

# 光诱导准一维光子晶格中离散空间 光孤子的相互作用\*

肖发俊 张鹏 刘圣 赵建林<sup>†</sup>

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2011年11月1日收到; 2011年11月22日收到修改稿)

基于分步束传播法数值分析了离散空间光孤子在准一维光诱导光子晶格中的相干与非相干相互作用过程. 结果表明: 对于相干孤子, 同相时相互吸引, 反相时相互排斥. 然而, 由于非线性响应的各向异性, 横向排布的非相干孤子会因间隔波导数目的增加而由相互吸引变为相互排斥. 并且, 沿对角方向排布的两个非相干孤子在孤子相互作用力和布拉格反射的共同影响下, 会呈现出“钟摆式”振荡传输现象. 研究结果有助于进一步理解非线性各向异性对离散孤子相互作用的影响机制, 并为后续实验研究提供理论参考.

**关键词:** 离散空间光孤子, 孤子相互作用, 光诱导光子晶格

**PACS:** 42.65.Tg, 42.70.Qs, 42.25.Bs

## 1 引言

光波在周期性离散系统中的传播一直是人们研究的重要课题. 光诱导光子晶格作为典型的周期性离散系统, 在过去的 20 年里得到了广泛的关注. 迄今为止, 人们已在光子晶格中发现了许多新奇的物理现象, 如: 晶格孤子<sup>[1-6]</sup>, 带隙结构<sup>[7,8]</sup>、负折射<sup>[9,10]</sup>、Bloch 振荡<sup>[11]</sup>、Anderson 局域<sup>[12]</sup>以及混合非线性下的晶格孤子<sup>[6,13,14]</sup>等. 光子晶格中光波传播行为的研究也为其他离散体系, 如玻色-爱因斯坦凝聚、生物分子链等提供了有益的参考. 光子晶格中的线性及非线性效应也为人们操控光场提供了便利的条件. 在线性响应条件下, 人们可以通过匹配布洛赫波的模式来实现光束的无衍射<sup>[15]</sup>传输, 以及调控光波正负折射的切换<sup>[9,10]</sup>; 在非线性响应条件下, 借助孤子间的相互作用可以对光束的传输方向和能量耦合进行调控<sup>[16-23]</sup>. 与连续介质中的情况类似, 离散孤子的相互作用也存在吸引、排斥、能量交换等现象<sup>[21-23]</sup>. 不同的是,

由于光子晶格的周期性折射率调制, 离散孤子间的相互作用不仅展现了一些特有的现象, 如 Tamm 振荡等<sup>[19]</sup>, 而且更有望在全光网络的信息处理方面得到应用<sup>[24]</sup>. 近年来, 随着光折变波导写入技术的进步, 在光折变晶体中构建稳定的光子晶格结构已成为可能<sup>[25,26]</sup>. 其中, 准一维光子晶格因其独特的结构, 更是为人们操控光束提供了便利的平台<sup>[10]</sup>. 然而, 准一维光子晶格中的孤子相互作用, 特别是非相干相互作用却鲜有报道. 本文利用分步束传播法模拟光波在光诱导准一维光子晶格中的线性与非线性传输过程, 通过 Petviashvili 迭代法求解准一维光诱导光子晶格中的离散孤子解, 并利用所得离散孤子解模拟分析不同空间排布的两个离散孤子间的相干及非相干相互作用.

## 2 理论分析

假设光折变晶体的光轴与外加电场方向均沿  $x$  轴, 则两束光波在光诱导光子晶格中传播和相互作用的动力学过程, 可以由下述无量纲的非线性薛定

\* 西北工业大学基础研究基金(批准号: JC200950)和博士论文创新基金(批准号: CX200514, CX200914)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jizhao@nwpu.edu.cn

谓方程描述<sup>[27]</sup>:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} - \frac{i}{2} \nabla^2 \right) B_1(x, y, z) \\ & = iE_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} B_1(x, y, z), \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} - \frac{i}{2} \nabla^2 \right) B_2(x, y, z) \\ & = iE_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} B_2(x, y, z), \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} & \nabla^2 \varphi + \nabla \varphi \cdot \nabla \ln(1 + I_1 + I_p) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \ln(1 + I_1 + I_p), \end{aligned} \quad (1c)$$

式中,

$$\nabla = \hat{x}(\partial/\partial x) + \hat{y}(\partial/\partial y),$$

$B_1(x, y, z)$  和  $B_2(x, y, z)$  分别为沿  $z$  轴传播的两束非常偏振探测光的复振幅分布,  $E_0$  为晶体外加电场的强度,  $\varphi$  为光生电势,  $I_1$  和  $I_p$  分别为晶格写入光和探测光的强度. 对于孤子相干相互作用,  $I_p = |B_1 + B_2|^2$ ; 孤子非相干相互作用,  $I_p = |B_1|^2 + |B_2|^2$ . 以光折变晶体 SBN: 60 为例, 上式中的归一化参量  $x, y, z$  和  $E_0$  与实际参量  $x', y', z'$  和  $E'_0$  的对应关系分别为  $x' = x_0 x$ ,  $y' = y_0 y$ ,  $z' = z_0 z$ ,  $E'_0 = E_{00} E_0$ . 这里选取  $x_0 = y_0 = 4.17 \mu\text{m}$ ,  $z_0 = 0.48 \text{ mm}$ ,  $E_{00} = 100 \text{ V/mm}$ .

对于光诱导光子晶格中的离散空间孤子, 其光场分布应满足

$$B(x, y, z) = b(x, y) \exp(i\beta z), \quad (2)$$

式中,  $b(x, y)$  为实函数,  $\beta$  代表传播常数. 根据式 (1) 可得

$$\left( \beta - \frac{1}{2} \nabla_{\perp}^2 \right) b(x, y) = E_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x}(x, y), \quad (3)$$

此即离散孤子解所满足的本征方程. 采用 Petviashvili 迭代法<sup>[28]</sup> 对方程进行求解, 即可得到光诱导光子晶格中存在的离散空间光孤子. 同时, 结合式 (1) 即可以对离散孤子的相干和非相干相互作用过程进行数值模拟.

### 3 数值模拟结果及讨论

#### 3.1 准一维光诱导光子晶格中的光波传输及离散空间光孤子

分别选取光子晶格写入光的强度分布  $I_1 = [\cos^2(\pi x/2) + \cos^2(\pi y/2)]$ , 外加电场强度  $E_0 = 2$

及探测光  $B = \exp[-(x^2 + y^2)/9]$ , 根据式 (1) 对探测光在光诱导光子晶格中的线性和非线性传输过程进行模拟. 图 1 为传输距离  $z = 40$  时的结果. 其中, 图 1(a) 为探测光 (中央亮点) 及晶格写入光的光场分布, 图 1(b) 为晶格写入光所诱导的折射率分布. 值得注意的是, 由于光折变非线性的各向异性, 正方晶格写入光所诱导的折射率分布是一种准一维的晶格结构<sup>[6,29]</sup>. 图 1(c) 和 (f) 分别为探测光的线性和非线性传输过程沿图 1(a) 虚线的切面图, 图 1(d) 和 (e) 分别为探测光经线性和非线性传输后在出射端面的光场分布. 由模拟结果可以看出, 当探测光在光子晶格中线性传输时, 由于相邻波导间的耦合, 探测光的能量逐渐向两边扩散, 形成离散衍射; 在非线性条件下, 探测光在传输过程中的自聚焦效应与波导间的线性耦合互相平衡, 使得光波的能量集中在原入射波导中传输, 形成离散孤子.

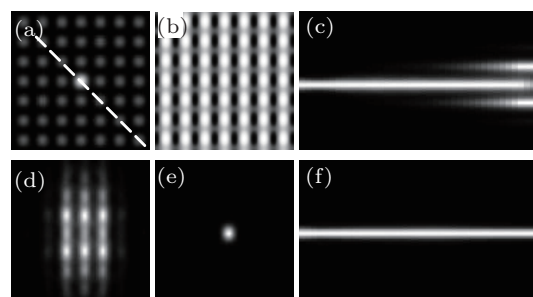


图 1 光诱导准一维光子晶格中的离散衍射与离散孤子 (a) 探测光 (中央亮点) 和晶格写入光的强度分布; (b) 光诱导光子晶格的折射率分布; (c), (f) 探测光线性、非线性传输过程沿 (a) 中虚线的切面图; (d), (e) 探测光经线性和非线性传输后在出射面上的光强分布

利用 Petviashvili 迭代法对式 (3) 求解, 可得到离散孤子解, 结果如图 2 所示. 其中, 图 2(a) 为本征值  $\beta$  随孤子峰值光强  $I_{\text{max}}$  的变化关系, 图 2(b)—(d) 分别对应本征值  $\beta$  为 0.05, 0.1, 0.8 时, 光子晶格中的离散孤子解. 可以看出, 本征值与孤子峰值光强呈单调递增关系, 并且随着本征值的增大, 离散孤子的侧峰逐渐消失; 当本征值较高时, 孤子光强主要集中在单个波导之中. 孤子相互作用强弱与否取决于其光场交叠区折射率变化的大小. 交叠区折射率变化需要综合考虑孤子的光强和光场交叠区的面积. 经模拟分析发现, 在准一维光子晶格中, 同等条件下本征值为 0.8 的孤子可在其交叠区引起较大的折射率变化, 进而可以观察到显著的相互作用现象. 以下选取本征值为 0.8 的孤子, 数值模拟孤子间的相干和非相干相互作用.

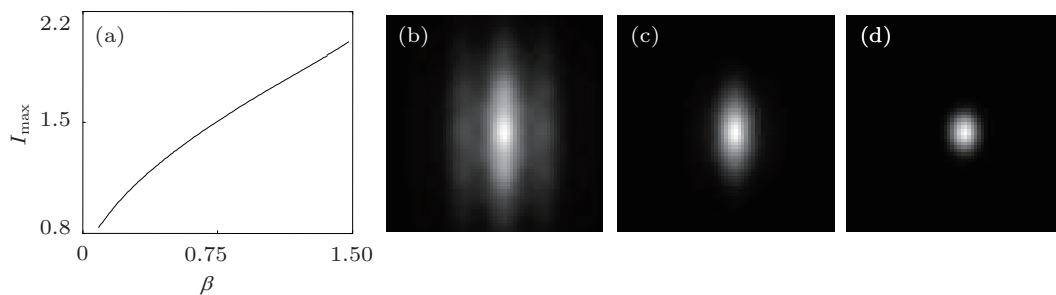


图2 准一维光子晶格中的离散孤子解 (a) 孤子光强峰值  $I_{\max}$  随传播常数  $\beta$  的变化曲线; (b)—(e) 分别对应  $\beta = 0.05, 0.1, 0.8$  时的离散孤子解

### 3.2 离散空间光孤子的相干相互作用

将本征值为 0.8 的两个离散孤子  $B_1$  和  $B_2$  代入式 (1), 对孤子间的相干相互作用进行模拟, 在归一化传输距离  $z = 40$  处得到结果如图 3 所示. 图中上、下排分别对应同相和反相相互作用. 其中, 图 3 (a)—(c) 分别为两孤子在水平、竖直和对角的相邻格点处入射的情况 (虚线为孤子入射位置). 可以看出, 两个同相孤子相互吸引, 融合为一束光; 两个反相孤子因相互排斥偏离入射波导. 这是因为当孤子同相时, 其光场交叠区将出现相长干涉, 使得其间的介质折射率增大, 两孤子均向中心偏移, 表现出相互吸引且逐渐融合; 两孤子反相时, 在其光场交叠区发生相消干涉, 导致这一区域折射率降低, 两孤子分别向两侧高折射率区域偏移.

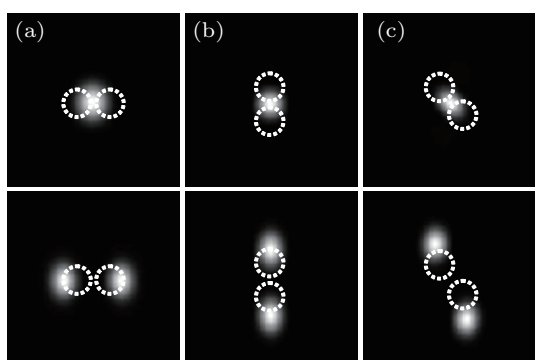


图3 准一维光子晶格中不同空间位置的离散光孤子的相干相互作用. 上排: 同相孤子; 下排: 反相孤子

### 3.3 离散空间光孤子的非相干相互作用

将上述离散孤子  $B_1$  和  $B_2$  代入式 (1), 同样可以对孤子间的非相干相互作用过程进行数值模拟. 图 4 所示为模拟得到的归一化传输距离  $z = 40$  处的结果. 图中上、下排分别为出射端面处的光强分布 (虚线为孤子入射位置) 和相应孤子与晶格写入

光所诱导的折射率分布 (亮区为高折射率区, 暗区为低折射率区). 其中, 图 4(a), (c) 中两孤子从相邻波导入射, 图 4(b), (d) 中两孤子间隔一条波导入射. 图 4 上排显示, 水平排布的两孤子随着间距的增大出现先吸引后排斥的现象; 竖直排布的两孤子随着间距的增加相互吸引减弱. 与连续介质中的情况类似<sup>[30,31]</sup>, 这种现象可由光致折射率变换的各向异性来解释. 图 4 下排显示了不同孤子空间分布下光致折射率的变化. 可以看出, 孤子间距由相邻波导变为间隔一条波导时, 水平排布孤子的光强交叠区由正的折射率变化变为负的折射率变化, 孤子相互作用力也因此由相互吸引变为互相排斥; 竖直排布的两个孤子的光场交叠区始终为正的折射率变化, 但折射率变化量逐渐减弱, 所以两孤子始终表现为相互吸引.

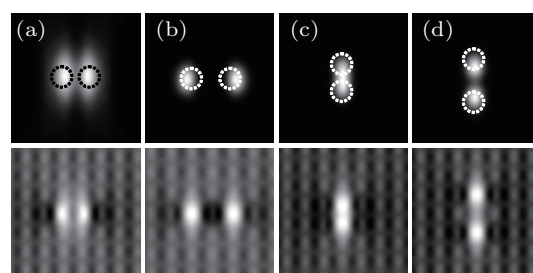


图4 准一维光子晶格中 (a), (b) 水平和 (c), (d) 竖直排布的离散光孤子的非相干相互作用 上排: 出射孤子光强分布; 下排: 孤子及晶格写入光所诱导的折射率分布

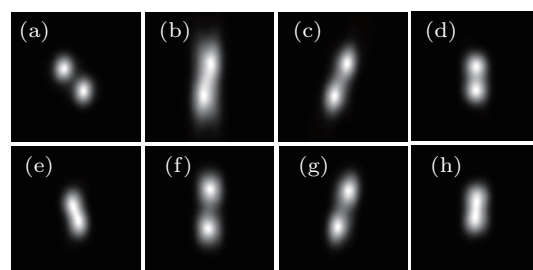


图5 准一维光子晶格中沿对角方向排布的两个离散光孤子在不同传输距离处的非相干相互作用 (a)—(h) 分别对应传输距离  $z = 4, 24, 40, 56, 64, 90, 100, 126$

图 5 给出了沿对角方向排布的两个离散光孤子  $B_1$  和  $B_2$ , 在传输不同距离  $z = 4, 24, 40, 56, 64, 90, 100, 126$  后的非相干相互作用结果. 可以看出, 此时两孤子的非相干相互作用呈现出“钟摆式”的振荡现象: 随着传输距离的增大, 两孤子开始绕其中心顺时针旋转; 当转过一定角度后, 又变为逆时针旋转, 接着又重复顺时针旋转. 这一现象与文献 [32] 中一维离散孤子的振荡现象类似, 是孤子相互作用力和晶格布拉格反射共同影响下的结果. 两孤子初始入射时, 波矢位于布里渊区的中央; 由于受到孤子相互作用力, 两孤子相互吸引, 其波矢向布里渊区边界偏离; 当波矢到达布里渊区边界时, 孤子满足布拉格条件, 形成波矢与之相反的反射波. 此时, 孤子改变方向, 并继续相互吸引, 波矢逐渐返回布里渊区中央. 如此反复, 便形成了图 5 所示的“钟摆式”振荡现象. 然而, 该现象并未在同等条件下的孤子相干相互作用中观测到. 原因可能是: 激发相干孤子振荡传播, 要求晶格写入光的强度和外加电场的大小必须在特定的区间之内 [30]. 本文选取的晶格写入光强度和外加电场可能在这种激发区间外,

故未在孤子相干相互作用中观测到伴随传输过程的“钟摆式”振荡现象.

## 4 结论

理论研究了准一维光子晶格中离散空间光孤子的相干及非相干相互作用. 利用 Petviashvili 迭代法求解了准一维光诱导光子晶格中的离散孤子解, 并利用所得离散孤子解模拟分析了不同空间排布下的两个离散孤子间的相干及非相干相互作用. 结果表明: 同相相干孤子相互吸引, 导致两束孤子融合成一束光; 反相相干孤子相互排斥, 导致两束孤子偏离入射波导; 因间隔波导数目的增加, 水平排布的两个非相干孤子会由相互吸引变为互相排斥, 而竖直排布的两个非相干孤子的相互吸引作用则减弱; 值得注意的是, 沿对角方向排布的两个非相干孤子则表现出“钟摆式”振荡传输的现象. 上述结论为实验观测准一维光子晶格中离散空间孤子的相互作用提供理论参考.

- [1] Efremidis N K, Sears S, Christodoulides D N, Fleischer J W, Segev M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046602
- [2] Fleischer J W, Carmon T, Segev M, Efremidis N K, Christodoulides D N 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 023902
- [3] Fleischer J W, Segev M, Efremidis N K, Christodoulides D N 2003 *Nature* **422** 147
- [4] Neshev D, Ostrovskaya E, Kivshar Y, Królikowski W 2003 *Opt. Lett.* **28** 710
- [5] Martin H, Eugenieva E D, Chen Z, Christodoulides D N 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 123902
- [6] Zhang P, Zhao J, Xiao F, Lou C, Xu J, Chen Z 2008 *Opt. Express* **16** 3865
- [7] Mandelik D, Eisenberg H S, Silberberg Y, Morandotti R, Aitchison J S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 053902
- [8] Liu S, Zhang P, Xiao F, Yang D, Zhao J 2009 *Sci. China Ser. G* **52** 747 [刘圣, 张鹏, 肖发俊, 杨德兴, 赵建林 2009 中国科学 G 辑 **39** 349]
- [9] Zhang P, Lou C, Liu S, Zhao J, Xu J, Chen Z 2010 *Opt. Lett.* **35** 892
- [10] Zhang P, Liu S, Lou C, Xiao F, Wang X, Zhao J, Xu J, Chen Z 2010 *Phys. Rev. A* **81** 041801(R)
- [11] Trompeter H, Królikowski W, Neshev D N, Desyatnikov A S, Sukhorukov A A, Kivshar Y S, Pertsch T, Peschel U, Lederer F 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 053903
- [12] Schwartz T, Bartal G, Fishman S, Segev M 2007 *Nature* **446** 52
- [13] Zhang P, Liu S, Zhao J, Lou C, Xu J, Chen Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 878
- [14] Hu Y, Lou C, Liu S, Zhang Peng, Zhao J, Xu J, Chen Z 2009 *Opt. Lett.* **34** 1114
- [15] Eisenberg H S, Silberberg Y, Morandotti R, Aitchison J S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1863
- [16] Meier J, Stegeman G I, Silberberg Y, Morandotti R, Aitchison J S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 093903
- [17] Meier J, Stegeman G I, Christodoulides D N, Silberberg Y, Morandotti R, Yang H, Salamo G, Sorel M, Aitchison J S 2005 *Opt. Lett.* **30** 1027
- [18] Smirnov E, Stepić M, Rüter C E, Shandarov V, Kip D 2007 *Opt. Lett.* **32** 512
- [19] Stepić M, Smirnov E, Rüter C E, Prönnke L, Kip D, Shandarov V 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046614
- [20] He Y J, Wang H Z 2006 *Opt. Express* **14** 9832
- [21] Xiao F, Zhang P, Liu S, Zhao J 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 3435
- [22] Xiao F, Zhang P, Liu S, Zhao J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2529 [肖发俊, 张鹏, 刘圣, 赵建林 2008 物理学报 **57** 2529]
- [23] Liu S, Hu Y, Zhang P, Gan X, Xiao F, Lou C, Song D, Zhao J, Xu J, Chen Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 1167
- [24] Christodoulides D N, Eugenieva E D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 233901
- [25] Zhao J, Li B, Zhang P, Yang D, Li Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2583 [赵建林, 李碧丽, 张鹏, 杨德兴, 李振伟 2004 物理学报 **53**

- 2583]
- [26] Zhang P, Yang D, Zhao J, Su K, Zhou J, Li B, Yang D 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1558
- [27] Zhang P, Zhao J, Lou C, Tan X, Gao Y, Liu Q, Yang D, Xu J, Chen Z 2007 *Opt. Express* **15** 536
- [28] Petviashvili V I 1976 *Sov. J. Plasma Phys.* **2** 257
- [29] Zhang P, Liu S, Lou C, Xiao F, Wang X, Zhao J, Xu J, Chen Z 2010 *Phys. Rev. A* **81** 041801(R)
- [30] Królikowski W, Saffman M, Luther-Davies B, Denz C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3240
- [31] Xiao F J, Zhang P, Liu S, Gan X, Zhao J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 044208
- [32] Xiao F J, Zhang P, Liu S, Zhao J 2011 *J. Opt.* **13** 105101

# Discrete soliton interaction in quasi one-dimensional optically induced photonic lattice\*

Xiao Fa-Jun Zhang Peng Liu Sheng Zhao Jian-Lin<sup>†</sup>

1) (Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

2) (The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, China)

(Received 1 November 2011; revised manuscript received 22 November 2011)

## Abstract

The coherent and the incoherent interactions of discrete solitons in quasi one-dimensional optically induced photonic lattice are theoretically and numerically analyzed. It is found that in-phase solitons attract each other and out-of-phase solitons repel one other. Due to the anisotropy of the nonlinearity, two initially attractive incoherent solitons will repel each other as their interval waveguide number increasing. Moreover, the pendulum-like intertwist of discrete solitons is observed during the incoherent interaction due to the interplay between soliton transverse motions resulting from the soliton interaction and the Bragg reflection of the lattice structure. These results help us to understand how the anisotropy of the nonlinearity response plays a role in discrete soliton interaction and offers the theoretical support for the experimental investigation.

**Keywords:** discrete soliton, soliton interaction, optically induced photonic lattice

**PACS:** 42.65.Tg, 42.70.Qs, 42.25.Bs

\* Project supported by the Northwestern Polytechnical University (NPU) Foundation for Fundamental Research (Grant No. JC200950) and the Doctorate Foundation of NPU (Grant Nos. CX200514, CX200914).

<sup>†</sup> E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn