)

设计了偶边界条件下激发热致暗空间光孤子的实验装置, 并在叶绿素丙酮溶液中进行实验, 最后阐述了暗空间光孤子的量子本质.

PACC: 4265; 4230; 4250; 4280

1 引 言

自从 1973 年 Hasegawa 和 Tappert 预言在 Kerr 型光学介质中存在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需要较高的激光光强, 较难实现; 相反, 在热致非线性效应作用下暗空间光孤子易于激发.

本文设计了偶边界条件下激发热致暗空间光孤子的实验装置, 并在叶绿素丙酮溶液中激发出了热致暗空间光孤子, 最后阐述了暗空间光孤子的量子本质.

2 偶边界条件下激发热致暗空间光孤子的实验装置

实验的光路如图 1 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.

^{*} 哈尔滨工业大学基金资助的课题.

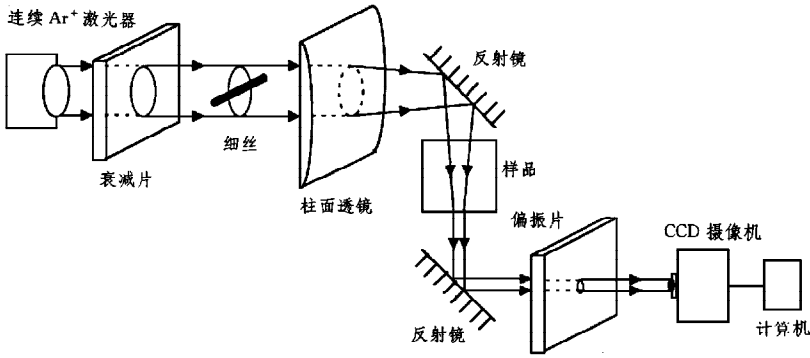


图 1 激发暗空间光孤子的实验装置

3 叶绿素丙酮溶液中的热致暗空间光孤子实验

利用直径为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的细金属丝形成偶边界条件,可以观测到出射光场中有两条暗带,其强度分布如图 2 所示。

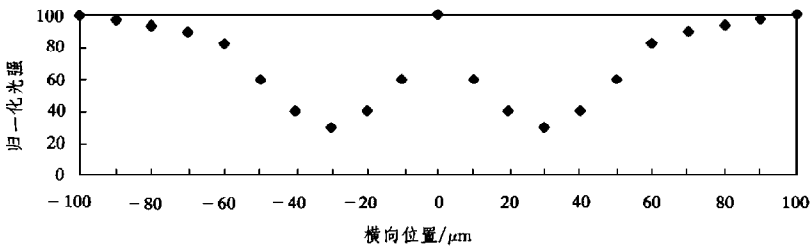


图 2 出射光场

图 2 显示的出射光场横向分布表明,偶边界条件激发出两个对称的暗空间光孤子,在出射光场中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。

为了证明所观察到的两条暗带确是两个对称分布的暗空间光孤子,我们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 $3.0\text{--}4.0\text{ cm}$,步长为 0.1 cm ,出射光场中两条暗带的半宽度 $\Delta_{1s(\text{FWHM})}$ 和 $\Delta_{2s(\text{FWHM})}$ 的数据列于表 1。

由表 1 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作较大变动,可以说明我们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。

表 1 不同叶绿素丙酮溶液高度对应的出射光场两条暗带半宽度

	叶绿素丙酮溶液高度 h/mm									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$\Delta_{1s}(\text{FWHM})/\mu\text{m}$	68	68	67	66	68	69	66	70	67	68
$\Delta_{2s}(\text{FWHM})/\mu\text{m}$	68	67	68	70	65	67	68	67	67	69

注:输入功率为 50 mW.

4 暗空间光孤子的量子本质

暗空间光孤子在海森堡表象中可以用量子非线性薛定谔方程来描述,

$$\mathrm{i}\hat{q}_z(x, z) - \hat{q}_{xx}(x, z) + 2\hat{q}^+(x, z)\hat{q}^2(x, z) = 0. \quad (1)$$

若引入哈密顿算符 $\hat{H}$, 则方程(1)可以在相互作用表象中写为

$$\mathrm{i}\partial_z|\Psi(z)\rangle = \hat{H}|\Psi(z)\rangle, \quad (2)$$

其中哈密顿算符 $\hat{H}$ 构造为

$$\hat{H} = \int dx [\hat{q}_x^+(x, z)][\hat{q}_x(x, z)] - \int dx [\hat{q}^+(x, z)]^2 [\hat{q}(x, z)]^2. \quad (3)$$

由方程(2)可解出暗空间光孤子的量子孤子态的表达式,

$$|\Psi_s(z)\rangle = a_0|0\rangle + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \int dp f_n(p) e^{-E(n, p)z} |n, p\rangle. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} |a_n|^2 &= 1, \\ \int dp |f_n(p)|^2 &= 1, \\ E(n, p) &= np^2 - \frac{n(n^2-1)}{12} \quad (n=0, 1, 2, \dots). \end{aligned}$$

从宏观角度来看, 空间光孤子是指光波的横向光强分布不随传播距离变化的情况; 从量子角度来看, 我们可以理解为光子数噪声非常小, 光子数算符的涨落被压缩了.

类比于非线性 Mach-Zehnder 干涉仪的处理方法, 在海森堡表象中, 相应的光子数算符为

$$\hat{N}_s = \int dx [\hat{q}^+(x, z) + \xi^* q_n^*(x, z)][\hat{q}(x, z) + \xi q_n(x, z)], \quad (5)$$

当我们定义

$$\hat{N}_i = \xi \int dx q_n(x, z) \hat{q}^+(x, z) + \text{h.c.}, \quad (6)$$

其中 $\hat{N}_i$ 用于描述激光进入孤子态前后光子数的变化. (5)式可以改写成

$$\hat{N}_s = \hat{N} + \hat{N}_i + \bar{n}|\xi|^2. \quad (7)$$

当 $t \ll 1$, $\bar{n} t \gg 1$, $\bar{n} t^2 \ll 1$ 时, 考虑到平均值

$$\langle \hat{N}_s \rangle \approx \bar{n}, \quad (8)$$

则有涨落

$$\langle \Delta \hat{N}_s \rangle^2 \approx \left(\frac{3}{4} \right)^{7/6} \langle \hat{N}_s \rangle^{1/3} + O\left(\frac{1}{\bar{n}} \right). \quad (9)$$

这个结果表明在量子孤子态中光子数算符的涨落由初始的 $\langle \hat{N}_s \rangle$ 被压缩到了 $\langle \hat{N}_s \rangle^{1/3}$, 即光子数噪声被压缩了.

5 结 论

按照我们的实验方案, 在偶边界条件下, 叶绿素丙酮溶液中激发出了热致暗空间光孤子. 在量子理论框架中可以认为暗空间光孤子是一种能够压缩光子数噪声的光学态.

- [1] A. Hasegawa, F. Tappert, *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 171.
- [2] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon, *Phys. Rev. Lett.*, **45**(1980), 1095.
- [3] P. Belanger, P. Mathieu, *Appl. Opt.*, **26**(1987), 111.
- [4] H. Jerominek, C. Delise, R. Tremblay, *Appl. Opt.*, **25**(1986), 732.
- [5] G. A. Swartzlander, Jr., D. R. Andersen, J. J. Regan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1583.

THERMAL DARK SPATIAL OPTICAL SOLITONS UNDER EVEN BOUNDARY CONDITION

LU HONG YANG KUN XU JIAN-DONG LI CHUN-FEI HONG JING

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

(Received 7 May 1997; revised manuscript received 8 September 1997)

ABSTRACT

An experimental setup is designed to stimulate thermal dark spatial optical solitons under even boundary condition, and the experiment in chlorophyll acetone is introduced in the paper. Finally, the quantum effect of dark spatial optical solitons is discussed.

PACC: 4265; 4230; 4250; 4280