

表面缺陷基态模孤子的性质及其临界行为

朱德生 许 飞 张 亮 田永红 徐大海*

(长江大学物理科学与技术学院, 湖北 荆州 434023)

摘要 表面缺陷基态模孤子的性质在实现全光控制方面有重要的应用。基于非线性薛定谔方程, 利用虚时间变换、非线性松弛法以及分步傅里叶算法等数值方法对具有半无限缺陷光格子的克尔型非线性介质中存在的基态模的特性进行了详细研究。研究表明: 对于吸引型半无限缺陷光格子, 表面缺陷基态模只能分布于缺陷处, 而对于排斥型半无限缺陷光格子, 表面缺陷基态模既可以分布于缺陷处, 也可以分布于其他格子通道处; 每个系统参数存在着一个临界值, 当其他参数保持不变的情况下, 这个系统参数的数值大于或小于其临界值时, 表面缺陷基态模将能或不能分布于缺陷处。从物理机制方面看, 光格子与光束诱导的非线性折射率之间的竞争导致了这种临界行为的出现。

关键词 非线性光学; 半无限缺陷光格子; 非线性介质; 表面缺陷基态模; 临界行为; 全光控制技术

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0519001

Properties and Critical Behavior of Fundamental Surface Defect Mode Soliton

Zhu Desheng Xu Fei Zhang Liang Tian Yonghong Xu Dahai

(School of Physical Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract Properties of the fundamental surface defect mode soliton have very important applications in all-optical control field. Based on nonlinear Schrödinger equation, properties of the fundamental surface defect mode, which can be supported by semi-infinite lattices with a local defect in Kerr-type nonlinear media, have been studied in details by employing numerical methods such as image-time method, nonlinear relaxation method and split-step Fourier algorithm. The research results show that the fundamental surface defect mode can only stay in the defect channel when the defect is attractive. However, when the defect is rejective, the fundamental surface defect mode can stay in the defect channel or not. In such a system, there are several critical values of the system parameters, and it is found that whether the fundamental defect mode can locate in the defect or not depends on whether the parameter value is higher or lower than its critical value when other parameters remain unchanged. In terms of physical mechanism, the competition between the optical lattices and nonlinear refractive index induced by optical beam leads to the occurrence of the critical behavior.

Key words nonlinear optics; semi-infinite defect lattices; nonlinear media; surface defect fundamental mode; critical behavior; all-optical control

OCIS codes 190.4350; 190.6135; 230.0250

1 引 言

由于新奇的物理性质以及在全光控制领域的潜在应用, 光在光格子和波导阵列中的传输演化性质吸引了人们的广泛关注, 并成为研究的热点问题之一^[1-10]。应该指出的是, 这些研究主要是基于均匀

的周期性光格子, 很少涉及其他非均匀的光格子。

近几年来, 考虑周期性光格子中存在着一个局域缺陷的情况下, 缺陷格子孤子的性质及其传输特性受到了越来越多的重视。例如, 具有聚焦的饱和和非线性的均匀介质与具有缺陷的光格子界面处能支

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2014-01-03

基金项目: 湖北省教育厅优秀中青年团队项目(T201204)

作者简介: 朱德生(1975—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: zhdf-72@163.com

* 通信联系人。E-mail: dhxu@yangtzeu.edu.cn

持表面缺陷孤子^[11], 孤子能存在于具有缺陷的 Kagome 光格子的光折变晶体中等^[12-17]。

本文考虑了在具有半无限缺陷光格子的非线性介质中存在的基态模特性, 并研究了表面缺陷基态模的临界行为, 这些性质可以被应用于全光控制技术。

2 数学模型与数值方法

光束在具有聚焦的克尔型非线性、且有线性折射率分布(即光格子)的平板波导中的传输演化可以由修正的非线性薛定谔方程来描述, 该方程可表示为^[18]

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

式中 $q(x, z)$ 为无量纲的光场振幅包络, 光束沿 z 方向传输且在 x 方向发生衍射, p 为格子深度, $R(x)$ 描述光格子的空间分布。在这样的系统中, 能流 $U = \int_{-\infty}^{\infty} |q(x, z)|^2 dx$ 是一个守恒量。

考虑光格子的空间分布是半无限的, 且在 $x = 0$ 处存在着局域的缺陷, $R(x)$ 可以表示为^[19]

$$R(x) = \begin{cases} \cos^2(\Omega x) [1 + hf(x)], & x \geq \frac{\pi}{2\Omega} \\ 0, & x < \frac{\pi}{2\Omega} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 Ω 为格子频率, $f(x) = \exp(-x^8/128)$ 为缺陷的形状, h 为缺陷的深度。对于 $h > 0$ 时, 缺陷处的峰值折射率大于其他格子处的峰值折射率, 称之为吸引型缺陷; 而 $h < 0$ 时, 缺陷处的峰值折射率小于其

他格子处的峰值折射率, 为排斥型缺陷; 在 $h = 0$ 时, 缺陷处的峰值折射率等于其他格子处的峰值折射率^[16]。

为了寻找在由(1)、(2)式所描述的系统的定解, 设其具有如下形式:

$$q(x, z) = w(x) \exp(ibz), \quad (3)$$

式中 $w(x)$ 为实函数, 而 b 为实传播常数。将(3)式代入(1)式可以得到

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 w}{dx^2} + w^3 + (pR - b)w = 0. \quad (4)$$

给定传播常数 b 后, 由(1)、(2)式所描述的系统定态解可以通过(4)式由打靶法^[20]、松弛法^[21]以及虚时间法^[22]等数值方法获得。由(1)、(2)式所描述的系统中存在着各阶模式的表面缺陷基态模, 由于基态的表面缺陷基态模最稳定、也最容易在实验中获得, 所以在下面的研究中, 只研究表面缺陷基态模的性质及其行为。

3 吸引型缺陷中基态孤子的性质

对于吸引型缺陷的情况, 即 $h > 0$ 时, 大量数值研究的结果表明, 表面缺陷基态模只可能存在于缺陷处, 而不可能存在于其它位置, 而且振幅最大的位置恰与缺陷 $f(x)$ 的最大值处重合, 如图 1(a)所示。图 1(b)给出了表面缺陷基态模在由(1)、(2)式所描述的系统中的传输演化行为, 模拟所用的参数分别为 $p=1, h=0.5, \Omega=1, U=2$ 。从图 1(c)中可以看出, 在其他参数保持不变的情况下, 表面缺陷基态模的能流 U 随传播常数 b 的增大而增大。

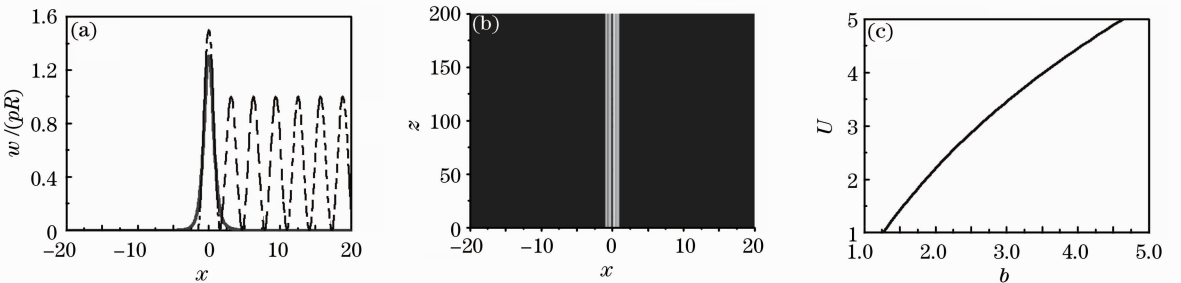


图 1 (a)吸引型缺陷中的表面缺陷基态模振幅(实线)与线性折射率(虚线)的空间分布; (b)表面缺陷基态模的系统中的传输演化情况; (c)能流 U 与传播常数 b 之间的依赖关系

Fig. 1 (a) Profiles of the fundamental surface defect mode amplitude (solid line) and linear refractive index distribution (dash line) for attractive-defected lattices; (b) propagation and evolution of the fundamental surface defect mode; (c) dependence of the energy flow U on the propagation constant b

此外, 吸引型缺陷中的表面缺陷基态模的特性与相关参数有着密切的关系。图 2 给出了吸引型缺陷中的表面缺陷基态模的峰值振幅和均方根宽度与

缺陷深度 h 、格子深度 p 、格子频率 Ω 以及能流 U 之间的依赖关系。从图 2 可以看出, 当其他参数保持不变时, 吸引性缺陷中的表面缺陷基态模的峰值振

幅随缺陷深度 h 、格子深度 p 、以及能流 U 的增大而增大，而其均方根宽度却随缺陷深度 h 、格子深度 p 、以及能流 U 的增大而减小。特别地，在研究中发现格子频率 Ω 对峰值振幅与光束宽度的影响都是非常小的，峰值振幅(光束宽度)随格子频率 Ω 的增大而略微增大(减小)，如图 2(c)所示。

4 排斥型缺陷中基态模孤子的临界行为

对于排斥型缺陷的情况，即 $h < 0$ 时，表面缺陷

基态模呈现出一系列的临界行为。首先，数值研究的结果表明，表面缺陷基态模的特性与格子深度 p 存在着密切的关系。在其他参数保持不变的情况下，存在着一个临界的格子深度 p_{cr} 。当 $p < p_{cr}$ 时，表面缺陷基态模分布于缺陷处，如图 3(a) 所示；而当 $p > p_{cr}$ 时，表面缺陷基态模将不再分布于缺陷处，而是分布于紧邻于缺陷的格子通道里，如图 3(b)、(c) 所示。在图 3 中所用到的参数为 $h = -0.6, U = 2, \Omega = 1$ ，临界格子深度 p_{cr} 的值为 1.1833。

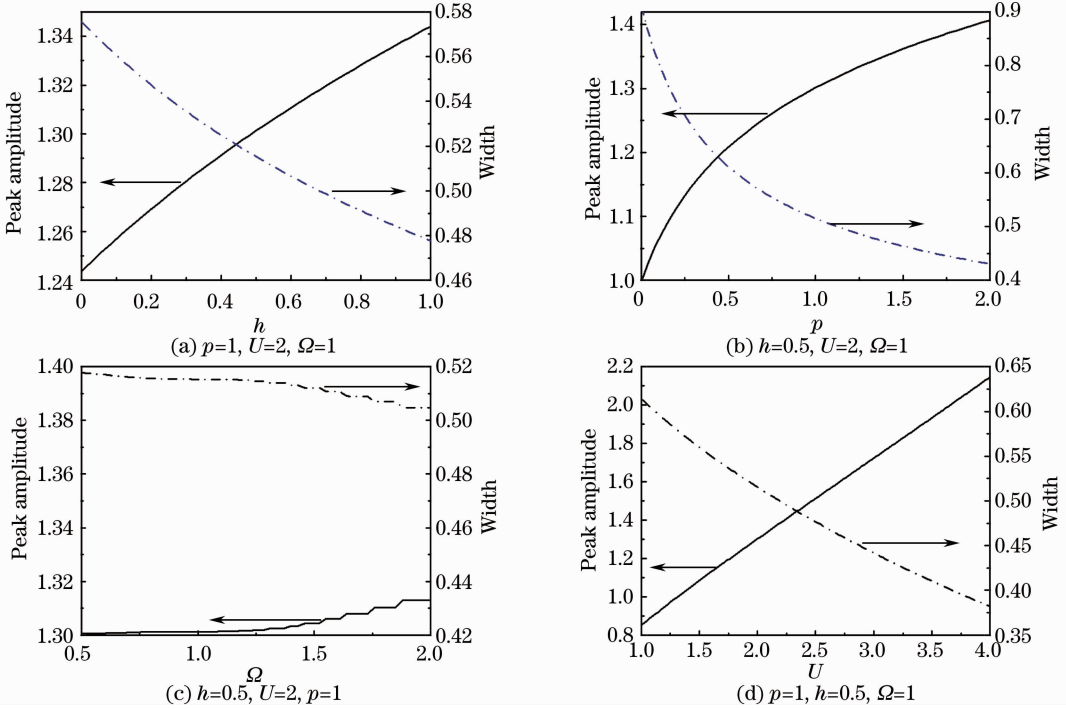


图 2 吸引型缺陷中的表面缺陷基态模的峰值振幅和宽度与(a)缺陷深度 h 、(b)格子深度 p 、(c)格子频率 Ω 和(d)能流 U 之间的依赖关系

Fig. 2 Dependences of peak amplitude and width of the fundamental surface defect mode on (a) defect strength h , (b) lattice depth p , (c) lattice frequency Ω and (d) energy flow U

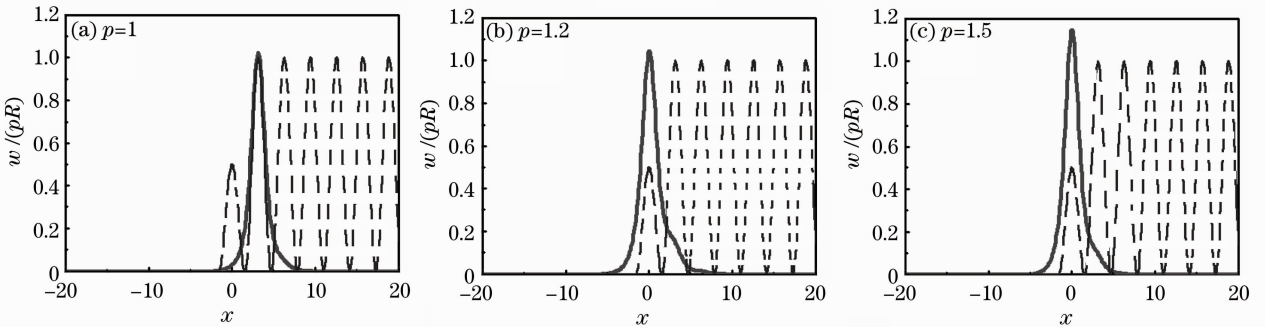


图 3 不同格子深度时排斥型缺陷中的表面缺陷基态模的振幅(实线)与线性折射率(虚线)的空间分布

Fig. 3 Profiles of the fundamental surface defect mode amplitude (solid lines) and linear refractive index distribution (dash lines) for rejective-defected lattices with different lattice depths

在排斥型缺陷的情况下,缺陷深度的大小也会影响到基态模的所在位置。研究表明,当其他参数保持不变的情况下,存在着临界的缺陷深度 h_{cr} 。当缺陷深度的绝对值小于临界缺陷深度的绝对值(即 $|h| < |h_{cr}|$)时,基态模分布于缺陷处,且振幅的最大值处恰好与缺陷 $f(x)$ 的最大值处重合,如图 4(a)所示。随着缺陷深度的绝对值进一步增

大,达到缺陷深度的绝对值大于临界缺陷深度的绝对值(即 $|h| > |h_{cr}|$)时,基态模将不再分布于缺陷处,而是分布于紧邻于缺陷的格子通道中,如图 4(b)、(c)所示。在图 4 中所用到的参数为 $p=1, U=2, \Omega=1$, 在该参数选择的情况下,临界缺陷深度 h_{cr} 的值为 -0.6338 。

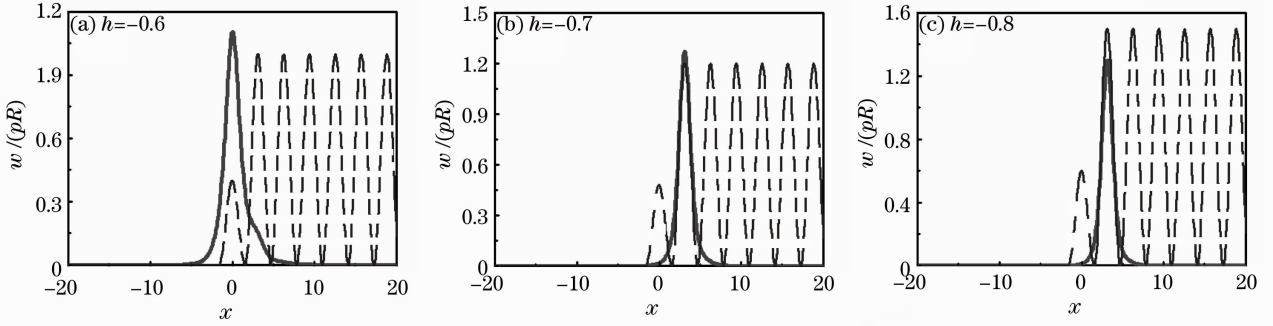


图 4 不同缺陷深度时排斥型缺陷中的表面缺陷基态模的振幅(实线)与线性折射率(虚线)的空间分布

Fig. 4 Profiles of the fundamental surface defect mode amplitude (solid lines) and linear refractive index distribution (dash lines) for rejective-defected lattices with different defect depths

数值研究的结果同样表明能流 U 也对表面缺陷基态模的性质有着重要的影响。在其他参数保持不变的情况下,当能流 U 较小时,表面缺陷基态模不能分布在缺陷光格子处,而只能分布于其他光格子中;随着能流 U 的逐渐增大,表面缺陷基态模所在的位置逐渐向缺陷处移动,直至分布于紧邻缺陷的光格子中,如图 5(a)所示;当能流 U 进一步增加超过某一临界值 U_{cr} 时,表面缺陷基态模将分布于缺陷光格子中,如图 5(b)、(c)所示。在图 5 中参数选择的情况下($p=1, h=0.5, \Omega=1$),能流的临界值 U_{cr} 为 1.7130。

当其他参数不变,只有格子频率 Ω 变化时,同样的情况也将发生,如图 6 所示。从图 6 可以看出,在其他参数保持不变的情况下,存在着一个临界的格子频率 Ω_{cr} 。当格子频率 $\Omega < \Omega_{cr}$ 时,表面缺陷基态模只能分布于缺陷处,且振幅的最大值处恰与缺陷 $f(x)$ 的最大值处重合,如图 6(a)所示;当 $\Omega > \Omega_{cr}$ 时,表面缺陷基态模不能再分布于缺陷处,而分布于紧邻缺陷的格子通道中,如图 6(b)、(c)所示。图 6 中所用到的参数为 $p=1, h=-0.6, U=2$, 在该参数选择的情况下,格子频率的临界 Ω_{cr} 为 1.0685。

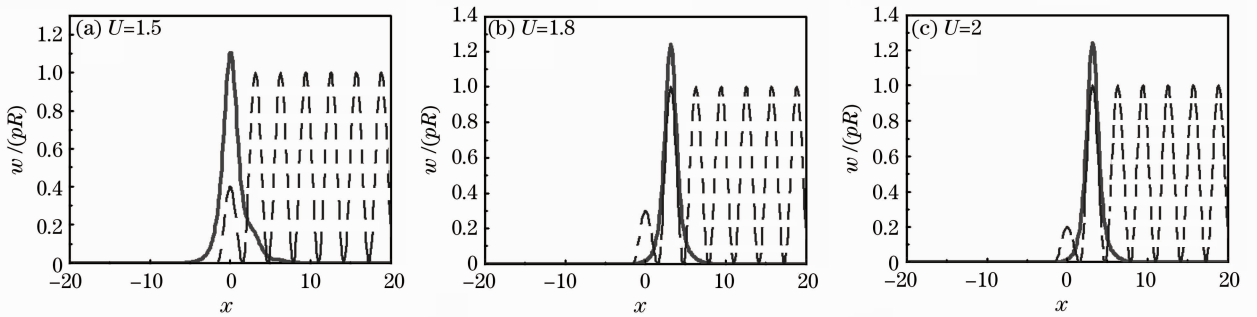


图 5 不同能流时排斥型缺陷中的表面缺陷基态模的振幅(实线)与线性折射率(虚线)的空间分布

Fig. 5 Profiles of the fundamental surface defect mode amplitude (solid lines) and linear refractive index distribution (dash lines) for rejective-defected lattices with different energy flows

若将表面缺陷基态模分布于缺陷处的状态记为“开”,而不在缺陷处的状态记为“关”,通过控制系统参数可以控制表面缺陷基态模所处的位置,这样,采

用合适的参数组合就可以达到光学开关效应。此外,通过控制系统参数可以让表面缺陷基态模在不同的格子通道中稳定的传输,从而实现光学路由。

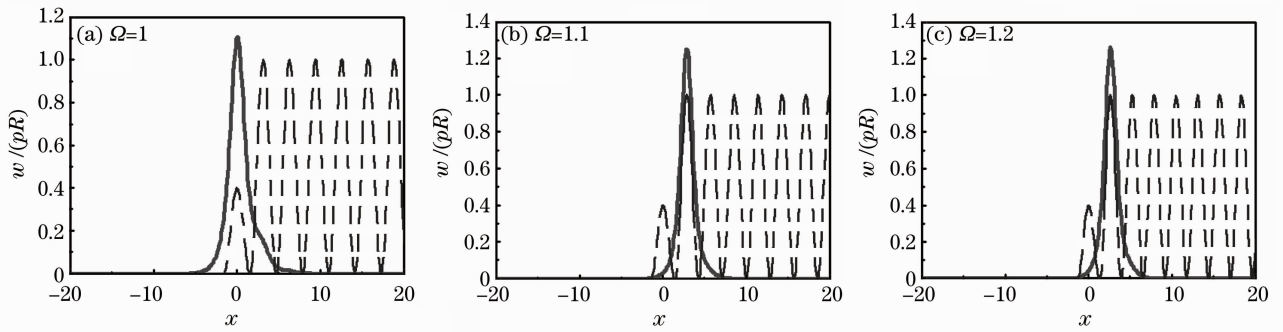


图6 不同格子频率时排斥型缺陷中的表面缺陷基态模的振幅(实线)与线性折射率(虚线)的空间分布

Fig. 6 Profiles of the fundamental surface defect mode amplitude (solid lines) and linear refractive index distribution (dash lines) for rejeive-defected lattices with different lattice frequencies

出现以上临界现象的物理机制是因为表面缺陷基态模诱导的非线性折射率与线性折射率之间竞争所产生的结果。当表面缺陷基态模诱导的非线性折射率超过线性折射率时,表面缺陷基态模可以分布于缺陷处,否则,表面缺陷基态模将分布于其他格子通道中。

5 结 论

研究了在具有缺陷的半无限光格子的非线性介质中表面缺陷基态模的特性。结果表明,吸引型半无限缺陷光格子中的表面缺陷基态模只能分布于缺陷处;排斥型半无限缺陷光格子每个系统参数存在着一个临界值,当其他参数保持不变的情况下,这个系统参数的数值大于或小于其临界值时,表面缺陷基态模将能或不能分布于缺陷处。通过控制系统参数可以控制表面缺陷基态模所处的位置,这一性质可以被应用于全光控制技术。

参 考 文 献

- 1 Y V Kartashov, B A Malomed, L Torner. Solitons in nonlinear lattices [J]. *Rev Mod Phys*, 2011, 83(1): 247–305.
- 2 H Leblond, B A Malomed, D Mihalache. Spatiotemporal vortex solitons in hexagonal arrays of waveguides [J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(6): 063825.
- 3 Y V Kartashov, S López-Aguayo, V A Vysloukh, *et al.*. Stripe-like quasi-nondiffracting optical lattices [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9505–9511.
- 4 Lianwei Dong, Hui Wang. Surface solitons supported by Bessel optical potential [J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1706–1711.
- 5 Liangwei Dong, Jiandong Wang, Hui Wang, *et al.*. Broken ring solitons in Bessel optical lattices [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(24): 2989–2991.
- 6 Fangwei Ye, Liangwei Dong, Bambi Hu. Localization of light in a parabolically bending waveguide array in thermal nonlinear media [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 584–586.
- 7 Huafeng Zhang, Jing Jia, Suotang Jia, *et al.*. Spatial soliton steering induced by weak nonlocality in optical lattices [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(15-16): 4130–4135.
- 8 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei, *et al.*. Properties of all-

- optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1016003.
- 杨辉, 王智勇, 张伟, 等. 基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1016003.
- 9 Chen Heming, Wang Guodong. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0323006.
- 陈鹤鸣, 王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0323006.
- 10 Gong Lei, Wu Zhensen, Li Zhengjun, *et al.*. Analysis of radiation forces exerted on defect particle on the wafer by a laser beam [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0203009.
- 巩雷, 吴振森, 李正军, 等. 基片表面缺陷粒子在激光波束作用下的辐射力分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203009.
- 11 D M Jović, Y S Kivshar, C Denz, *et al.*. Anderson localization of light near boundaries of disordered photonic lattices [J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(3): 033813.
- 12 X Zhu, H Wang, L X Zheng. Defect solitons in kagome optical lattices [J]. *Opt Express*, 2010, 18(20): 20786–20792.
- 13 Z Lu, Z M Zhang. Surface line defect solitons in square optical lattice [J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 2410–2416.
- 14 V A Brazhnyi, B A Malomed. Localization and delocalization of two-dimensional discrete solitons pinned to linear and nonlinear defects [J]. *Phys Rev E*, 2011, 83(1): 016604.
- 15 S Hu, X Ma, D Lu, *et al.*. Defect solitons in parity-time-symmetric optical lattices with nonlocal nonlinearity [J]. *Phys Rev A*, 2012, 85(4): 043826.
- 16 J Yang, Z Chen. Defect solitons in photonic lattices [J]. *Phys Rev E*, 2006, 73(2): 026609.
- 17 L Dong, F Ye. Shaping solitons by lattice defects [J]. *Phys Rev A*, 2010, 82(5): 053829.
- 18 Z Xu, Y V Kartashov, L Torner. Soliton mobility in nonlocal optical lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(11): 113901.
- 19 W H Chen, Y J He, H Z Wang. Surface defect gap solitons [J]. *Opt Express*, 2006, 14(23): 11271–11276.
- 20 W H Chen, Y J He, H Z Wang. Defect superlattice solitons [J]. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14498–14503.
- 21 W H Press, B P Flannery, S A Teukolsky, *et al.*. Relaxation methods. in *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* [M]. New York: Cambridge University Press, 1992. 753–763.
- 22 M L Chiofalo, S Succi, M P Tosi. Ground state of trapped interacting Bose-Einstein condensates by an explicit imaginary-time algorithm [J]. *Phys Rev E*, 2000, 62(5): 7438–7444.

栏目编辑: 史敏