

文章编号: 1001-3806(2009)04-0366-03

光折变屏蔽光伏亮孤子相互作用研究

吉选芒¹, 刘劲松²

(1. 运城学院 物理与电子工程系, 运城 044000; 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了得到两个或多个光折变屏蔽光伏亮孤子之间相互作用结果, 采用数值方法分析了两个或多个屏蔽光伏亮孤子之间的相互作用。两同相孤子作用时表现为相互吸引, 并伴有融合现象, 且孤子融合发生时的作用距离随着孤子初始间距的增大而增大; 两反向孤子相互排斥, 且排斥作用随孤子初始间距的减小而增强; 当两孤子的相位差位于区间 $(0, \pi)$ 和 $(-\pi, 0)$ 中时, 其相互作用过程中伴有能量的转移, 两区间中能量转移方向相反。多个同向孤子相互作用时, 不同于两个孤子周期的融合和分开, 而是在整体吸引过程中发生孤子的逐步融合作用。当中间孤子与两边孤子的相位差是 $\pi/2$ 时, 多个孤子之间存在能量转换。而邻近相互反相的多个孤子相互作用时, 能保持很好的稳定性传播。结果表明, 这种相对相位控制下的两孤子间相互作用的变化有望用于光开关器件。多个孤子作用结果对形成孤子阵列及阵列波导具有指导意义。

关键词: 非线性光学; 光折变效应; 屏蔽光伏亮孤子; 相互作用

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.009

Coherent collision between photorefractive screening-photovoltaic bright spatial solitons

Ji Xuan-mang¹, Liu Jin-song²

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China; 2. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huanzhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to understand the interaction between two or multiple screening-photovoltaic bright spatial solitons, the interaction was numerically simulated. Both in-phase solitons attract each other and soliton fusions do occur at a certain interaction length, which increases monotonously with their initial separation. While in the case of out-of-phase, both the solitons repel each other with a force decreasing monotonously with the initial separation. When the relative phase between the solitons falls within the ranges of $(0, \pi)$ and $(-\pi, 0)$, energy transfers in reverse direction. When the multiple solitons are in-phase, they will attract each other and the inner ones will fuse together gradually. When the relative initial phase between any two adjacent solitons is $\pi/2$, energy transfers among them. When the colliding solitons are out of phase, they propagate stably. The result indicate that the change of interaction between both solitons controlled by relative phase can be applied in all optical switch, and that the interaction result of multiple spatial solitons may be useful for the formation of soliton array and waveguide array.

Key words: nonlinear optics; photorefractive effect; screening-photovoltaic bright spatial solitons; coherent interaction

引言

近年来在对光折变空间光孤子的研究中, 已证明了存在3种稳态光折变空间光孤子: 屏蔽孤子^[1,2], 光伏孤子^[3]以及屏蔽光伏孤子^[4,5]。对孤子间相互作用的研究表明, 相干的两个孤子相互作用取决于两光束的相位差^[6,7]。如果两孤子在入射面处相位相同, 则两

孤子表现为互相吸引; 如果在入射面处两孤子的相位反相, 则两孤子表现为互相排斥。非相干相互作用发生在响应远远慢于光束之间相位差变化的非线性介质中, 介质只对光强的时间平均值产生响应。理论和实验研究均表明, 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^[8-10]。作者用数值计算方法研究了同频率平行入射的两光束在外加偏压光伏光折变晶体中的相互作用。并在此基础上研究了多个屏蔽光伏亮孤子间的相互作用。

基金项目: 山西省高等学校科技开发基金资助项目 (200611042)

作者简介: 吉选芒 (1965-), 男, 教授, 从事物理教学与光折变非线性光学方面的研究工作。

E-mail: jixuanmang@126.com

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2008-09-03

1 基本理论

设真空波长为 λ_0 的信号光在外加偏压的光伏光折变晶体中沿 z 方向传播, 晶体的 c 轴方向与 x 轴重

合,在忽略损耗的情况下,采用旁轴近似,在无扩散场
的情况下,可得到在外加偏压的光伏光折变晶体中无
量纲化光波振幅 U 的演化方程^[5]:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \beta(\rho + 1) \frac{U}{1 + |U|^2} - \alpha \frac{(\rho - |U|^2)U}{1 + |U|^2} = 0 \quad (1)$$

式中, $I = I_0 |U|^2$ 为晶体中的总光强, $\rho = I_\alpha / I_d$, $\beta = \sigma E_0$, $\alpha = \sigma E_p$, α 和 β 分别是与光伏场和外加电场相联系
的无量纲量, $\sigma = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2)$, $I_\alpha = I(x \rightarrow \pm \infty, z)$; $k_0 = 2\pi / \lambda_0$; r_{33} 为有效电光系数, n_e 为晶体对非常
光折射率, E_p 为晶体的光伏场, E_0 为晶体的外加电场; I_d 是暗辐射强度。无量纲的坐标 $\xi = z / (kx_0^2)$, $s = x / x_0$, 其中, $k = n_e k_0$, x_0 为一个任意的空间宽度, $U_\xi = \partial U / \partial \xi$, $U_{ss} = \partial^2 U / \partial s^2$ 。利用和文献[3]中相同的方法,令
 $U = r^{1/2} y(s) \exp(i\nu \xi)$, 其中, $r = I_0 / I_d = I(0, 0) / I_d$, 对于亮孤子来说, $\rho = I_\alpha / I_d = 0$ 。由(1)式可得到:

$$\frac{d^2 y}{ds^2} - 2\nu y - 2\beta \frac{y}{1 + ry^2} + 2\alpha \frac{ry^3}{1 + ry^2} = 0 \quad (2)$$

$y(s)$ 为归一化亮孤子场包络, 对亮孤子 $0 \leq y(s) \leq 1$, ν 表示光波传播常数的空间相移, 利用亮孤子包络解的
边界条件: $y(0) = 1$, $\dot{y}(0) = 0$ 和 $y(s \rightarrow \pm \infty) = 0$, 在 $\rho = 0$ 的情况下, 可以得到亮孤子数值积分解的形式:

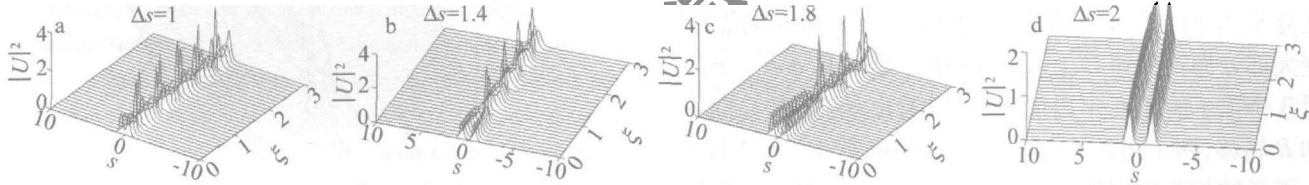


Fig. 1 Interaction between two in-phase screening-photovoltaic bright spatial solitons at different initial distances

随着融合现象。这是由于两孤子同相, 它们将在交叠
区干涉相涨, 使它们之间的介质的折射率增大, 两孤子
将因此向中心偏移而表现为相互吸引。另外, 由图可
知, 两孤子产生融合时作用距离随着两孤子之间初始
间距的增大而增大, 当两孤子初始间距过大, 如图1d所

$$[2(\alpha + \beta)]^{1/2} s = \pm \int_s^1 \frac{r^{1/2} d\tilde{y}}{[\ln(1 + r\tilde{y}^2) - \tilde{y}^2 \ln(1 + r)]^{1/2}} \quad (3)$$

式中, $\nu = -[(\alpha + \beta) / r] \ln(1 + r)$, 对于屏蔽光伏亮孤
子, 由(3)式可以看出, 必须要求 $(\alpha + \beta) > 0$ 。

2 两个屏蔽光伏亮孤子的相互作用

下面以文献[5]中给出的晶体参量为例, 来研究
两个亮孤子入射到晶体中的相互作用。所取参量如
下: $\alpha = -100$, $\beta = 135$ 以及 $r = 1$ 。从(2)式就可以得
到在这些参量下晶体中支持的孤子解 $y(s)$ 。设在入
射面处, 光场的总复数振幅为 $U(s, 0) = r^{1/2} y(s + \Delta s / 2) + r^{1/2} y(s - \Delta s / 2) \exp(i\phi)$, Δs 是两入射屏蔽光伏孤
子峰值之间的距离, ϕ 是两光束之间的相位差, 将不
同的 Δs 和 ϕ 所对应的 U 作为初始条件, 数值求解(1)
式, 可对任意间距和任意相位情况下两屏蔽光伏孤子
的相互作用进行模拟。以下为了分析方便, 将峰值中心
对应 s 为正的光束记作为 B , 而 s 为负的光束记作 A 。

2.1 两同相位屏蔽光伏亮孤子的相互作用

图1中给出的是两束同相位的孤子在不同的初始
间距 Δs 下的相互作用过程。由图中可以看出, 在一
定的初始间距范围内, 同相孤子总表现为相互吸引, 并

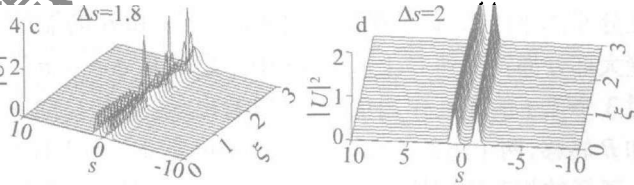
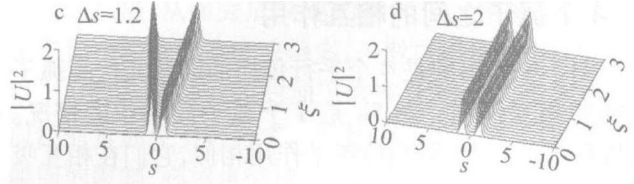


Fig. 2 Interaction between two out-of-phase screening-photovoltaic bright spatial solitons at different initial distances

示, 两孤子之间已没有相互作用了。
随着融合现象。这是由于两孤子同相, 它们将在交叠
区干涉相涨, 使它们之间的介质的折射率增大, 两孤子
将因此向中心偏移而表现为相互吸引。另外, 由图可
知, 两孤子产生融合时作用距离随着两孤子之间初始
间距的增大而增大, 当两孤子初始间距过大, 如图1d所

2.2 两反相位屏蔽光伏亮孤子的相互作用

图2中给出的是两束相位相反的孤子在不同的初
始间距 Δs 下的相互作用过程。由图中可以看出, 当
两孤子相位相反时, 它们将在交叠区发生干涉相消, 从而



中保持孤子的空间形态不变, 见图2c。

2.3 两屏蔽光伏亮孤子之间的能量转换

图3中给出的是两光束的相位差在区间 $(0, \pi)$ 和
 $(-\pi, 0)$ 时相互作用情况。由图可以看出, 两孤子之
间的相互作用除相互排斥外还伴随着能量的转移。当
相位差在 $(0, \pi)$ 之间时, 两孤子在相互作用过程中能
量由孤子 B 向 A 转移, 见图3a和图3b。当相位差处

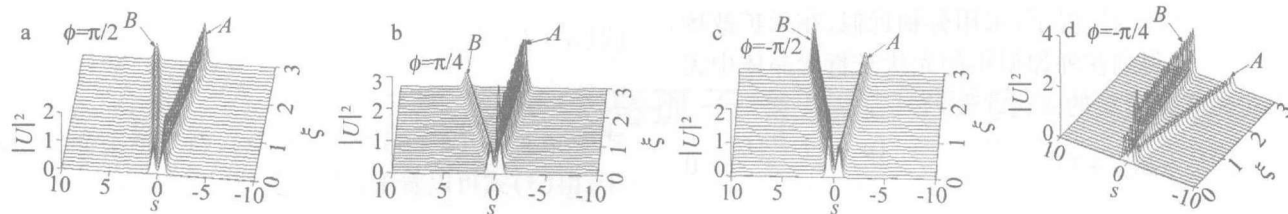


Fig. 3 Energy transferring in interaction between two screening-photovoltaic bright spatial solitons

在 $(-\pi, 0)$ 之间时, 能量转移方向发生变化, 既由孤子 A 向孤子 B 发生转移, 见图 3c 和图 3d。图 3 的计算过程中两孤子之间的初始间距 $\Delta s = 1$ 。

3 3 个亮孤子之间的相互作用

设 3 个相互平行同振幅的孤子光束 A, B 和 C 同时入射到光伏光折变晶体中, 其中, A 和 B 同相位, C 在 A 和 B 中间, C 光束峰值中心到 A 和 B 的峰值中心

距离相等, 相对间距均为 1, 那 A 和 B 的初始相对间距就为 $\Delta s = 2$ 。在入射面处, 光场的总复数振幅为 $U(s, 0) = r^{1/2} y(s + \Delta s/2) + r^{1/2} y(s - \Delta s/2) + r^{1/2} y(s) \times \exp(i\phi)$, 其中, $y(s)$ 是 (2) 式得到的孤子解, Δs 是 A 和 B 两入射屏蔽光伏孤子的峰值之间相对间距, ϕ 是 C 与 A, B 两光束之间的相位差。图 4 中给出的是 $\Delta s = 2, \phi = 0, -\pi/2, \pi/2$ 和 π 时 3 个孤子的相互作用过程。由图 4 可知, 3 个孤子间的相互作用强烈地依赖

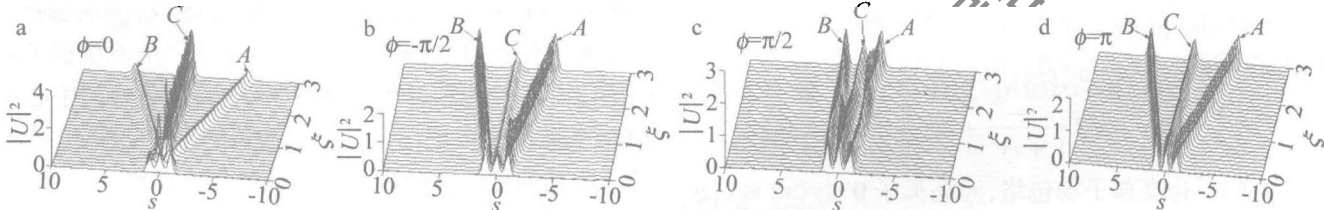


Fig. 4 Interaction among three screening-photovoltaic bright spatial solitons

于它们之间的相位差。由图 4a 可以看出, 3 个同相的屏蔽光伏孤子相互作用时, 开始相互融合, 然后由排斥相互分开, 中间的 C 孤子保持直线传播, 但 A 和 B 的能量绝大部分都转移到 C 上。图 4b 中给出的是 $\phi = -\pi/2$ 时 3 个孤子的相互作用情况, 可以看出, 能量由 C 向 A 和 B 转移, 两个边孤子得到放大。图 4c 是 $\phi = \pi/2$ 时 3 个孤子的相互作用情况, 可以看出, 开始作用初期, 能量由 A 和 B 向 C 转移, 随后又从 C 向 A 和 B 转移, 但转移的数值不是很大。图 4d 是 C 与 A 和 B 反相时 3 个孤子的相互作用结果, C 同时受到 A 和 B 等值反向的排斥而保持原来的传播方向, 而 A 和 B 由于受到 C 的排斥而均偏离原来的传播方向。孤子之间无能量交换。

4 4 个孤子之间的相互作用

图 5 中给出的是 4 个平行传播的屏蔽光伏亮孤子之间的相互作用。图 5a 是 4 个孤子同相位的情况。可以看出, 与 3 个同相位孤子作用相似, 它们在相互吸引靠近的过程中首先是中间两个孤子先融合为 1 个, 并与旁边两个孤子发生一定的能量交换作用, 最后以 3 个孤子形式传播。图 5b 是 4 个相互反相孤子之间的相互作用情况, 由图可见, 相互反相平行传播孤子之间存在着相互排斥作用。除了处于边缘的孤子只受到一个方向的排斥力外, 其余的孤子都受到两边孤子的相反方相的排斥力, 因而基本都处于力的平衡状态, 从而除了两边孤子发生比较明显的偏转外, 中间的两孤

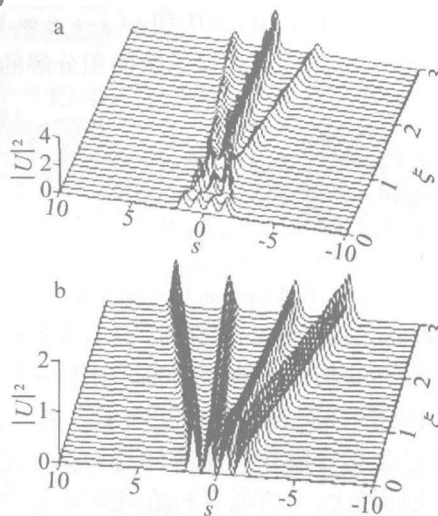


Fig. 5 Interactions among four planar screening-photovoltaic bright spatial solitons
a—in-phase b—out-of-phase

子发生的偏转较小, 孤子之间没有能量相互交换。

5 结论

采用数值方法分析了同频率的两亮屏蔽光伏孤子之间相互作用。发现同相亮孤子相互吸引, 并在一定的作用距离处有融合现象, 且孤子融合发生时的作用距离随着孤子初始间距的增大而增大; 两反向孤子相互排斥, 且排斥作用随孤子初始间距的减小而增强; 当两孤子的相位差位于区间 $(0, \pi)$ 和 $(-\pi, 0)$ 中时, 其

(下转第 373 页)

止测试。

如图8所示,用一个 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的正方形,按 45° 交叉线形成网格进行切割试验(此时激光器的输出能量很小,只是将白纸烧焦),来测试补偿前后的综合效果。图8a为补偿前的切割效果,可以观察到各块之间的拼接处有明显的重叠、错位现象,而采用本文中所述的补偿措施后,同样的图形切割的效果如图8b所示,各个块之间已无明显的重叠、错位,在高倍显微镜下观察,估计误差为 $5\mu\text{m}$ 左右,满足FPCB板的切割工艺要求。

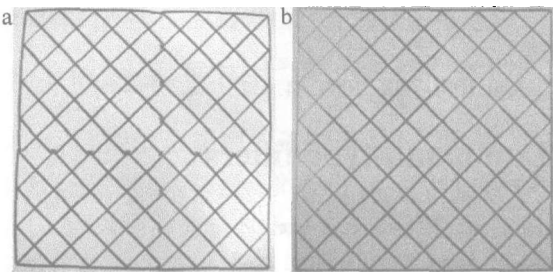


Fig. 8 Contrast of results after stitching compensation
a—shape before compensation b—shape after compensation

4 结论

网格切缝的拼接是动光式激光切割的关键所在,在振镜畸变矫正的基础之上,作者通过线性插值和射影变换方法来分别补偿振镜的区域系数、梯形以及菱形畸变,并设计了一种简单、有效的方案来测试补偿的效果,并将该方法应用到激光振镜切割系统中,极大地提高了激光切割的效率。本机与传统定光式激光切割

机相比,平均效率提高了将近8倍,与国外最新切割机的效率基本持平。

参 考 文 献

- [1] JIANG H H. Development and prospect of application of laser cutting technique [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2001, 14(4): 1-12 (in Chinese).
 - [2] SUN H L, LIN Sh Zh. Error analysis on dual-lens laser scanning process [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(3): 161-163 (in Chinese).
 - [3] CHEN Zh, LIU X D. Research on fast software calibration arithmetic of laser lens scanning system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2003, 31(5): 68-69 (in Chinese).
 - [4] WANG H Q, SHI Y Sh, HUANG Sh H. Control arithmetic and application of 3-D dynamic focusing laser lens scanning system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2003, 31(5): 70-71 (in Chinese).
 - [5] GUO F, HU B, YING H Sh. Hardware calibration of geometric distortion of dual-lens scan [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 337-341 (in Chinese).
 - [6] LONG Y H, XIONG L C, SHI T L. The quality study on excimer laser-induced electrochemical etching of silicon [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 235-237 (in Chinese).
 - [7] WANG J Zh, SHI T L, XIONG L C. A shortened procedure of microelectromechanical systems fabrication by means of femtosecond laser [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 88-91 (in Chinese).
 - [8] ZHU L Q. Error analysis and calibration technique of dual-lens 2-D scanning system [J]. *Applied Laser*, 2001, 20(5): 325-327 (in Chinese).
 - [9] WAN Zh, DU W X. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 115-118 (in Chinese).
 - [10] GEDACH K H, JERSCH J, DICHMANN K, et al. Design and performance of an excimer laser based optical system for high precision microstructuring [J]. *Optics and Laser Technology*, 1997, 29(8): 439.
-
- [1] SINGH S R, CHRISTODOULIDES D N. Evolution of spatial optical solitons in biased photorefractive media under steady state conditions [J]. *Opt Commun*, 1995, 118(5/6): 569-576.
 - [2] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J O S A*, 1995, B12(9): 1628-1633.
 - [3] SEGEV M, VALLY G C, BASHAW M C, et al. Photovoltaic spatial solitons [J]. *J O S A*, 1997, B14(7): 1772-1781.
 - [4] JI X M, WANG J L, LIU J S, et al. The temperature dependence of separate spatial soliton pairs in an unbiased series photorefractive crystal circuit [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 102-105 (in Chinese).
 - [5] JI X M, WANG J L, LIU J S, et al. The temperature dependence of incoherently coupled bright-dark screening photovoltaic solution pairs [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 387-389 (in Chinese).
 - [6] HOU C F, LI S Q, LI B, et al. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Progress in Physics*, 2001, 21(2): 237-245 (in Chinese).
 - [7] JIANG D S, OUYANG S G, SHE W L. Interaction of photovoltaic spatial solitons between dark and dark as well as dark and bright [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(11): 3777-3785 (in Chinese).
 - [8] SHIH M F, CHEN Z G, SEGEV M, et al. Incoherent collisions between one-dimensional bright steady-state photorefractive spatial screening solitons [J]. *A P L*, 1996, 69(27): 4151-4153.
 - [9] SHIH M F, SEGEV M. Incoherent collisions between two-dimensional bright steady-state photorefractive spatial screening solitons [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1538-1540.
 - [10] STEPKEN A, KAISER F, BÉLIC M R, et al. Interaction of incoherent two-dimensional photorefractive solitons [J]. *Phys Rev*, 1998, E58(4): 4112-4115.

(上接第368页)

相互作用过程中伴有能量的转移,两区间中能量转移方向相反。多个同相屏蔽光伏孤子相互作用时,开始相互融合,然后由排斥相互分开,中间的孤子保持直线传播,两边孤子的能量能量绝大不分都转移到中间孤子上。多个反相孤子之间是相互排斥的,处于中间孤子保持相对稳定的传播方式。利用孤子间相互作用对相位的依赖关系,可通过控制一束光的相位来实现对另一束光的控制,即全光控光,这使得光折变空间孤子及其相互作用在全光通信中有很大的应用前景。

参 考 文 献