

文章编号: 1001-3806(2014)06-0771-05

入射光强对多个亮孤子相干相互作用的影响

姜其畅, 苏艳丽, 吉选芒

(运城学院 物理与电子工程系, 运城 044000)

摘要: 为了研究入射光强对多个亮屏蔽孤子之间相干相互作用的影响, 采用数值模拟的方法求解孤波演化方程。在特定的相互作用距离和相对相位条件下, 改变入射孤子的光强, 分别对2个孤子和3个孤子的相干相互作用做了分析。结果表明, 在同相位条件下, 2个孤子的相互作用表现出融合-分开-融合的周期性; 对3个孤子, 这种周期性消失; 同时表现出能量的定向转移特性。改变入射光强的大小, 能够控制能量转移的方向。在相反相位的情况下, 2个孤子和3个孤子类似, 都表现出相互排斥的相互作用, 入射光强的大小会影响相互作用的程度。当孤子之间相位差为 $\pi/2$ 时, 2个孤子和3个孤子都表现出能量的定向转移, 能量转移方向由相对相位差的符号决定; 对3个孤子, 随着入射光强的增加, 伴随着能量的转移, 还会表现出一定的排斥作用。此研究结果说明入射光强对孤子的相互作用具有一定的调节作用。

关键词: 非线性光学; 光折变效应; 相干相互作用; 入射光强

中图分类号: O437 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.010

Effect of incident optical intensity on coherent interaction of multiple bright solitons

JIANG Qichang, SU Yanli, JI Xuanmang

(Departments of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: In order to study the effect of incident optical intensity on coherent interaction of multi bright screening spatial solitons, evolution equations of solitary wave were solved by numerical simulation. Under the conditions of the giving distance of interaction and relative phase, the coherent interactions of two and three solitons were analyzed respectively under different optical intensity of incident solitons. The result shows that, under the in-phase conditions, two solitons have the period of fusion-separate-fusion. For three solitons, this period will disappear and the energy transfer will emerge. The direction of energy transfer can be controlled by varying the value of the incident optical intensity. Under the out-of-phase conditions, both two solitons and three solitons show the interaction of repulsion each other. The value of repulsion is affected by the incident optical intensity. Both two solitons and three solitons show the energy transfer when the phase difference is $\varphi = \pi/2$ and the direction of energy transfer is determined by the sign of phase difference. For three solitons, small repulsion will emerge accompanied with the energy transfer when the incident optical intensity increases. All the results show that the incident optical intensity can affect the coherent interaction of solitons.

Key words: nonlinear optics; photorefractive effect; coherent interaction; incident optical intensity

引言

光折变空间光孤子的相互作用行为由于表现出类粒子特性而广受关注^[1-6]。孤子之间的相互作用

分相干和非相干相互作用两类。相干相互作用发生在瞬时非线性介质中, 此时, 在介质的响应时间内, 孤子之间的相对相位是不变的, 介质对孤子光束之间的干涉发生非线性响应。当两孤子光束的相位相同时, 光束交叠区域的折射率由于光强的相长干涉而增大, 因此两孤子光束将向中心偏移, 表现出相互吸引的作用; 当两孤子的相位相反时, 光束交叠区域的折射率由于光强的相消干涉而减小, 两孤子表现出相互排斥的作用。非相干相互作用发生在响应时间远远大于光束之间相对相位的变化时间的非线性

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (2011011003-2)

作者简介: 姜其畅(1980-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事物理教学及非线性光学方面的研究。

E-mail: jiangsir009@163.com

收稿日期: 2013-12-02; 收到修改稿日期: 2014-01-17

介质中,此时介质只对光强的时间平均值发出响应,不管孤子之间的相对相位如何,孤子交叠区域的光强都将增强,伴随着折射率的增加,孤子之间表现出相互吸引的作用。

目前,对光折变空间光孤子的相互作用研究,无论是两个孤子还是多个孤子^[7-9],多集中于相对相位、相对距离等因素的影响。本文中在已有孤子相互作用的理论基础上,着重讨论了入射光强对2个、3个亮屏蔽孤子相干相互作用的影响。研究发现,可以通过改变孤子的入射光强,使2个孤子或者3个孤子之间的相互作用呈现更丰富的形态,孤子之间相互作用的程度、能量转移的多少都会受到入射光强的影响,这为控制孤子之间的相互作用提供了又一个灵活可变的参量,具有一定的现实意义。

1 基本理论

为了研究入射光强对孤子相互作用的影响,选取如下结构:假设孤波光束在块状光折变晶体中沿着z轴传播,x轴是晶体的光轴方向,也是外加电场的方向,对亮孤子,1维无量纲的光波演化方程如下^[10]:

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial s^2} - \frac{\beta}{1 + |U|^2} U = 0 \quad (1)$$

式中, $\beta = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2) E_0$, $\xi = z / (k x_0^2)$, $s = x / x_0$, E_0 是外加电场场强, x_0 是任意空间常数, $k = k_0 n_e$, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$, λ_0 是自由空间波长, n_e 是未受扰动的折射率, r_{33} 是电光系数。

令 $U = r^{1/2} y(s) \exp(i\nu \xi)$, 其中 ν 表示孤波传播中的非线性移动, $y(s)$ 是归一化的实函数满足 $0 \leq y(s) \leq 1$ 。对亮孤子,有如下边界条件: $y(0) = 1$, $y'(0) = 0$, $y(s \rightarrow \pm \infty) = 0$ 。 r 表示孤波包络中心位置光强与暗辐射的比值,下面改变入射孤波光强即改变 r 的取值。将 U 的形式带入(1)式,借助边界条件可以得到:

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

积分以上方程,可以得到:

$$s = \pm \int_y^1 \frac{(2\beta)^{-1/2} r^{1/2} dy}{[\ln(1 + ry^2) - y^2 \ln(1 + r)]^{1/2}} \quad (3)$$

孤子的归一化包络 $y(s)$ 可以由上式积分得到。

多个孤子相干相互作用的强度包络由下式决定:

$$U(s, 0) = \sum_n r^{1/2} y(s + \Delta s_n) \exp(i\phi_n) \quad (4)$$

式中, Δs 和 ϕ 分别是孤子之间的间距和相对相位。

在一定的间距参量和相位条件下,代入数值求解(1)式,就可以得到孤子之间相互作用的情况。

2 孤子之间的相互作用

取如下参量: $\Delta s = 0.8$, $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $r_{33} = 224 \times 10^{-12} \text{m/V}$, $x_0 = 30 \mu\text{m}$, $n_e = 2.35$, $E_0 = 2 \times 10^5 \text{V/m}$, 可计算出 $\beta \approx 97$ 。为了方便后面的表述,对3个孤子相互作用,做如下约定:中间孤子入射光强为 r_0 , 左右两侧分别为 r_1 和 r_2 。对2个孤子相互作用,其入射光强分别为 r_1 和 r_2 。

2.1 同相位孤子的相互作用

图1中给出了两个亮孤子在不同入射光强下的相干相互作用图像。可以看到,在同相位条件下,2个亮孤子的相干相互作用整体表现出融合-分开-融合的周期性作用。随着入射光强的增加,2个孤子会更早地开始融合;在 $r = 10$ 左右周期性较好,继续加大光强,能量虽然是融合,但融合效果变差。或者

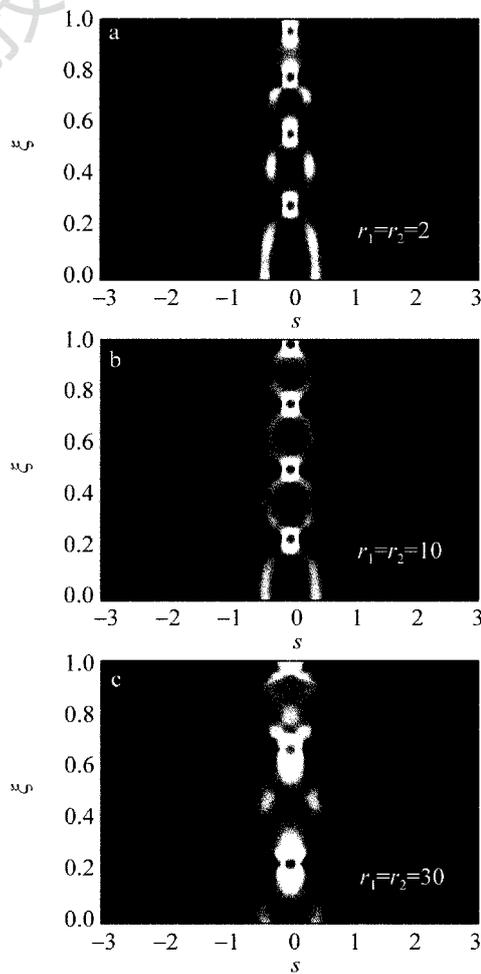


Fig. 1 Coherent interactions of two solitons under different optical intensity

说,这种周期性的作用现象,应该对应1组最佳的入射间距、相位和入射光强的参量组合。对于同样条件下3个孤子的相干相互作用(如图2所示),孤子之间融合-分开-融合的周期性消失;而且两侧孤子的能量将向中间孤子转移,中间孤子的能量呈现周期起伏的特性。当入射光强增加时,一方面两侧孤子分开的角度加大,另一方面中间孤子能量起伏明显。

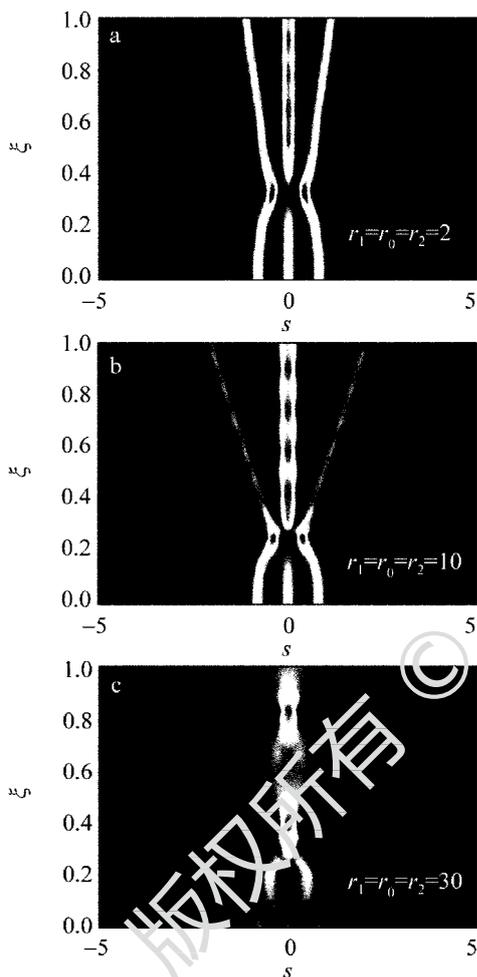


Fig. 2 Coherent interactions of three solitons under different optical intensity

上面分析了入射孤子的光强同步变化的情况,下面再研究当入射孤子之间相对光强变化的情况。首先,如果是中间孤子的入射光强小,如: $r_1 = r_2 = 10, r_0 = 2$ (如图3所示),则会出现能量的逆向转移,即中间孤子的能量会向两侧转移。

如果逐渐加大中间孤子的入射光强,如分别取 r_0 为5和8,则这种能量的逆向转移会逐渐消失,直至能量再次从两侧向中间转移(如图4所示)。

如果是侧面孤子的入射光强较小,如: $r_0 = r_2 =$

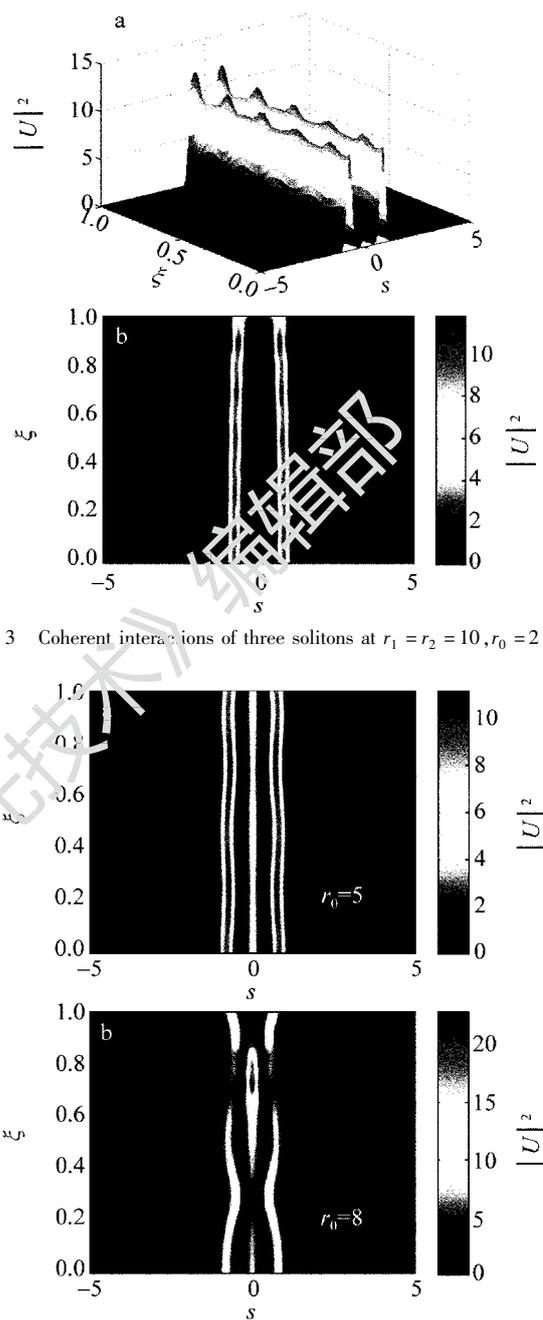


Fig. 3 Coherent interactions of three solitons at $r_1 = r_2 = 10, r_0 = 2$

Fig. 4 Coherent interactions of three solitons under different r_0

10, $r_1 = 2$,则小的入射光强孤子几乎不参与相互作用,另外2个孤子呈现出融合-分开-融合的周期特性,如图5a所示;如果逐渐加大侧面孤子的入射光强,如图5b、图5c所示,侧面孤子将逐渐参与到3个孤子的相互作用过程中,并逐渐破坏另外2个孤子的周期特性,最终表现出类似图2的相互作用特性。

2.2 反相位孤子的相互作用

当孤子之间的相位相反时,无论是2个孤子还是3个孤子,都表现出排斥作用,如图6a~图6f所示。究其原因,对于2个反相位孤子,由于中间区域

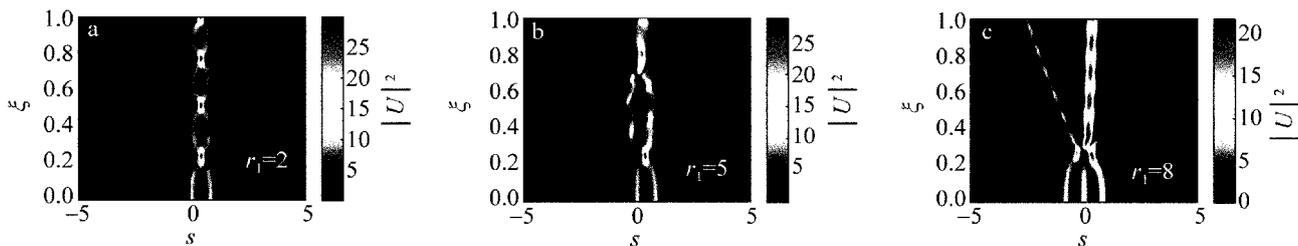


Fig. 5 Coherent interactions of three solitons under different r_1

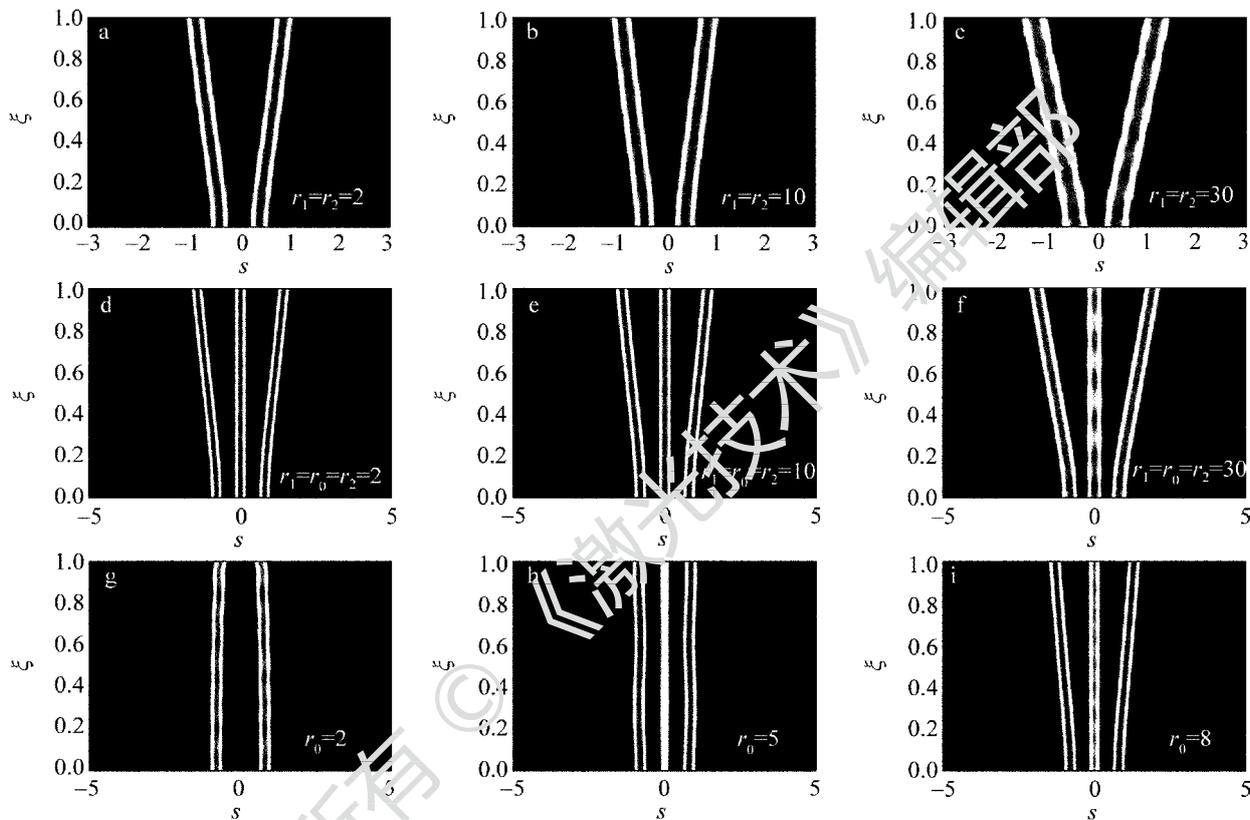


Fig. 6 Coherent interactions of solitons

a ~ c—two solitons d ~ f—three solitons g ~ i—different r_0

的相消干涉使得此区域的总光强相对变小,2个孤子光束会分别向外侧偏转,从而表现出排斥作用;对于3个反相位孤子,两两相邻孤子之间具有和2个反相位孤子类似的特性,所以两侧孤子分别向外侧偏转,而中间孤子由于受到两侧孤子大小相等,方向相反的排斥作用而保持直线传播。此外,当中间孤子的入射光强由弱逐渐增加时,这种排斥作用会逐渐显现,如图6g~图6i所示,此时, $r_1 = r_2 = 10$ 。这是因为,当中间孤子光强较小时(如 $r_0 = 2$),两两相邻孤子的排斥作用很弱,同时,两侧孤子之间由于相对距离较大导致二者之间的相互作用也比较小,所以三者几乎都是保持直线传播。当中间孤子的入射光强逐渐加大时,两两孤子之间的排斥力越来越大,最终导致两侧孤子的外向偏转。

2.3 $\phi = \pi/2$ 孤子相互作用

最后给出孤子相对相位差为 $\phi = \pi/2$ 时,2个孤子、3个孤子的相干相互作用。可以看到无论是2个孤子还是3个孤子,都会产生明显的能量转移(如图7所示),可以认为这是由于干涉效应所导致的孤子之间的能量再分配^[1,11]。数值模拟还发现,能量转移的方向由相对相位差的符号决定(限于篇幅没有给出)。对3个孤子相互作用的情况,如果令中间孤子的入射光强从小逐渐增加,伴随着能量的转移,会逐渐表现出一定的排斥作用(如图8所示),此时 $r_1 = r_2 = 10$ 。对此,可以理解为:随着能量逐渐由中间孤子向两侧孤子转移,外侧孤子区域光强变大,相应的折射率变大,从而导致孤子的外向偏转,即呈现一定的排斥作用。

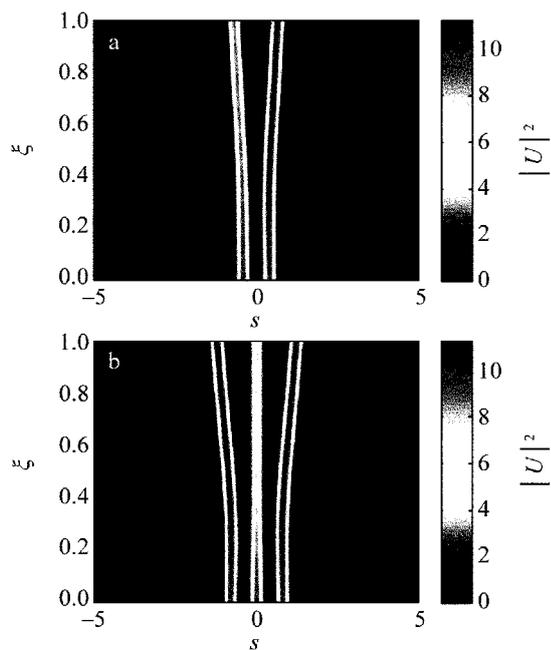


Fig. 7 Coherent interactions of two solitons and three solitons for $r_1 = r_0 = r_2 = 10$

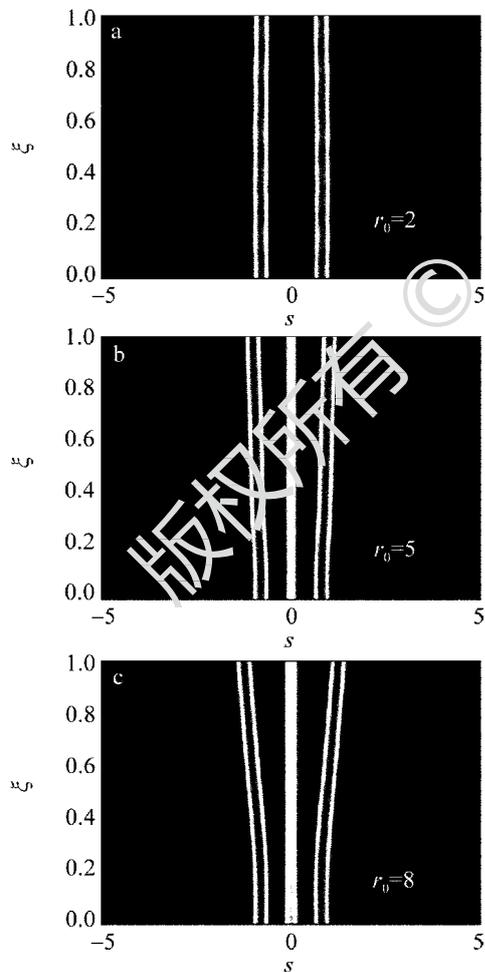


Fig. 8 Coherent interactions of three solitons under different r_0

3 结论

分析了入射光强的改变对2个孤子、3个孤子相互作用的影响。对两个孤子的相干相互作用,通过改变入射孤子的光强,可以控制孤子相互作用的周期特性和相互作用程度的大小。对3个孤子的相互作用,同步改变入射孤子的光强,也可以控制孤子相互作用程度的大小;如果只改变某一个孤子的入射光强,则孤子之间能量的定向转移、相互作用的大小都会呈现更丰富的特性。可以看到,孤子的入射光强对孤子相互作用,尤其是多个孤子相互作用有着很大的影响,为调节孤子的相互作用提供了一个重要参量。

参 考 文 献

- [1] MENG H X, SALAMO G, SHIH M F, *et al.* Coherent collisions of photorefractive solitons[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(7):448-450.
- [2] SHIH M F, SEGEV M. Incoherent collisions between two-dimensional bright steady-state photorefractive spatial screening solitons [J]. *Optical Letters*, 1996, 21(19):1538-1540.
- [3] OUYANG S G, WANG X S, SHE W L. Interaction between photovoltaic spatial solitons with difference wavelengths [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(3):767-772 (in Chinese).
- [4] JIANG D Sh, OUYANG Sh 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).
- [5] YAN L F, JIN Q L, ZHANG D, *et al.* Interactions of dark solitons in photovoltaic photorefractive crystals with diffusion nonlinearity [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(6):1682-1685.
- [6] JI X M, JIANG Q Ch, LIU J S. Effects of temperature on the interaction of two-photon photorefractive screening-photovoltaic bright spatial solitons [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(1):94-99 (in Chinese).
- [7] JIANG D S, SHE W L. Coherent collisions of multi photovoltaic bright spatial solitons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5):2090-2095 (in Chinese).
- [8] HUO Ch F, GUO R, LIU S M. Mutual interactions of multiple partially incoherent spatial solitons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2):908-917 (in Chinese).
- [9] SU Y L, JIANG Q Ch, JI X M. Coherent interactions of multi bright spatial solitons in biased photorefractive crystals [J]. *Optik*, 2014, 125(3):1231-1233.
- [10] JI X M, JIANG Q Ch, LIU J S. Effect of the o-polarized irradiation on the screening-photovoltaic photorefractive spatial solitons [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(4):445-449 (in Chinese).
- [11] HONG B J, YANG C C. Interactions between femtosecond solitons in optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1991, B8(5):1114-1121.