

文章编号: 0253-2239(2009)08-2264-06

基于双光子异构非线性的非相干耦合孤子族

王红成 彭小兰 陈少文 李洪涛 凌东雄

(东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要 理论研究了基于双光子异构非线性的非相干耦合孤子族的存在性。发现非相干耦合灰孤子族及暗孤子族可以在具有双光子异构非线性的块状聚合物中存在。若各分量成分具有相同的偏振和波长但彼此互不相干,可能形成这种孤子族。用数值方法详细地研究了这种非相干耦合灰孤子族及暗孤子族的存在条件及其特性。非相干耦合孤子族的每一个分量成分具有相同的半高全宽。当这一非相干耦合灰孤子族或暗孤子族在具有双光子光致异构非线性的聚合物中传播时,各分量成分光束都能稳定传播。研究表明,灰孤子族各分量成分具有横向运动速度,但暗孤子族不会在横向上发生移动。当这种非相干耦合孤子族只有两个分量成分时,它们自动退化成灰孤子对或暗孤子对。

关键词 非线性光学; 光学孤子; 折射率改变; 双光子异构

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2264

Incoherently Coupled Soliton Family Supported by Two-Photon Isomerization Nonlinearity

Wang Hongcheng Peng Xiaolan Chen Shaowen Li Hongtao Ling Dongxiong

(College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China)

Abstract A theory is presented to investigate the existence of incoherent coupled soliton family supported by two-photon isomerization nonlinearity. It is found that incoherent coupled gray and dark soliton families can exist in bulk polymers with the two-photon isomerization (TPI) nonlinearity. These soliton families can be established provided that their components have the same polarization and wavelength, and are mutually incoherent. The existing conditions and properties of this kind of incoherent coupled gray and dark soliton families are investigated in detail by numerical method. Each component of an incoherent coupled soliton family has the same full width of half maximum. When this incoherent coupled gray or dark soliton family propagates together, all the components can propagate stably in the polymers with two-photon isomerization nonlinearity. The investigation shows that the components of a gray soliton family have a transverse velocity, while those of dark soliton family don't move in the transverse direction. If there are only two components, incoherent coupled TPI soliton families automatically degenerates to incoherent coupled TPI gray or dark soliton pairs.

Key words nonlinear optics; optical soliton; refractive index change; two-photon isomerization

1 引 言

光致异构是指材料在适当波长的光激发下其结构发生变化进而引起折射率发生改变的过程。目前这种非线性^[1]已广泛应用于光储存、全息光记录及全光开关等方面^[2~5]。最近,人们又从理论和实验上证明了在单光子光致异构非线性聚合物中可以形成光学空间孤子^[6,7]。与其他类型的光学空间孤

子^[8~12]不同,这种光学孤子的形成是由于聚合物材料在具有一定光强分布的激光光束的激发下因光致异构发生了结构变化,从而在这种聚合物材料中形成了一个依赖于光束光强分布的折射率改变。当这一折射率改变对光束的约束作用与光的自然衍射相平衡时,便形成了光致异构孤子。原则上,所有由单光子过程引起的线性和非线性效应都可以用双光子

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2008-12-05

基金项目: 东莞市科技计划项目(2007108101013)资助项目。

作者简介: 王红成(1981-),男,讲师,博士,主要从事光学空间孤子及其应用方面的研究。E-mail: hc_wang@126.com

过程^[13~17]来产生。也就是说,双光子光致异构非线性应也可以支持光学空间孤子。在双光子光致异构过程中,光束的有效吸收与光强的平方成正比^[13,14]。非线性介质折射率改变依赖于光强的平方。人们已经发现这种平方关系可以使得全息微加工、3D 光学储存^[15,16]及双光子荧光成像等方面的空间分辨率得以很大程度的提高。

近年来,非相干耦合光学空间孤子对和光学空间孤子族引起了人们的广泛关注。Christodoulides 等^[18]从理论上指出,两束偏振方向和波长都相同的共线传播的互不相干光束可在有外加电场的非光伏光折变晶体中形成屏蔽孤子对。Chen 等^[19,20]在铌酸锶钡(SBN)光折变晶体中观测到了上述非相干耦合亮-亮、亮-暗及暗-暗屏蔽孤子对。侯春风等人研究了有外加电场的非光伏光折变晶体中空间孤子的非相干耦合,预言了非相干耦合亮-亮、暗-暗^[21]及灰-灰^[22]屏蔽光伏孤子对的存在。他们又证明了在光伏光折变晶体中还存在着非相干耦合亮-暗屏蔽光伏孤子对^[23]。另外,卢克清等人也对有偏压的光折变晶体中的亮、暗、灰孤子族及低振幅孤子对进行了详细的研究^[24~26]。本文将从基于双光子光致异构的微观机制出发,推导出双光子光致异构非线性折射率改变的表达式,并分析讨论这种双光子光致异构非线性介质中非相干耦合灰孤子族及暗孤子族的存在性。

2 光束在双光子光致异构聚合物中的演化方程

为了研究双光子异构非线性聚合物中非相干耦合空间孤子族的存在性,考虑在聚合物中沿着 z 轴传播的 N 束彼此不相干的线偏振光束,它们具有相同的光波频率和传播方向,且其偏振方向也相同。通常可以将入射光场表达为如下形式: $\mathbf{E}_1 = i\mathbf{p}_1(x, z)\exp(-ikz)$, $\mathbf{E}_2 = i\mathbf{p}_2(x, z)\exp(-ikz)$, \dots , $\mathbf{E}_N = i\mathbf{p}_N(x, z)\exp(-ikz)$, 其中 $k = k_0 n_0$, n_0 为本底折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空中的光波长。 i 代表 x 方向上的单位矢量。这 N 束信号光的稳态传输方程可以写为^[21]

$$i \frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 A_j}{\partial x^2} - \frac{k}{2n} \Delta n A_j = 0, \quad (j = 1, \dots, N). \quad (1)$$

(1)式中 Δn 为由双光子诱导的折射率改变,它与晶体内总的光强分布有关。由于这 N 束入射光束是互不相干的,因此晶体内总光强等于 N 束入射

光光强之和,即 $I(x, z) = I_1(x, z) + I_2(x, z) + \dots + I_N(x, z)$ 。一般地,偶氮苯衍生物等光化学分子有两个几何异构体,即顺态(Cis)和反态(Trans)。偶氮分子的反态异构体可以认为是一维棒状分子,而顺态异构体可以认为是各向同性的。异构反应为这两种异构体之间的光诱导或热诱导转换(如图 1 所示)。在合适光波长、合适强度的激光光束照射下,偶氮苯聚合物就有可能发生双光子光致异构。在每激发一个分子的过程中,材料要同时吸收两个相同频率的光子,其跃迁几率正比于激光光强的平方(I^2)^[13,14]。

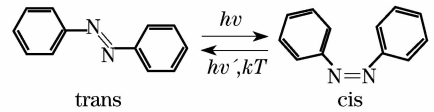


图 1 光致顺反异构示意图

Fig. 1 Sketch of cis-trans photoisomerization

因此,基于双光子角烧孔模型,双光子诱导的光致异构过程可以用下式描述:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{5}{2} q_T \sigma_T I_s^2 T \cos^4 \theta + \frac{5}{2} q_C \sigma_C I_s^2 \cdot (T - T_0) + K_C (T - T_0). \quad (2)$$

由于每激发一个分子,需要吸收两个光子,因此(2)式中引入了一个 $1/2$ 的因子,而因子 5 的引入是因为双光子吸收的吸收截面是在溶液中测量得到的吸收截面的 5 倍^[14]。双光子角烧孔体现在跃迁几率与 $\cos^4 \theta$ 成正比的关系上^[13]。这里 T 和 T_0 分别为线偏振光照时和无光照情况下的 Trans 态分子的方位角密度, θ 为线偏振信号光的电场方向与 Trans 态分子轴的夹角, q_T 和 q_C 分别为信号光激发的 Trans-Cis 异构和 Cis-Trans 异构的量子产率, σ_T 与 σ_C 分别为信号光引起的 Trans-Cis 和 Cis-Trans 异构的吸收截面张量元, K_C 为热致 Cis-Trans 异构速率。(2)式右边第一项表征信号光激发的 Trans-Cis 异构,第二项表征信号光激发的 Cis-Trans 异构,第三项表征热导致的 Cis-Trans 弛豫。

当光束持续激发使得异构过程达到稳态时,布居在反态的分子总数为恒量,即 $dT/dt = 0$, 有

$$T = T_0 \frac{5I^2 + 2}{5\beta I^2 \cos^4 \theta + 5I^2 + 2}, \quad (3)$$

其中 $I = I_s/I_D$, $I_D = K_C/(q_C \sigma_C)$, $\beta = (q_T \sigma_T)/(q_C \sigma_C)$ 。 β 依赖于光波长和材料。例如,在分散红掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA 聚合物中,变化光波长可以使得 β 从 0.2 变化到 1.5^[27]。

在这种非线性作用下,由信号光束引起的聚合

物材料的折射率改变^[6]为

$$\Delta n = S \int (T - T_0) \cos^2 \theta d\Omega, \quad (4)$$

其中 Ω 为方位角, S 为依赖于材料和波长的参数。

将(3)式代入(4)式,得

$$\Delta n = 2\pi S T_0 f(I), \quad (5)$$

其中

$$f(I) = \frac{(2 + 5I^2)^{3/4}}{\sqrt{2}(5\beta I^2)^{3/4}} \left\{ \arctan \left[1 + \frac{\beta^{1/4} \sqrt{2I}}{(2/5 + I^2)^{1/4}} \right] - \arctan \left[1 - \frac{\beta^{1/4} \sqrt{2I}}{(2/5 + I^2)^{1/4}} \right] \right\} + \frac{1}{2} \ln \frac{(2 + 5I^2)^{1/2} - \sqrt{2I}(5\beta)^{1/4} (2 + 5I^2)^{1/4} + (5\beta)^{1/2} I}{(2 + 5I^2)^{1/2} + \sqrt{2I}(5\beta)^{1/4} (2 + 5I^2)^{1/4} + (5\beta)^{1/2} I} - \frac{2}{3}. \quad (6)$$

由(6)式可以得出 β 取不同值时函数 $f(I)$ 随光强 I 的变化关系如图 2 所示。可以看出, 折射率改变 Δn 是可饱和的, 它随光强 I 单调递减, 而且, 饱和值 $|\Delta n|$ 随着 β 的增大而增大。因此, 在双光子光致异构非线性聚合物中, 形成灰孤子族及暗孤子族是可能的^[28]。每一个灰孤子族或暗孤子族由 $N(N \geq 1)$ 束灰光束或暗光束组成。这些光束具有对称或反对称的光强分布, 并镶嵌在一个均匀的暗背景中。值得说明的是, 当这种非相干耦合孤子族只有两个分量成分时, 它们自动退化到耦合灰孤子对或耦合暗孤子对的情况; 当 $N=1$ 时, 这一孤子族自动变为双光子异构孤子。为了方便起见, 将(1)式无量纲化, 并将(5)式代入(1)式, 可以建立起孤子光束在聚合物中传输的无量纲包络演化方程, 为

$$i \frac{\partial U_j(s, \xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 U_j}{\partial s^2} + f\left(\sum_{k=1}^N |U_k|^2\right) U_j = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

其中无量纲坐标 $s = x/x_0$, $\xi = z/(2kx_0^2)$, $x_0 = (4n_0 k_0^2 \pi S T_0)^{-1/2}$, $U = A/\sqrt{I_D}$, x_0 为任意大小的空间宽度, $U_j(s, \xi)$ 为第 j 束光的无量纲化光场分布。一般地, $n_0 \approx 1.5$, $S T_0$ 的数值约为 1.3×10^{-2} , 这样可以计算得 Δn 的数值大约为 10^{-3} 量级。选择钛宝石激光器发出的波长为 785 nm 的激光为信号光, 则有 $x_0 = 0.25 \mu\text{m}$ 。

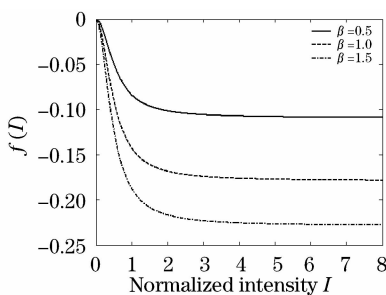


图 2 β 取不同值时 $f(I)$ 随光强 I 的变化

Fig. 2 $f(I)$ as a function of I for different values of β

3 非相干耦合灰孤子族及暗孤子族

在考虑其灰孤子族解之前, 将(7)式做伽利略变换。采用类似于参考文献[29]的做法, 引入如下变换

$$U_j(s, \xi) = u_j(\eta, \zeta) \exp(i v \eta / 2) \exp(i v^2 \zeta / 4), \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (8)$$

及移动坐标 $\eta = s - v\xi$, $\zeta = \xi$ 后, 则 $u(\eta, \zeta)$ 满足

$$i \frac{\partial u_j(\eta, \zeta)}{\partial \zeta} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial \eta^2} + f\left(\sum_{k=1}^N |u_k|^2\right) u_j = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (9)$$

在这一新的运动坐标系中, v 为双光子光致异构非相干耦合灰孤子族的无量纲横向速度。显然, 这一变换具有一一对应关系, 所以(9)式的任意解都是方程(1)的解, 反之亦然。

假设非相干耦合灰孤子族的每一分量都具有如下形式的解 $u_j = c_j \rho^{1/2} y(\eta) \exp[i(\mu \zeta + J \int_0^\eta y(t)^{-2} dt)]$, 其中 ρ 为孤子在无穷远处的光强, J 为待定的实常数, 且 $c_j^2 = |u_j|^2 / \sum_{k=1}^N |u_k|^2$ 应满足如下归一关系:

$\sum_{j=1}^N c_j^2 = 1$ 。由于空间灰孤子的相位在 η 或 $s \rightarrow \pm \infty$ 时应为常数, 利用这一关系可以很方便地计算出常数 J 的值。显然, 要求 $J = -v/2$, 这样函数 $U(s, \xi)$ 现在可以写为

$$U_j(s, \xi) = c_j \rho^{1/2} y(\eta) \cdot \exp\left\{i(\mu + v^2/4)\zeta + i \frac{v}{2} \left[\eta - \int_0^\eta y^{-2}(\eta') d\eta'\right]\right\}, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

其中 $\mu + v^2/4$ 为传播常数。从(9)式可以推导出 $y(\eta)$ 所满足的方程为

$$\frac{\partial^2 y(\eta)}{\partial \eta^2} - \frac{J^2}{y(\eta)^3} = y(\eta) [\mu - f(\rho y^2)]. \quad (11)$$

假定无量纲电场满足边界条件: $y(0) = m^{1/2}$, $y'(0) = 0$, $y(\infty) = 1$, $y'(\infty) = 0$, 和 $y''(\infty) = 0$, 其

中灰度 m 应该满足 $0 \leq m < 1$ 。从(11)式可以推导出如下方程：

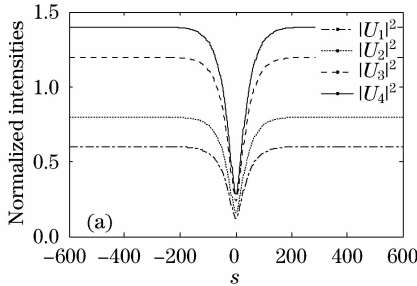
$$(y')^2 = \mu y^2 - \frac{J^2}{y^2} - \mu + J^2 - \frac{1}{\rho} \int_{\rho}^{\omega^2} f(t) dt, \quad (12)$$

$$v = -2J =$$

$$2 \left[-\frac{m}{1-m} f(\rho) + \frac{m}{\rho(m-1)^2} \int_{\rho}^{\rho} f(t) dt \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$\mu = \frac{1}{1-m} f(\rho) - \frac{m}{\rho(m-1)^2} \int_{\rho}^{\rho} f(t) dt. \quad (14)$$

显然,如果 $m \neq 0$,则 J 和 v 也不为 0,耦合灰孤子族各成分光束的相位不会象亮孤子族一样在横向方向上为恒定的常数,而是具有 $\varphi(\eta) = \frac{v}{2} \left[\eta - \int_0^{\eta} y^{-2}(\eta') d\eta' \right]$ 这一形式分布。(12)式没有解析解,因此只能通过数值方法求得。利用(13)式,(14)式,数值积分(12)式,可以获得 $y(\eta)$ 的分布,从



而可以得到双光子光致异构非相干耦合灰孤子族各个成分的光强分布。图 3(a)给出了 $\rho=4, m=0.2, \beta=0.2$ 时含有 4 个成分分量 ($c_1^2=0.15, c_2^2=0.2, c_3^2=0.3, c_4^2=0.35$) 的双光子异构非相干耦合灰孤子族的强度分布曲线。计算结果表明,这一灰孤子族的各个成分光束都具有相同的孤子半高宽,约为 $71.6x_0$ (约 $17.9 \mu\text{m}$)。也有相同的相位分布,如图 3(b)所示。在 $s \rightarrow \pm \infty$ 时,其相位总是趋于一个定值。这一非相干耦合灰孤子族在具有双光子异构非线性的聚合物中能稳定传播,如图 4 所示。从图 4 可以看出,各分量成分光束都具有相同大小的横向移动速度,在传播了 5000 个无量纲化的纵向长度 (约 5 mm) 后,它们向 x 轴的正方向移动了 $298x_0$ (约 $72.3 \mu\text{m}$)。

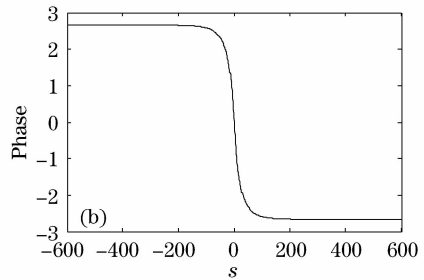


图 3 当 $\rho=4, m=0.2, \beta=0.2$ 时,基于双光子异构非线性的非相干耦合灰孤子族的四个分量成分 ($c_1^2=0.15, c_2^2=0.2, c_3^2=0.3$ 及 $c_4^2=0.35$) 的无量纲化强度分布(a);相应的相位分布(b)

Fig. 3 Normalized intensity profiles of the four components ($c_1^2=0.15, c_2^2=0.2, c_3^2=0.3$, and $c_4^2=0.35$) of an incoherently coupled gray soliton family supported by two-photon isomerization when $\rho=4, m=0.2$, and $\beta=0.2$ (a); the associated phase profiles (b)

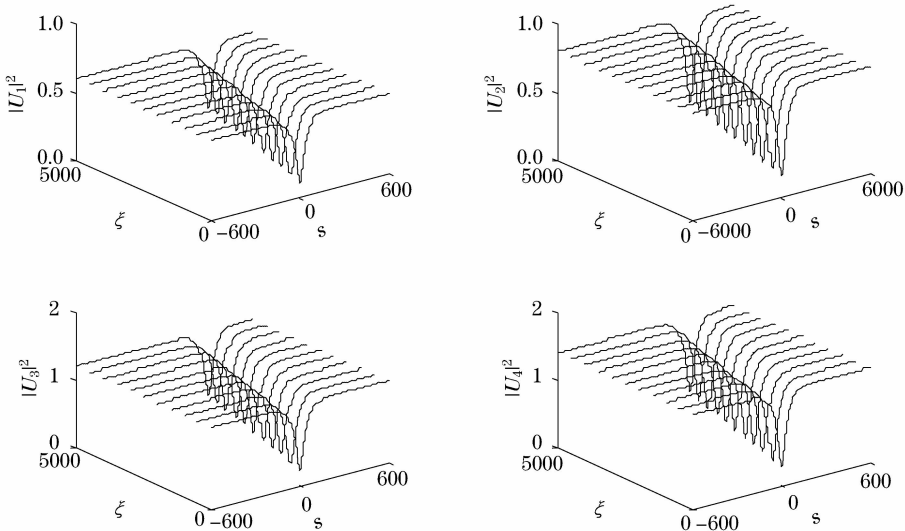


图 4 非相干耦合灰孤子族在具有双光子异构非线性聚合物中的稳定传播

Fig. 4 Stable propagation of the incoherently coupled gray soliton family in a polymer with two-photon isomerization nonlinearity

下面证明双光子异构非线性也能支持非相干耦合暗孤子族,这一暗孤子族由 N 束具有同偏振、同波长的暗光束组成,各分量的光强应满足如下边界条件: $y(0)=0, y^2(s \rightarrow \pm \infty)=1$,以及 $y(s)$ 在无穷远的各阶导数都为 0。这与灰孤子族各分量所满足的边界条件有诸多类似之处,其光强形式分布也有类似之处。因此,可以令耦合灰孤子族解中的灰度 m 趋于 0,所求得之渐进解即为非相干耦合暗孤子族的解。也就是说,非相干耦合双光子异构暗孤子族的存在性可以放在灰孤子族的研究中一起研究。在(12)式~(14)式中,令 $m \rightarrow 0$ 得

$$\partial^2 y(s)/\partial s^2 = y[\mu - f(y^2)], \quad (15)$$

$$v = 0, \quad (16)$$

$$\mu = f(\rho). \quad (17)$$

显然,无量纲光场 $y(s)$ 的分布可以通过数值积分(15)式来求得。图 5 给出了 $\rho=9, \beta=0.2$ 时含有 4 个成分分量的双光子异构非相干耦合暗孤子族的强度分布曲线。计算表明每一个分量成分都有相同的半峰全宽,为 $51.3x_0$ (约 $12.8 \mu\text{m}$)。一起在具有双

光子异构非线性的聚合物中传播时,由于它们共同引起折射率发生改变,能稳定地沿 z 轴传播,如图 6 所示。

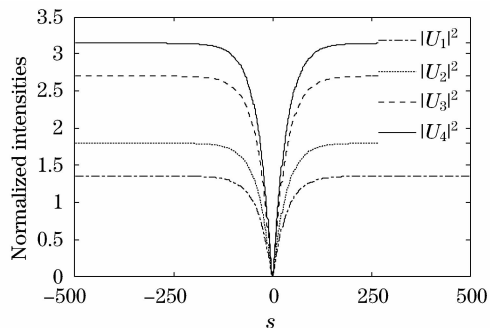


图 5 当 $\rho=9, \beta=0.2$ 时,基于双光子异构非线性的非相干耦合暗孤子族的四个分量成分 ($c_1^2=0.15, c_2^2=0.2, c_3^2=0.3$ 和 $c_4^2=0.35$) 的无量纲化强度分布
Fig. 5 Normalized intensity profiles of the four components ($c_1^2=0.15, c_2^2=0.2, c_3^2=0.3$, and $c_4^2=0.35$) of an incoherently coupled dark soliton family supported by two-photon isomerization when $\rho=9, \beta=0.2$

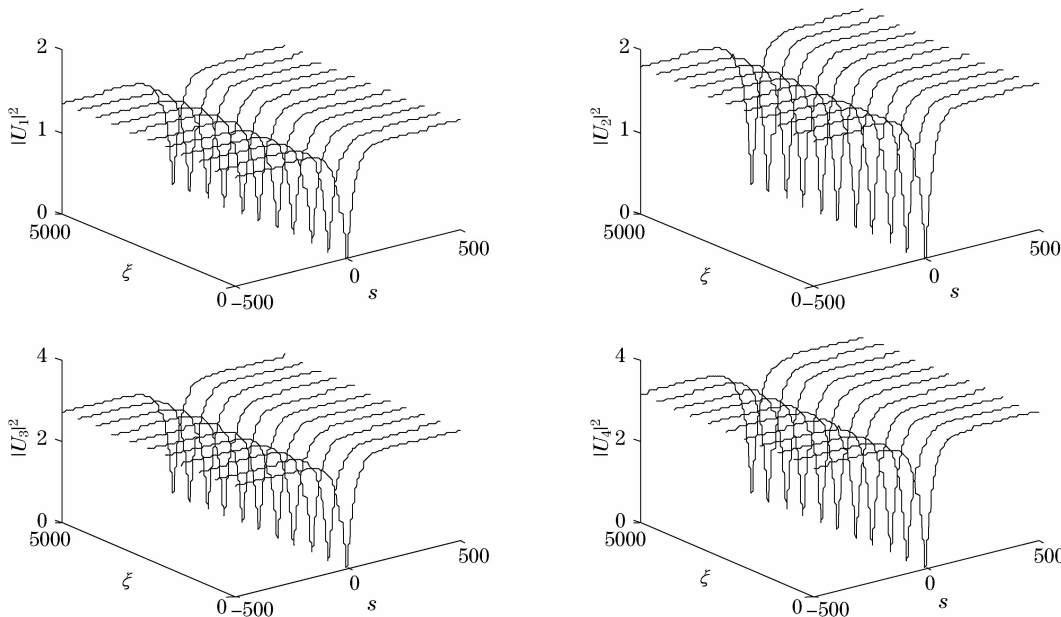


图 6 当 $\rho=9, \beta=0.2$ 时非相干耦合暗孤子族在具有双光子异构非线性聚合物中的稳定传播

Fig. 6 Stable propagation of the incoherently coupled dark soliton family in a polymer with two-photon isomerization nonlinearity when $\rho=9, \beta=0.2$

4 结 论

对基于双光子光致异构非线性的非相干耦合孤子族的存在性进行了研究,证明了多束同偏振、同波长、互不相干的激光光束可以在具有双光子光致异构非线性的有机聚合物中形成聚合物孤子族。研究

了这种非线性聚合物中灰孤子族及暗孤子的存在条件及其特性。当这一灰孤子族在具有双光子光致异构非线性的聚合物中传播时,各分量成分光束在他们共同引起的折射率改变的作用下都能以孤子状态稳定地传播。当这种非相干耦合孤子族只有两个分

量成分时,它们自动退化到耦合灰孤子对或耦合暗孤子对的情况。

参 考 文 献

- Z. Sekkat, W. Knoll. Photoreactive Organic Thin Films[M]. USA: Academic Press, 2002
- A. Natansohn, P. Rochon. Photoinduced motions in azo-containing polymers[J]. *Chem. Rev.*, 2002, **102**(11):4139~4175
- S. Xie, A. Natansohn, P. Rochon. Recent developments in aromatic azo polymers research[J]. *Chem. Mater.*, 1993, **5**(4):403~411
- Luo Duanbin, She Weilong, Wu Shuizhu *et al.* Influence of doping different azo chromophores on the all-optical switching effect of the polymer films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1073~1078
罗殿斌, 余卫龙, 吴水珠 等. 不同生色团对聚合物薄膜全光开关效应的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):1073~1078
- Yang Jianjun, Zhou Jingli, Wang Keyi *et al.* Influence of silver-doped nanoparticles on photo-induced isomerization of azo polymer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):119~123
杨建军, 周京利, 王克逸 等. 掺杂 Ag 纳米粒子对偶氮聚合物光致异构效应的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):119~123
- X. S. Wang, W. L. She. Spontaneous one-and two-dimensional optical spatial solitons supported by photoisomerization nonlinearity in a bulk polymer[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(2):026601-1
- S. Bian, M. G. Kuzyk. Dark spatial solitons in bulk azo-dyed polymer using photoinduced molecular reorientation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7):1104~1106
- Zhong Weiping, Yi Lin. Influence of linear focusing and defocusing effects on interaction between spatial solitons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):960~964
钟卫平, 易林. 线性聚焦和线性散焦效应对空间光孤子间相互作用的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):960~964
- Shen Yan, Zhang Guoquan, Xu Jingjun *et al.* Dynamic behaviour of open-circuit photovoltaic spatial solitons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):528~533
申岩, 张国权, 许京军 等. 开路光伏空间孤子的动态行为[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):528~533
- Liu Yajie, Feng Qiyuan. Self-consistent multimode gaussian soliton solution in logarithmically saturable nonlinear medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10):1989~1993
刘雅洁, 冯启元. 对数饱和非线性介质中的自洽多模高斯孤子解[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10):1989~1993
- Dong Liangwei, Ma Lihong, Wang Hui. Self-bending effect of spatial soliton in photorefractive medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1485~1489
董亮伟, 马利红, 王辉. 光折变介质中空间光孤子自弯曲现象研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1485~1489
- Zheng Hongjun, Liu Shanliang, Tian Zhen *et al.* Effects of raman amplification on propagation characteristics of the soliton[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):861~866
郑宏军, 刘山亮, 田振 等. 拉曼放大对孤子传输特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):861~866
- H. Ishitobi, Z. Sekkat, S. Kawata. Photo-orientation by multiphoton photoselection[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(5):868~873
- Z. Sekkat. Isomeric orientation by two-photon excitation: a theoretical study[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6):291~303
- M. Maeda, H. Ishitobi, Z. Sekkat *et al.* Polarization storage by nonlinear orientational hole burning in azo dye-containing polymer films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(3):351~353
- Wei Zhenqian, Fei Haosheng, Bao Xinxian *et al.* Two-photon image storage of azo dye doped polymer films[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8):1082~1087
魏振乾, 费浩生, 鲍信先 等. 偶氮基染料掺杂薄膜的双光子图像储存[J]. *光学学报*, 1995, **15**(8):1082~1087
- Zhang Yu, Hou Chunfeng, Sun Xiudong. Temperature effects on the photovoltaic spatial solitons in two-photon photorefractive media[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):694~697
张宇, 侯春风, 孙秀冬. 温度对双光子光折变介质中光伏孤子特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):694~697
- Christodoulides D. N., Singh S. R., Carvalho M. L. Incoherently coupled soliton pairs in biased photorefractive crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(13):1763~1765
- Z. Chen, M. Segev, T. H. Coskun *et al.* Observation of incoherently coupled photorefractive spatial soliton pairs[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(8):1436~1438
- Z. Chen, M. Segev, T. H. Coskun *et al.* Coupled photorefractive spatial-soliton pairs[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(11):3066~3077
- C. F. Hou, B. Li, X. D. Sun *et al.* Incoherently coupled screening-photovoltaic soliton families in biased photovoltaic photorefractive crystals[J]. *Chin. Phys.*, 2001, **10**(4):310~313
- C. Hou, Z. Zhou, X. Sun *et al.* Incoherently coupled grey-grey screening-photovoltaic soliton pairs in biased photovoltaic-photorefractive crystals[J]. *Optik*, 2001, **112**(1):17~20
- C. Hou, Y. Pei, Z. Zhou *et al.* Bright-dark incoherently coupled photovoltaic soliton pair[J]. *Chin. Phys.*, 2005, **14**(2):349~352
- K. Lu, Y. Zhang, T. Tang *et al.* Incoherently coupled steady-state soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic materials[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(5):056603-1
- Lu Keqing, Zhao Wei, Qian Shixiong *et al.* Incoherently coupled low-amplitude soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic materials[J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **31**(5):563~566
卢克清, 赵卫, 钱世雄 等. 有偏压光伏光折变晶体中低振幅非相干耦合孤子对[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):563~566
- K. Lu, W. Zhao, Y. Yang *et al.* Incoherently coupled gray-gray soliton pairs in biased photorefractive-photovoltaic crystals[J]. *Opt. Mater.*, 2005, **27**:1845~1850
- Loucif-Saibi R., Nakatani K., Delaire J. A. *et al.* Photoisomerization and second harmonic generation in disperse red one-doped and functionalized poly(methyl methacrylate) films[J]. *Chem. Mater.*, 1993, **5**(2):229~236
- H. C. Wang, X. S. Wang, W. L. She. Generalized theory of one-dimensional steady-state optical spatial solitons[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(12):2441~2444
- Wang Hongcheng, Jiang Desheng, Wang Xiaosheng *et al.* Study on one-dimensional gray photovoltaic spatial solitons and their stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1111~1116
王红成, 江德生, 王晓生 等. 一维光伏空间灰孤子及其稳定性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1111~1116