

单通道与多通道多极格子孤子及其动力学行为

张华峰^{1,2,3*}, 李继军³, 陈方^{1,3}, 郁春潮^{1,3}, 孙利辉^{1,3}

¹长江大学量子光学与信息光子学研究所, 湖北 荆州 434023;

²山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

³长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023

摘要 基于非线性薛定谔方程,研究了具有光格子的局域非线性介质中存在的单通道和多通道多极格子孤子的光场分布、稳定性和动力学行为。研究发现,系统中存在同相和反相 2 种类型的多通道多极格子孤子;在单通道情形下,只存在反相多极格子孤子,同相的多极格子孤子不存在;在 3 种类型的格子中,同相多极格子孤子的稳定性最差,而多通道反相多极格子孤子的稳定性最高。在撤去光格子的情况下,3 类格子孤子呈现出不同的动力学行为。同相多极格子孤子分裂成相应数目的光束后,或合并成 1 个光束、或能量重新分配、或周期性碰撞。而反相多极格子孤子分裂后,光束相互排斥,2 个边带光束沿直线路径向前传输,且轨迹与原传播方向的夹角相等;在传播常数较小时,可能会出现光束弥散。这些性质对全光路由、全光开关等全光控制技术的研究有一定的参考作用。

关键词 光通信; 空间光孤子; 光格子; 光学传输; 多极孤子

中图分类号 O437.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.020602

Properties and Dynamical Behaviors of Single-Channel and Multi-Channel Multi-Polar Lattice Solitons

Zhang Huafeng^{1,2,3*}, Li Jijun³, Chen Fang^{1,3}, Yu Chunchao^{1,3}, Sun Lihui^{1,3}

¹Institute of Quantum Optics and Information Photonics, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

²State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

³School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

Abstract Based on nonlinear Schrödinger equation, we research the light field properties, including the distribution and the stability, and dynamical behaviors of multi-polar lattice solitons, distributed on a single channel or across different channels in nonlinear media with optical lattices. These survey results indicate that there are two kinds of multi-polar solitons such as in-phase soliton and out-of-phase soliton in such systems. Significantly, multi-polar lattice soliton distributed on a single channel can only be out-of-phase, but an in-phase multi-polar lattice soliton is not allowed. Among three kinds of multi-polar lattice solitons, stability of in-phase multi-polar lattice soliton is the worst, and that of out-of-phase multi-polar lattice soliton distributed across different channels is the best. If optical lattice is removed, three kinds of multi-polar lattice solitons present different dynamical behaviors. After the optical lattice is removed, an in-phase multi-polar lattice soliton first splits into a corresponding number of light beams, and then they merge into one beam, or their energy is redistributed, or they collide periodically. Nevertheless, the out-of-phase multi-polar lattice soliton splits into several light beams, and then the beams repel each other, in which two side light beams transmit forwards along their respective straight trajectories, and the angle between any of their straight trajectories and its original direction of propagation is equal; especially, light beams, generated from the fission of out-of-phase multi-polar lattice soliton with a small propagation constant, may diffuse when the optical lattice is withdrawn. These results may have certain value to all-optical controlling techniques such as all-optical routing and all-optical switching.

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-06; 录用日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(11547007)、量子光学与光量子器件国家重点实验室开放课题(KF201812、KF201815)

* E-mail: zhhf72@126.com

Key words optical communications; optical spatial soliton; optical lattice; optical transmission; multi-polar soliton

OCIS codes 060.2310; 190.6135; 320.7110

1 引言

非线性光学的基本目标之一是实现光束的有效控制,而空间光孤子是实现这一目标的有效途径之一^[1-4]。研究表明:介质的非线性效应会导致光束变窄,光束衍射会导致光束展宽,当光束变窄和展宽达到平衡时,光束的宽度将保持不变,形成所谓的空间光孤子。近年来,人们在非线性介质中建立光格子,获得了各种格子孤子,并利用这些格子孤子来实现光束的操控。光波在周期性结构的光格子中传播时,将会导致带隙结构出现。带隙的存在意味着:由于全内反射或 Bragg 反射的作用,具有某些波矢的光波将不能通过这些光格子传播。光束在非线性光格子里的动力学特征由介质的非线性和在周期性结构里散射的相互作用决定。

2002年,人们在理论上预测了所谓的格子孤子,也就是存在于具有格子的非线性介质里的束缚态光波^[5];并在2003年实验验证了在一维和二维光格子中孤子的存在^[6-7]。随后,许多关于光波在光格子中产生的引人注目的现象被陆续报道,诸如带隙孤子的形成和操控^[6-8]、光格子中的布洛赫振荡^[9]以及离散涡旋孤子的形成与稳定特性^[10-13]等。更有趣的是,通过改变光格子的对称性,孤子的动力学特性会变得更加丰富,如孤子能在贝塞尔型光格子里旋转^[14-15]。近来,在光格子和激光写入波导阵列中的表面孤子得到了报道和研究^[16-17],线性和非线性光格子同时存在的非线性介质中会产生涡旋孤子^[18],在非线性光格子中狄拉克点处的孤子具有振荡的“拖尾”且代数衰减^[19],利用准一维、P-T (Parity-Time)对称光格子可以实现光束的有效操控^[20-25]。这些研究表明,利用光格子操控光束依然是非线性光学的热点研究课题。

在非局域介质和具有光格子的非线性介质中存在包括偶极光孤子在内的各阶高阶孤子^[8,26-27]。由于其新颖的动力学行为和在全光控制方面的潜在应用,包括偶极在内的多极光孤子的研究具有重要的应用价值和发展前景。在三阶和五阶非线性效应的情况下,双波导通道中存在偶极孤子^[28];在具有二维缺陷光格子的非线性介质中存在包括偶极孤子在内的各类“整形孤子”^[29];在复杂的二维非线性光格子里存在有偶极光孤子^[30];一维光格子所支持的偶

极孤子的动力学性质能够被运用于对光束的有效操控^[31]。

2 模型

光束在具有光格子的 Kerr 介质中的传输演化可以表示为

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + |q|^2 q + pR(x)q = 0, \quad (1)$$

式中: $q(x, z)$ 为光场的复振幅,光束沿着 z 方向传播,同时在 x 方向发生衍射;实函数 $R(x) = \cos(\Omega x)$ 描述光格子的空间分布, Ω 为格子频率, p 为格子深度。光束在这样的系统中传输演化的时候,其能流 $U = \int_{-\infty}^{\infty} |q|^2 dx$ 能够保持不变。

(1)式所描述的系统存在着形如 $q(x, z) = w(x) \exp(i\beta z)$ 的稳态解;其中, β 为传播常数, $w(x)$ 为实函数,且满足如下方程:

$$\beta w = \frac{1}{2} \frac{d^2 w}{dx^2} + w^3 + pR(x)w. \quad (2)$$

对(2)式利用牛顿迭代法^[26,32]可以得到包括基态、偶极以及其他多极孤子的数值解。

为了分析孤子的稳定性,可令(1)式有如下微扰形式的解^[28]:

$$q(x, z) = w(x) \exp(i\beta z) + u(x) \exp[i(\beta + \lambda)z] + v^*(x) \exp[i(\beta - \lambda^*)z], \quad (3)$$

式中: $w(x) \exp(i\beta z)$ 为(1)式的稳态解,微扰部分 $u(x)$ 和 $v(x)$ 在传播过程中以复增长率 λ 增长。将(3)式代入(1)式并线性化得到:

$$\begin{cases} \lambda u = \frac{1}{2} \frac{d^2 u}{dx^2} + w^2(2u + v) + p \cos(\Omega x)u - \beta u \\ \lambda v = -\frac{1}{2} \frac{d^2 v}{dx^2} - w^2(2v + u) - p \cos(\Omega x)v + \beta v \end{cases}. \quad (4)$$

求解这个耦合方程组,可以得到复增长率 λ 。很显然, λ 的虚部 $\text{Im}(\lambda)$ 就是微扰在传播过程中的增长率。

在波色-爱因斯坦凝聚的研究中,人们利用光格子技术来控制凝聚体,光格子中的波色-爱因斯坦凝聚体的性质已经被广泛研究^[33]。本研究将给出在(1)式所描述的系统单通道和多通道多极孤子的性质异同,以及它们的动力学行为的差异。这些性质将对光纤通信系统的全光控制技术具有一定的参考价值。

3 单通道和多通道多极格子孤子的比较

在光格子对光场的束缚作用、非线性效应和衍射效应的共同作用下,在(1)式所描述的系统中存在单通道和多通道的多极孤子。考虑在可应用的参数范围内,研究(1)式所描述的系统中存在的单通道和多通道的多极格子孤子的性质及其动力学行为。

3.1 单通道和双通道偶极格子孤子

偶极孤子是 2 个基态模孤子按一定相位关系所

组成的束缚态。2 个反相的基态模孤子所构成的束缚态是反相偶极孤子;同样地,同相偶极孤子是由 2 个同相的基态模孤子所构成的束缚态。图 1 给出了在(1)式所描述的系统中存在的典型的双通道偶极孤子的光场振幅 $w(x)$ 的空间分布。从图 1 中可以看出,组成偶极格子孤子的 2 个基态模孤子分别处于 2 个相邻的格子通道内,其中,图 1(a)和(b)中的偶极格子孤子称为双通道反相偶极格子孤子(I 型偶极格子孤子),而图 1(c)和(d)中的偶极格子孤子称为双通道同相偶极格子孤子(II 型偶极格子孤子)。

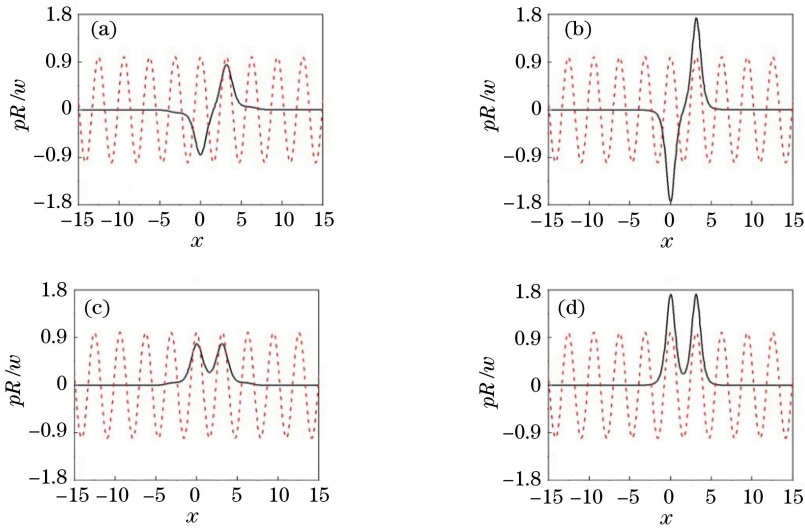


图 1 典型的双通道偶极格子孤子。传播常数为(a) $\beta=0.6$ 和(b) $\beta=2$ 的双通道反相(I 型)偶极格子孤子;传播常数为(c) $\beta=0.6$ 和(d) $\beta=2$ 的双通道同相(II 型)偶极格子孤子。其中,虚线和实线分别代表光格子 $pR(x)$ 和光场振幅 $w(x)$ 的空间分布。其他参数为: $p=1$ 和 $\Omega=2$

Fig. 1 Typical dipolar lattice solitons in two channels. Out-of-phase dipolar solitons with propagation constants (a) $\beta=0.6$ and (b) $\beta=2$ in two channels (type I), in-phase dipolar solitons with propagation constants (c) $\beta=0.6$ and (d) $\beta=2$ in two channels (type II). Here, the dashed and solid lines correspond to the optical lattice $pR(x)$ and the amplitude $w(x)$ of the light field. Other parameters are $p=1$ and $\Omega=2$

图 2 给出了典型的单通道反相(III 型)偶极格子孤子的光场振幅的空间分布,从中可以看出该类型偶极格子孤子的典型特征:组成单通道反相(III 型)偶极格子孤子的 2 个基态模孤子同处于 1 个格子通道内。单通道反相偶极格子孤子由 2 个反相的基态模孤子组成,在偶极孤子内部,2 个反相的基态模孤子相互排斥,而这种排斥相互作用与单通道对 2 个基态模孤子的束缚作用相互抵消。然而,值得注意的是,数值计算表明:与双通道偶极孤子不同的是,在单通道内不存在同相偶极格子孤子;其原因是 2 个同相的基态孤子之间的吸引力不可能与单通道对 2 个基态模孤子的束缚作用相互平衡。

这 3 类偶极格子孤子不仅光场振幅的空间分布显著不同,它们的能流特性和稳定性也有很大的差

异。图 3(a)给出了这 3 类偶极格子孤子能流 U 与传播常数 β 的依赖关系,可以看出:传播常数 β 在可应用的范围内增加时,3 类偶极格子孤子的能流均随之增加。更值得注意的是,在传播常数相同时,双通道反相和同相偶极格子孤子的能流也相同。从稳定性上看,双通道反相(I 型)偶极格子孤子的稳定性最好,在所采用的参数范围内都是稳定的;双通道同相(II 型)偶极格子孤子的稳定性最差,在参数范围内几乎都不稳定;单通道反相(III 型)偶极格子孤子的稳定性介于两者之间,只在 1 个很窄的参数范围内是不稳定的。

3.2 单通道和三通道三极格子孤子

与偶极孤子类似,3 个基态模孤子按一定相位关系也可以组成束缚态,被称为三极孤子,如图 4 和图 5 所示。3 个相邻的反相基态模孤子组成的束缚

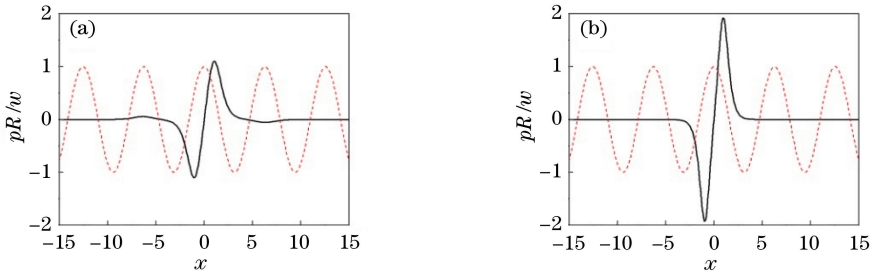


图 2 传播常数为(a) $\beta=0.5$ 和(b) $\beta=2$ 的单通道反相(III型)偶极格子孤子。其中,虚线和实线分别代表光格子 $pR(x)$ 和光场振幅 $w(x)$ 的空间分布。其他参数为: $p=1$ 和 $\Omega=1$

Fig. 2 Typical out-of-phase dipolar lattice solitons with propagation constants (a) $\beta=0.5$ and (b) $\beta=2$ in single channel. Here, the dashed and solid lines correspond to the optical lattice $pR(x)$ and the amplitude $w(x)$ of the light field.

Other parameters are $p=1$ and $\Omega=1$

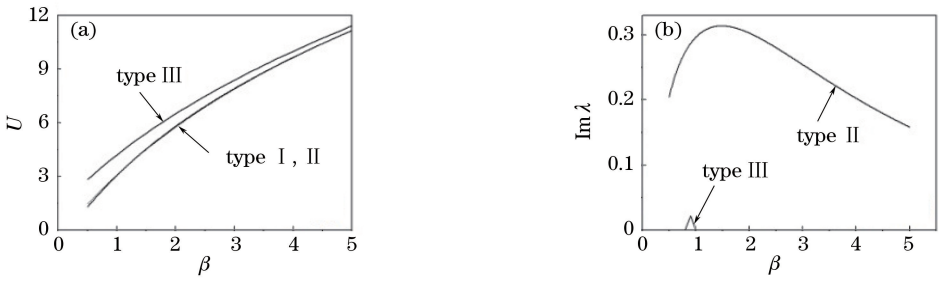


图 3 (a)偶极孤子的能流 U 和(b)受到扰动后的增长率 $\text{Im } \lambda$ 与传播常数 β 的依赖关系。其他参数为: $p=1$; 对 I,II 型偶极孤子 $\Omega=2$,对 III 型偶极孤子 $\Omega=1$

Fig. 3 Dependence of (a) energy flow U and (b) growth rate $\text{Im } \lambda$ of dipolar lattice soliton on propagation constant β . Other parameters are $p=1$, $\Omega=2$ for type I and II dipolar solitons or $\Omega=1$ for type III dipolar solitons

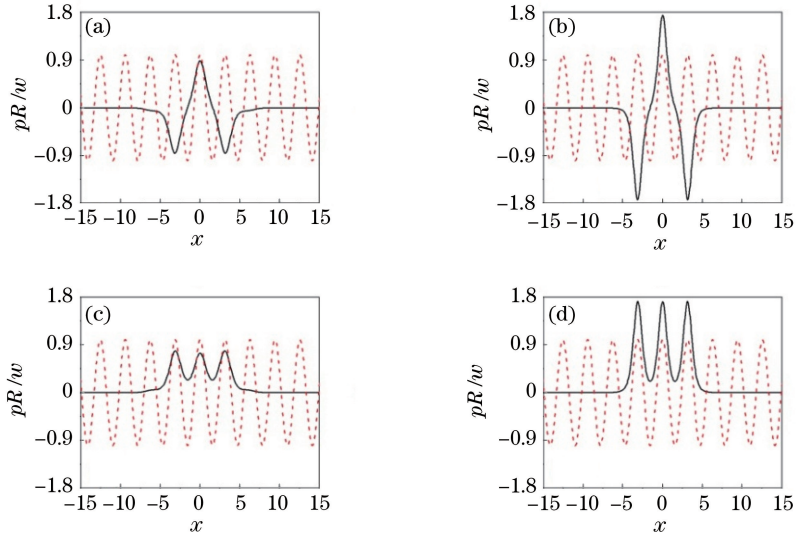


图 4 典型的三通道三极格子孤子。传播常数为(a) $\beta=0.6$ 和(b) $\beta=2$ 的三通道反相(I型)三极格子孤子;传播常数为(c) $\beta=0.6$ 和(d) $\beta=2$ 的三通道同相(II型)三极格子孤子。其中,虚线和实线分别代表光格子 $pR(x)$ 和光场振幅 $w(x)$ 的空间分布。其他参数为: $p=1$ 和 $\Omega=2$

Fig. 4 Typical tripolar lattice solitons in three channels. Out-of-phase tripolar solitons with propagation constants (a) $\beta=0.6$ and (b) $\beta=2$ in three channels (type I), in-phase tripolar solitons with propagation constants (c) $\beta=0.6$ and (d) $\beta=2$ in three channels (type II). Here, the dashed and solid lines correspond to the optical lattice $pR(x)$ and the amplitude $w(x)$ of the light field. Other parameters are $p=1$ and $\Omega=2$

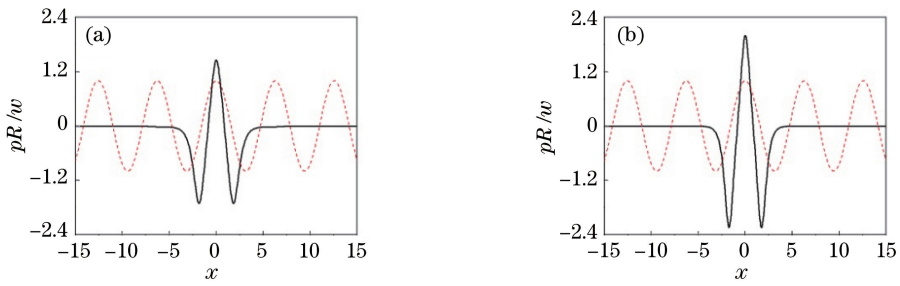


图5 传播常数为(a) $\beta=0.8$ 和(b) $\beta=2$ 的单通道反相(III型)三极格子孤子。其中,虚线和实线分别代表光格子 $pR(x)$ 和光场振幅 $w(x)$ 的空间分布。其他参数为: $p=1$ 和 $\Omega=1$

Fig. 5 Typical out-of-phase tripolar lattice solitons with propagation constants (a) $\beta=0.8$ and (b) $\beta=2$ in single channel.

Here, the dashed and solid lines correspond to the optical lattice $pR(x)$ and the amplitude $w(x)$ of the light field.

Other parameters are $p=1$ and $\Omega=1$

态称为反相三极孤子,如图4(a)、4(b)和图5所示;而同相三极孤子中包含3个同相的基态模孤子,如图4(c)和4(d)所示。图4和图5给出了典型的三极格子孤子的光场振幅的空间分布,图4(a)和4(b)中,束缚态中3个两两反相的基态孤子分别位于3个相邻的格子通道中,称为三通道反相(I型)三极格子孤子;当3个两两反相的基态模孤子,如图5所示,同处于1个格子通道时,称为单通道反相(III型)三极格子孤子;而分别位于3个相邻的格子通道中的3个同相的基态孤子所组成的束缚态,称为三通道同相(II型)三极格子孤子,如图4(c)和4(d)所示。

这3类三极格子孤子的存在是由于光格子对孤子的束缚作用与各基态模孤子之间作用相互平衡的结果。这3类三极格子孤子的能流特性与偶极格子孤子有着非常相似的特性,如图6(a)所示,3类三极格子孤子的能流 U 均随传播常数 β 的增加而增加,而且,三通道同相和反相三极格子孤子的能流特性几乎相同。但是,这3类三极格子孤子的稳定性差异较大,数值模拟的结果表明,三通道反相三极格子孤子在所采用的参数范围内都是稳定的,三通道同相三极格子孤子在很宽的范围内都不稳定,而单通道反相三极格子孤子在一些离散的区域是不稳定的,如图6(b)所示。

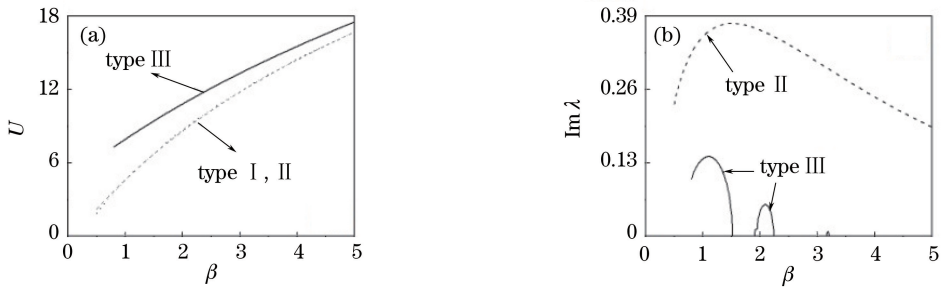


图6 三极格子孤子的(a)能流 U 和(b)受到扰动后的增长率 $\text{Im } \lambda$ 与传播常数 β 的依赖关系。其他参数为:

$p=1$;对I、II型三极孤子 $\Omega=2$;对III型三极孤子 $\Omega=1$

Fig. 6 Dependence of (a) energy flow U and (b) growth rate $\text{Im } \lambda$ of tripolar lattice soliton on propagation constant β .

Other parameters are $p=1$ and $\Omega=2$ for type I and II tripolar solitons and $\Omega=1$ for type III tripolar solitons

构成多极格子孤子束缚态的各基态孤子之间的相互作用以及光格子对格子孤子的束缚作用共同决定了多极格子孤子的稳定性,且各基态孤子之间的相互作用占据主要地位。对反相多极格子孤子,各基态孤子之间均相互吸引,但光格子对多通道格子孤子的束缚作用比对单通道多极格子的孤子更强,所以多通道格子孤子比单通道多极格子孤子更稳定。而尽管光格子对同相多极格子孤子具有束缚作

用,但是其内部各基态孤子之间是相互排斥的,且这种排斥作用居于主导地位,导致同相多极格子孤子比反相的多极格子孤子稳定性要差。

4 单通道和多通道多极格子孤子动力学行为比较

为了研究多极格子孤子的动力学行为,将(1)式中稳定存在的多极孤子在该系统中传输一段距离

z_0 后 ($z_0=20$) 撤去光格子, 即

$$p(z) = \begin{cases} p_0, & z \leq z_0 \\ 0, & z > z_0 \end{cases} \quad (5)$$

多极格子孤子是多个基态模孤子按一定相位关系所组成的束缚态, 在由(1)式所描述的系统中能够稳定传输。但当多极格子孤子在(1)式和(3)式所描述的系统中传输时, 多极格子孤子会受到外界的扰动, 将由多个基态模孤子所组成的束缚态分裂成相应数目的基态模孤子。这些基态模孤子中, 由于相邻的孤子间具有特定的相位关系, 将呈现出丰富的相互作用图景。

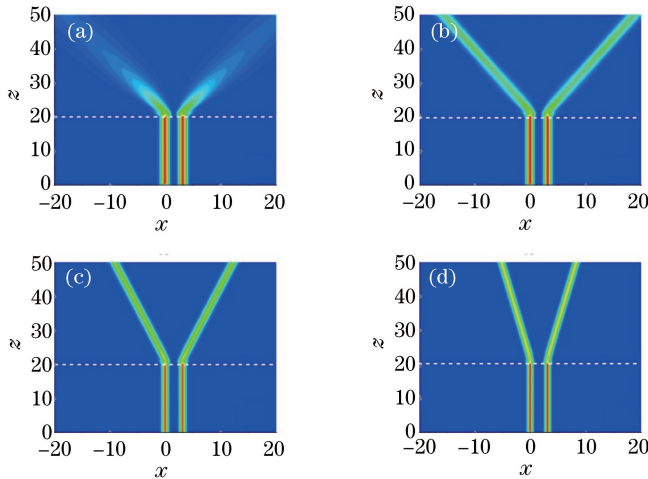


图7 典型的双通道反相偶极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中演化的图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ 和(d) $\beta=3$ 。其他参数为: $p_0=1, z_0=20$ 和 $\Omega=2$

Fig. 7 Typical evolution diagrams of the two-channel out-of-phase dipolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ and (d) $\beta=3$. Other parameters are $p_0=1, z_0=20$ and $\Omega=2$

三通道反相三极格子孤子在(1)式和(3)式所描述的系统中传输过程中的动力学行为随传播常数的变化显著不同。当传播常数较小时, 由于光格子撤去, 三通道反相三极孤子分裂形成了3个光束, 其中, 中间的光束迅速弥散, 而2个边带光束由于相互排斥将以不变的夹角向前传输, 如图8(a)和(b)所示。当传播常数较大时, 三通道反相三极格子孤子分裂形成3个独立的光束, 中间光束将不再弥散, 如图8(c)和8(d)所示。由于3个光束两两反相, 相邻光束间相互排斥, 导致中间光束沿原来的入射方向直线传输; 由于与中间光束相互排斥, 2个边带光束的传播方向发生明显偏折, 最终将沿直线路径向前传输, 而且2个边带光束的传播方向分别与原来的入射方向形成的夹角相等。为了便于描述, 定义边带光束的传播方向与原来的入射方向形成的夹角为逃逸角 α 。比较图8(a)~(d)可以看出, 传播常数越大, 边带光束的逃逸角 α 越小。多极反相格子孤子

4.1 多通道反相多极格子孤子的动力学行为

图7提供了双通道反相偶极孤子在(1)式和(3)式所描述的系统中传输过程中的典型演化图像。从图中可以看出, 双通道反相偶极孤子在(1)式和(3)式所描述的系统中稳定传输 $z_0=20$ 后, 由于光格子撤去所产生的扰动, 分裂成2个反相的光束, 它们将相互排斥。当传播常数 β 很小时, 分裂形成的2个反相光束将很快弥散, 如图7(a)所示。然而, 当传播常数 β 较大时, 分裂形成的2个反相光束将不再发生弥散, 而是以不变的夹角向前传输, 传播常数 β 越大, 2个光束之间的夹角越小, 如图7(b)~(d)所示。

的这一性质是因为传播常数越大, 光束总的能流越大[如图3(a)和图6(a)], 分裂的光束各自诱导的非线性波导越强, 它们间的排斥作用相对减弱, 导致2个边带光束的逃逸角越小。

4.2 多通道同相多极格子孤子的动力学行为

多极同相格子孤子受到外界扰动时, 将由多个基态模孤子所组成的束缚态分裂成相应数目的同相的基态模孤子。这些同相的基态模孤子, 相邻的孤子间相互吸引, 将呈现出不同于反相格子孤子的相互作用图景。

图9提供了双通道同相偶极孤子在(1)式和(3)式所描述的系统中传输过程中的典型演化图像。从图9(a)和9(b)可以看出, 当传播常数较小时, 光格子撤去后双通道同相偶极孤子由于受到扰动分裂成2个同相的光束, 同相光束相互吸引, 合并成1个光束, 这个合并形成的光束将沿同相偶极孤子分裂前的传播方向沿直线向前传输。但是, 当传播常数超

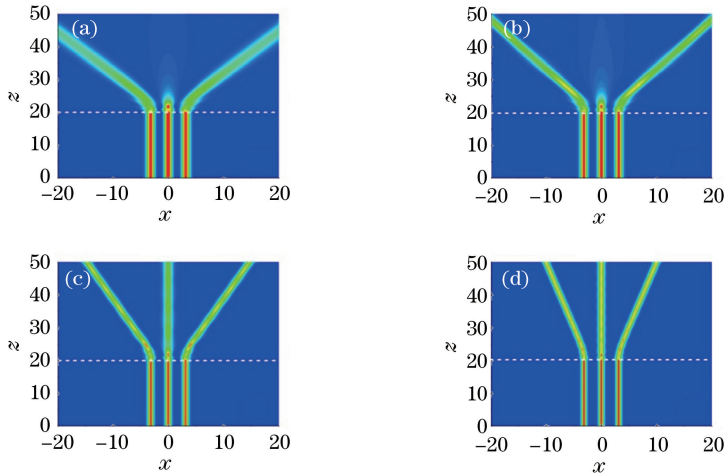


图 8 典型的三通道反相三极格子孤子在(1)式和(2)式描述的系统中的演化图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ 和(d) $\beta=3$ 。其他参数为: $p_0=1, z_0=20$ 和 $\Omega=2$

Fig. 8 Typical evolution diagrams of the three-channel out-of-phase tripolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ and (d) $\beta=3$. Other parameters are $p_0=1, z_0=20$ and $\Omega=2$

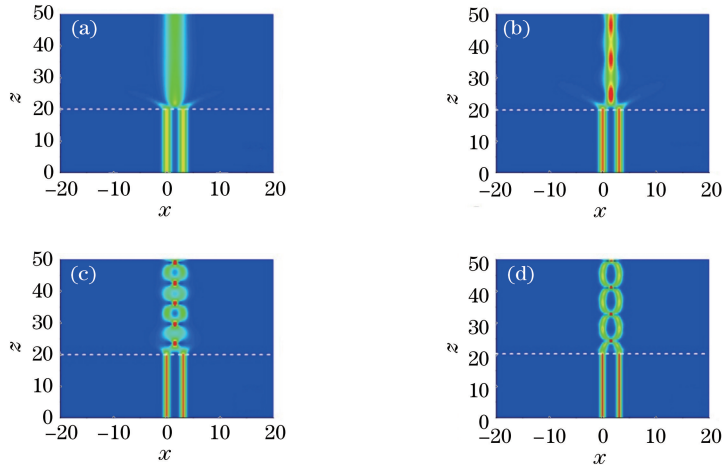


图 9 典型的双通道同相偶极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的演化图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ 和(d) $\beta=3$ 。其他参数为: $p_0=1, z_0=20$ 和 $\Omega=2$

Fig. 9 Typical evolution diagrams of the two-channel in-phase dipolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ and (d) $\beta=3$. Other parameters are $p_0=1, z_0=20$ and $\Omega=2$

过 1 个临界值时, 分裂的 2 个同相光束不再合并为 1 个光束, 而是由于相互吸引而发生周期性的碰撞; 传播常数越大, 光束总的能流越大, 分裂的各光束各自诱导的非线性波导越强, 它们间的吸引作用相对减弱, 导致碰撞的周期随传播常数增大而增大, 如图 9(c) 和 9(d) 所示。

三通道同相三极孤子在(1)式和(3)式所描述的系统传输过程中的动力学行为比双通道同相偶极孤子更为丰富。从图 10(a) 可以看出, 当传播常数很小时, 光格子撤去后三通道同相三极孤子分裂成 3 个同相的光束, 它们相互吸引而合并成 1 个光束, 这个合并形成的光束沿分裂前的传播方向继续向前

传输。但是, 当传播常数继续增大到一定数值后, 分裂的 3 个同相光束不再合并为 1 个光束, 由于相互吸引而进行能量的重新分配, 形成 2 个同相的光束, 在向前传输的过程中发生周期性的碰撞, 如图 10 (b) 和(c) 所示。当传播常数增大到较大的数值后, 分裂的 3 个同相光束不再合并为 1 个光束, 在向前传输的过程中发生周期性的碰撞, 如图 10(d) 所示。

4.3 单通道反相多极格子孤子的动力学行为

比较图 7 和图 11 可以看出, 单通道反相偶极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的动力学行为与双通道反相偶极格子孤子几乎相同。通过比较图 7(b) 和图 11(c), 以及图 7(c) 和图 11(d) 可以看

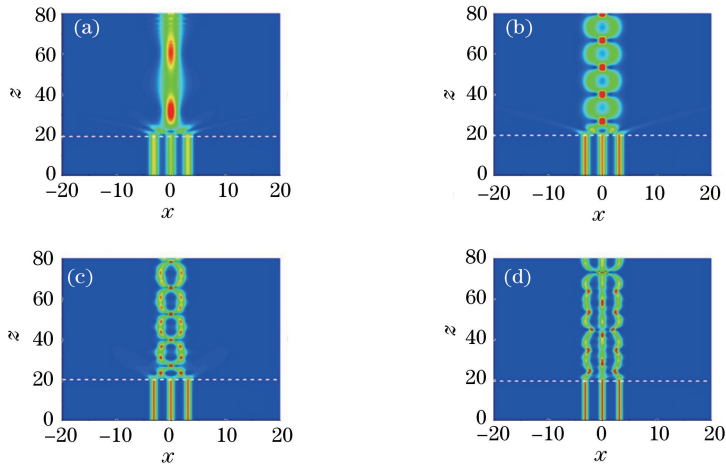


图 10 典型的三通道同相三极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的演化的图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ 和(d) $\beta=3$ 。其他参数为: $p_0=1, z_0=20$ 和 $\Omega=2$

Fig. 10 Typical evolution diagrams of the three-channel in-phase tripolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1$, (c) $\beta=2$ and (d) $\beta=3$. Other parameters are $p_0=1, z_0=20$ and $\Omega=2$

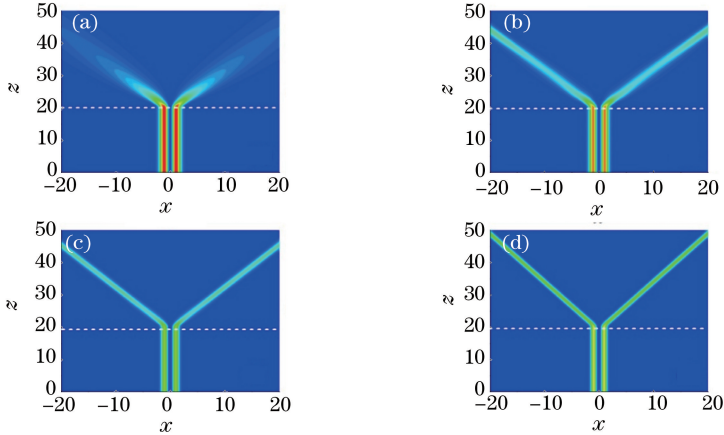


图 11 典型的单通道反相偶极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的演化的图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.1$, (b) $\beta=0.5$, (c) $\beta=1$ 和(d) $\beta=2$ 。其他参数为: $p_0=1, z_0=20$ 和 $\Omega=1$

Fig. 11 Typical evolution diagrams of the single-channel out-of-phase dipolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.1$, (b) $\beta=0.5$, (c) $\beta=1$ and (d) $\beta=2$. Other parameters are $p_0=1, z_0=20$ and $\Omega=1$

出,它们两者的不同之处在于:传播常数相同的情况下,单通道反相偶极格子孤子在撤去光格子后分裂形成的2个反相光束传播轨迹所形成的夹角比双通道情形下的更大。

单通道反相三极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的动力学行为与三通道反相三极格子孤子也十分相似。所不同的是,即使传播常数非常小的时候,也不会发生中间光束弥散的现象,如图12(a)所示。在单通道的情形下,无论是反相偶极格子孤子,还是反相三极格子孤子,随着传播常数的改变,2个边带光束的传输轨迹与分裂前多极孤子传播方向的夹角的变化并不显著,如图7和图11所示。

传播常数非常小的时候,反相多极格子分裂后

形成的光束会发生弥散,其主要原因是分裂形成的光束的能流太小,诱导所形成的非线性波导不足以平衡光束的衍射,这时分裂形成的光束中的全部或部分可能会发生弥散。

5 结 论

研究了具有光格子的局域的非线性介质中存在的典型的多极格子孤子的性质和动力学行为。研究发现,多通道多极格子孤子存在同相和反相2种类型的孤子;而单通道情况下,只存在反相多极格子孤子。这3种类型的多极格子孤子中,多通道反相多极格子孤子稳定性最好,而多通道同相多极格子孤子稳定性最差。

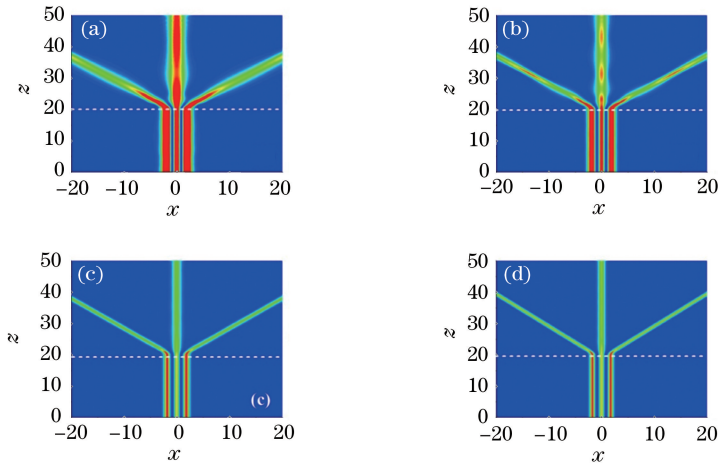


图 12 典型的单通道反相三极格子孤子在(1)式和(3)式描述的系统中的演化图像。传播常数分别为(a) $\beta=0.05$, (b) $\beta=0.5$, (c) $\beta=1$ 和(d) $\beta=2$ 。其他参数为: $p_0=1$, $z_0=20$ 和 $\Omega=1$

Fig. 12 Typical evolution diagrams of the single-channel out-of-phase tripolar solitons in the system described by Eqs. (1) and (3) for (a) $\beta=0.05$, (b) $\beta=0.5$, (c) $\beta=1$ and (d) $\beta=2$. Other parameters are $p_0=1$, $z_0=20$ and $\Omega=1$

在撤去光格子的情况下,同相和反相多极格子孤子的动力学行为显著不同。双通道同相偶极多极格子孤子在撤去光格子后,分裂形成的 2 个光束或合并成 1 个光束后沿原来的传输方向继续传输(传播常数较小时),或由于相互吸引而作周期性碰撞(传播常数较大时)。三通道同相三极多极格子孤子在撤去光格子后,分裂形成 3 个光束,当传播常数较小时,它们合并成 1 个光束后沿原来的传输方向继续传输;当具有中等数值的传播常数时,3 个光束的能量重新分配形成 2 个同相光束,然后 2 个光束作周期性碰撞;当传播常数较大时,3 个光束作周期性碰撞。撤去光格子后,反相多极格子孤子分裂成相应数目的两两反相的基态模光束。研究表明:单通道和双通道偶极格子孤子呈现出相似的动力学行为。传播常数较小时,反相偶极格子孤子分裂形成的 2 个光束将会迅速弥散;对于较大的传播常数,2 个光束将分别沿与原传播方向夹相同角度的方向的直线传播。对于单通道和三通道三极格子孤子,传播常数较小时,三通道三极格子孤子分裂形成的 3 个光束中位于中间的光束发生了弥散,单通道则不会发生相应的现象。无论是否有光束发生弥散,2 个边带光束都沿直线轨迹传输,而且,轨迹与原传播方向的夹角相同。这些结果可以应用于全光控制技术,特别是对光学路由、光学开光的研究具有一定的参考作用。

参 考 文 献

[1] Kivshar Y S, Agrawal G P. Optical solitons: from fibers to photonic crystals [M]. Elsevier: Academic

Press, 2003.

- [2] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 195-211.
- [3] Agrawal G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. Cambridge: Academic Press, 2010.
- [4] Liu S M, Guo R, Xu J J. Photorefractive nonlinear optics and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2004.
刘思敏, 郭儒, 许京军. 光折变非线性光学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] Efremidis N K, Sears S, Christodoulides D N, *et al.* Discrete solitons in photorefractive optically induced photonic lattices [J]. Physical Review E, 2002, 66 (4): 046602.
- [6] Fleischer J W, Carmon T, Segev M, *et al.* Observation of discrete solitons in optically induced real time waveguide arrays [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(2): 023902.
- [7] Fleischer J W, Segev M, Efremidis N K, *et al.* Observation of two-dimensional discrete solitons in optically induced nonlinear photonic lattices [J]. Nature, 2003, 422(6928): 147-150.
- [8] Neshev D, Sukhorukov A A, Hanna B, *et al.* Controlled generation and steering of spatial gap solitons [J]. Physical Review Letters, 2004, 93(8): 083905.
- [9] Cao Z, Li X J, Tan Q G, *et al.* Trajectory variations of optical Bloch oscillations for Airy beams in transversely and longitudinally modulated photonic lattices [J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3484-3490.
- [10] Yang J K, Musslimani Z H. Fundamental and vortex solitons in a two-dimensional optical lattice [J].

- Optics Letters, 2003, 28(21): 2094-2096.
- [11] Neshev D N, Alexander T J, Ostrovskaya E A, *et al.* Observation of discrete vortex solitons in optically induced photonic lattices [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(12): 123903.
- [12] Musslimani Z H, Yang J K. Self-trapping of light in a two-dimensional photonic lattice[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(5): 973-981.
- [13] Fleischer J W, Bartal G, Cohen O, *et al.* Observation of vortex-ring “discrete” solitons in 2D photonic lattices[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(12): 123904.
- [14] Wang X S, Chen Z G, Kevrekidis P G. Observation of discrete solitons and soliton rotation in optically induced periodic ring lattices [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(8): 083904.
- [15] Kartashov Y V, Vysloukh V A, Torner L. Rotary solitons in Bessel optical lattices[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(9): 093904.
- [16] Sunstov S, Makris K G, Christodoulides D N, *et al.* Observation of discrete surface solitons[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(6): 063901.
- [17] Makris K G, Sunstov S, Christodoulides D N, *et al.* Discrete surface solitons [J]. Optics Letters, 2005, 30(18): 2466-2468.
- [18] Xu S L, Belić M R, Cai D P, *et al.* Vortex solitons produced in spatially modulated linear and nonlinear refractive index waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(2): 410-416.
- [19] Xie K, Boardman A D, Li Q, *et al.* Spatial algebraic solitons at the Dirac point in optically induced nonlinear photonic lattices [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30349-30364.
- [20] Kartashov Y V, Vysloukh V A, Torner L. Asymmetric soliton mobility in competing linear-nonlinear parity-time-symmetric lattices [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4348-4351.
- [21] Zhou K Y, Wei T T, Sun H P, *et al.* Soliton dynamics in a PT-symmetric optical lattice with a longitudinal potential barrier [J]. Optics Express, 2015, 23(13): 16903-16911.
- [22] Lopez-Aguayo S, Ruelas-Valdez C, Perez-Garcia B, *et al.* Quasi-one-dimensional optical lattices for soliton manipulation [J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6545-6548.
- [23] Li Y L, Qin Y L, Mao S Y, *et al.* Propagation characteristics of optical solitons in parity-time symmetric potentials with longitudinal barriers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081901.
- 李屹磊, 覃亚丽, 毛盛益, 等. 宇称-时间对称纵向势垒中光孤子的传播特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081901.
- [24] Chen S F, Xu S L. Transmission characteristics of two-dimensional optical soliton through photoisomerization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050601.
- 陈顺芳, 徐四六. 二维光致异构光孤子传输特性的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050601.
- [25] Wang Y, Zhang P, Li X Y, *et al.* Optical communication performance of solitonic pulses in weak oceanic turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506004.
- 王阳, 张鹏, 李晓燕, 等. 海洋弱湍流条件下光孤子脉冲通信性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506004.
- [26] Xu Z Y, Kartashov Y V, Torner L. Upper threshold for stability of multipole-mode solitons in nonlocal nonlinear media[J]. Optics Letters, 2005, 30(23): 3171-3173.
- [27] Kartashov Y V, Malomed B A, Kivshar Y S. Solitons in nonlinear lattices[J]. Review of Modern Physics, 2011, 83(1): 247-305.
- [28] Birnbaum Z, Malomed B A. Families of spatial solitons in a two-channel waveguide with the cubic-quintic nonlinearity[J]. Physica D, 2008, 237(24): 3252-3262.
- [29] Dong L W, Ye F W. Shaping solitons by lattice defects [J]. Physical Review A, 2010, 82(5): 053829.
- [30] Ablowitz M J, Antar N, Bakirtaş I, *et al.* Vortex and dipole solitons in complex two-dimensional nonlinear lattices[J]. Physical Review A, 2012, 86(3): 033804.
- [31] He Y J, Wang H Z. (1+1)-dimensional dipole solitons supported by optical lattice [J]. Optics Express, 2006, 14(21): 9832-9837.
- [32] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, *et al.* Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing [M]. New York: Cambridge University Press, 2001: 753-764.
- [33] Louis P J Y, Ostrovskaya E A, Savage C M, *et al.* Bose-Einstein condensates in optical lattices: band-gap structure and solitons [J]. Physical Review A, 2003, 67(1): 013602.