

光致异构聚合物中光学空间孤子的垂直全光调控^{*}

黎扬钢 余卫龙[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2006 年 3 月 31 日收到, 2006 年 6 月 11 日收到修改稿)

用数值方法研究了在具有光致异构非线性的聚合物中光学空间孤子的垂直全光调控. 结果表明, 对于调控光和信号光是相干的情况, 被调控的信号光会产生散射甚至坍塌、微偏转等现象, 其作用强弱依赖于两束光的初始相位之差、调控光光强、调控光入射位置等. 这种垂直全光调控效应有望应用于全光开关、光集成等方面.

关键词: 光折变空间孤子, 孤子相互作用, 垂直调控, 光致异构

PACC: 4265J, 4265S, 4270J

1. 引 言

光折变空间孤子的研究已经有十多年了^[1-12], 理论上^[1, 2, 5, 6, 8-12]、实验上^[3, 4, 7]都取得了重要进展. 近年又发现, 在具有光致异构非线性的聚合物中能形成新一类光学空间孤子^[13-15]. 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的^[14]. 有关研究刚刚开始, 许多课题有待进一步深入研究.

光孤子的相互作用是光孤子研究的前沿热点^[16]. 1997 年, Garcia-Quirino 等^[17]研究了光折变晶体 $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ 中相干孤子的平行同向传播相互作用, 实验上发现他们是同相互吸引、异相互排斥的. 非相干的平行同向传播的孤子一般是互相吸引的^[18], 然而互相排斥的现象也被发现了^[19]. 2000 年, Coskun 等^[20]发现非相干的暗孤子可使同向传播的亮光束光强分布变得尖锐, 相干性加强. 2005 年, Ku 等^[21]通过控制同向传播的两亮孤子的相干系数实现对孤子相互作用的控制, 发现改变相干系数可以使两孤子互相吸引或互相排斥. 2003 年, Motzek 等^[22]数值研究了饱和自聚焦非线性介质中光束的对向相互作用, 指出了对向传播和同向传播由于具

有不同的边界条件而导致不同的相互作用. 双光束在自散焦介质中对向传播的聚焦效应也可见报道^[23]. 2005 年, Motzek 等^[24]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. 以上同向、对向相互作用都是在各向异性介质中进行的, 且光的传播方向是一个维度的.

因未极化的光致异构聚合物是各向同性的, 这就容易在两个或两个以上的维度研究光束的相互作用. 本文着眼于两组互相垂直的单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. 信号光在聚合物中独立传播时, 只感受到自身光场诱导的折射率波导的作用. 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垂直全光调控. 就我们所知, 两垂直传播的光孤子相互作用还没见报道. 我们先建立垂直全光调控的模型, 然后采用数值方法研究在相干情况下信号光被调控的情况, 分别研究了 $0, \pi$ 初始相位之差下调控光光强对信号光的调控影响, 讨论了调控光垂直入射位置对信号光的调控影响, 给出了相同调控光光强下不同相位之差与信号光调控的关系曲线, 接着分别研究了不同信号光光强、不同相位之差下信号光的微偏转. 结果表明, 这种垂直全光调控可望应用于全光开关、光集成等方面.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 310374121, 10574167)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: stils02@zsu.edu.cn

2. 理论分析及数值模拟方案

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两种异构体. 顺态(cis 态)异构体和反态(trans 态)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^[13]

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

其中, 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, $\alpha =$

$$\frac{q_{cs}\sigma_c}{q_{cb}\sigma_t^{\parallel} + q_{cb}\sigma_c^b}, \quad \beta = \frac{q_{ts}\sigma_t^{\parallel}}{q_{tb}\sigma_t^b + q_{cb}\sigma_c^b}, \quad \gamma = \frac{1}{(q_{tb}\sigma_t^b + 1)q_{cb}\sigma_c^b},$$

其中 q_{ts} , q_{cs} 分别表示信号光使反态转变成顺态、顺态转变成反态时的量子产率, q_{tb} , q_{cb} 分别表示背景光使反态转变成顺态、顺态转变成反态时的量子产率, σ_t^{\parallel} 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[13]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[13] γ 取 0.2), 折射率改变 Δn 可以为正数, 介质形成自聚焦型透镜, 可以支持光束形成亮孤子. 本文考虑亮孤子情况.

描述光场在介质中传播的一维非线性薛定谔方程为

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

其中 k , k_0 分别是介质中、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)两式代入(2)式, 可得无量纲化的孤子方程

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

其中, $\xi = \frac{x}{x_0}$, $x_0 = (8n_0 k_0^2 \pi S T_0)^{-1/2}$. 令 $z_0 =$

$$\frac{1}{4\pi S T_0 k_0}, \quad L = \frac{z}{z_0}, \quad \Delta N = \frac{\Delta n}{4\pi S T_0} \quad (2) \text{式可以写成归一化无量纲的光场演化方程}$$

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

这就是光场在光致异构非线性的聚合物中的演化方程. 我们采用分步傅里叶法^[25]数值模拟光场的传播演化.

2.2. 垂直传播的两孤子相互作用的数值模拟方案

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.

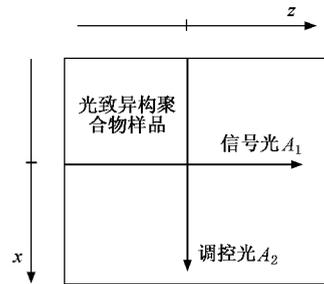


图 1 两光束垂直传播相互作用示意图

图 1 中 A_1 , A_2 分别表示信号光和调控光. A_1 入射位置是固定的, A_2 垂直入射位置可沿 z 轴移动, 光场在边界的反射忽略不计. 从麦克斯韦方程出发, 作慢变振幅近似、旁轴近似处理, 可推导得到描述两垂直光束各自的非线性薛定谔方程. 描述 A_1 的方程

$$\text{为 } \frac{\partial A_1}{\partial L} = i \frac{\partial^2 A_1}{\partial \xi^2} + i \Delta N(A_1, A_2) A_1, \text{ 描述 } A_2 \text{ 的方程则}$$

$$\text{为 } \frac{\partial A_2}{\partial \xi} = i \frac{\partial^2 A_2}{\partial L^2} + i \Delta N(A_1, A_2) A_2. \text{ 这对于采用分步}$$

傅里叶法进行数值模拟是有利的.

由于信号光和调控光的光场信息开始是互相独

立的、互不知道的,直接考察他们的相互作用比较困难.我们采用如下方法数值模拟研究他们的相互作用:

- 1) 让 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) 再让 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) 再次让 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,数值模拟循环 3—5 次就可以得到稳定结果.我们就以此方案研究 A_2 对 A_1 的控制.

3. 数值模拟结果及分析

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上一个复值常数.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 $x_0 \approx 0.6 \mu\text{m}, z_0 = 10 \mu\text{m}$. 考虑 A_1, A_2 在相干情况下的相互作用,如没特别说明,下文所说的 A_1, A_2 的相位差都是指两束光在入射面处初始相位之差,简称相位差.

3.1.1 相位差为 0 时不同光强的光调控

图 2 是 A_1, A_2 相干,相位差为 0,不同调制光强对应的 A_1 的演化, A_2 在 $L = 400$ 处垂直于 A_1 入射,图 3 是没有 A_1 时垂直入射的调控光 A_2 的独立传播.为方便起见,入射调控光峰值光强简记为光强 I_c ,入射信号光峰值光强简记为 I_{cs} .

对于不同的调控光强, A_1 受调控程度明显不同,图 2 中三个图分别对应调控光光强 I_c 为 $1 \text{ W/m}^2, 10 \text{ W/m}^2, 20 \text{ W/m}^2$ 时 A_1 的演化.出射光强分布发生变化,光强分布被展宽, A_1 的原来孤子传播特性被破坏.调控光光强越大,信号光被展宽越明显,被破坏越明显,在 A_1, A_2 交汇处破坏最明显, A_1 离开交汇区后光强分布会逐渐变窄.图 3 是没有 A_1

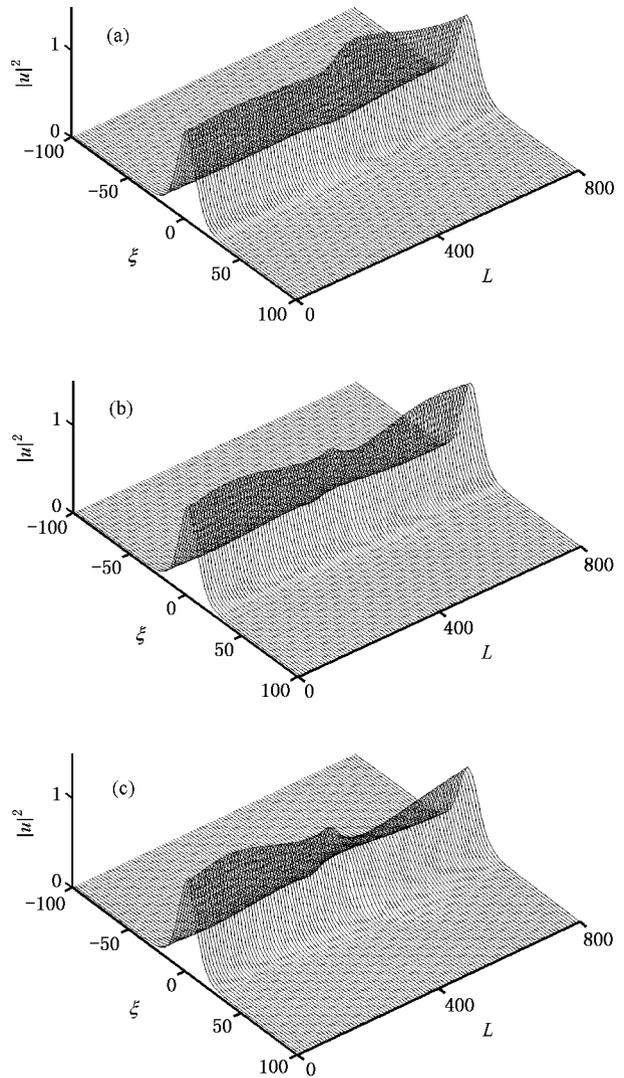


图 2 相位差为 0 时,不同的 A_2 光强 I_c 调控下 A_1 ($I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2$) 的演化 (a) $I_c = 1 \text{ W/m}^2$ (b) $I_c = 10 \text{ W/m}^2$ (c) $I_c = 20 \text{ W/m}^2$

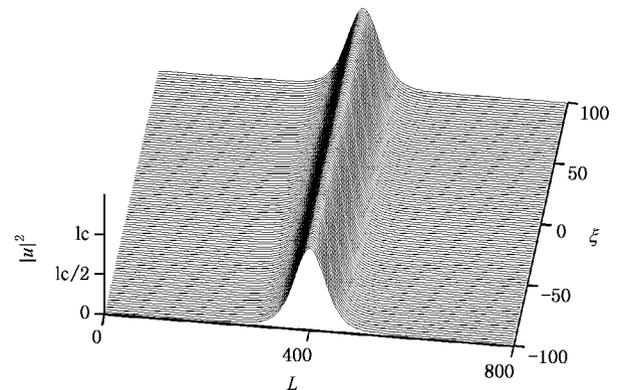


图 3 在 $L = 400$ 处垂直入射的调控光 A_2 的独立传播
时调控光 A_2 的独立传播,下文不给出调控光的演

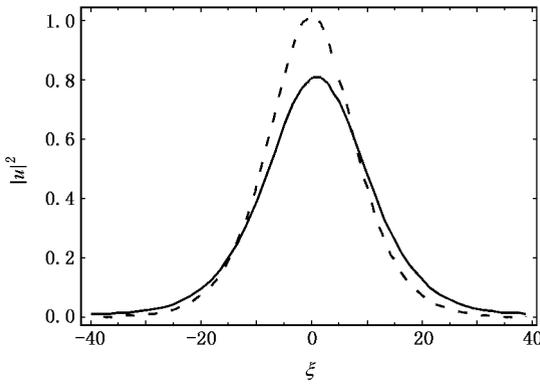


图 4 相位差为 0, $I_c = 10 \text{ W/m}^2$ 时 A_1 ($I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2$) 入射光强分布 (虚线) 和出射光强分布 (实线)

化. 图 2(c) 中 A_1 的入射、出射光强分布如图 4 所示.

3.2. π 相位差时不同光强的光调控

图 5 是相位差为 π , 不同调控光强 I_c 对应的 A_1 的演化, A_2 在 $L = 400$ 处垂直入射.

相位差为 π 时, A_1 原来的孤子传播特性大受破坏, 不同的调控光强下, A_1 出射光强相差甚大. 调控光光强较小时, A_1 光强分布在交汇区明显地被展宽, 但随着传播距离变大, A_1 光强分布又逐渐变窄, 会逐渐恢复入射前状态, 如图 5(a) 所示. 增大入射光强, 如 $I_c = 10 \text{ W/m}^2$, A_1 光强分布极大地被展宽, 出射光被散射, 甚至坍塌, A_1 光强分布不会随着传播距离而恢复入射前状态, 如图 5(b) 所示. 继续增大入射光强, 如 $I_c = 20 \text{ W/m}^2$, 此时 A_1 光强分布极大地被展宽, A_1 被散射但没有坍塌, 明显区别于 $I_c = 10$ 的情况, 但随着传播距离增大, A_1 的光强分布稍有逐渐变窄而恢复入射前状态的趋势, 如图 5(c) 所示. 再继续增大入射光强使 $I_c = 30 \text{ W/m}^2$, A_1 光强分布在交汇区明显地被展宽, 随传播距离增大, 会较快恢复入射前状态, 如图 5(d) 所示. 这表明, 适当光强的调控光可以调控 A_1 的出射光强分布, 如 $I_c = 10 \text{ W/m}^2$ 时, A_1 的出射光基本坍塌, 对应着信号光 A_1 的关闭状态, 而没有 A_2 调控时对应着信号光 A_1 的开通状态, 此现象有望应用于光控光开关.

3.3. 调控光在不同位置入射的光调控

上面调控光垂直入射位置都是在 $L = 400$ 处, 本小节让调控光分别在 $L = 100, 200$ 处垂直入射, 研究信号光的演化. 图 6 是 A_2 在 $L = 100$ 处垂直入射

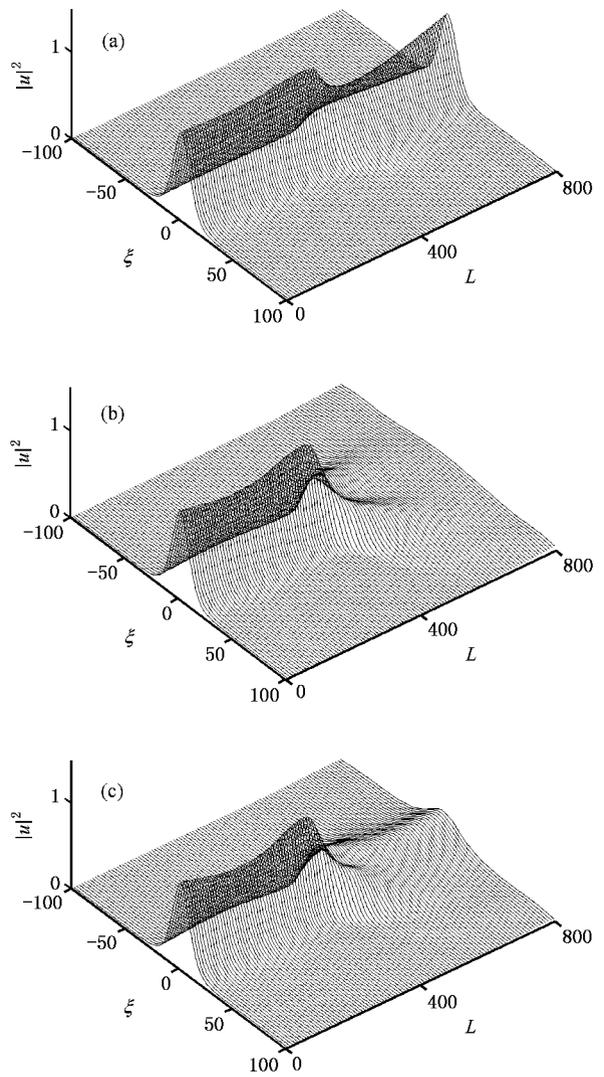


图 5 相位差为 π 时, 不同光强 I_c 的 A_2 在 $L = 400$ 处垂直入射时对应的 A_1 ($I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2$) 的演化 (a) $I_c = 1 \text{ W/m}^2$ (b) $I_c = 10 \text{ W/m}^2$ (c) $I_c = 20 \text{ W/m}^2$ (d) $I_c = 30 \text{ W/m}^2$

时, 不同的 A_1, A_2 入射初始相位之差对应的 A_1 的演化, $I_c = 10 \text{ W/m}^2$.

从图 6 可以看到 0 相位差时, A_1 的出射光基本坍塌; $\frac{\pi}{2}$ 相位差时, A_1 被展宽, 且传播较长一段距离后, 光强空间分布改变较小; π 相位差时, A_1 在交汇区略被展宽, 但很快恢复到入射前状态. 出射光坍塌对应着信号光的关闭状态, 这种坍塌可望应用于光控光开关. 图 7 给出 A_2 在 $L = 200$ 处垂直入射时, 不同的 A_1, A_2 入射初始相位之差对应的 A_1 的演化, $I_c = 10 \text{ W/m}^2$.

从图 7 可以看到, $\frac{\pi}{2}$ 相位差时, A_1 的出射光基

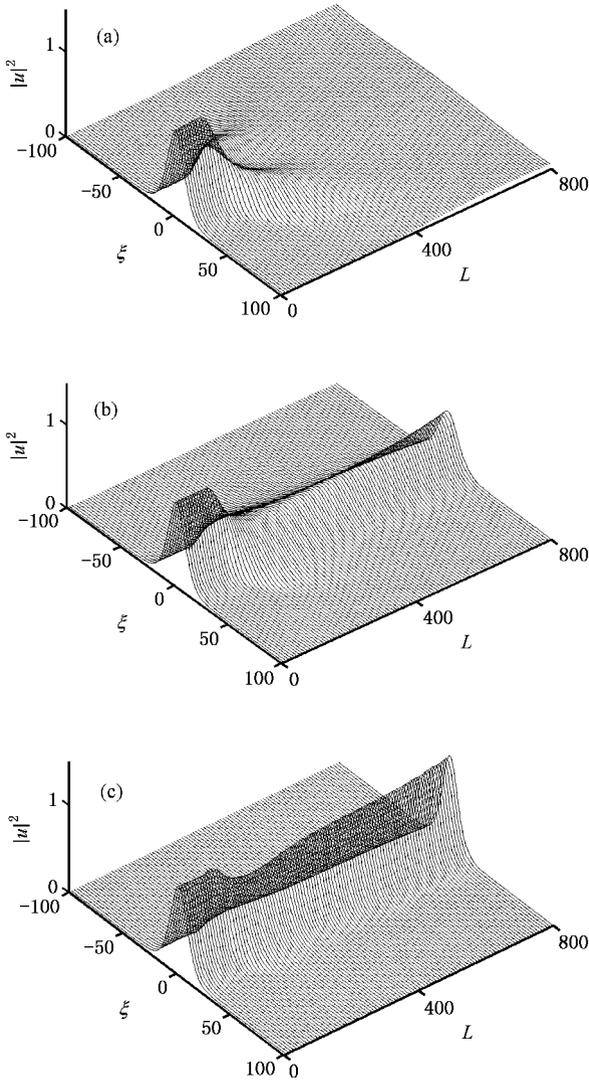


图 6 A_2 在 $L=100$ 处垂直入射时, 不同相位差对应的 $A_1(I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2)$ 的演化 (a) 相位差 (b) $\frac{\pi}{2}$ 相位差 (c) π 相位差

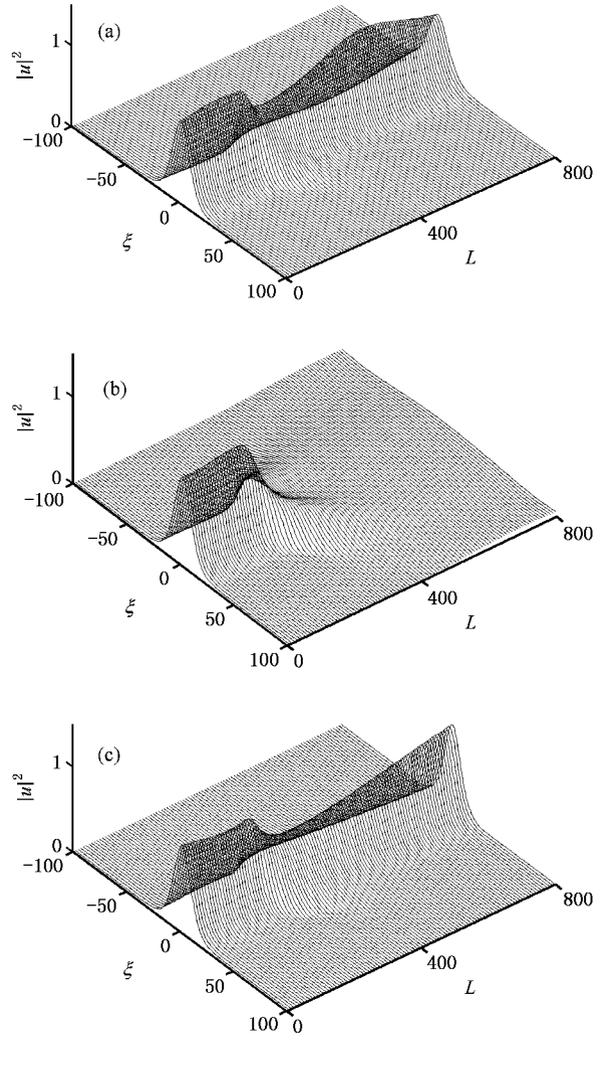


图 7 A_2 在 $L=200$ 处垂直入射时, 不同相位差对应的 $A_1(I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2)$ 的演化 (a) 相位差 (b) $\frac{\pi}{2}$ 相位差 (c) π 相位差

本坍塌;其他情况时, A_1 在交汇区被展宽, 但随着传播距离增大而又会恢复到入射前状态. 图 6, 7 表明, A_2 的不同的入射位置, 对应着不同的相位差使 A_1 的出射光坍塌, 这在实际中有潜在指导意义.

3.4. 不同相位差的光调控

我们定义出射光强比 α 为 A_1 出射光强分布中心最大值与 A_1 入射光强分布中心最大值的比值, 如图 4 中 α 约为 0.8. 下面, 我们考虑 A_2 在 $L=400$ 处垂直入射, $I_c = 10 \text{ W/m}^2$ 时, 不同的相位差对 α 的影响. 图 8 给出 α 和相位差 ($0-\pi$) 的关系.

图 8 显示, 在相位差 $0-0.76\pi$ 内, α 变化很平缓, 在相位差 0.75π 附近 α 迅速变小, 曲线变得陡

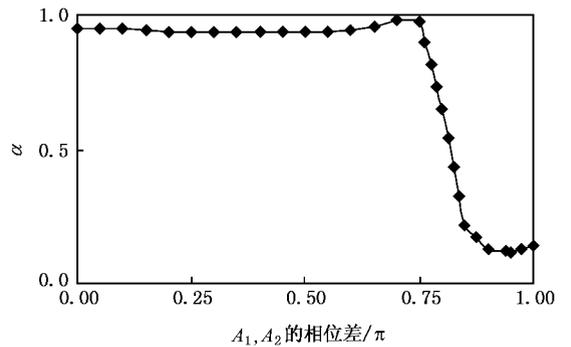


图 8 A_2 在 $L=400$ 处垂直入射, $I_c = 10 \text{ W/m}^2$, $I_{cs} = 1 \text{ W/m}^2$ 时, α 与相位差的关系

峭, 之后 α 恢复平缓而保持较小值. 在 $0-0.75\pi$ 内对应着信号光开通状态, 在 $0.9\pi-\pi$ 内对应着信号

光关闭状态,这在光控光开关方面有潜在的应用.

3.5. 弱光调控强光微偏转

上面我们讨论了控制光光强比信号光强大的情况,如果调控光光强比信号光光强小会怎样呢?数值模拟发现,信号光会偏转.这就是用弱光束调控强光束的偏转.我们固定控制光光强 $I_c = 1 \text{ W/m}^2$,约定沿信号光传播方向的左边、右边偏转的角度分别为负、正,偏转角度记为 β .图 9 给出强的信号光被弱的调控光调控而产生的微偏转角度与信号光光强的关系,此时 A_2 在 $L = 400$ 处垂直入射.

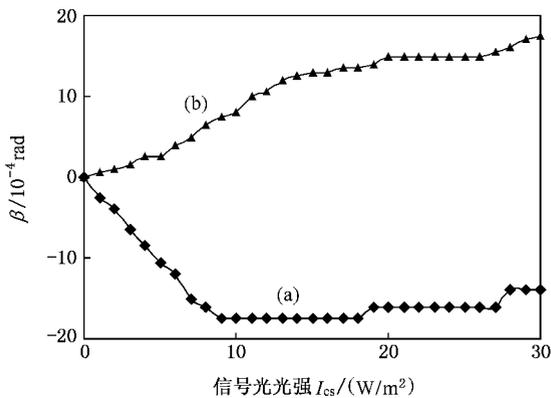


图 9 A_2 在 $L = 400$ 处垂直入射弱光束调控强光束的偏转
(a) 相位差 (b) π 相位差

其他相位差时情况如何呢?图 10 给出 A_2 在 $L = 400$ 处垂直入射,调控光光强 $I_c = 1 \text{ W/m}^2$,信号光光强 $I_{cs} = 10 \text{ W/m}^2$ 时,信号光的微偏转角度和相

位差的关系.

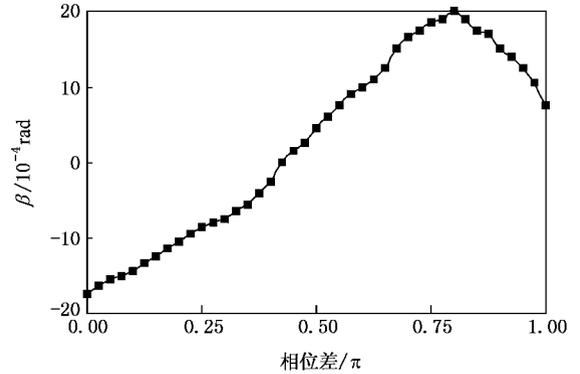


图 10 信号光的微偏转角度 β 和相位差的关系

4. 结 论

采用数值方法研究了互相垂直传播的两光束的相互作用,亦即调控光对信号光的全光垂直调控.讨论了 $0 \sim \pi$ 相位差时调控光光强对信号光的影响,讨论了调控光垂直入射位置对信号光的影响,给出了相同调控光光强下出射光强比 α 和相位差的关系曲线,分别给出了微偏转角度 β 和相位差、信号光光强的关系曲线.结果表明,信号光受调控的性质及强弱可以通过改变相位差、调控光光强、调控光垂直入射位置等实现.这种横向调控具有便于实现、全光可控、响应时间快等优点.对于全光开关、光集成等的深入研究具有重要的指导意义.

[1] Segev M, Crosignani B, Yariv A, Fischer B 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 923
 [2] Segev M, Valley G C, Crosignani B, Diporto P, Yariv A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
 [3] She W L, Lee K K, Lee W K 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3182
 [4] She W L, Lee K K, Lee W K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2498
 [5] Lu K Q, Tang T T 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2070 (in Chinese) [卢克清、唐天同 1999 物理学报 **48** 2070]
 [6] Hou C F, Yuan B H, Sun X D, Xu K B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1969 (in Chinese) [侯春风、袁保红、孙秀冬、许克彬 2000 物理学报 **49** 1969]
 [7] Wang X S, He G G, She W L, Jiang S J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 496 (in Chinese) [王晓生、何国岗、余卫龙、江绍基 2001 物理学报 **60** 496]
 [8] Liu J S, Hao Z H 2003 *Chin. Phys.* **12** 1124
 [9] Fang J P, Zheng C L 2005 *Chin. Phys.* **14** 669

[10] Liu J S, Du Z M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2739 (in Chinese) [刘劲松、杜泽明 2005 物理学报 **54** 2739]
 [11] Huang C F, Guo R, Liu S M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1218 (in Chinese) [黄春福、郭儒、刘思敏 2006 物理学报 **55** 1218]
 [12] Lu K Q, Zhao W, Yang Y L, Zhang M Z, Li J P, Liu H J, Zhang Y P 2006 *Chin. Phys.* **15** 403
 [13] Wang X S, She W L, Lee W K 2004 *Opt. Lett.* **29** 277
 [14] Wang X S, She W L 2005 *Opt. Lett.* **30** 863
 [15] Wang X S, She W L 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026601
 [16] Stegeman G I, Segev M 1999 *Science* **286** 1518
 [17] Garcia-Quirino G S, Ituibe-Castillo M D, Vysloukh V A, Sanchez-Mondragan J J, Stepanov S I, Lugo-Martinez G, Torres-Cisneros G E 1997 *Opt. Lett.* **22** 154
 [18] Shih M, Segev M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1538
 [19] Krolikowski W, Saffman M, Luther-Davies B, Denz C 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3240

- [20] Coskun T H , Grandpierre A G , Christodoulides D N , Segev M 2000 *Opt. Lett.* **25** 826
Chinese] 江秀娟、李华刚、郭 旗、胡 巍 2004 物理学报 **53** 3771]
- [21] Ku T S , Shih M F , Sukhorukov A A , Kivshar Y S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 063904
[24] Motzek K , Belic M , Richter T , Denz C , Desyatnikov A , Jander P , Kaiser F 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016610
- [22] Motzek K , Jander P , Desyatnikov A , Belic M , Denz C , Kaiser F 2003 *Phys. Rev. E* **68** 066611
[25] Li J , Huang D X , Zhang X L 2003 *Opt. Tech&Info.* **16** 9(in Chinese] 李 均、黄德修、张新亮 2003 光电子技术与信息 **16** 9]
- [23] Jiang X J , Li H Z , Guo Q , Hu W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3771(in

Perpendicular all-optical control of optical spatial soliton in photoisomerized polymers^{*}

Li Yang-Gang She Wei-Long[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

(Received 31 March 2006 ; revised manuscript received 11 June 2006)

Abstract

In the photoisomerized polymer , the perpendicular and all-optical control of optical spatial soliton is simulated by numerical method. The results show that if the controlling beam (c-beam) and the signal beam (s-beam) are coherent , the s-beam under control of the c-beam will be dispersed , deflected or even collapse . The interactions depend on the difference of the two beam 's initial phases , c-beam 's intensity and the incident position of c-beam . The effect of perpendicular and all optical control has potential applications in all-optical switching and optical integration .

Keywords : photovoltaic spatial soliton , soliton interaction , perpendicular 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