

光致异构聚合物中相互作用光学空间 孤子对的垂直光调控*

黎扬钢 余卫龙† 王红成

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2006 年 7 月 11 日收到, 2006 年 8 月 20 日收到修改稿)

采用数值法研究了在具有光致异构非线性的聚合物中平行传播的光学空间孤子对(信号光)被另一束垂直入射光调控的情况. 调节调控光和信号光的初始相位差、调控光入射位置等可以使信号光孤子产生合成、分开等现象. 对此给出了物理解释. 这种相互作用的空间光孤子被垂直光调控的现象可望应用于光合成、光互联、光波导等方面.

关键词: 光学空间孤子对, 相互作用, 垂直光调控, 光致异构

PACC: 4265J, 4265S, 4270J

1. 引 言

光折变空间孤子的研究已有十多年的历史^[1], 人们对光折变空间孤子进行了广泛的研究, 相继报道了准稳态孤子^[2,3]、屏蔽孤子^[4-8]、光伏孤子^[9-12]、屏蔽-光伏孤子^[13-15]等. 光折变空间孤子的形成一般只需毫瓦量级或更低的功率^[2], 便于实验观察. 其研究呈现多维性. 最近文献^[16]报道了基于光致异构非线性的光学空间孤子. 与过去常用的光折变材料不同, 未极化的光致异构聚合物是各向同性的, 它所承载的光学空间孤子具有许多新的性质, 例如, 这种材料中的孤子光束可以是圆偏振、光强分布柱对称的^[17]. 因此, 光致异构空间孤子研究更具多维性.

光学空间孤子相互作用以其新奇结果及潜在应用前景而成为光学空间孤子研究的前沿热点之一^[18]. 此类孤子相互作用具有光控光特性, 可望应用于光集成中的全光开关、全光逻辑门、光连接器等. 两同向平行传播的相干一维光学空间亮孤子同相吸引、异相排斥, 但相互间没有能量转移, 其他相位差使两孤子发生能量转移. 相位差、入射中心距离等因素影响孤子相互作用程度, 这已是公认的结论. 2005 年, Ku 等^[19]在实验和理论上研究了相干系数

如何控制两孤子相互作用. 他们将两孤子光束当作一整体构成部分非相干光, 发现可以通过相干系数来控制孤子相互作用程度, 使两孤子从相互吸引到排斥的转变, 或实现孤子间能量转移等. 2005 年, Motzek 等^[20]利用各向异性非局域理论分析了相干对向传播的相互作用; Petrovic 等^[21]实验及数值研究了 SBN 晶体中对向传播的非相干的 2+1 维空间孤子相互作用及其动力学, 观察到一种对称的分裂转变. 他们发现该转变使稳定的交叠对向传播孤子变成不稳定的对向传播孤子, 并建立相关理论预言了分裂转变临界值, 其数值模拟结果与实验符合得相当好. 以上同向、对向相互作用都是在各向异性介质中进行的, 且同向、对向光的传播方向是一个维度的.

在一般的光折变晶体中, 光诱导的折射率改变不但与光强有关, 还与光场偏振态有关, 而光诱导的光致异构聚合物折射率改变只与光强有关, 与光场偏振方向、入射光束方向无关. 这就容易在两个或两个方向以上的维度研究光致异构聚合物中光束的相互作用. 本文着眼于研究两组互相垂直传播的光束在这种介质中的相互作用, 这两组光分别称为信号光和调控光. 信号光采用两同向相互作用的亮孤子, 它们的相互作用受相位差等参数影响. 信号光在聚合物中独立传播时, 只感受到自身光场诱导的折射

* 国家自然科学基金(批准号: 30374121, 10574167)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: stils02@zsu.edu.cn

率波导的作用.如在垂直方向引入调控光,调控光也会形成折射率波导,那么,信号光会受到怎么样的影响呢?这就是我们所要研究的孤子相互作用的横向光调控.我们先推导两光场的演化方程,并建立垂直全光调控的模型,然后采用数值方法研究信号光被调控的情况.在此基础上分别给出了相位差为 0 , $\pi/2$, π 的两同向相互作用的孤子在调控光调控下的演化结果,并讨论了信号光和调控光非相干的情况.这种垂直全光调控可望应用于全光开关、光集成等方面.

2. 基本理论

2.1. 光致异构聚合物中的孤子理论

含有偶氮苯等有机生色团的聚合物中生色团分子可以有顺态(cis态)和反态(trans态)两种异构体.在适当波长的光照射条件下两种异构体可以互相转化,这就是光致异构.对同一波长的光,顺态和反态异构体对应不同的折射率,因此,光照该聚合物可产生光诱导折射率改变.

在有背景光照射条件下,线偏振光激发的折射率改变 Δn 可写为^[16]

$$\Delta n = 4\pi ST_0 \left\{ \frac{\alpha I + \gamma}{\beta I} \left[1 - \sqrt{\frac{1 + \alpha I}{\beta I}} \right] \times \arctan \sqrt{\frac{\beta I}{1 + \alpha I}} \right\} - \frac{1}{3} \gamma. \quad (1)$$

这里 S 是与信号光波长、样品材料有关的参数, T_0 表示没有光照射情况下反态异构分子的浓度.

$$\alpha = \frac{q_{cs} \sigma_c}{q_{tb} \sigma_t^b + q_{cb} \sigma_c^b},$$

$$\beta = \frac{q_{ts} \sigma_t^{\prime\prime}}{q_{tb} \sigma_t^b + q_{cb} \sigma_c^b},$$

$$\gamma = \frac{1}{(q_{tb} \sigma_t^b + 1) q_{cb} \sigma_c^b},$$

其中 q_{ts} , q_{cs} 分别表示反态转变成顺态、顺态转变成反态时信号光的量子产率, q_{tb} , q_{cb} 分别表示反态转变成顺态、顺态转变成反态时背景光的量子产率, $\sigma_t^{\prime\prime}$ 表示分子取向平行电场方向时反态转变成顺态信号光的吸收截面, σ_c 表示顺态转变成反态时信号光的吸收截面, σ_t^b , σ_c^b 分别表示反态转变成顺态、顺态转变成反态时信号光的吸收截面.

$$I = \frac{I_s}{I_d},$$

$$I_d = I_b + \frac{K}{q_{cb} \sigma_c^b},$$

其中 I_s , I_b 分别表示信号光、背景光光强, K 表示顺态转变为反态的热弛豫系数.如文献 14 所指出的,当背景光激发的反态转变为顺态的转换率大于信号光激发的顺态转变为反态的转换率时,即 γ 较小时(例如文献 16 中 γ 取 0.2) 折射率改变 Δn 可以为正数,这就可以支持光束形成亮孤子.本文考虑亮孤子的情况.

描述光场在介质中传播的一维非线性薛定谔方程为

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + k_0 \Delta n A = 0, \quad (2)$$

式中 k 和 k_0 分别是介质中和真空中的波数.对于光学空间孤子,可令

$$A = u(x) \sqrt{I_d} \exp(i\Gamma z), \quad (3)$$

其中 Γ 是孤子传播常数,则 I 又可表示为 $I = |u(x)|^2$.将(1)(3)式代入(2)式,可得无量纲化的孤子方程

$$\frac{\partial^2 u(\xi)}{\partial \xi^2} = u(\xi) \left\{ b - \left[\frac{\alpha u^2 + \gamma}{\beta u^2} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha u^2 + 1}{\beta u^2}} \right) \times \arctan \sqrt{\frac{\beta u^2}{\alpha u^2 + 1}} - \frac{\gamma}{3} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中

$$\xi = \frac{x}{x_0},$$

$$b = \frac{\Gamma}{4k_0 \pi ST_0},$$

$$x_0 = (8n_0 k_0^2 \pi ST_0)^{-1/2}.$$

令

$$z_0 = \frac{1}{4\pi ST_0 k_0},$$

$$L = \frac{z}{z_0},$$

$$\Delta N = \frac{\Delta n}{4\pi ST_0},$$

(2)式可以写成归一化无量纲的光场演化方程

$$\frac{\partial A}{\partial L} = i \frac{\partial^2 A}{\partial \xi^2} + i \Delta N A. \quad (5)$$

这就是光场在光致异构非线性的聚合物中的演化方程,可用分步傅里叶法数值模拟光场的传播演化.

2.2. 垂直传播两孤子方程及数值模拟方案

无光照时,具有光致异构非线性的聚合物是各向同性的,我们考虑两光束互相垂直传播相互作用的情况,如图 1 所示.

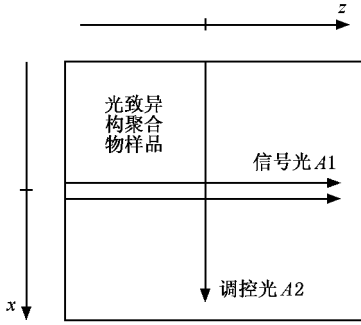


图 1 两光束垂直传播相互作用示意图

图 1 中信号光 A_1 和调控光 A_2 光场在边界面的反射忽略不计.设总光场由传播方向互相垂直的两光场组成,即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = E_1 \mathbf{e}_1 + E_2 \mathbf{e}_2. \quad (6)$$

考虑两同频、傍轴光场

$$E_1 = A_1(x, z) \exp[i(kz - \omega t)],$$

$$E_2 = A_2(x, z) \exp[i(kx - \omega t)],$$

从麦克斯韦方程出发,并做慢变近似,可推导得一维情况下信号光、调控光的演化方程

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} - \frac{ik\Delta n}{n_0} A_1 = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial x} - \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A_2}{\partial z^2} - \frac{ik\Delta n}{n_0} A_2 = 0, \quad (8)$$

式中 k 是光场在介质中的波数.令

$$\Delta \mathcal{N}(A_1, A_2) = \frac{\Delta n}{4\pi ST_0},$$

$$x_0 = (8k^2 \pi ST_0 / n_0)^{-1/2},$$

$$\xi = \frac{x}{x_0}$$

$$z_0 = \frac{n_0}{4\pi ST_0 k},$$

$$L = \frac{z}{z_0},$$

可得两光场的归一化无量纲演化方程,亦即两光场的一维的非线性薛定谔方程

$$\frac{\partial A_1}{\partial L} = i \frac{\partial^2 A_1}{\partial \xi^2} + i \Delta \mathcal{N}(A_1, A_2) A_1, \quad (9)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial \xi} = i \frac{\partial^2 A_2}{\partial L^2} + i \Delta \mathcal{N}(A_1, A_2) A_2. \quad (10)$$

(9),(10)两方程并不是独立的,存在耦合项 $\Delta \mathcal{N}(A_1, A_2)$,两耦合方程的形式有利于采用分步傅里叶法进行数值模拟.

由于信号光和调控光的光场信息开始是互相独立的,直接考察它们的相互作用比较困难.我们采用如下方法数值模拟研究它们的相互作用:(1)使 A_1, A_2 各自在聚合物中独立传播.(2)将 A_1, A_2 的独立演化光场信息保存下来得到 A_{11}, A_{21} .(3)再使 A_1, A_2 在聚合物中传播,分别考虑 A_{21}, A_{11} 的光强耦合作用,可得到新的光场 A_{12}, A_{22} .(4)再次使 A_1, A_2 在聚合物中传播,分别考虑 A_{22}, A_{12} 的光强耦合作用.又可得到新的光场 A_{13}, A_{23} .如此重复,经过多次循环迭代,最后获得的稳定结果即为我们所需要的解.这样,我们就得到入射光 A_1, A_2 在聚合物中的互相作用情况.实际上,对于垂直传播情况循环 3—5 次就可以得到稳定的结果.我们就以此方案研究 A_2 对 A_1 的横向光调制.

3. 数值模拟结果及分析

设信号光 A_1 是两相干相互作用的孤子,两孤子之间有相位差,本文约定沿着入射方向的左半边比右半边的相位超前,记为 ϕ_{cc} .如 A_1, A_2 是完全相干光, A_2 比 A_1 右半边相位超前,记为 ϕ_{sc} .下面我们考虑 A_1, A_2 在相干、非相干情况下的相互作用.如无特别说明,相位差都是指入射光在入射面处初始相位之差,简称相位差.孤子方程(4)中参数 α, β, γ 分别取 0.1, 0.1, 0.2.解方程(4)就可以得到一亮孤子数值解,以这个数值解作为 A_2 的入射初始条件, A_1 入射初始条件可以是该数值解乘以一个复值常数.其他参数选取如下: $4\pi ST_0 = 10^{-2}, k_0 \approx 10^7 \text{ m}^{-1}, n_0 = 1.5$.可估算得 $x_0 \approx 0.6 \mu\text{m}, z_0 = 10 \mu\text{m}$.

3.1. $\phi_{cc} = 0$ 时的横向光调控

在没有外来因素干扰下, $\phi_{cc} = 0$ 时两同向平行入射的孤子相互作用传播时,两孤子呈周期性的吸引—分开状态.在两孤子相互作用的基础上,再沿两孤子传播方向的垂直方向引入一束调控光,入射位置分别选在 $L = 100, 300, 400$ 处.调控光也是孤子,它的中心最大光强为 20 W/cm^2 ,是信号光中心最大光强的 20 倍.本文改变调控光入射位置、调控光与信号光相位差,研究信号光受调控情况.

A_2 在 $L = 100$ 处入射, $\phi_{sc} = 0, \pi/2, \pi$ 时, A_1 被

调控后的演化如图 2 所示.

图 3、图 4 分别是 A_2 在 $L = 300, 400$ 处入射, A_1 被调控后的演化情况.

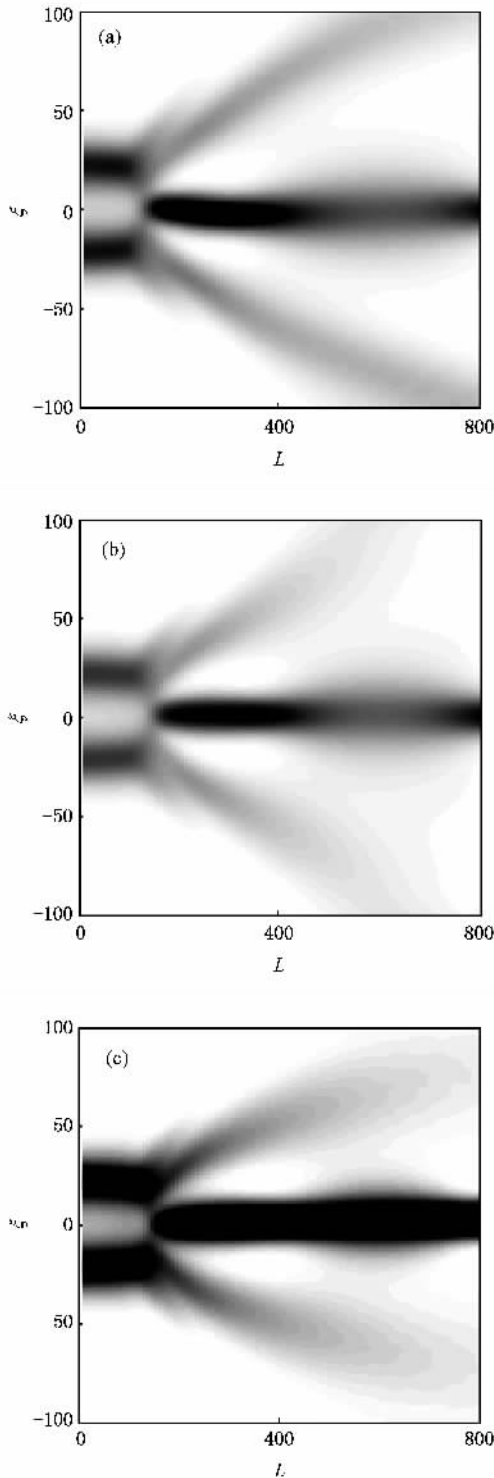


图 2 $\phi_{cc} = 0$ 时, A_1 被 $L = 100$ 处入射的 A_2 调控后的演化
(a) $\phi_{sc} = 0$ (b) $\phi_{sc} = \pi/2$ (c) $\phi_{sc} = \pi$

在图 2—图 4 中, 引入调控光后两相互作用孤

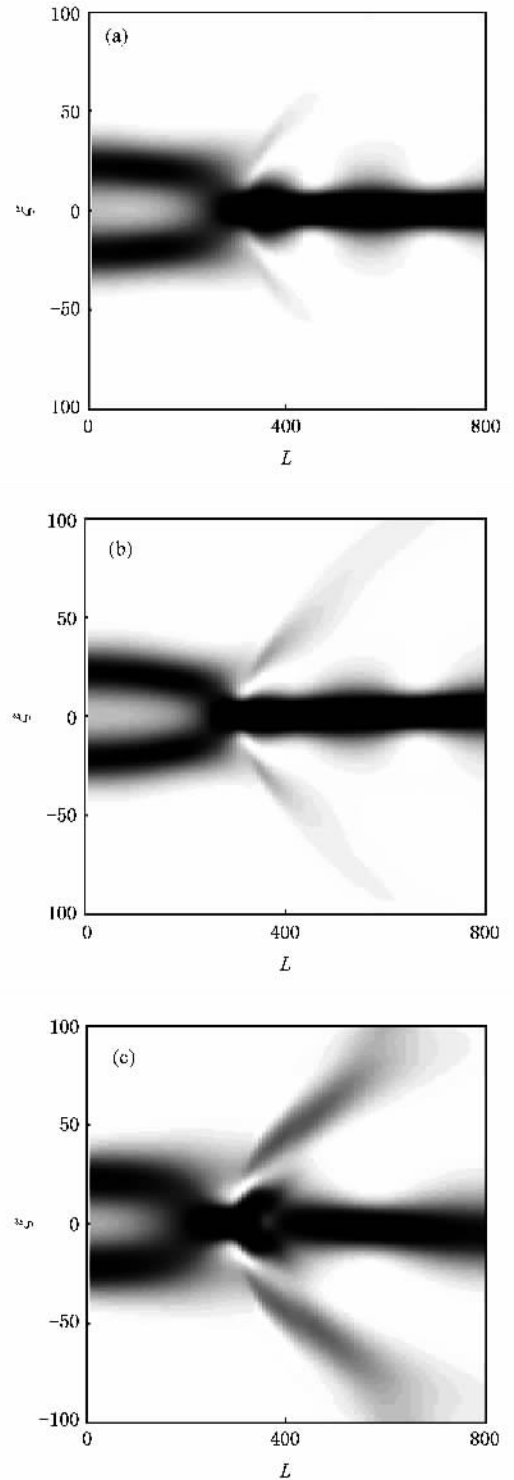


图 3 $\phi_{cc} = 0$ 时, A_1 被 $L = 300$ 处入射的 A_2 调控后的演化
(a) $\phi_{sc} = 0$ (b) $\phi_{sc} = \pi/2$ (c) $\phi_{sc} = \pi$

子原来的传播状态已经被破坏, 信号光受调控而产生光合成、分开等现象, 这有望应用于光控光光合成、光互联、光波导等方面. 调控光在 $L = 100$ 处入射时, 随着 ϕ_{sc} 变大 ($0 \rightarrow \pi$), 两束光合成一束光程度

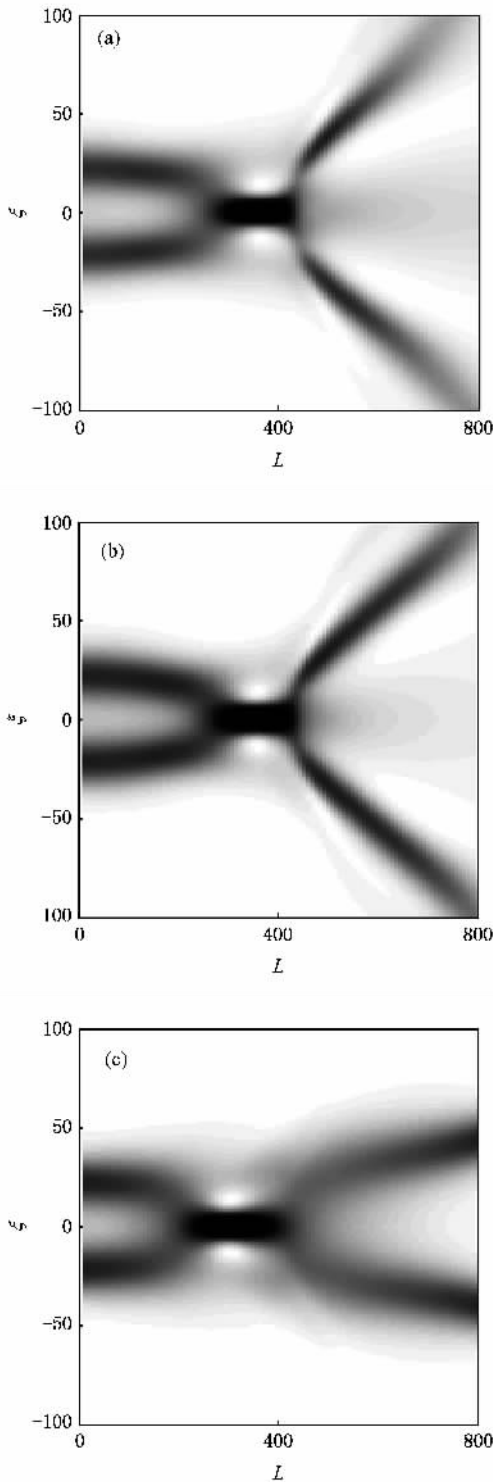


图4 $\phi_{cc} = 0$ 时, A_1 被 $L = 400$ 处入射的 A_2 调控后的演化
(a) $\phi_{sc} = 0$ (b) $\phi_{sc} = \pi/2$ (c) $\phi_{sc} = \pi$

变大, 两旁杂散光减少, 如图 2 所示. 调控光在 $L = 300$ 处入射时, 随着 ϕ_{sc} 变大 ($0 \rightarrow \pi$), 两束光合成一束光但程度变弱, 两旁杂散光增多, 如图 3 所示. 调控光在两相互作用孤子结合部即 $L = 400$ 处入射

时, 被调控的信号光分成两束, 分开程度随着 ϕ_{sc} 变大 ($0 \rightarrow \pi$) 而减小. 较强的调控光与较弱的信号光在交汇处光场相干叠加, 信号光处于一个横向折射率光栅区, 该光栅区折射率分布与相位差密切相关. 如调控光在 $L = 100, 300$ 处入射, 信号光两相互作用的孤子光强分布被展宽而在中间区叠加增强, 信号光两个分量的能量大部分转移到中间而合成一束, 但光栅散射仍造成两旁的杂散光. 如在 $L = 400$ 处调控, 由于此处两相互作用的孤子已合成一束而将要分开, 进入高折射率光栅区后, 信号光被偏折而分开.

3.2. $\phi_{cc} = \pi$ 时的横向光调控

在没有外来因素干扰下, $\phi_{cc} = \pi$ 时两同向平行入射的孤子相互作用时, 两孤子彼此排斥而传播, 但当 A_2 在 $L = 400$ 处入射, 信号光在交汇区受到一个复杂的折射率光栅作用, 信号光被散射. A_1 被调控后的演化如图 5 所示.

3.3. $\phi_{cc} = \pi/2$ 时的横向光调控

在没有外来因素干扰下, $\phi_{cc} = \pi/2$ 时两同向平行入射的孤子相互作用时, 两孤子排斥传播且有能量交换. A_2 在 $L = 400$ 处入射, A_1 被调控后的演化如图 6 所示. 与 $\phi_{cc} = \pi$ 相似, 此时信号光被严重破坏, $\phi_{sc} = 0$ 时信号光散射明显, 随 ϕ_{sc} 变大 ($0 \rightarrow \pi$) 散射略为变缓.

3.4. A_1, A_2 非相干调控

以上是 A_1, A_2 相干情况, 实际上, 方程 (7) (8) 也适用于同频的非相干情况. 下面考虑两光场没有稳定相位差的非相干情况, 此时耦合光强是两光场光强之和.

3.4.1. $\phi_{cc} = 0$ 时的横向光调控

A_2 分别从 $L = 100, 400$ 处入射, A_1 受调控后的演化如图 7 所示.

从图 7 可以看出, 信号光被调控后的演化也会发生明显变化, 两相互作用孤子的传播特性也会被破坏, 但没相干情况严重. 在 $L = 100$ 处调控, 信号光会提前合在一起, 后又会分开, 总体上还会保持周期性的吸引—分开状态的演化规律, 如图 7(a) 所示. 在 $L = 400$ 处调控, 信号光被分开, 如图 7(b) 所示. 在交汇区, 调控光与信号光光强非相干叠加, 信号光受到的不再是折射率光栅的作用, 而是一折射率透镜的作用. 在 $L = 100$ 处调控, 信号光受到凸透

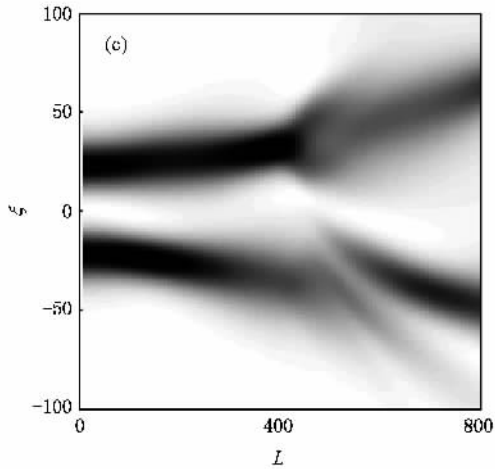
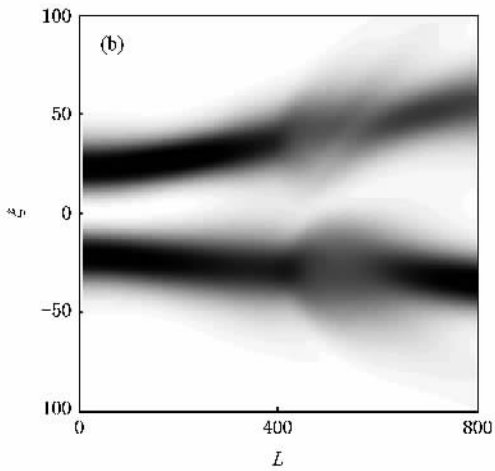
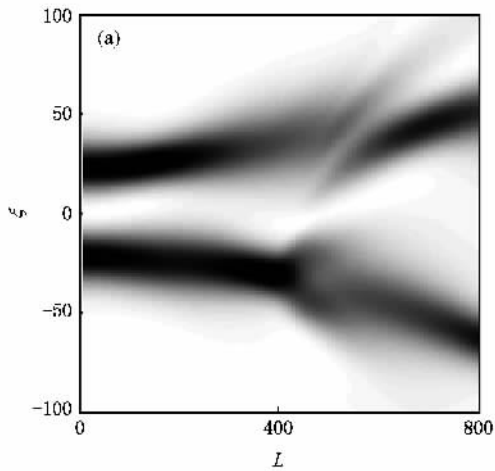


图5 $\phi_{cc} = \pi$ 时, A_1 被 $L = 400$ 处入射的 A_2 调控后的演化
(a) $\phi_{sc} = 0$ (b) $\phi_{sc} = \pi/2$ (c) $\phi_{sc} = \pi$

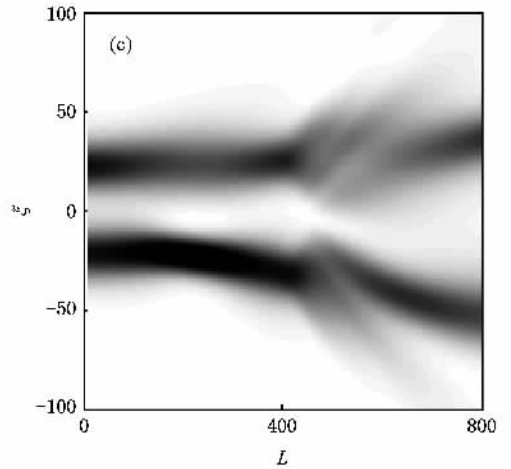
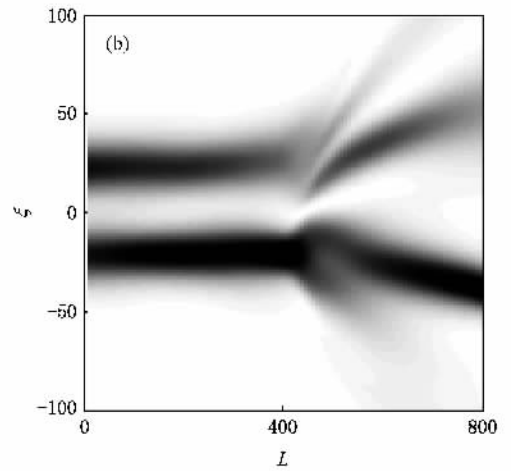
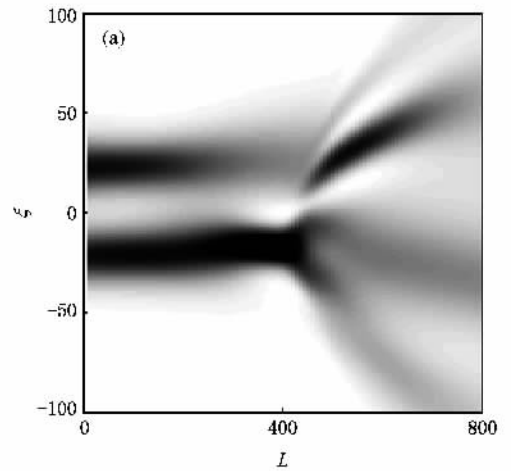


图6 $\phi_{cc} = \pi/2$ 时, A_1 被 $L = 400$ 处入射的 A_2 调控后的演化
(a) $\phi_{sc} = 0$ (b) $\phi_{sc} = \pi/2$ (c) $\phi_{sc} = \pi$

镜的作用会提前合并在一起. 在 $L = 400$ 处调控, 信号光受到凹透镜作用而向两边偏折而分开.

3.4.2. $\phi_{cc} = \pi$ 时的横向光调控

A_2 在 $L = 400$ 处入射, A_1 受调控后的演化如图

8 所示.

图 8 显示了 $\phi_{cc} = \pi$ 时的非相干调控. 此时, 信号光被调控效果不明显, 只在交汇区略被破坏, 但随传播距离增大而恢复到原来状态. 在交汇区, 信号光

受到一个横向折射率透镜的作用,光束略微受影响

而不会改变传播状态.

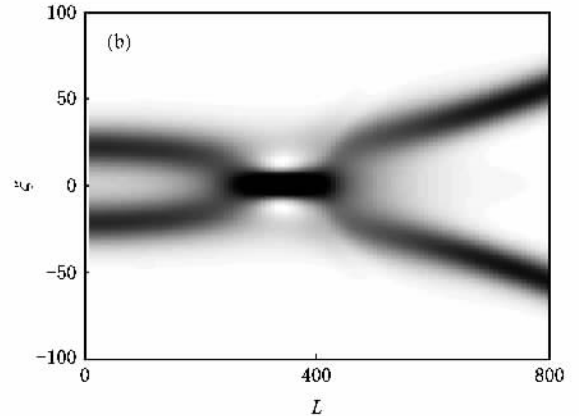
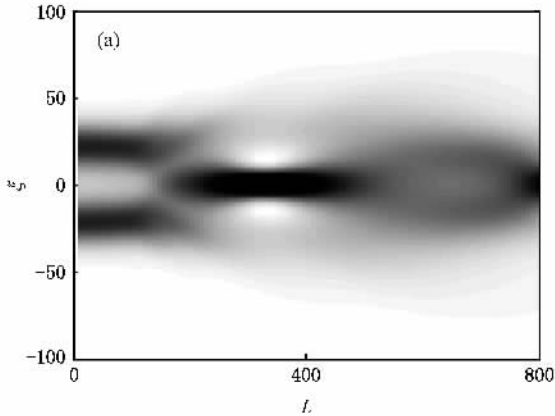


图 7 $\phi_{cc} = 0$ 时, A1 被调控后的演化 (a) A2 在 $L = 100$ 处入射 (b) A2 在 $L = 400$ 处入射

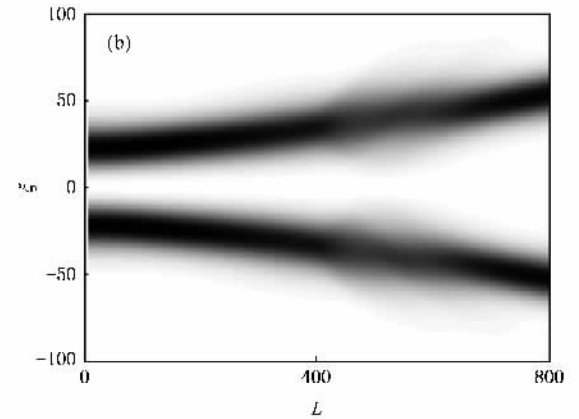
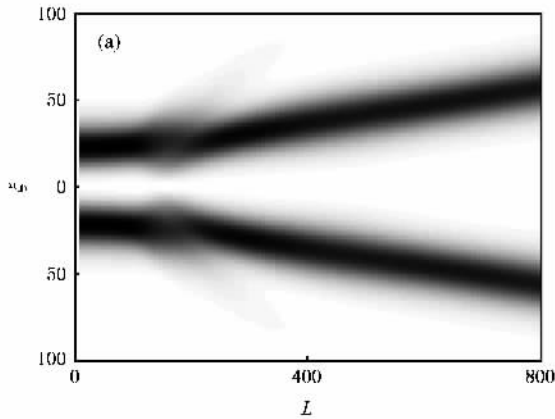


图 8 $\phi_{cc} = \pi$ 时, A1 被调控后的演化 (a) A2 在 $L = 100$ 处入射 (b) A2 在 $L = 400$ 处入射

4. 结 论

本文采用数值法研究了光致异构光学空间孤子对垂直光调控. 信号光是两同向相互作用的孤子, 调控光采用单个孤子. 我们研究了不同相位差的两相互作用孤子被调控光作用后的演化. 被调控后, 两相互作用孤子传播特性被破坏, 信号光会产生合成、分

开等现象. 对相干调控, 信号光演变行为不仅取决于信号光中两个孤子的相位差, 还取决于信号光和调控光的初始相位差以及调控光入射位置. 对非相干调控, 信号光演变行为取决于信号光中两个孤子的相位差及调控光入射的位置. 两者有明显的区别. 这种光学空间孤子的垂直光调控可望应用于光合成、光互联、光波导等方面.

- [1] Segev M , Crosignani B , Yariv A *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
 [2] Duree G C Jr , Shultz J L , Salamo G J *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 533
 [3] She W L , Lee K K , Lee W K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2498

- [4] Segev M , Valley G C , Crosignani B *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
 [5] Chen Y Y , Wang Q , Shi J L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2980 (in Chinese) 陈园园、王 奇、施解龙 2004 物理学报 **53** 2980]

- [6] Lu K Q , Zhao W , Yang Y L *et al* 2006 *Chin. Phys.* **15** 403
- [7] Christostoulides D N , Carvalho M I 1995 *J. Opt. Soc. Am.* B **12** 1628
- [8] Christodoulides D N , Coskun T H , Mitchell M *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5113
- [9] Valley G C , Segev M , Crosignani B *et al* 1994 *Phys. Rev.* A **50** 4457
- [10] Taya M , Bashaw M C , Fejer M M *et al* 1995 *Phys. Rev.* A **52** 3095
- [11] She W L , Wang X S , He G G *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2166 (in Chinese) 余卫龙、王晓生、何国岗等 2001 *物理学报* **50** 2166]
- [12] Hou C F , Pei Y B , Zhou Z X *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 366
- [13] Liu J S , Lu K Q 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1509 (in Chinese) 刘劲松、卢克清 1998 *物理学报* **47** 1509]
- [14] Liu J S , Hao Z H 2003 *Chin. Phys.* **12** 1124
- [15] Hou C F , Li B , Sun X D *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 310
- [16] Wang X S , She W L , Lee W K 2004 *Opt. Lett.* **29** 277
- [17] Wang X S , She W L 2005 *Phys. Rev.* E **71** 026601
- [18] Stegeman G I , Segev M 1999 *Science* **286** 1518
- [19] Ku T S , Shih M F , Sukhorukov A A *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 063904
- [20] Motzek K , Belic M , Richter T *et al* 2005 *Phys. Rev.* E **71** 016610
- [21] Petrovic M , Jovic D , Belic M *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **29** 053901

Perpendicular all-optical control of interactional optical spatical soliton pair^{*}

Li Yang-Gang She Wei-Long[†] Wang Hong-Cheng

(*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology , Sun Yat-Sen University , Guangzhou 510275 , China*)

(Received 11 July 2006 ; revised manuscript received 20 August 2006)

Abstract

In photoisomerization polymer , the perpendicular optical control of the optical spatial soliton interaction is simulated by numerical method. Under control , the properties of two interacting solitons are damaged , the signal beam can give birth to phenomena such as the two beams to join together , or to detach and so on. We also give a physical explanation of the phenomena , that they are determined by the difference in the initial phases of the beams , the incident position of control-beam and so on. The effect of perpendicular optical control of interaction solitons can be applied to optical interlinkage , optical waveguide and so on.

Keywords : optical spatial soliton pair , soliton interaction , perpendicular optical control , photoisomerization

PACC : 4265J , 4265S , 4270J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10374121 , 10574167).

[†] Corresponding author. E-mail : stils02@zsu.edu.cn