

# 亮-暗复色光伏孤子\*

欧阳世根 余卫龙†

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2003 年 11 月 21 日收到 2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

提出一种实现亮-暗复色光伏孤子的方法, 不共轴的两束同频率相干但反相的亮光束共同形成一中空光束, 在此暗区引入另一束不同频率的亮光束, 这三束光在一定条件下可以通过非线性相互作用而形成亮-暗复色孤子. 通过数值分析的方法对这种亮-暗复色光伏孤子的空间动力过程进行了研究. 研究表明, 这种亮-暗结构具有光控光特性.

关键词: 亮-暗复色光伏空间孤子, 光控光

PACC: 4265S, 4265J

## 1. 引 言

近年来, 在光折变材料中观察到的三类空间孤子, 即准稳态孤子<sup>[1-3, 28]</sup>, 屏蔽孤子<sup>[4-7]</sup>和光伏孤子<sup>[8-10, 29]</sup>. 对空间孤子的研究主要包括四方面, 即孤子形成<sup>[1-10]</sup>, 孤子诱导光波导<sup>[7, 9, 11]</sup>, 孤子相互作用<sup>[12-18]</sup>以及耦合孤子对<sup>[19-22, 25, 26, 30, 31]</sup>. 其中孤子相互作用和耦合孤子对有着密切的联系, 其内容丰富多样. 孤子相互作用包括相干相互作用<sup>[12-14]</sup>和非相干相互作用<sup>[15-18]</sup>两种. 两相干的亮屏蔽孤子之间的相互作用依赖于它们之间的相位差, 同相位的两亮孤子相互吸引, 而反相的两亮孤子则相互排斥<sup>[12]</sup>. 与相干孤子相互作用不同, 不同频率的两光伏亮孤子只存在相互吸引的作用<sup>[18]</sup>. 此外我们最近还对不共轴入射的不同频率的两暗孤子以及暗孤子和亮孤子的相互作用进行了研究, 结果也表明非相干相互作用与相干相互作用有着本质上的差别<sup>[32]</sup>. 广义上, 耦合孤子也属于孤子相互作用的范围. 矢量孤子是由同频而偏振状态不同的两光波耦合形成的, 对其研究起源于时间孤子<sup>[23, 24]</sup>, 最近, 在光折变材料中也观察到矢量孤子<sup>[25, 26]</sup>. 除了矢量空间孤子外, 人们还对同偏振而不同频率的光波通过非线性作用耦合形成的耦合孤子进行了广泛的研究<sup>[19-22]</sup>. 1996 年, Chen 和 Segev 等人采用由同一激光器产生而超出相

干长度的同频率、同偏振而相互不相干的暗光束和亮光束入射到加偏压折射率改变为负的光折变材料中产生(1+1)维的耦合亮-暗屏蔽孤子对<sup>[19-21]</sup>, 他们还对这样形成的亮-暗屏蔽孤子对在解耦后的演化进行研究, 发现一维屏蔽耦合亮-暗孤子具有纵向的稳定性和横向的不稳定性, 解耦后暗孤子演化成三束暗光束而亮孤子则演化成扩散光束. 此外, 在光伏材料中由不同频率而同偏振的两亮光束互相耦合形成的亮-亮光伏孤子对也被理论预言并且在实验中实现了<sup>[22, 27]</sup>.

本文提出在折射率改变为正的光伏材料中利用两种频率的三束亮光束耦合形成亮-暗光伏孤子对的光场结构, 其中两束同频率而反相的亮光束共同形成一束中心光强为零的中空光束(这与暗光束相似), 在中空光束的中间入射另一束具有不同频率的亮光束, 在一定的条件下这中空光束和亮光束能耦合形成类似亮-暗孤子对的孤子结构. 我们采用数值模拟的方法对这种耦合孤子的空间动力学进行了研究, 研究表明双曲正割光束能很好地实现这种耦合孤子结构. 模拟结果还表明, 解耦后, 组成中空光束的两同频反相光束由于排斥作用而互相分开, 而中间亮光束的光强随着传播而不断起伏, 这具有光控光的特性. 最后我们对这种耦合孤子在偏离左右对称情况下的相互作用进行研究, 结果表明左右不对称对这种耦合孤子结构产生较大的影响.

\* 国家自然科学基金(批准号: 10074082, 10374121), 广东省自然科学基金(批准号: 0011192, 031567)资助的课题.

† 通讯作者.

### 2. 亮-暗复色光伏孤子

首先,从不同频率的两光束在光伏晶体相互作用的无量纲演化方程组(1)开始(其推导过程可见文献[18]):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \zeta} &= \frac{i}{\Lambda_1} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + b_1 \frac{1+r_1|u_1|^2+r_2|u_2|^2}{1+|u_1|^2+|u_2|^2} u_1 \right), \\ \frac{\partial u_2}{\partial \zeta} &= \frac{i}{\Lambda_2} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + b_2 \frac{1+r_1|u_1|^2+r_2|u_2|^2}{1+|u_1|^2+|u_2|^2} u_2 \right), \end{aligned} \tag{1}$$

其中  $u_j$  为不同频率的两无量纲光场(这里以及下文  $j=1, 2$ ),  $r_j, b_j$  和  $\Lambda_j$  对于一定的频率和光伏晶体为无量纲常数( $u_j, r_j, b_j$  和  $\Lambda_j$  的具体表达式可在文献[18]中找到).

假设偏微分方程组(1)有孤子解  $U_j(\xi, \zeta) = y_j(\xi) e^{ig_j\zeta/\Lambda_j}$  (下文以大写  $U_j$  标记孤子,以小写  $u_j$  表示非孤子的其他情况), 方程组(1)变为

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{d\xi^2} &= 2 \left( g_1 - b_1 \frac{1+r_1 y_1^2+r_2 y_2^2}{1+y_1^2+y_2^2} \right) y_1, \\ \frac{d^2 y_2}{d\xi^2} &= 2 \left( g_2 - b_2 \frac{1+r_1 y_1^2+r_2 y_2^2}{1+y_1^2+y_2^2} \right) y_2. \end{aligned} \tag{2}$$

采用与文献[18]相同的信号光、背景光和光伏晶体, 获得与文献[18]相同的参数  $\Lambda_1 = 1, \Lambda_2 =$

514.5/488,  $b_1 = 11.5, b_2 = 13, r_1 = 1.6, r_2 = 2.5$ . 当  $g_1 = 12, g_2 = 15.19642646$  以及  $y_1(0) = 0, y_2(0) = 0.45, y_1'(0) = 0.686341019, y_2'(0) = 0$  时, 对方程组(2)直接数值求解, 我们获得亮-暗复色光伏孤子数值解. 图1为亮-暗复色光伏孤子的光场振幅分布, 而图2为相应的光强分布, 实线和虚线代表不同频率的光(实线对应信号光1, 虚线对应信号光2). 图3为该亮-暗复色光伏孤子的在晶体中的传播过程, 可以看出它们的光强分布都不随传播而改变.

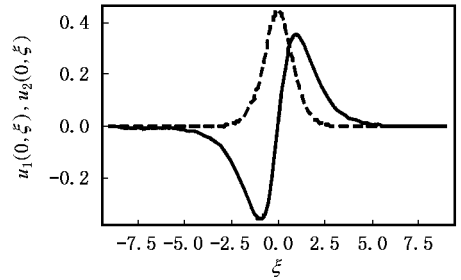


图1 亮-暗复色孤子的光场分布

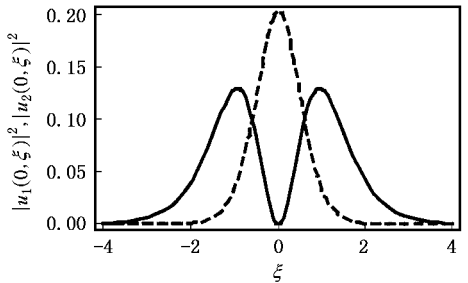


图2 亮-暗复色孤子的光强分布

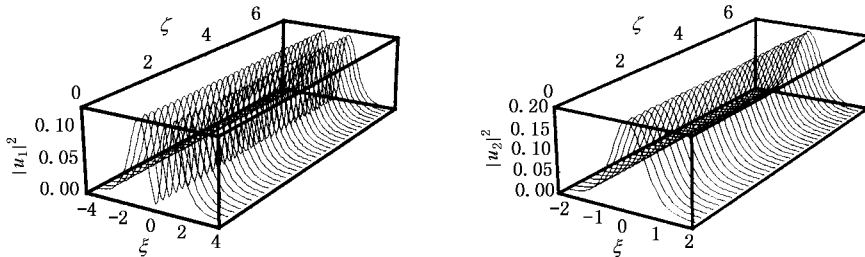


图3 亮-暗复色光伏孤子  $U_j$  的传播过程

事实上, 可以采用孤子相互作用的观点分析这种耦合孤子形成的机理. 从图1可以看出中空光束(暗光束)两边的相位差为  $\pi$ , 因此我们可以把中空光束看成是由相位差为  $\pi$  的两束相干亮光束叠加而成的. 由文献[12]知相位差为  $\pi$  的两屏蔽亮孤子之间存在排斥作用, 同理相位差为  $\pi$  的两光伏亮孤子

也存在排斥作用, 而文献[18]表明不同频率的光伏亮孤子之间存在吸引作用. 这样复色光伏亮-暗孤子中的中心亮光束对形成中空光束的两旁光束存在非相干的吸引作用, 而形成中空光束的两旁反相亮光束之间存在相干的排斥作用, 当非相干的吸引作用和相干的排斥作用相平衡时这三束光就形成耦合孤

子,即复色光伏亮-暗孤子.

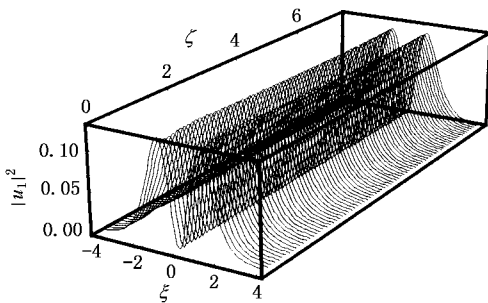
### 3. 亮-暗复色光伏孤子的空间动力特性

#### 3.1. 入射光束为高斯光束或双曲正割光束的情况

通过数值分析我们发现以适当的双曲正割光束入射能较好地实现亮-暗复色光伏孤子.例如以光场振幅分布由

$$\begin{aligned}
 u_1(\xi, 0) &= 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi - 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] \\
 &+ 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi + 0.63\right)\right. \\
 &\times \left. \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] e^{i\pi}, \\
 u_2(\xi, 0) &= 0.45 \operatorname{sech}\left[\xi \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.56\right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

描述的双曲正割光束入射光伏晶体就非常接近亮-暗孤子了.(3)式中双曲正割光束的峰值,半高宽以



及相对位置都是为了使入射光束接近亮-暗孤子  $U_j$  而适当选择的.

图4为双曲正割光束与亮-暗复色孤子在入射面处光强的比较(其中实线为孤子  $U_j$ ,虚线为双曲正割光束.作图时为了看清楚,把孤子  $U_j$  相对双曲正割光束往左边平移了0.06),可以看出在入射面处双曲正割光束已非常接近亮-暗孤子了.图5为上述双曲正割光束在光伏晶体中的传播过程.从光束的传播同样可以看出这样的双曲正割入射光束已比较接近亮-暗孤子了.

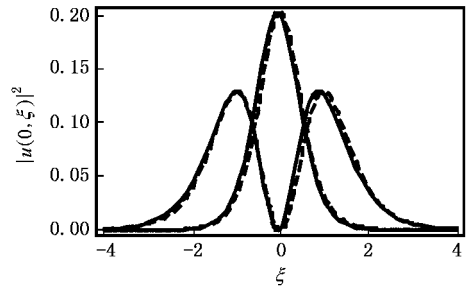


图4 双曲正割光束与孤子的比较

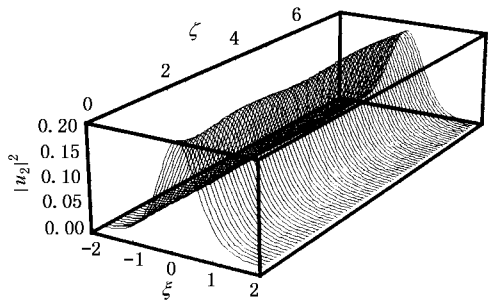


图5 入射双曲正割光束在光伏晶体中的传播

相比之下,以高斯光束入射就较难实现亮-暗孤子.这表现为很难选择适当的参数使高斯光束的光强分布在入射面处接近亮-暗复色孤子.(4)式是为了使入射光束较为接近亮-暗复色孤子而选择的高斯光束.

$$\begin{aligned}
 u_1(\xi, 0) &= 0.62 \exp\left[-\frac{(\xi - 0.56)^2 \ln 2}{2 \times 0.89^2}\right] \\
 &+ 0.62 \exp\left[-\frac{(\xi + 0.56)^2 \ln 2}{2 \times 0.89^2}\right] e^{i\pi}, \\
 u_2(\xi, 0) &= 0.45 \exp\left[-\frac{\xi^2 \ln 2}{2 \times 0.62^2}\right].
 \end{aligned} \tag{4}$$

图6为相应入射光束在入射面处的光强分布与亮-暗孤子的比较,其中实线为孤子,虚线为入射光束.可以看出入射光束与亮-暗复色孤子有较大的差

别.而图7为上述高斯光束在光伏晶体中的传播,可以看出无论是暗光束还是亮光束的光强都随着传播而不断变化.

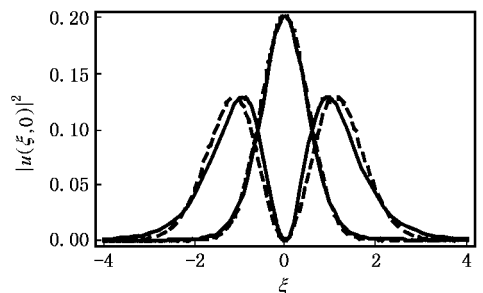


图6 高斯入射光束与孤子的比较

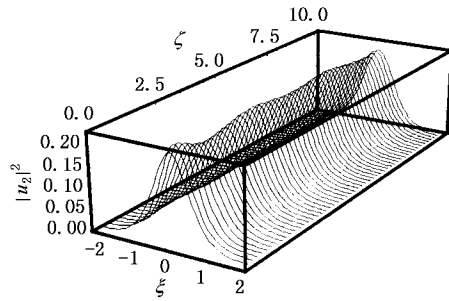
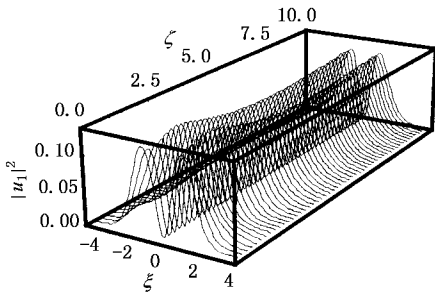


图 7 入射高斯光束在晶体中的传播过程

### 3.2. 亮-暗复色孤子在解耦合后的动力学过程以及光控光特性

由前面的讨论知这种亮-暗复色孤子是建立在两旁相干反相亮光束之间的相干排斥力与中间亮光束对两旁光束的非相干吸引作用的平衡基础上的。如果把中间的亮光束去掉,那么两旁光束就会由于的相干的排斥作用而不断分开。这表明可以通过控制中间光束的入射状态而控制两旁光束的传播状态。亮-暗复色孤子具有光控光的特性。图 8 为两旁相干反相光束在挡掉中间亮光束后的传播过程,其入射光场为  $u_1(\xi, 0) = U_1(\xi, 0), u_2(\xi, 0) = 0$ 。众所周知相互作用是相互的,中间光束对两旁光束有非相干吸引作用,反过来两旁光束也对中间亮光束有吸引作用。由于这种吸引作用,中间光束的光能比没有吸引作用的自由状态更多地分布在两侧。这就是说,如果挡掉两旁的光束(即中空光束),中间光束两侧的光能就会往中间集中,中间光束的中心光强就会增大。图 9 为中间光束在挡掉两旁光束后的传播过程,其入射光场为  $u_1(\xi, 0) = 0, u_2(\xi, 0) = U_2(\xi, 0)$ 。

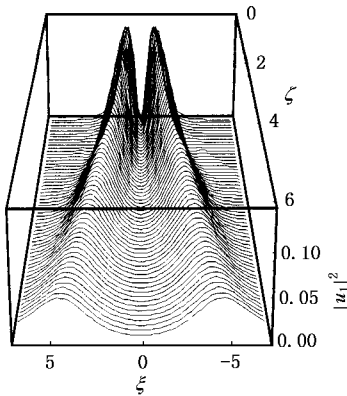


图 8 没有中间光束的情况下两旁光束的传播过程

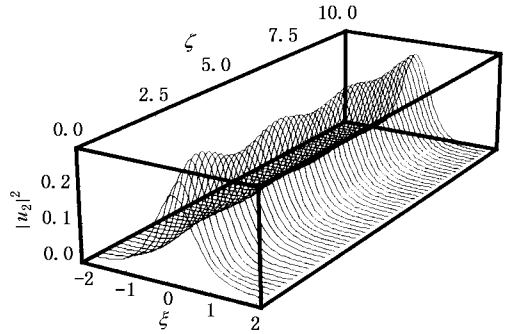


图 9 没有两旁光束的情况下中间光束的传播过程

### 3.3. 入射光束偏离左右对称的情况

显然,要实现这种亮-暗复色光伏孤子,系统就要具有左右对称性。我们对系统偏离左右对称的情况进行了数值分析,发现微小的左右不对称会显著地影响这种亮-暗复色孤子的实现。图 10 为光场分布为  $u_1(\xi, 0) = U_1(\xi, 0), u_2(\xi, 0) = U_2(\xi - 0.2, 0)$  的两光场。图 11 为上述光束在晶体中的传播过程,而图 12 为这三束光的中心光强,中心光强的位置与传播距离的关系。从图 11 和图 12 可以看出两旁光束之中靠近中间光束的旁光束(右光束)的光强在经历极短传播距离的增大后就开始减小,而距离较远的旁光束(左光束)的光强变化恰好相反。初看起来这好像与光线往折射率增大的方向弯曲相矛盾。我们认为光强在入射晶体后极短距离的变化主要是由于吸引作用的变化而造成的。由于中间光束往右平移 0.2,使右光束的光能往右边集中,中心光强增大,半高宽减小;同理,左光束的光能往右转移,中心光强减小,半高宽增大。但随着传播距离增大,右光束的半高宽不断减小,左光束的半高宽不断增大,另一种效应的作用变得显著起来,这种效应就是两旁光束之间的相干性。分析如下,由具有不同半高宽而

具有相同峰值的两双曲正割光束叠加成的光场,半高宽大的光束的光强较大,半高宽小的光束的光强较小,这一点可以从图 13 看出.图 13 为由(5)式描述的两个叠加光场的对比,实线为  $|f_1(\xi)|^2$ ,虚线为  $|f_2(\xi)|^2$ .我们相信类似的原因造成了随后光强的变化.

$$f_1(\xi) = 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi - 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] + 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi + 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] e^{i\pi},$$

$$f_2(\xi) = 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi - 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right]$$

$$+ 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi + 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.95\right] e^{i\pi}. \tag{5}$$

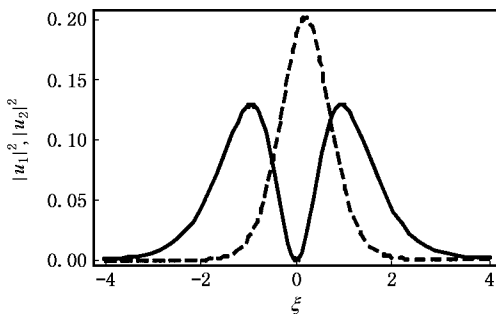


图 10 中间亮光束的中心相对暗光束的中心往右平移 0.2

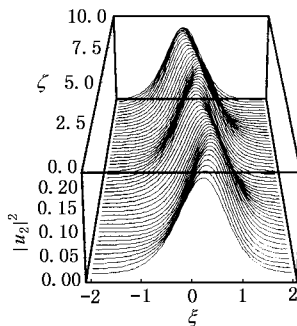
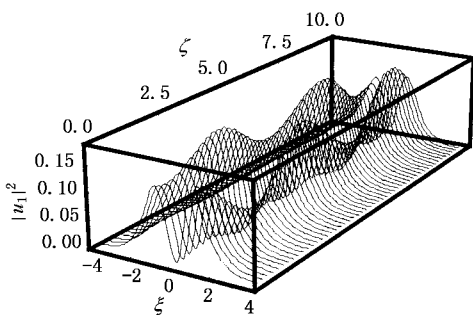


图 11 入射光束为图 10 的偏心光束在晶体中的传播

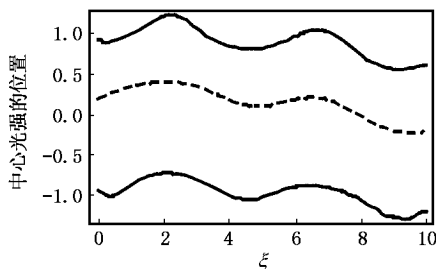
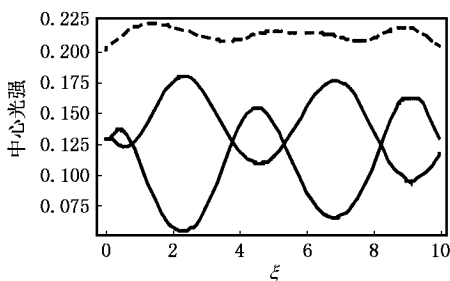


图 12 三束光的中心光强,中心光强位置与传播距离的关系

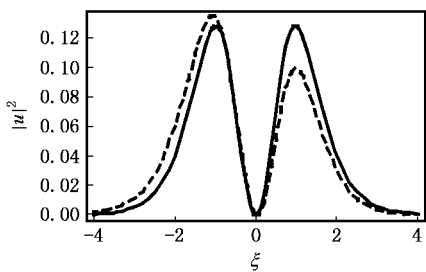


图 13 不同半高宽的光束叠加光场的光强分布对比

此外,我们发现如果两旁光束的光场分布偏离左右对称时,三光束的空间动力学行为跟上述由中间光束偏右入射而造成的左右不对称的情况相似.由(6)式描述的三光束入射晶体,它们的行为就跟前面左右不对称的情况相似.图 14 为入射光束与孤子的比较,实线为孤子  $U_j$ ,虚线为入射光束.图 15 为它们在晶体中的传播过程.

$$\begin{aligned}
 u_1(\xi, \rho) &= 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi - 0.63\right) \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] \\
 &+ 0.94 \times 0.62 \operatorname{sech}\left[\left(\xi + 0.63\right)\right. \\
 &\left. \times \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.84\right] e^{i\pi}, \\
 u_2(\xi, \rho) &= 0.45 \operatorname{sech}\left[\xi \operatorname{arcsech}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) / 0.56\right]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

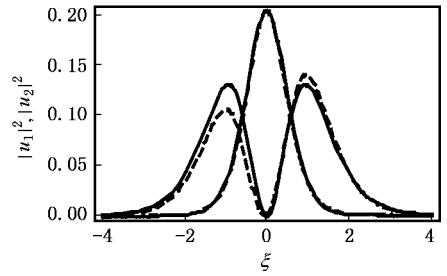


图 14 两旁光束光场分布左右不对称的三光束的光强分布

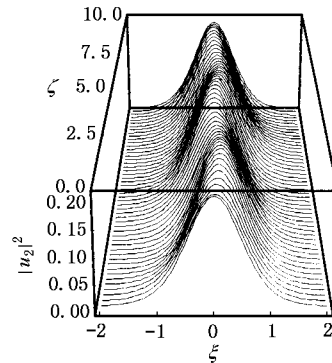
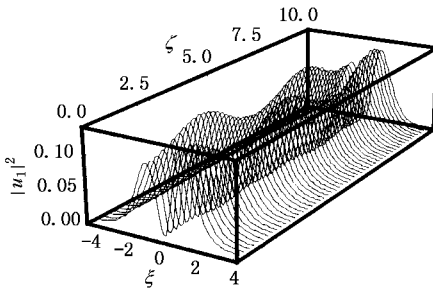


图 15 两旁光束都对称的三光束在晶体中的传播

由以上的讨论可以看出这种亮-暗复色孤子对左右不对称较为敏感,这主要是由于形成暗光束的两光束的相干性造成的。

## 4. 结 论

本文提出了采用三束光以实现复色光伏亮-暗

复色光伏孤子的方法.通过数值分析,发现采用适当的双曲正割光束作为入射光束能较好地实现上述的亮-暗复色孤子.进一步的分析表明这种亮-暗复色孤子具有光控光的潜在可能性.另一方面这种亮-暗复色孤子对相同的左右对称性要求较高。

- [ 1 ] Segev M, Crosignani B, Yariv A and Fischer B 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
- [ 2 ] Duree G, Shultz J L, Salamo G, Segev M, Yariv A, Crosignani B, DiPorto P, Sharp E and Neurgaonkar R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **73** 533
- [ 3 ] She W L, Lee K K and Lee W K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2498
- [ 4 ] Segev M, Valley G C, Crosignani B, DiPorto P and Yariv A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
- [ 5 ] Christodoulides D N and Carvalho M I 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1628
- [ 6 ] Shih M, Segev M, Valley G V, Salamo G, Crosignani B and DiPorto P 1995 *Electron. Lett.* **31** 826
- [ 7 ] Chen Z, Segev M, Singh S R, Coskum T H and Christodoulides D N 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1407
- [ 8 ] Valley G C, Segev M, Crosignani B, Yariv A, Fejer M M and Bashaw M 1994 *Phys. Rev. A* **50** R4457

- [ 9 ] Taya M, Bashaw M, Fejer M M, Segev M and Valley G C 1995 *Phys. Rev. A* **52** 3095
- [ 10 ] She W L, Chan C W and Lee W K 2001 *Opt. Lett.* **26** 1093
- [ 11 ] Morin M, Duree G, Salamo G and Segev M 1995 *Opt. Lett.* **20** 2066
- [ 12 ] Singh S R and Christodoulides D N 1995 *Opt. Commun.* **118** 569
- [ 13 ] Garcia-Quirino G S, Iturbe-Castillo M D, Vysloukh V A, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S I, Lugo-Martinez G and Torres-Cisneros G S 1997 *Opt. Lett.* **22** 154
- [ 14 ] Meng H, Salamo G, Shih M and Segev M 1997 *Opt. Lett.* **22** 448
- [ 15 ] Shih M and Segev M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1538
- [ 16 ] Shig M, Chen Z, Segev M, Coskum T H and Christodoulides D N 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 4151
- [ 17 ] Shih M, Segev M and Salamo G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2551
- [ 18 ] Ouyang S G, Wang X S and She W L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 767 (in Chinese) [ 欧阳世根、王晓生、余卫龙 2004 物理学报 **53** 767 ]

- [ 19 ] Christodoulides D N , Singh S R , Carvalho M I and Segev M 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1763
- [ 20 ] Chen Z , Segev M , Coskum T H , Christodoulides D N , Kivshar Y S and Afanasjev V V 1996 *Opt. Lett.* **21** 1821
- [ 21 ] Chen Z , Segev M , Coskum T H , Christodoulides D N , Kivshar Y S 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 3066
- [ 22 ] Ouyang S G , Jiang D S and She W L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3033 ( in Chinese ) [ 欧阳世根、江德生、余卫龙 2004 物理学报 **53** 3033 ]
- [ 23 ] Christodoulides D N and Joseph R I 1988 *Opt. Lett.* **13** 53
- [ 24 ] Haelterman M and Sheppard A 1994 *Phys. Rev. E* **49** 3376
- [ 25 ] Segev M , Valley G C , Singh S R , Carvalho M I and Christodoulides D N 1995 *Opt. Lett.* **20** 1764
- [ 26 ] Ostrovskaya E A , Kivshar Y S , Chen Z and Segev M 1999 *Opt. Lett.* **24** 327
- [ 27 ] Wang X S , He G G , She W L and Jiang S J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 496 ( in Chinese ) [ 王晓生、何国岗、余卫龙、江绍基 2001 物理学报 **50** 496 ]
- [ 28 ] She W L and Lee R K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 886 ( in Chinese ) [ 余卫龙、李荣基 2001 物理学报 **50** 886 ]
- [ 29 ] She W L , Wang X S , He G G , Tao M X , Lin L P and Lee R K 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2166 ( in Chinese ) [ 余卫龙、王晓生、何国岗、陶孟仙、林励平、李荣基 2001 物理学报 **50** 2166 ]
- [ 30 ] Kivshar Y S , Sukhorukov A A , Ostrovskaya E A , Alexander T J , Bang O , Saltiel S M , Clausen C B and Christiansen P L 2000 *Physica A* **288** 152
- [ 31 ] Motzek K , Kaiser F , Weilmann C , Denz C , McCarthy G , Krolikowski W , Desyatnikov A and Kivshar Y S 2002 *Opt. Commun.* 209 501
- [ 32 ] Jiang D S , Ouyang S G and She W L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** ( in Chinese ) [ 江德生、欧阳世根、余卫龙 2004 物理学报 **53** ]

## Dark-bright photovoltaic soliton pair with two-wavelength components \*

Quyong Shi-Gen She Wei-Long<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China )

( Received 21 November 2003 ; revised manuscript received 16 January 2004 )

### Abstract

We present a scheme to realize coupled dark-bright photovoltaic spatial-soliton pairs with two-wavelength components. With the propagating beam method we numerically study the spatial dynamic properties of these coupled solitons , finding the possibility to use such coupled solitons in all-optical beam switching.

**Keywords :** dark-bright coupled photovoltaic photorefractive spatial solitons , light controlled light

**PACC :** 4265S , 4265J

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10074802 , 10374121 ) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China ( Grant Nos. 001192 , 031567 ).

<sup>†</sup> Corresponding author.