

异色光伏孤子之间的相互作用*

欧阳世根 王晓生 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 1 月 23 日收到, 2003 年 5 月 13 日收到修改稿)

用数值方法模拟异色光伏孤子的相互作用, 结果表明孤子间相互作用是非弹性的, 相互作用的孤子只在有限的传播距离内保持孤子形状. 不同频率光伏孤子间的相互作用除了相互吸引外, 还存在光能在孤子诱导波导间的耦合.

关键词: 光伏空间孤子, 异色, 相互作用

PACC: 4265S, 4265J

1. 引言

近 40 年来, 人们对光自陷和空间光孤子的形成进行了广泛的研究. 其中光折变空间光孤子由于其低功率(微瓦量级)生成和稳定性等优点更引起了广泛的兴趣. 光折变空间孤子在光折变晶体中产生的波导可以导引其他的光波^[1-5], 可望在光控光中得到应用^[6]. 现已在实验室实现的光折变空间光孤子有三种基本类型: 准稳态孤子^[7-10], 屏蔽孤子^[11-14]和光伏孤子^[15-18]. 对光折变孤子的研究已从孤子产生、孤子诱导光波导扩展到孤子间的相互作用^[20-26]. 在相互靠近平行入射非线性材料的两空间亮孤子彼此相干的情况下^[19-21], 如果在入射面两孤子同相(相位差为零), 则在它们之间的区域光波场产生相长干涉, 在该区域引起大的折射率改变, 更多的光能被耦合到该区域, 两孤子表现为相互吸引; 如果在入射面两孤子反相(相位差为 π), 则在它们之间的区域光波场产生相消干涉, 在该区域折射率改变减小, 而两侧的折射率相对显得更大, 光能被更多地耦合到两侧, 光孤子表现为相互排斥. 非相干的两亮孤子, 无论它们在入射面处的相位差为多少, 总是表现为相互吸引^[22-25], 因为它们之间的区域的光强为它们光强之和, 总是增大的.

光孤子的相互作用丰富了光孤子的研究内容, 可用于光控光. 但在大规模集成光路中, 光孤子之间

的相互干扰却是有害的, 应该设法避免. 过去对非相干孤子间的相互作用的研究都是采用同频率的非相干孤子, 通过使孤子之间的光程差大于它们的相干长度而实现孤子间的非相干性. 本文进一步发展了非相干孤子相互作用的研究工作, 使用不同频率的两空间孤子在有强光伏效应的晶体中传播, 使它们相互作用. 数值模拟结果表明不同频率的光孤子间的相互作用强度不仅与它们的距离和半高宽有关, 而且依赖于光伏系数和线性电光效应系数. 孤子间的相互作用是非弹性的^[26], 孤子在相互作用的过程中改变它们的峰值光强和半高宽, 孤子只在一定的传播距离内保持孤子形状. 本文的数值模拟结果还表明, 异色孤子间的相互作用除了相互吸引外, 还存在光能在孤子诱导波导间的耦合.

2. 基本理论

真空中波长分别为 λ_1 和 λ_2 的两光场在光伏光折变晶体中沿 z 轴方向传播, x 方向(也是晶体的 c 轴方向和两光场的振动方向)为它们的衍射方向. 在忽略损耗情况下, 采用傍轴近似, 得到两束光的传播演化方程为

$$\frac{\partial \phi_\sigma}{\partial z} - \frac{i}{2k_\sigma} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{ik_\sigma}{n_\sigma} \Delta n_\sigma \phi_\sigma = 0 \quad (\sigma = 1, 2) \quad (1)$$

(σ 总是取 1 或 2), 其中 n_σ 为低频折射率, $k_\sigma = n_\sigma 2\pi/\lambda_\sigma$, Φ_σ 为光波的慢变化包络, 与光强的关系为

* 国家自然科学基金(批准号: 10074082)及广东省自然科学基金(批准号: 001192)资助的课题.

† 通讯联系人.

$|\Phi|^2 = 2I(\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2}/n_\sigma$, $\Delta n = -0.5n_\sigma^3 r_{\text{eff}} E_{\text{sc}}$ 为折射率在空间电荷场 E_{sc} 作用下的变化. 空间电荷场 E_{sc} 是在光激发电荷、电荷迁移和电荷俘获、形成空间电荷分布以后形成的. 我们采用文献 [27] 类似的方法得到开路情况下的 E_{sc} , 从速率方程和电流方程, 有

$$(s_1 I_1 + s_2 I_2 + s_b I_b + \beta \chi N_d - N_d^+) - \gamma N_e N_d^+ = 0,$$

$$J = q\mu N_e E_{\text{sc}} + (k_1^e s_1 I_1 + k_2^e s_2 I_2 + k_b^e s_b I_b)(N_d - N_d^+) = 0.$$

在近似 $N_d^+ \approx N_A$ 和 $\beta/s_b I_b \approx 0$ 下, 得到

$$E = -\frac{1 + r_1 |u_1|^2 + r_2 |u_2|^2}{1 + |u_1|^2 + |u_2|^2}, \quad (2)$$

其中 $E = E_{\text{sc}}/E_p$, $E_p = k_b^e \gamma N_A / q\mu$, $r_\sigma = k_\sigma^e / k_b^e$, $|u_\sigma|^2 = s_\sigma I_\sigma / s_b I_b$, I_σ 和 I_b 为信号光和背景光的光强, s_σ 和 s_b 为晶体对信号光和背景光的吸收截面, β 为暗辐射, N_d 和 N_d^+ 分别为总施主密度和已电离施主密度, γ 为复合率系数, J 为电流密度(开路情况下为零), $-q$ 为电子的电量, μ 为电子迁移率, N_e 为电子密度, k_σ^e 和 k_b^e 为晶体对信号光和背景光的有效光伏系数, N_A 为补偿电离施主的受主密度. 由 (1) 和 (2) 式得到

$$\frac{\partial u_1}{\partial \zeta} = \frac{i}{\Lambda_1} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + b_1 \frac{1 + r_1 |u_2|^2 + r_2 |u_2|^2}{1 + |u_1|^2 + |u_2|^2} u_1 \right),$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \zeta} = \frac{i}{\Lambda_2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + b_2 \frac{1 + r_1 |u_2|^2 + r_2 |u_2|^2}{1 + |u_1|^2 + |u_2|^2} u_2 \right), \quad (3)$$

其中 $\zeta = z/z_0$, $\xi = x/x_0$, $\Lambda_\sigma = k_\sigma x_0^2 / z_0$, $b = k_\sigma^e x_0^2 n_\sigma^2 r_{\text{eff}} \times E_p / 2$, x_0 和 z_0 为两个归一化长度. 方程组 (3) 即为所需要的无量纲演化方程组. 当光伏光折变晶体中只有一束光传播时, 方程组 (3) 退化为

$$\frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{i}{\Lambda} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + b \frac{1 + r |u|^2}{1 + |u|^2} u \right). \quad (4)$$

设该方程有亮孤子解 $u = A^{1/2} y(\xi) \exp(ia\zeta/\Lambda)$ ($0 \leq y(\xi) \leq 1$), 那么, 有

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 y}{d\xi^2} = \kappa(r-1) \left[\frac{y}{1 + Ay^2} - \frac{\ln(1 + A)}{A} y \right] \quad (5)$$

其中 $a = br - (b/A) \chi(r-1) \ln(1 + A)$. 方程 (5) 具有初步一次积分

$$\frac{dy}{dt} = \left[\frac{\ln(1 + Ay^2)}{A} - y^2 \frac{\ln(1 + A)}{A} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

其中 $t = (2b(r-1))^{1/2} \xi$, 从方程 (6) 可以求出孤子的全半高宽 (FWHM) 与孤子峰值的关系, 如图 1 所示. 从 t 与 ξ 的关系, 可以看出对于同样峰值 A , FWHM 与 $(b(r-1))^{1/2}$ 成正比, 即 FWHM 与线性电光系数和光伏系数有关. 线性电光系数和光伏系数

越大, FWHM 越小, 孤子的光能越集中.

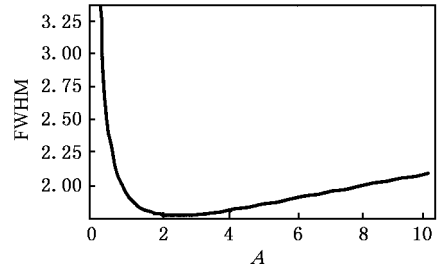


图 1 光伏亮孤子 FWHM 与孤子归一化峰值 A 的关系

本文以方程 (5) 的亮孤子解 $u_\sigma = A^{1/2} y_\sigma(\xi - h_\sigma) \exp(ia_\sigma \zeta / \Lambda_\sigma)$ 作为光伏光折变晶体入射面处两束光的光强分布(其中 h_σ 为 u_σ 对原点的位移), 利用方程组 (3), 用数值方法模拟两束光孤子在光伏光折变晶体中的相互作用.

3. 数值模拟结果与讨论

3.1. 孤子相互吸引

这里以 Cu:KNSBN^[10,18,28,29] 作为例子. 信号光为波长 $\lambda_1 = 488\text{nm}$ 和波长 $\lambda_2 = 514.5\text{nm}$ 的 e 光, 背景光为波长 $\lambda_b = 488\text{nm}$ 的 o 光. 对于 Cu:KNSBN, 上述两种波长的光具有下列参数: $n_1^o = 2.33$, $n_1^e = 2.25$, $n_2^o = 2.31$, $n_2^e = 2.23$, $r_{\text{eff}} = 120\text{pm/V}$, $E_p = 20\text{kV/cm}$, $s_1^e/s_b^e = 0.688$, $s_2^e/s_b^e = 0.551$, $r_1 = k_1^e/k_b^e = 2.5$, $r_2 = k_2^e/k_b^e = 1.6^{[10,18]}$. 选取归一化长度 $z_0 = 1.578\text{mm}$, $x_0 = 11.362\ \mu\text{m}$, 这样对于上述参数有 $\Lambda_1 = 514.5/488$, $\Lambda_2 = 1$, $b_1 = 13$, $b_2 = 11.5$, $r_1 = 2.5$, $r_2 = 1.6$.

对方程组 (3) 进行数值模拟, 作为例子, 入射面处孤子的峰值分别为 $A_1 = 4/50$ 和 $A_2 = 21/80$, 相应的 FWHM 分别为 1.4785 (约为 $16.8\ \mu\text{m}$) 和 1.5105 (约为 $17.16\ \mu\text{m}$), 使它们的峰位相距 $23/32$ (约为 $8.17\ \mu\text{m}$). 图 2 为入射面处的光强分布.

图 3 为上述孤子在晶体中传播和相互作用的情况. 图 3(a) 和 (b) 的坐标原点本来是重合在一起的, 作图时为了看清楚相互作用的情况, 把它们分开来. 从图 3 可以看出孤子的相互作用是非弹性的, 因为孤子的峰值和宽度沿传播路径不断改变, 孤子的形状也改变. 两孤子沿传播路径不断靠近, 互相吸引. 这一点在图 4 和图 5 更明显地表现出来. 图 4 为峰值与传播距离的关系. 图 5 为 FWHM 与传播距离的

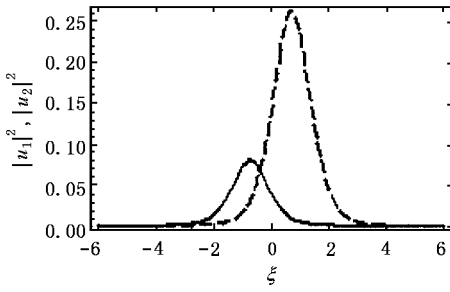
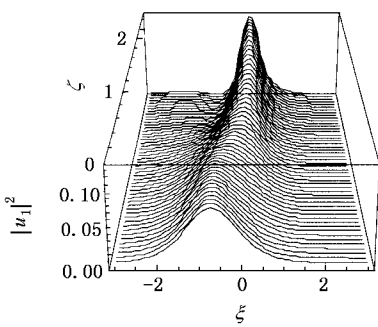


图2 入射面处两孤子的光强分布 ——为孤子1, - - -为孤子2

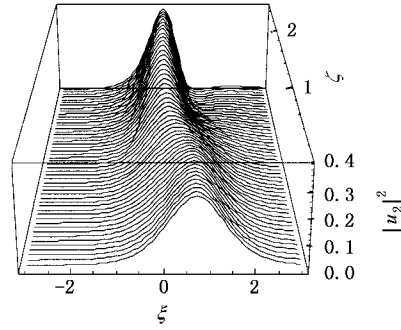


关系. 光束的峰值和 FWHM 沿传播路径不断地改变, 可以看到峰值增大时 FWHM 减小, 峰值降低时 FWHM 增大. 图 4 和图 5 均表明只在 $\zeta < 0.5$ (约为 0.79 mm) 的范围光束才保持孤子形状.

图 6 为峰位与传播距离的关系. 可以看出, 孤子相互吸引. 起初, 两光束的峰距离不断减小, 直到两峰重合在一起, 接着两峰又重新错开, 两峰距离增大, 但在远没有达到初始位置时, 两峰又开始靠近. 这也表明了相互作用的非弹性.



(a) 孤子 1 (与图 2 实线对应)



(b) 孤子 2 (与图 2 虚线对应)

图 3 两孤子相互吸引的情况 (a) 和 (b) 的原点重合在一起

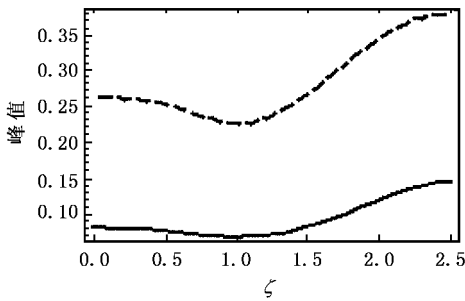


图 4 两孤子的峰值高度与传播距离的关系 ——对应孤子 1, - - - 对应孤子 2

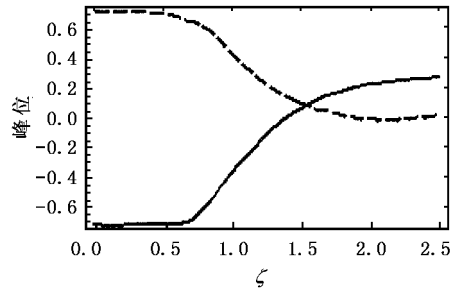


图 6 两孤子的峰位与传播距离的关系 图注同图 4

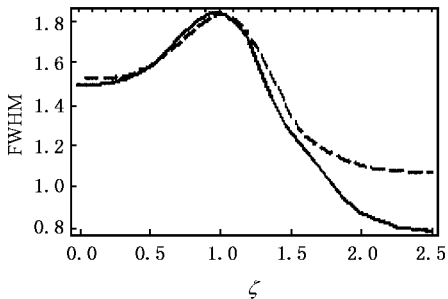


图 5 两孤子的 FWHM 与传播距离的关系 图注同图 4

3.2. 孤子能量在波导间的耦合

本文的数值模拟结果还表明孤子的相互作用除了相互吸引外, 还存在能量相互耦合的现象. 例如当入射面处孤子的峰值分别为 $A_1 = 9/80$ 和 $A_2 = 1/8$, 相应的 FWHM 分别为 1.27 (约为 14.42 μm) 和 2.04 (约为 23.16 μm), 孤子的峰位相距 $11/8$ (约为 15.62 μm). 图 7 为入射面处的光强分布.

图 8 为孤子在晶体中传播和相互作用的情况, 图 8 (a) 和 (b) 的坐标原点实际上也是重合的. 从图 8 (b) 可以看到, 在传播过程中, 孤子 2 的部分能量被耦合到孤子 1 形成的波导里面去. 这说明不同频率

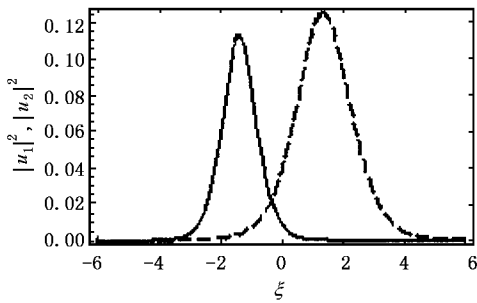


图 7 入射面处孤子的光强分布 图注同图 2

的孤子的相互作用不仅有相互吸引的现象,而且有光能量在波导间耦合的现象.

3.3. 孤子距离对相互作用的影响

随入射面处孤子距离的增大,孤子的相互作用明显地变弱.例如当入射面处孤子的峰值仍保持为 $A_1 = 9/80$ 和 $A_2 = 1/8$ 而峰位相距为 $19/10$ (约为 $21.59 \mu\text{m}$)时,孤子的相互作用就变得很弱.图 9 为入射面处的光强分布.

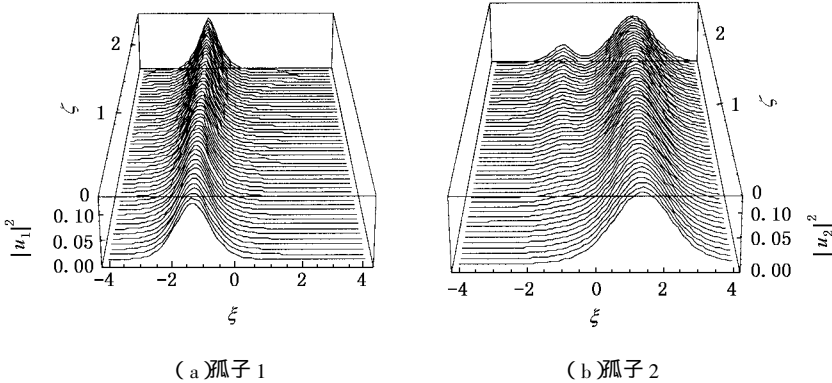


图 8 孤子能量的耦合 从(b)可以看出,孤子 2 有部分能量被耦合到孤子 1 里面

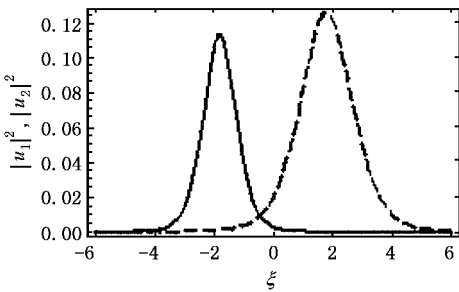


图 9 入射面处两孤子的光强分布 图注同图 2

图 10 为上述两孤子在晶体中传播和相互作用的情况.容易看出,这时孤子的相互作用已变得非常弱,孤子在传播过程中峰值和形状都没有明显地发生改变.在光路大规模集成中,光的干扰必须避免,这就限制了集成密度.我们的数值模拟结果可以为此提供参考.

3.4. 电光系数和光伏系数的影响

孤子相互作用的强弱强烈地依赖于孤子的宽

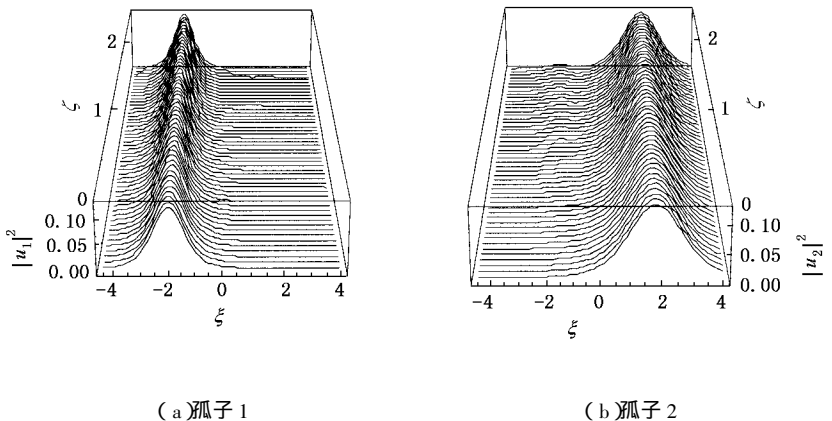


图 10 两孤子在晶体中传播和相互作用情况 相互作用变得非常弱,孤子的形状沿传播距离没有明显的改变



度、振幅和孤子的距离. 当孤子峰位的距离保持不变, 而孤子的宽度增大时, 孤子的相互作用就会变得更明显. 正如前面指出, 孤子的宽度不仅与孤子的峰值大小有关(如图 1 所示), 而且孤子的宽度与 $(b(r-1))^{1/2}$ 成反比, b 与电光系数成正比, r 与光伏系数成正比, 一切使 b 和 r 增大的因数都可以减小孤子的宽度, 这意味着具有更大电光系数和光伏系数的材料, 孤子的有效相互作用距离就更小, 光学元件就可有更高的集成度.

4. 结 论

本文采用数值方法模拟不同频率的亮孤子在光伏光折变晶体中的相互作用, 发现不同频率的亮孤子间的相互作用除了相互吸引外, 还存在光能在孤子形成的波导间的耦合. 晶体的电光系数和光伏系数越大, 孤子的有效相互作用距离越短.

- [1] Shalaby M and Barthelemy A 1991 *Opt. Lett.* **16** 1472
- [2] Barthelemy A, Froehly C, Maneuf S and Reynaud F 1992 *Opt. Lett.* **17** 844
- [3] Morin M, Duree G, Salamo G and Segev M 1995 *Opt. Lett.* **20** 2066
- [4] Shih M, Segev M and Salamo G 1996 *Opt. Lett.* **21** 931
- [5] Lu Y and Liu S M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1300 [in Chinese] 陆猗、刘思敏 2002 物理学报 **51** 1300]
- [6] Snyder A W, Mitchell D J, Poladian L and Ladouceur F 1991 *Opt. Lett.* **16** 21
- [7] Segev M, Crosignani B, Yary A and Fischer B 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
- [8] Crosignani B, Segev M, Engin D, DiPorto P, Yariv A and Salamo G 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 446
- [9] Christodoulides D N and Carvalho M I 1994 *Opt. Lett.* **19** 1714
- [10] She W L and Li R J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 886 [in Chinese] 余卫龙、李荣基 2001 物理学报 **50** 886]
- [11] Segev M, Valley G C, Crosignani B, DiPorto P and Yariv A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
- [12] Christodoulides D N and Carvalho M I 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1628
- [13] Shih M, Leach P, Segev M, Garret M H, Salamo G and Valley G C 1996 *Opt. Lett.* **21** 324
- [14] Chen Z, Segev M, Coskun T H, Christodoulides D N, Kivshar Y S and Afanasjev V V 1996 *Opt. Lett.* **21** 1821
- [15] Valley G C, Segev M, Crosignani B, Yariv A, Fejer M M and Bashaw M 1994 *Phys. Rev. A* **50** R4457
- [16] Taya M, Bashaw M, Fejer M M, Segev M and Valley G C 1996 *Opt. Lett.* **21** 943
- [17] Segev M, Valley G C, Bashaw M, Taya M and Fejer M M 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1772
- [18] She W L, Lee K K and Lee W K 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3182
- [19] Singh S R and Christodoulides D N 1995 *Opt. Commun.* **118** 569
- [20] Meng H, Salamo G, Shih M and Segev M 1997 *Opt. Lett.* **22** 448
- [21] Krolkowski K and Holmstrom S A 1997 *Opt. Lett.* **22** 369
- [22] Shih M and Segev M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1538
- [23] Mitchell M, Chen Z, Shih M and Segev M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 490
- [24] Shih M, Segev M and Salamo G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2551
- [25] Hou C F, Li S Q, Li B and Sun X D 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1709 [in Chinese] 侯春风、李师群、李斌、孙秀冬 2001 物理学报 **50** 1709]
- [26] Snyder A W and Sheppard A P 1993 *Opt. Lett.* **18** 482
- [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] Shen X N *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3371
- [29] Shen X N, Zhao J H, Wang R B and Pochi Y 1998 *Opt. Lett.* **23** 1253

Interaction between photovoltaic spatial solitons with difference wavelengths^{*}

Ouyang Shi-Gen Wang Xiao-Sheng She Wei-Long[†]

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

(Received 23 January 2003 ; revised manuscript received 13 May 2003)

Abstract

The interaction between photovoltaic spatial solitons with difference wavelengths in photovoltaic-photorefractive crystals is investigated by numerical method. Our numerical study indicates that the interaction between these solitons is inelastic , and these solitons keep their shapes only within some propagation distance. Besides the attraction with each other , the energy of soliton would be coupled from one waveguide to other waveguide during propagation.

Keywords : photovoltaic spatial soliton , difference wavelength , interaction

PACC : 4265S , 4265J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.10074082) ,and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China(Grant No.001192).

[†] Corresponding author.