

# 暗光伏孤子的实验研究\*

李金萍<sup>1,2</sup> 卢克清<sup>1</sup> 赵 卫<sup>1</sup> 朱香平<sup>1</sup> 杨延龙<sup>1</sup> 过晓辉<sup>1</sup> 宋建平<sup>3</sup> 张彦鹏<sup>3</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(3 西安交通大学电子科学与技术系, 西安 710049)

**摘 要** 在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中, 采用相位掩模对部分空间非相干和相干暗光伏孤子进行了实验研究. 实验观察到了部分空间非相干和相干的一维和二维暗光伏孤子, 它们的形成来源于光伏效应, 是自散焦效应和衍射效应平衡的结果. 实验和理论分析表明, 暗光伏孤子的形成与光的传输方向, 强度梯度与晶体  $c$  轴夹角有关; 只有在一定的条件下, 才能得到稳态的部分空间非相干暗光伏孤子.

**关键词** 光伏效应; 光折变晶体; 空间光孤子

**中图分类号** O437.5 **文献标识码** A

## 0 引言

一般而言, 光束在介质中传输会产生衍射, 使光束加宽; 而在非线性介质中由于自聚焦的作用, 又会使光束汇聚. 当衍射与自聚焦作用达到平衡时, 光束直径保持不变, 这就叫自陷, 形成空间光孤子<sup>[1~14]</sup>. 在过去的几十年里, 光折变空间光孤子已经引起了人们广泛的研究, 这是由于光折变空间光孤子在光波导和光互联等方面具有广阔的应用前景, 而且在实验上易于观察和实现. 90 年代早期人们便预言和观察到了光折变空间光孤子, 大多数的研究都集中到有偏压的光折变屏蔽光孤子上<sup>[1~3]</sup>. 然而, 光折变空间光孤子也可以在没有偏压的光伏晶体中观察到, 即是利用光伏效应作用下形成的光伏孤子<sup>[4~10]</sup>. 最近, 又在理论上提出了光折变屏蔽光伏孤子, 将屏蔽孤子和光伏孤子有机地结合起来, 从理论上对这两类孤子进行了统一<sup>[11]</sup>.

1995 年, 人们首先利用相干光观察到了一维暗光伏孤子<sup>[4]</sup>, 随后, 人们又利用相干光观察到了一维和二维暗光伏孤子<sup>[5]</sup>, 此后, Chen 等人利用相干光在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中观察到了涡旋光伏孤子<sup>[6]</sup>. 早前的实验主要集中到相干光折变空间光孤子上. 1996 年, 人们首次利用部分空间非相干光观察到了部分空间非相干屏蔽光折变孤子<sup>[1]</sup>, 不久, 人们又利用完全非相干的白光观察到了白光屏蔽光折变孤子<sup>[2]</sup>, 从而把光孤子的研究领域由相干光拓展到了非相干光. 目前对光伏孤子的实验研究大部分是利用相干光产生的却主要集中在一维研究上, 对于部分空间

非相干光和完全非相干的白光光伏孤子的研究报导甚少. 前不久, 人们在实验上观察到了部分空间非相干一维亮光伏孤子<sup>[9]</sup>; 随后, 又有人实验观察到了完全非相干白光一维暗空间孤子<sup>[10]</sup>. 本文从相干光和非相干光的角度, 利用相位掩模, 对暗光伏孤子进行了全面的实验研究, 实验观察到了相干的一维和二维暗光伏孤子, 同时, 还利用部分空间非相干光观察到了部分空间非相干的一维和二维暗光伏孤子, 对相干和部分空间非相干暗光伏孤子进行了理论和实验上的比较. 讨论了相干和部分空间非相干暗光伏孤子之间的区别和联系, 得出了暗光伏孤子的形成条件和特性.

## 1 实验

### 1.1 部分空间非相干暗光伏孤子实验

用波长为 532 nm、最大功率为 200 mW 的连续可调的 YAG 激光器, 经过扩束准直后, 然后通过一透镜聚焦到旋转散射器上, 再通过一透镜收集入射到相位掩模上. 通过相位掩模的光经透镜聚焦后, 直接入射到  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体的前表面, 光束传播方向与  $c$  轴垂直, 通过晶体的光经过透镜和衰减器后由 CCD 采集图像. 在这个实验中的旋转散射器提供了随机相位变化, 使相干光转化成了部分空间非相干光, 相干度可以通过透镜和旋转散射器之间的距离进行调节. 实验中使用的旋转散射器转速为 60 转/秒, 其变化的速度远大于晶体的响应速度, 晶体接收到的是瞬时光斑的平均光强. 实验所使用的两种相位掩模与文献[5]是类似的.

典型的实验结果如图 1. 采用 e 光照射晶体, 入射到晶体上的光功率为 5 mW, 在二维情况下, 首先观察到晶体上的暗十字渐渐变得模糊, 光强随之变暗; 在晶体后面可以看见明显的散射光, 这是由于衍

\*国家自然科学基金(10474136)和中国科学院西安光学精密机械研究所所长基金资助

Tel: 029-88472107-8630 Email: lijinpj@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-04-20

射效应的结果;随着光伏效应的建立,可以观察到散射光逐渐减小,光强变强,最后可以看见暗十字逐渐地清晰地重现.这时,暗十字自陷已经形成.从图上可以看到,图 1(d)表示了入射光,图 1(e)表示了入射光经过 10 mm 衍射后的出射光,图 1(f)表示了自陷情况下的出射光.从图中清楚地看到,在光伏场未建立时,图 1(e)中的图像表明了很强的衍射效应,在图 1(f)中可以看到,出射光和入射光基本一致,即形成了部分空间非相干的二维暗光伏孤子.因此,实验观察到了部分空间非相干的二维暗光伏孤子.

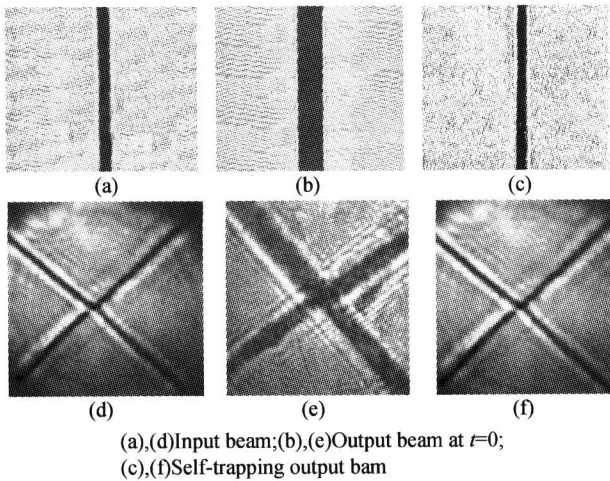


图 1 分别表示了部分空间非相干一维和二维暗光伏孤子的图像

Fig. 1 Images showing spatially partially incoherent one-dimension and two-dimension dark photovoltaic solitons respectively

本文多次重复这样的实验,但是不断改变激光器的功率,发现功率越小形成自陷所需要的时间就越长.当转动暗十字的角度,仍然可以得到不同角度的十字自陷,但是当转到一边平行于  $c$  轴,另一边垂直于  $c$  轴时,发现在平行于  $c$  轴方向不能自陷,只有在垂直于  $c$  轴方向能够发生.

做上面相同的实验,用一维相位掩模代替二维情况下的掩模,其暗痕取向垂直于晶体的  $c$  轴,仍然采用  $e$  光照射.发现暗痕先消失,散射光产生,随着光伏场的建立,可以发现暗痕又慢慢出现,最后自陷,形成暗孤子.实验结果如图 1(a), (b), (c). 图 1(a)表示了一维情况下的入射光,图 1(b)表示光伏场未建立即  $t=0$  时的衍射光,图 1(c)表示了自陷发生时的出射光,可以看到图中的暗痕和入射光斑中的暗痕尺寸基本一致,因此,部分空间非相干的一维暗光伏孤子已经形成.

## 1.2 相干暗光伏孤子实验

仍然采用上面的光路,但是去掉了旋转散射器,使得从激光器发出的相干光照射晶体.首先,仍然

采用  $e$  偏振和功率同部分空间非相干暗孤子相同的光照射,但是发现,当光经历了散射后,很快就出现了暗十字或暗痕,整个过程观察不到十字或暗痕的消失,即很快就可以观察到相干暗光伏孤子.同样地进行功率变化和角度转动,结果和部分空间非相干暗孤子中观察得到的结果是一致的.实验结果如图 2,图 2(a)和(d)分别表示了相干暗光伏孤子实验中入射时的一维和二维光斑,图 2(b)和(e)分别表示了入射时的出射光斑,即在光伏场未建立时的衍射光斑,图 2(c)和(f)分别表示了这两种情况下的孤子光.与文献[5]中观察到的相干光伏孤子是一致的.

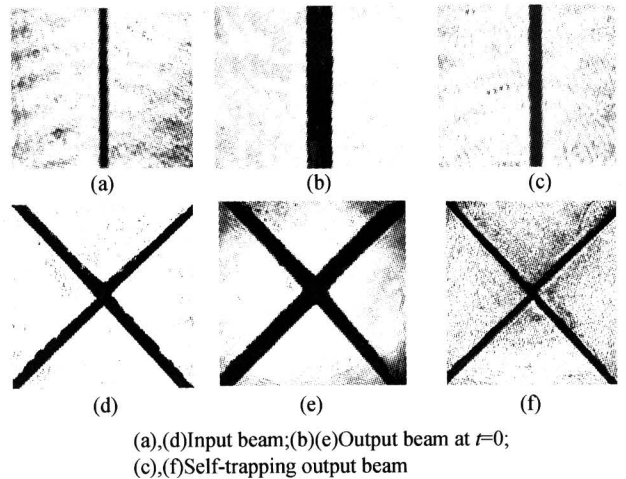


图 2 分别表示了相干一维和二维暗光伏孤子的图像

Fig. 2 Images showing coherent one-dimension and two-dimension dark photovoltaic solitons respectively

## 2 分析与讨论

### 2.1 相干暗光伏孤子和部分空间非相干暗光伏孤子的区别

部分空间非相干光是介于相干光和完全非相干光之间的中间光状态,一般用相干距离  $L$  来描述其相干性.相干距离  $L$  是指光束横截面上位相相关的两点间的平均距离.当  $L$  远小于光束直径时,则光束可认为是准空间非相干光<sup>[1]</sup>.另外,部分空间非相干光斑中每个相干距离内的部分都自成一个独立的次波源,不同的次波源发出的次波相位没有关联.因此部分空间非相干光光束的发散角较之相干光要大,所以同样条件下,部分空间非相干光自陷比相干光自陷所要求的非线性要大.

第一,从原理上讨论相干暗光伏孤子和部分空间非相干暗光伏孤子的区别.相干光在所有点上的电场复振幅变化都是一致的,因此,它们之间的相位关联也是一致的.但对于部分空间非相干光,所有点的场振幅在时间上是毫不相关的,因此,它们之间的相位变化也是随机的.相干光源之间的衍射是复

振幅通过对菲涅尔积分得到的,但是空间部分非相干光是通过复振幅模的平方时间平均积分所得到的.部分非相干光的衍射比同一宽度的相干光的衍射要强,因此自陷所要求的非线性更强;所以实验中在同样条件下,观察到部分空间非相干暗光伏孤子的时间比观察到相干暗光伏孤子的时间要长.

以一维暗光伏孤子为例.假设光沿着  $z$  轴方向传输,只在  $x$  方向发生衍射,由文献[12,4]可得

$$i\left(\frac{\partial f}{\partial x} + \theta \frac{\partial f}{\partial z}\right) + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + k_0 \Delta n(I_1) f = 0 \quad (1)$$

$$i\left(\frac{\partial g}{\partial x} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + k_0 \Delta n(I_2)\right) g = 0 \quad (2)$$

式(1)和(2)分别表示了部分空间非相干和相干情况下的一维暗光伏孤子的演变方程.其中  $f$  是非相干任意分量的相干密度; $\theta$  是  $f$  的  $x$  分量与  $z$  轴间的夹角; $k=2\pi n_0/\lambda$ ; $\lambda$  是波长; $k_0$  是真空中波矢; $\Delta n(I_{1,2}) = -\frac{1}{2} n_0^3 r E_p \frac{I_{1,2}}{I_{1,2} + I_b}$  是光伏效应所引起的非线性折射率的变化; $E_p$  是光伏场常量; $I_1 = \int |f(x, z, \theta)|^2 d\theta$  是部分空间非相干光强; $I_2 = |g(x, z)|^2$  是相干光光强; $g$  是相干光的振幅; $I_d$  是暗辐射.上述二式它们从理论上预言了这两类孤子的存在,这样的方程可以通过数值模拟求解,类似的结果参见文献[13].

第二,从孤子形成条件上比较.对于部分空间非相干暗光伏孤子,要求介质要具有非瞬时非线性响应特性,即介质的响应时间要远大于光束波前上各点相位的变化时间,这样介质就只能感应到有限时间内相对平稳的平均光强,从而产生平滑的波导,使得部分空间非相干光束自陷形成空间光孤子.这也是形成非相干孤子的必要条件.但是对于相干孤子,介质既可以是瞬时的也可以是非瞬时的.这是因为部分空间非相干光是由无数多个亮和暗的点构成,相位分布随着时间不断发生变化,对于非瞬时性的非线性介质,它响应的是时间平均值,所以能够形成自陷.从实验中可以看出,当采用部分空间非相干光照射晶体时,由于旋转散射器的快速旋转,使得晶体感应到的是时间平均光强,能够观察到孤子;但是当停止旋转散射器时,观察到的图形只是一些斑点,当再次转动旋转散射器时,则又可以观察到部分空间非相干暗孤子.

第三,从相位上比较.对于部分空间非相干暗光伏孤子,它的初始条件极为重要,这类孤子具有相位记忆效应,它趋向于记住它的初始相位和强度分布.因为部分空间非相干光在非线性介质中传输时,所有的相位信息在经过有限的传输距离后将完全消失.实验观察部分空间非相干暗光伏孤子时,可以看到携带着一维或二维信息的光经过晶体时,首先变得模

糊,初始相位信息完全消失;由于扇形效应,在晶体后面可以观察到很强的散射光.随着光伏场的建立,可以看到暗十字或暗痕重新出现,从而携带着它的初始信息形成孤子.在相干暗光伏孤子的实验中,没有发现相位信息的消失,只是看到暗痕的衍射,随着光伏场的建立,暗痕渐渐自陷,形成孤子.

第四,对于暗的部分空间非相干光伏孤子,由于孤子内同时存在辐射模和束缚模,因此这类孤子是灰的;但是对于相干暗光伏孤子既可以是黑的,也可以是灰的.可以从实验结果图1中观察到,无论是一维还是二维情况,观察到的部分空间非相干孤子都是灰的.

## 2.2 相干暗光伏孤子和部分空间非相干暗光伏孤子的联系

第一,相干和部分空间非相干暗光伏孤子都源于光伏效应所引起的折射率变化和衍射效应平衡而形成.它们的形成与光的传输方向,以及强度梯度与晶体  $c$  轴之间的夹角有关,只有在特定的取向,才能够得到稳态的暗光伏孤子.在实验中也验证了这一点,当把暗十字的一边与晶体  $c$  轴平行时,则只能在垂直于晶体  $c$  轴方向上得到自陷,而在平行于  $c$  轴方向得不到.同样,在一维情况下,当把暗痕的方向平行于晶体光轴时,则不能得到一维的光伏孤子.第二,它们都必须产生一个相位跃变.第三,部分空间非相干暗孤子和相干暗孤子都有沿着  $c$  轴方向移动的现象,这是由于扩散场作用的结果.第四,部分空间非相干暗光伏孤子也具有相干特性.

## 3 结论

本文对暗光伏孤子进行了详细的实验研究.从相干光和非相干光的角度,对相干和部分空间非相干暗光伏孤子进行了理论和实验上的比较.讨论了相干和部分空间非相干暗光伏孤子之间的区别和联系.由此得出暗光伏孤子的形成与光传输方向、强度梯度与晶体  $c$  轴之间的夹角有关.只有在特定的条件下,才能得到稳态的部分空间非相干暗光伏孤子.

### 参考文献

- 1 Mitchell M, Chen Z G, Shih M F, et al. Self-Trapping of partially spatially incoherent light. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(3): 490~493
- 2 Mitchell M, Segev M. Self-trapping of incoherent white light. *Nature*, 1997, 387(6): 880~883
- 3 李金萍, 卢克清, 赵卫, 等. 有偏压中心对称光折变晶体中的屏蔽孤子. *光子学报*, 2006, 35(2): 257~260  
Li J P, Lu K Q, Zhao W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(2): 257~260
- 4 Taya M, Bashaw M C, Fejer M M, et al. Observation of

- dark photovoltaic spatial solitons. *Phys Rev A*, 1995, **52** (4):3095~3100
- 5 Liu S M, Zhang G Q, Tian G Y, *et al.* (1+1)-dimensional and (2+1)-dimensional waveguides induced by self-focused dark notches and crosses in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal. *Appl Opt*, 1997, **36**(34):8982~8986
- 6 Chen Z G, Segev M, Wilson D W, *et al.* Self-trapping of an optical vortex by use of the bulk photovoltaic effect. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(15):2948~2951
- 7 Valley G C, Segev M, Crosignani B, *et al.* Dark and bright photovoltaic spatial solitons. *Phys Rev A*, 1994, **50** (6):R4457~R4460
- 8 Chen Z, Segev M, Christodoulides D N. Experiments on partially coherent photorefractive solitons. *J Opt A Pure Appl Opt*, 2003, **5**:389~397
- 9 王晓生, 奢卫龙. 部分空间非相干光光伏孤子. 物理学报, 2002, **51**(3):573~577  
Wang X S, She W L. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(3):573~577
- 10 陆猗, 刘思敏, 郭儒, 等. 完全非相干白光一维光生伏打暗空间孤子. 物理学报, 2003, **52**(12):3075~3081  
Lu Y, Liu S M, Guo R, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(12):3075~3081
- 11 卢克清, 朱京平, 张彦鹏, 等. 有偏压的光伏光折变晶体中的空间灰孤子. 光子学报, 2001, **30**(5):546~549  
Lu K Q, Zhu J P, Zhang Y P, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):546~549
- 12 Trillo S, Torruellas W. *Spatial solitons*. New York: Springer, 2001. 97~100
- 13 Coskun T H, Christodoulides D N, Mitchell M, *et al.* Dynamics of incoherent bright and dark self-trapped beams and their coherence properties in photorefractive crystals. *Opt Lett*, 1998, **23**(6):418~420
- 14 Huang C F, Guo R, Liu S M, *et al.* Spatiotemporal coherence of white light beam trapped within dark spatial soliton. *Optics Communications*, 2005, **248**(4-6):449~457

## Experimental study on dark photovoltaic solitons

Li Jinping<sup>1,2</sup>, Lu Keqing<sup>1</sup>, Zhao Wei<sup>1</sup>, Yang Yanlong<sup>1</sup>, Zhu Xiangping<sup>1</sup>,  
Guo Xiaohui<sup>1</sup>, Song Jianping<sup>3</sup>, Zhang Yanpeng<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision  
Mechanics, Chinese Academic of Sciences, Xi'an 710068

2 College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

3 Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2005-04-20

**Abstract** Spatially partially incoherent and coherent dark photovoltaic solitons are comprehensively experimentally studied with phase masks in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystals. One-dimension and two-dimension dark photovoltaic solitons are observed with spatially partially incoherent and coherent beam, which result from the bulk photovoltaic effect and when diffraction is exactly balanced by photorefractive self-defocusing. The analysis of theory and experiments shows that dark photovoltaic solitons depend on the direction of propagation, orientation of the intensity gradient, with respect to the crystalline axes of the medium. Under certain conditions, the steady-state spatially partially incoherent dark photovoltaic solitons can be observed.

**Keywords** Photovoltaic effect; Photorefractive crystal; Optical spatial soliton



**Li Jinping** was born in 1979 and received her B. S. degree from physics from Changchun Institute of Optics and Fine Machine in 2001. Now she is currently working as a Ph. D. candidate at the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her main research is optical spatial soliton.