

竞争非局域介质中光束调控

浦绍质, 马 愈, 张留洋, 黄金哲

(哈尔滨理工大学 应用科学学院 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 非局域空间孤子具有低功率、类似粒子的弹性碰撞特性,因此在光信息处理和光连接领域具有潜在应用。为了获得光束传输的有效控制方法,数值计算了亮孤子及亮孤子对由非局域介质进入竞争非局域介质后的传输行为。发现,非局域亮孤子进入竞争非局域介质后以呼吸子的形式传输。非局域偶极孤子进入竞争非局域介质后分裂成两个独立传输的亮孤子。反位相非局域亮孤子组成的震荡束缚态进入竞争非局域介质后的传输行为与界面(非局域介质与竞争非局域介质的交界)位置有关。当界面选到节点(非局域孤子间距离取最小值的点)附近时,震荡束缚态分裂成两个独立的孤子;界面选到其它位置时,震荡束缚态以准束缚态形式传输。该发现为光的传输与控制提供了新的方法。

关键词: 非局域介质; 空间孤子; 竞争非线性; 光束调控; 液晶

DOI: 10.15938/j.jhust.2017.05.025

中图分类号: O437.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)05-0137-06

Beam Steering in Nonlocal Medium with Competing Nonlinearities

PU Shao-zhi, MA Yu, ZHANG Liu-yang, HUANG Jin-zhe

(School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Nonlocal spatial solitons have potential applications in all-optical signal processing and optical interconnects due to their low power and particle-like nature on interactions. In order to obtain the effective method to beam steering, the propagation of bright solitons and soliton pairs from the nonlocal medium to the nonlocal medium with competing nonlinearities is investigated by the numerical simulations. When propagate from nonlocal medium to the nonlocal medium with competing nonlinearities, the nonlocal bright solitons will propagate in the form of breather, the nonlocal dipole solitons will split into two individual solitons, however, the propagation of the nonlocal oscillating bound state which is composed by two out-of-phase solitons depends on the position of the interface (nonlocal medium and nonlocal media with competing nonlinearities interface). When the position of the interface is choose at the node (the minimum distance of the soliton pairs), the nonlocal oscillating bound state will split into two individual solitons, otherwise, and the oscillating bound state will propagate in the form of bound state. These results introduce a new way to beam propagation and steering.

Keywords: nonlocal medium; spatial solitons; competing nonlinearities; beam steering; liquid crystal

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61405049); 黑龙江省自然科学基金(QC2015086).

作者简介: 浦绍质(1981—)男,博士,讲师, E-mail: shaozhipu@126.com;

马 愈(1993—)男,硕士研究生;

张留洋(1981—)男,博士,副教授.

0 引言

非局域光孤子指在非局域材料中传输时空间(时间)形状保持不变的光脉冲。当色散(衍射)引起的展宽效应和自聚焦效应抵消时光束传输过程中形状保持不变即形成光孤子。迄今,发现有很多材料具有非局域非线性,如向列相液晶^[1]、等离子体^[2]、玻色爱因斯坦凝聚^[3]、热非线性材料^[4]等。在光学上非局域非线性指材料折射率的改变不仅与该点的光强有关,还与该点附近区域内的所有光强有关;而局域非线性指材料折射率的改变仅仅与该点的光强有关。自1997年 Snyder 和 Mitchell 在强非局域情况下把光传输模型简化为线性谐振子模型以来(称为 S-M 模型),非局域孤子成为了国内外的一个研究热点^[5]。大量的研究发现与局域孤子相比,非局域孤子具有许多独特的性质:低功率光束可以形成孤子;存在稳定的高维孤子^[6];反位相的非局域亮孤子间存在相互吸引力、非局域暗孤子间存在相互吸引力^[7-8];存在多种复杂结构的孤子,如多极孤子^[9-10]、涡旋孤子^[11]、厄米特高斯孤子^[12]、因斯高斯孤子^[13]、拉盖尔高斯孤子^[14]、椭圆孤子、项链孤子^[15]、矢量-项链-环孤子^[16]、时空孤子等^[17-18];存在非相干孤子^[19-21];非局域空间孤子比局域空间孤子具有更大的相移^[22-24]等。

随着理论和实验研究的深入,非局域孤子的传输和调控取得了丰硕的成果。胡巍等通过巧妙设计的实验发现通过外加电场可以改变液晶的非局域程度,从而有效的控制向列相液晶中孤子之间的相互作用^[25]。叶芳伟等以向列相液晶材料为背景通过简化模型给出改变光束传输路径上的非局域程度和非线性系数可以操控(1+1)维和(2+1)维非局域孤子间的相互作用^[26]。欧阳世根等人发现强非局域情况下反位相亮孤子对能形成相互吸引的振动束缚态^[27]。任标等利用 S-M 模型研究了多个(2+1)维孤子的相互作用,为非线性领域光控制光提供了理论指导^[28]。M. Kwasny 等在固定非局域程度的情况下控制光传输路径上材料的非线性系数有效的控制了向列子间的相互作用^[29]。张华峰等数值计算了非局域操控方式控制孤子的相互作用^[30]。2012年,浦绍质等引入自散焦缺陷层控制亮孤子及其亮孤子间的相互作用^[31]。同年,提出非局域和非线性控制方式控制亮孤子和暗孤子的传输,在此基

础上讨论了基于孤子相互作用的分光器件^[32]。

近年来,竞争非局域非线性介质中孤子及其孤子间的相互作用已经成为孤子领域的一个研究热点。2006年,D. Mihalache 等人研究了自聚焦三次和自散焦五次竞争非局域介质中基态孤子和偶极孤子,发现基态孤子的稳定性符合 Vakhitov-Kolokolov 准则^[33]。2009年,Y. V. Kartashov 等^[34]发现自聚焦与自散焦非局域非线性效应的竞争产生了许多独特的现象,如存在稳定的拓扑数大于2的涡旋孤子、存在峰值大于4的一维多极孤子。2011年,B. K. Esbensen 等^[35]研究了竞争非局域介质中的调制不稳定性及孤子特性,发现非线性和非局域程度改变了平面波的稳定性。此外,还发现改变光束的强度自聚焦和自散焦竞争非局域介质中能形成稳定的暗孤子和亮孤子。同年,杜艳伟等^[36]发现竞争非局域非线性改变了孤子间的相互作用,如特定参数下位相形同的孤子间存在相互排斥力。2012年,B. K. Esbensen 等^[37]研究了自聚焦与自散焦竞争非局域介质中亮孤子及亮孤子间的相互作用。发现自聚焦与自散焦非局域非线性的相互作用导致孤子间的相互吸引和排斥与孤子间的距离有关。特别地,自聚焦与自散焦效应竞争导致大间距孤子间存在排斥力。2013年,L. Chen 等^[38]研究了三次自聚焦非局域非线性和五次局域自散焦(聚焦)竞争介质中暗孤子特性,发现五次自散焦局域效应和三次非局域效应竞争介质中的暗孤子宽度不随非局域程度的变化而变化。2014年,孔茜等^[39]研究了竞争非局域非线性介质中暗孤子特性,给出任意非局域程度时孤子参数之间的关系。发现,竞争非局域介质中暗孤子的宽度随非局域程度增加单调递减。同年,Chen Wei^[40]研究了三五次竞争非局域介质中暗孤子间的相互作用。发现五次自聚焦非线性会增强孤子间的相互作用,同时减小孤子间的相互距离。申明等^[41-42]研究了三次自聚焦和五次自散焦竞争非线性介质中的涡旋孤子,发现该类介质中存在两类涡旋孤子。此处仅仅列举了部分竞争非局域非线性介质中空间孤子的研究现状,从这些研究中发现竞争非局域非线性赋予了非局域空间孤子许多新奇的特点。然而,竞争非局域介质中孤子理论还有待进一步完善,特别是竞争非局域介质中空间孤子控制的研究还处于一片空白。本文利用数值研究了亮孤子及反位相亮孤子对由非局域材料进入竞争非局域材料后的传输行为。提出通过调节界面(非局域介

质与竞争非局域介质的界面) 位置来控制孤子的传出路径。

1 理论部分

1.1 理论模型

考虑一束线偏振光在平面波导结构的液晶盒中传输。液晶盒结构如图 1 所示, 图中深色区域为 ITO 电极, x 轴为横向方向 z 为光传输方向 k 为光的波矢方向 n 为液晶分子长轴方向 θ 液晶分子取向角。选用离散电极是为了通过外加电场控制液晶分子在 xz 平面的取向角。图 1 中虚线(Z_1 处) 把液晶盒分成两个部分, 在虚线两侧分别加上不同的电压。众所周知, 向列相液晶具有分子取向自聚焦非线性效应和热自散焦非线性效应, 通过调节外加电场和入射光的偏振方向能控制热效应和分子取向效应的强度。

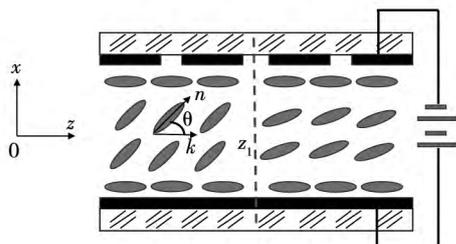


图 1 向列相液晶分子取向图

线偏振光在该液晶盒中的传输由下列方程组描述:

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (n_1 + n_2) u = 0 \quad (1)$$

$$d_1 \frac{\partial^2 n_1}{\partial x^2} - n + \sigma_1(z) |u|^2 = 0 \quad (2)$$

$$d_2 \frac{\partial^2 n_2}{\partial x^2} - n + \sigma_2(z) |u|^2 = 0 \quad (3)$$

其中: u 为归一化的入射光的复振幅; z 和 x 是归一化的纵坐标和横坐标; n_1 为分子取向自聚焦效应引起的折射率改变; n_2 为热效应导致的折射率变化; 参数 d_1 和 d_2 分别为分子取向效应和热效应的非局域程度; $\sigma_1(z)$ 和 $\sigma_2(z)$ 分别表示分子取向效应和热效应的非线性系数。经过计算方程(1) ~ (3) 可以简化为如下方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sigma_1(z) u \int_{-\infty}^{+\infty} R_1(x - \xi) |u(x, z)|^2 d\xi + \sigma_2(z) u \int_{-\infty}^{+\infty} R_2(x - \xi) |u(x, z)|^2 d\xi = 0 \quad (4)$$

其中 $R_{1,2}(x) = (2\sqrt{d_{1,2}})^{-1} \exp(-|x|/\sqrt{d_{1,2}})$ 。为了得到方程(4) 的稳态孤子解, 选用试探解 $u = w(x) \exp(ibz)$ 其中 w 和 b 分别表示强度分布和传播常数。由于方程(4) 没有解析解, 此处采用牛顿迭代法数值求解方程(4) 获得稳态的孤子解。

1.2 数值计算

微尺度光束控制技术有助于实现实用化的全光器件, 此处通过调节分子取向效应和热效应的竞争来控制光束的传输。数值计算时 x 轴方向取 512 个离散点, z 轴方向步长 0.01、初始输入光束形状由牛顿迭代法解方程(4) 所得、孤子传输图由分布傅里叶算法绘制, 其它参数为: $b = 1, d_1 = 2, d_2 = 4, \sigma_1(z)$

$$= 2, \sigma_2(z) = \begin{cases} 0 & z < z_1 \\ -0.5 & z > z_1 \end{cases} \text{ (该分段函数表示 } Z < Z_1 \text{ 区域分子取向效应大于热效应。其中负号表示自散焦效应 } Z_1 \text{ 表示图 1 中虚线位置。由于向列相液晶的分子取向效应和液晶分子的预倾角(液晶分子长轴方向与 } z \text{ 轴的夹角) 有关。当液晶分子预倾角很小时存在 Freédericks 阈值, 入射光束功率很强时才能使液晶分子产生重新取向, 此时液晶材料的非线性系数较小、热效应产生的自散焦效应不能忽略; 当液晶分子的预倾角等于 } 45^\circ \text{ 时, 低功率的入射光就能使液晶分子产生重新取向, 此时液晶材料的非线性系数远大于热效应(热效应可以忽略)。因此, 本文数值计算所选参数是合理的, 可以通过外加电压使液晶盒 } Z_1 \text{ 左侧区域液晶分子预倾角大一些 } Z_1 \text{ 右侧区域液晶分子预倾角小一些来实现。} \text{)}$$

首先, 通过牛顿迭代法得 $b = 1, d_1 = 2, d_2 = 4, \sigma_1(z) = 2, \sigma_2(z) = 0$ 时的亮孤子解。然后, 将该数值解作为光束传输过程的初始输入。图 2(a) 表示亮孤子在只有分子取向效应的非局域介质中的传输图, 从图中可以看出亮孤子在传输过程中形状保持不变, 此时光束自身的衍射展宽效应和分子取向自聚焦效应相互抵消。当光束由非局域非线性区域进入具有自聚焦与自散焦竞争的非局域区域后, 光束传输过程中束宽和峰值功率呈现周期性震荡如图 2(b) 所示。这是因为热自散焦效应的出现使得光束的自聚焦效应小于光束自身的衍射展宽。随着光束的展宽, 光束自身的衍射展宽效应小于自聚焦效应, 此时光束宽度变小。当光束宽度变小后, 光束自身的衍射展宽效应又大于自聚焦效应, 周而复始光束传输过程中表现出周期性震荡。

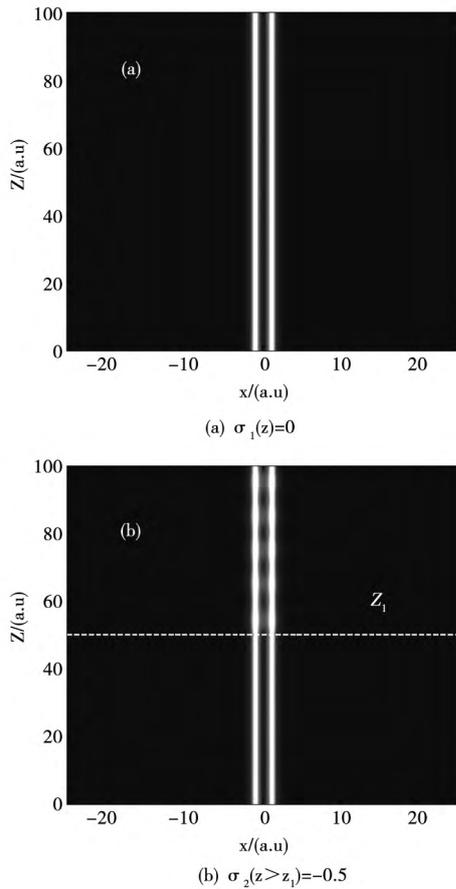


图2 亮孤子传输图

非局域非线性改变了孤子间的相互作用,位相相反的亮孤子间的相互作用与孤子间的距离有关。孤子间的距离较小时,孤子间的排斥力大于吸引力。反之,孤子间的吸引力大于排斥力。选择参数为 $b = 1, d_1 = 2, d_2 = 4, \sigma_1(z) = 2, \sigma_2(z) = 0$ 时反位相亮孤子间的距离等于 4.5 时排斥力等于吸引力,此时反位相亮孤子间形成稳定传输的偶极孤子如图 3 (a) 所示。 $\sigma_2(z > z_1) = -0.5$ 时自散焦效应的出现打破了该平衡状态,此时孤子间的吸引力小于排斥力,反位相亮孤子对在界面(图中白虚线)处将分开并沿两侧传输如图 3 (b) 所示。进一步的数值计算发现分开后的孤子与 z 轴的夹角 α 为一常数。因此改变界面(图中虚线)位置可以控制孤子在输出界面的输出位置,如界面距离输出端的距离为 Δz 则孤子在输出界面距离轴 ($z = 0$) 的横向距离为 $\Delta x = \Delta z \tan \alpha$ 。

当反位相亮孤子间的距离为 6 时,孤子间的排斥力小于吸引力,在传输过程中孤子间的距离逐渐变小。随着孤子间距离的变小,排斥力逐渐增加,当排斥力大于吸引力后孤子间的距离又逐渐增加。因此,距离为 6 的反相位亮孤子传输过程中孤子间的

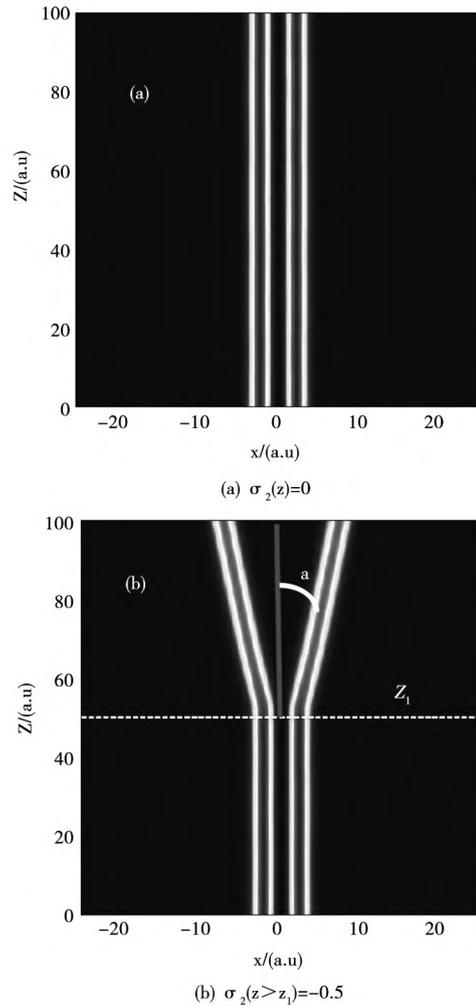


图3 偶极孤子传输图

距离呈周期性的震荡,形成震荡束缚态如图 4 (a) 所示。此处,定义孤子间距离最小位置为节点。自散焦效应的出现改变了震荡束缚态的传输行为。当界面 $z_1 = 30$ (非节点处) 时,反位相孤子间的吸引力约等于排斥力,形成类偶极孤子的准束缚态如图 4 (c) 所示。进一步的数值计算发现只要界面选到非节点处(或稍微原理节点),震动束缚态经过界面后的动力学行为类似于图 4 (c)。有趣的是界面选到节点处(或离节点较近区域)震荡束缚态将分裂成两个独立的孤子,此时的逃逸角 α 见图 4 (b) 大于偶极孤子经过界面后的逃逸角见图 3 (b)。该发现可以用于对光束传输路径的精确大角度控制,如通过界面位置的选择实现对孤子输出位置的控制。众所周知,孤子及孤子间相互作用会在材料中写入折射率波导,该波导对入射的弱光或其它波长的光具有导波作用。因此通过调节界面位置并利用孤子相互作用可以在材料中写入特殊的波导,该波导能实现对其它波长的弱光传输路径的大角度精确控制。

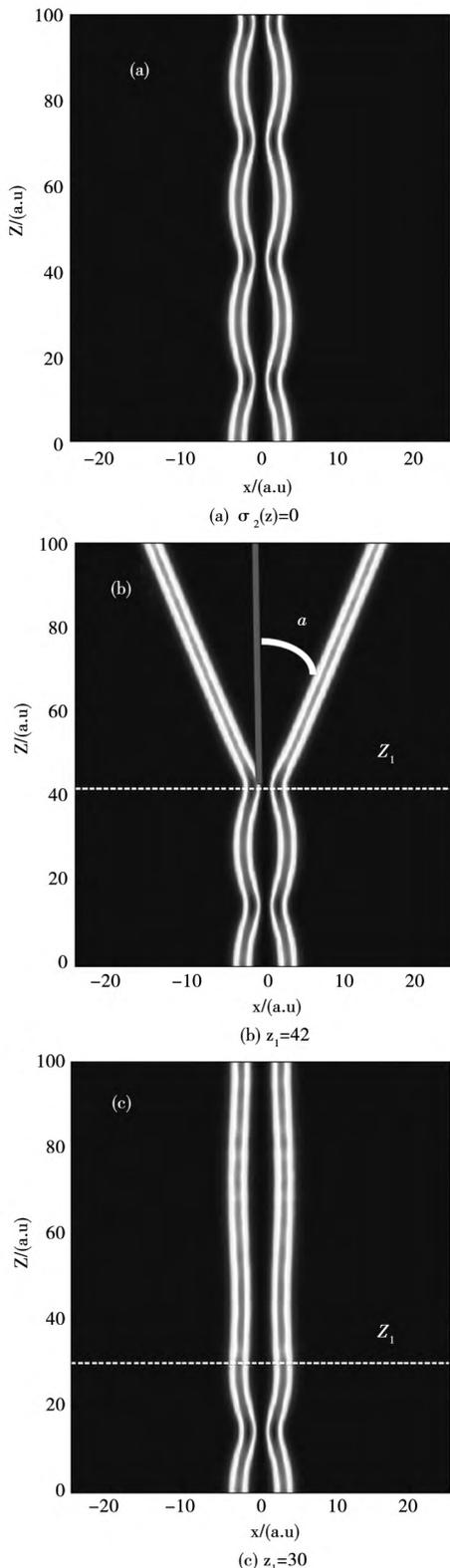


图 4 间距为 6 的反位相亮孤子传输图

2 结 论

本文以向列相液晶(分子取向效应和热效应竞

争)为背景,数值研究了亮孤子及反位相亮孤子对由非局域介质进入竞争非局域介质(自聚焦效应与自散焦效应竞争)后的传输行为,得出以下结论:①亮孤子由非局域介质进入竞争非局域介质后光束自身的衍射效应与自聚焦效应不再平衡,亮孤子将以呼吸子的形式传输。②非局域偶极孤子进入竞争非局域介质后将分裂成两个独立的孤子,分裂后的孤子对称的沿 Z 轴两侧传输。③震荡束缚态由非局域介质进入竞争非局域介质后的传输行为与非局域和竞争非局域介质的界面位置选取有关。当界面选到震荡束缚态的节点或节点附近时,该束缚态分裂成两个独立的孤子,分裂后孤子的逃逸角大于非局域偶极孤子分裂后的逃逸角;当界面远离震荡束缚态的节点时,震荡束缚态变为准束缚态(类偶极孤子)。

竞争非局域非线性的引入为光束的传输与调控提供了可行的方法。若没有竞争非局域非线性,亮孤子及孤子对由非局域程度(非线性系数)高(低)的介质进入非局域程度(非线性系数)低(高)的介质后将不能稳定的传输(光束束宽会出现剧烈变化甚至光束坍塌)。因此,通过调节非局域程度或非线性来操控孤子及孤子对的传输需要一个缓冲区域(在该区域中非局域程度和非线性系数是缓慢变化的)。然而,由于竞争非局域非线性的出现亮孤子及孤子对由非局域介质进入竞争非局域介质后依然能稳定的传输,所以在非局域介质中引入竞争非局域非线性效应在光束的传输与控制领域具有巨大的潜在应用。

参 考 文 献:

[1] CONTI C, PECCIANTI M, ASSANTO G. Route to Nonlocality and Observation of Accessible Solitons [J]. Phys. Rev. Lett., 2003, 91(7): 3901-3904.

[2] BRATMAN V L, ZORIN V G, KALYNOV YK, et al. Plasma Creation by Terahertz Electromagnetic Radiation [J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(8): 083507-1-3.

[3] BURGER S, BONGS K, DETTMER S, et al. Dark Solitons in Bose-Einstein Condensates [J]. Phys. Rev. Lett., 1999, 83(25): 5198-5201.

[4] ROTSCCHILD C, COHEN O, MANELA O, et al. Solitons in Nonlinear Media with an Infinite Range of Nonlocality: First Observation of Coherent Elliptic Solitons and of Vortex Ring Solitons [J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 95(21): 213904-1-3.

[5] SNYDER A W, MITCHELL D J. Accessible Solitons [J]. Science, 1997, 276(6): 1538-1541.

[6] BANG O, KROLIKOWSKI W, WYLLER J, et al. Collapse Arrest and Soliton Stabilization in Nonlocal Nonlinear Media [J]. Phys. Rev. E, 2002, 66(4): 046619-1-5.

- [7] DREISCHUH A, NESHEV D N, PETERSEN D E, et al. Observation of Attraction between Dark Solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96(4): 043901-1-3.
- [8] RASMUSSEN P, BANG O, KROLIKOWSKI W. Theory of Nonlocal Soliton Interaction in Nematic Liquid Crystals[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 72(6): 066611-1-7.
- [9] XU Z, KARTASHOV Y, TORNER L. Upper Threshold for Stability of Multipole-mode Solitons in Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(23): 3171-3173.
- [10] DONG L, YE F. Stability of Multipole-mode Solitons in Thermal Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, 81(1): 013815-1-4.
- [11] YAKIMENKO A, ZALIZNYAK Y, KIVSHAR Y. Stable Vortex Solitons in Nonlocal Self-focusing Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 71(6): 065603-1-4.
- [12] BUCCOLIERO D, DESYATNIKOV A, KROLIKOWSKI W, et al. Laguerre and Hermite Soliton Clusters in Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98(5): 53901-1-4.
- [13] DENG D, GUO Q. Ince-Gaussian Solitons in Strongly Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(21): 3206-3208.
- [14] ZHONG W, YI L. Two-dimensional Laguerre-Gaussian Soliton Family in Strongly Nonlocal Nonlinear media[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, 75(6): 061801-1-4.
- [15] ZHONG W, BELIĆ M. Three-dimensional Optical Vortex and Necklace Solitons in Highly Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(2): 023804-1-6.
- [16] SHEN M, KONG Q, JENG C, et al. Instability Suppression of Clusters of Vector-necklace-ring Solitons in Nonlocal Media[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 83(2): 023825-1-6.
- [17] MIHALACHE D, MAZILU D, LEDERER F, et al. Three-dimensional Spatiotemporal Optical Solitons in Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 73(2): 025601-1-4.
- [18] ZHONG W, BELIĆ M, XIE R, et al. Three-dimensional Spatiotemporal Solitary Waves in Strongly Nonlocal Media[J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(24): 5213-5217.
- [19] MITCHELL M, SEGEV M. Self-trapping of Incoherent White Light[J]. *Nature*, 1997, 387(26): 880-882.
- [20] SHEN M, WANG Q, SHI J, et al. Nonlocal Incoherent White-light Solitons in Logarithmically Nonlinear Media[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 72(2): 026604-1-10.
- [21] SHEN M, WANG Q, SHI J, et al. Partially Coherent Accessible Solitons in Strongly Nonlocal Media[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 72(2): 026604-1-4.
- [22] XIE Y, GUO Q. Phase Modulations Due to Collisions of Beam Pairs in Nonlocal Nonlinear Media[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2004, 36(11): 1335-1351.
- [23] GUO Q, LUO B, YI F, et al. Large Phase Shift of Nonlocal Optical Spatial Solitons[J]. *Phys. Rev. E*, 2007, 69(1): 016602-1-8.
- [24] SHOU Q, ZHANG X, HU W, et al. Large Phase Shift of Spatial Solitons in Lead Glass[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(21): 4194-4196.
- [25] HU W, ZHANG T, GUO Q. Nonlocality-controlled Interaction of Spatial Solitons in Nematic Liquid Crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(7): 071111-1-3.
- [26] YE F, KARTASHOV Y V, TORNER L. Enhanced Soliton Interactions by Inhomogeneous Nonlocality and Nonlinearity[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, 76(3): 033812-1-5.
- [27] OUYANG S, HU W, GUO Q. Light Steering in a Strongly Nonlocal Nonlinear Medium[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, 76(5): 053832-1-5.
- [28] 任标, 郭旗, 兰胜, 等. 强非局域介质中多个空间孤子的相互作用[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1668-1674.
- [29] KWASNY M, PICCARDI A, ALBERUCCI A, et al. Nematic-nematic Interaction in a Medium with Tunable Nonlinearity and Fixed Nonlocality[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(13): 2566-2568.
- [30] ZHANG H, XU D, ZOU J, et al. Soliton Control in Inhomogeneous Nonlocal Media[J]. *Opt. Commun.*, 2011, 284(5): 1370-1378.
- [31] PU SHAOZHI, HOU CHUNFENG, ZHAN KAIYUN, et al. Spatial Solitons in Nonlocal Materials with Defocusing Defects[J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285(6): 1456-1460.
- [32] PU SHAOZHI, HOU CHUNFENG, ZHAN KAIYUN, et al. Beam Steering in a Nonlocal Medium with Inhomogeneous Nonlinearity[J]. *J. Opt.*, 2012, 14(10): 208201-1-8.
- [33] MIHALACHE D, MAZILU D, LEDERER F, et al. Stable Solitons of Even and Odd Parities Supported by Competing Nonlocal Nonlinearities[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, 74(6): 066614-1-6.
- [34] KARTASHOV V, VYSLOUKH V V, TORNER L. Stabilization of Higher-order Vortices and Multihump Solitons in Media with Synthetic Nonlocal Nonlinearities[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(1): 013803-1-4.
- [35] ESBENSEN B K, WLOTZKA A, BACHE M, et al. Modulational Instability and Solitons in Nonlocal media with Competing Nonlinearities[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 84(5): 053854-1-7.
- [36] DU Yanwei, ZHOU Zhongxiang, TIAN Hao, et al. Bright Solitons and Repulsive In-phase Interaction in Media with Competing Nonlocal Kerr Nonlinearities[J]. *J. Opt.*, 2011, 13(1): 015201-1-5.
- [37] ESBENSEN B K, BACHE M, BANG O, et al. Anomalous Interaction of Nonlocal Solitons in Media with Competing Nonlinearities[J]. *Phys. Rev. A*, 2012, 86(3): 033838-1-12.
- [38] CHEN L, WANG Q, SHEN M, et al. Nonlocal Dark Solitons under Competing Cubic-quintic nonlinearities[J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(1): 13-15.
- [39] KONG Q, SHEN M, CHEN Z Y, et al. Dark Solitons in Nonlocal Media with Competing Nonlinearities[J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(7): 1764-1766.
- [40] CHEN W, SHEN M, KONG Q, et al. Interactions of Nonlocal Dark Solitons under Competing Cubic-quintic Nonlinearities[J]. *Phys. Rev. A*, 2013, 87(7): 063832-1-4.
- [41] SHEN M, ZHAO H W, LI B L, et al. Stabilization of Vortex Solitons by Combining Competing Cubic-quintic Nonlinearities with a Finite Degree of Nonlocality[J]. *Phys. Rev. A*, 2014, 89(2): 025804-1-4.
- [42] SHEN M, WU D, ZHAO H W, et al. Vortex Solitons under Competing Nonlocal Cubic and Local Quintic Nonlinearities[J]. *Journal of Physics B: Atomic Molecular and Optical Physics*, 2014, 47(15): 155401-1-9.

(编辑: 温泽宇)