

闭路光伏光折变聚合物中非相干耦合亮-暗空间孤子对

吉选芒¹ 苏艳丽¹ 姜其畅¹ 刘劲松²

(¹ 山西运城学院物理与电子工程系, 山西 运城 044000
² 华中科技大学光子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了得到闭路光折变有机聚合物中存在非相干耦合亮-暗光伏空间孤子对,采用数值模拟的方法,对稳态情况下两束互不相干的光束,在闭路光伏光折变有机聚合物中的传播进行了研究。结果表明,具有相同偏振和相同波长的两束互不相干的光束,可在光伏光折变有机聚合物中形成非相干耦合亮-暗光伏孤子对。在给定适当参量或扰动不太大的情况下,孤子对中的亮孤子和暗孤子都能在光伏光折变有机聚合物中稳定传播。研究结果可为光折变有机聚合物空间孤子理论的发展提供理论依据。

关键词 非线性光学;光折变效应;光折变聚合物;亮-暗孤子对

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0919002

Incoherently Coupled Bright-Dark Spatial Soliton Pairs in Closed-Circuit Photovoltaic Photorefractive Polymer

Ji Xuanmang¹ Su Yanli¹ Jiang Qichang¹ Liu Jinsong²

(¹ Department of Physics and Electronic Engineering, Yuncheng University, Yuncheng, Shanxi 044000, China
² College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In order to obtain the incoherently coupled bright-dark photovoltaic spatial soliton pairs that can exist in closed-circuit photorefractive polymer, the propagation of two mutually incoherent optical beams in closed-circuit photorefractive polymer is numerically investigated under steady-state conditions. It is shown that incoherently coupled bright-dark photovoltaic soliton pairs can be established in the photorefractive polymer, in which the mutually incoherent incident beams have the same polarization and wavelength. The bright and dark solitons both can propagate steadily in photovoltaic photorefractive polymer under the conditions of proper parameters or small perturbation. These results provide the theoretical basis for the development of polymer spatial solitons theory.

Key words nonlinear optics; photorefractive effect; photorefractive polymer; bright-dark soliton pairs

OCIS codes 190.6135; 190.5330

1 引 言

近年来,由于光折变空间光孤子在光开关、光计算和光波导等领域有着十分广阔的应用前景,因而引起了研究者的极大关注。其中关于无机光折变晶体中的空间孤子已经展开许多研究,相关理论已日趋完善^[1~6]。迄今为止,已证明在无机光折变晶体材料中存在的空间孤子包括:准稳态孤子^[1,2]、屏蔽

孤子^[3]、光伏孤子^[4,5]和屏蔽光伏孤子^[6]。在研究无机光折变空间孤子的同时,人们也相继发现了有机聚合物材料也存在光折变效应^[7,8],与无机材料相比,光折变有机聚合物材料具有制备容易、均匀性好、可根据实际需要进行人为设计等优点,是很有应用前景的光折变材料。在现有发现的光折变有机聚合物中,以光电导聚合物为基体掺杂有高浓度非线性

收稿日期: 2012-03-21; 收到修改稿日期: 2012-05-08

基金项目: 山西省自然科学基金(2011011003-2)和山西省高校科技研究开发项目(20111125)资助课题。

作者简介: 吉选芒(1965—),男,硕士,教授,主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: jixuanmang@126.com

性生色团的主客体聚合物是良好的光折变聚合物材料^[9],由于具有取向增强效应,所以能产生很高效的光折变效应。1999年,Shih等^[10]最先报道主客体式的光折变聚合物中可以产生亮和暗空间孤子。之后,侯春风等^[11]严格证明了主客体式光折变有机聚合物中空间孤子的存在性。2002年,Hou等^[12]报道了有机聚合物非相干耦合空间孤子对的存在性。同年,郝中华等^[13]证明了主客体式光折变聚合物中空间明孤子的动态演化。随后,Hou等^[14,15]还证明了有机聚合物中空间灰孤子和灰灰孤子对的存在性。2011年,吉选芒等^[16]证明在外加电场光折变有机聚合物串联回路中存在独立空间孤子对。但上述有机聚合物空间孤子形成时强烈地依赖性于外加电场,可以称为光折变有机聚合物中的屏蔽空间孤子。最近,Li等^[17]开发出了具有光伏效应的光折变聚合物PVK-PBA:DR1:TNF。2011年,潘舒^[18]基于这种光伏光折变聚合物材料,从理论上证明了光折变有机聚合物光伏亮和暗空间孤子的存在性。基于上述工作,本文从理论上证明在闭路光伏光折变聚合物中存在非相干耦合光伏亮-暗空间孤子对。得到了光折变有机聚合物中非相干耦合亮-暗光伏空间孤子对归一化包络积分解。对材料中支持孤子对存在性的条件进行了详细的讨论,并数值模拟了亮-暗光伏孤子对在光折变有机聚合物中的演化。

2 基本理论

图1为光伏光折变聚合物和分压电阻 R 构成的闭合回路示意图。聚合物上加有强度为 I_b 的均匀背景光。偏振态和波长都相同且互不相干两束光共轴沿 z 轴传播。其衍射和偏振方向也都沿 x 轴,总强度为 I 。如果光波空间展宽远小于材料宽度 W ,则有近似表达式 $E_0 = V_0/W$, E_0 和 V_0 分别代表聚合物电极间的电场强度和电压, $V_R = JSR$, V_R 是电阻

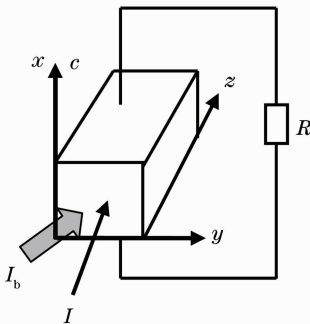


图1 光路示意图

Fig.1 Optical setup

上的电压, S 是聚合物截面积, J 是电流密度,由 $V = - \int_{-w/2}^{w/2} E_0 dw = -V_R$,可有 $E_0 = -JSR/W$ 。

将两光束电场分量用其慢变振幅 ϕ 和 ψ 分别表述为

$$E_1(x, z) = \phi(x, z) \exp(ik_0 n_b z) \sqrt{I_b + I_d},$$

$$E_2(x, z) = \psi(x, z) \exp(ik_0 n_b z) \sqrt{I_b + I_d},$$

式中 n_b 为材料未受扰动的折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为自由空间波长, I_d 为暗辐射强度,在这些条件下,两光束满足的耦合方程为^[11,12]

$$i \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{k_0^2}{2k} C_{x,y} E^2 \phi = 0, \quad (1a)$$

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{k_0^2}{2k} C_{x,y} E^2 \psi = 0, \quad (1b)$$

式中 $k = k_0 n_b$,当入射光束为 x 偏振时,

$$C_{x,y} = C_x = 0.54 N_{ch} \Delta\alpha (\mu_D / k_B T_a)^2, \quad (2a)$$

当入射光为 y 偏振时,

$$C_{x,y} = C_y = -0.27 N_{ch} \Delta\alpha (\mu_D / k_B T_a)^2, \quad (2b)$$

式中 N_{ch} 为非线性生色团浓度, μ_D 为非线性生色团固有偶极矩, k_B 为玻尔兹曼常量, T_a 为聚合物所处的环境温度, $\Delta\alpha$ 为平行和垂直于耦极矩方向非线性生色团一价极化率之间的差。对于这种新型的光伏光折变聚合物PVK-PBA:DR1:TNF^[17],其中的光折变效应主要成因而于非线性生色团DR1的取向增强。由于生色团DR1取向增强是在自身光伏电场和空间电荷场的作用下共同完成的,所以光伏场和空间电荷场共同引起材料的双折射效应, $E = E_{sc} + E_p$, E_{sc} 为空间电荷场, E_p 为有机聚合物自身的光伏场。在闭路稳态和慢变振幅条件下,空间电荷场 E_{sc} 可由光折变聚合物中满足的速率方程、连续性方程、泊松方程及高斯定理给出^[18]。在一维情况下,相关方程为

$$\frac{\partial N^-}{\partial t} = s_i \varphi (N - N^+) (I + I_b + I_d) - \frac{e\mu}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rho N^- = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T^+}{\partial t} = \frac{e\mu}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rho (T - T^+) - r_i T^+ = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_{sc}}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (\rho - N^- + T^+), \quad (5)$$

$$J = e\mu\rho E_{sc} - eD \frac{\partial \rho}{\partial x} + \kappa s_i \varphi (N - N^-) (I + I_b) = C, \quad (6)$$

式中 ρ 为空穴浓度, N 为敏化剂浓度, N^- 为离子化了的敏化剂浓度, T 为陷阱浓度, T^+ 为俘获空穴的

陷阱浓度, D 为扩散系数, r_i 为解俘获系数, s_i 为光电离截面, μ 和 e 分别为电子的迁移率和基本电荷, ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空和相对电介常数, J 为电流密度, φ 为量子效率, κ 为 Glass 常数, C 为常数。对于典型的光折变聚合物^[18]。在 T^+ 、 N^- 、 $N \gg \rho$ 、 $N \gg N^-$ 及 $\partial E_{cc}/\partial x$ 和扩散项忽略的条件下, 由(3) ~ (6) 式可得到空穴浓度 ρ 和电流密度 J 如下:

$$\rho \cong \frac{\epsilon_0 \epsilon_r s_i \varphi N (I + I_b + I_d)}{\epsilon \mu T^+}, \quad (7)$$

$$J = \epsilon \mu \rho E_{sc} + \kappa s_i \varphi (N - N^-) (I + I_b). \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式可得

$$J \cong \epsilon_0 \epsilon_r E_{sc} \frac{s_i \varphi N (I + I_b + I_d)}{T^+} + \kappa s_i \varphi (N - N^-) (I + I_b), \quad (9)$$

在远离孤子中心的光强 I_∞ 及电场强度趋于常量 E_0 情况下, 则有

$$J_\infty \cong \epsilon_0 \epsilon_r E_{sc} \frac{s_i \varphi N (I_\infty + I_b + I_d)}{T^+} + \kappa s_i \varphi (N - N^-) (I_\infty + I_b), \quad (10)$$

(6)式表明光伏光折变聚合物中的电流处处相等, 即有 $J = J_\infty$, 结合(9)、(10)式可得到

$$E_{sc} = E_0 \frac{I_\infty + I_b + I_d}{I + I_b + I_d} + E_p \frac{I_\infty - I}{I + I_b + I_d}, \quad (11)$$

式中 $E_p = \kappa T^+ / \epsilon_0 \epsilon_r$ 为光伏聚合物中的光伏电场。由 $E_0 = -JSR/W$, 结合(9)、(11)式可以得出

$$E_{sc} = E_p \frac{GI_\infty + (G-1)I_b - I}{I + I_b + I_d}, \quad (12)$$

式中 $G = 1/[1 + SRP(I_\infty + I_b + I_d)]$, $P = \epsilon_0 \epsilon_r s_i \varphi / (WT^+)$ 。一般情况下, $0 < G < 1$, 当 $R = 0$ 时, $G = 1$, 表示短路情况, 光伏光折变聚合物两极的电压为总电压, 没有分压电阻; 当 $R \rightarrow \infty$ 时, $G = 0$, 这时相当于开路情况。

由总场与空间电荷场和光伏场的关系式 $E = E_{sc} + E_p$, 可得出

$$E = E_p \frac{G(I_\infty + I_b) + I_d}{I + I_b + I_d}, \quad (13)$$

式中 $I = (|\phi|^2 + |\psi|^2)(I_b + I_d)$ 为两束光的总强度。将(13)式代入(1)式, 采用无量纲变量 $\xi = z/(kx_0^2)$, $s = x/x_0$, x_0 为一个任意的空间宽度, 得无量纲化振幅 ϕ 和 ψ 满足的耦合方程

$$i \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} + \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + |\phi|^2 + |\psi|^2} \right]^2 \phi = 0, \quad (14a)$$

$$i \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial s^2} + \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + |\phi|^2 + |\psi|^2} \right]^2 \psi = 0, \quad (14b)$$

式中 $\beta = (k_0 x_0)^2 C_{x,y} E_p^2$, $\sigma = I_d / (I_b + I_d)$, $\delta =$

$I_b / (I_b + I_d)$ 。

3 亮-暗混合空间孤子对

下面来推导亮-暗空间孤子对的孤子解, 令孤子对慢变振幅为 $\phi = r^{1/2} f(s) \exp(i\mu\xi)$ 和 $\psi = \gamma^{1/2} q(s) \exp(i\omega\xi)$, 这里 $f(s)$ 为亮孤子归一化振幅, $r = I_A(0)/(I_d + I_b)$ 为亮孤子中心光强与背景光和暗辐射强度之和的比值。 $q(s)$ 为暗孤子归一化振幅, $\gamma = I_{B\infty}/(I_b + I_d)$ 是暗孤子最大光强与背景光和暗辐射强度之和的比值。 $f(s)$ 和 $q(s)$ 边界条件为 $f(0) = 1; f'(0) = 0, f(s \rightarrow \pm\infty) = 0, q(0) = 0, q(s \rightarrow \pm\infty) = \pm 1$ 及 $s \rightarrow \pm\infty$ 时各阶导数为零。把 ϕ 和 ψ 表达式代入(14)式可有

$$\frac{d^2 f}{ds^2} = \mu f - \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + \gamma q^2 + r f^2} \right]^2 f, \quad (15a)$$

$$\frac{d^2 q}{ds^2} = \omega q - \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + \gamma q^2 + r f^2} \right]^2 q, \quad (15b)$$

(15)式在满足 $f^2 + q^2 = 1$ 的条件下可改写为

$$\frac{d^2 f}{ds^2} = \mu f - \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + \theta f^2} \right]^2 f, \quad (16a)$$

$$\frac{d^2 q}{ds^2} = \omega q - \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{(1+r) - (r-\gamma)q^2} \right]^2 q, \quad (16b)$$

式中 $\theta = (r-\gamma)/(1+\gamma)$, 对(16a)式乘以 df/ds 并在区间 $[0, s]$ 内对 s 积分可得

$$\left(\frac{df}{ds} \right)^2 = \mu (f^2 - 1) + \frac{\beta [G(\rho + \delta) + \sigma]^2}{\theta} \times \left(\frac{1}{1 + \theta f^2} - \frac{1}{1 + \theta} \right), \quad (17)$$

结合 $f(s)$ 在 $s \rightarrow 0$ 的边界条件, 可有

$$\mu = \frac{\beta [G(\rho + \delta) + \sigma]^2}{\theta} \left(1 - \frac{1}{1 + \theta} \right). \quad (18)$$

对(15b)式, 利用 $q(s \rightarrow \pm\infty) = \pm 1, f(s \rightarrow \pm\infty) = 0, s \rightarrow \pm\infty$ 时 $q(s)$ 的二阶导数等于零, 可以得到

$$\omega = \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + \gamma} \right]^2, \quad (19)$$

将(19)式代入(15b)式, 能推出

$$\frac{d^2 q}{ds^2} = \beta \left[\frac{G(\rho + \delta) + \sigma}{1 + \gamma} \right]^2 \left[1 - \left(\frac{1}{1 - \theta q^2} \right)^2 \right] q. \quad (20)$$

将(18)式代入(17)式积分可得出 f 的归一化包络积分

$$s = \pm \int_1^f \left\{ \frac{\beta [G(\rho + \delta) + \sigma]^2}{\theta} \times \left[\frac{1}{1 + \theta \tilde{f}^2} - \frac{\tilde{f}^2}{1 + \theta} - (1 - \tilde{f}^2) \right]^{-1/2} d\tilde{f} \right\} \quad (21)$$

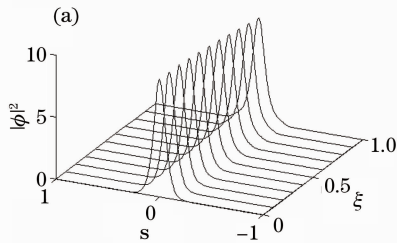
由 $0 < f^2 < 1$ 的条件, 可证明(21)式中的

$\left[\frac{1}{1+\theta f^2} - \frac{f^2}{1+\theta} - (1-f^2) \right] < 0$, 因此在光伏光折变聚合物中形成亮-暗空间孤子对, 须使 $\beta/\theta < 0$ 。当光折变聚合物的 $\Delta\alpha > 0$, 这时只有使入射光为 x 偏振光, 才有 $\beta > 0, \theta < 0$, 聚合物中支持亮孤子峰值光强小于暗孤子最大光强的亮-暗空间孤子对。如果入射光为 y 偏振光, 可有 $\beta < 0, \theta > 0$, 支持亮孤子峰值光强大于暗孤子最大光强的亮-暗空间孤子对。反之, 当光折变聚合物的 $\Delta\alpha < 0$, 只有使入射光为 y 偏振光, 才能使 $\beta > 0, \theta < 0$, 聚合物中支持亮孤子峰值光强小于暗孤子最大光强的亮-暗空间孤子对。如果入射光为 x 偏振光, $\beta < 0, \theta > 0$, 材料中支持亮孤子峰值大于暗孤子最大光强的亮-暗空间孤子对。利用(21)式可得到 $f(s)$, 再用 $f^2 + q^2 = 1$ 可求出 $q(s)$, 再代入 ϕ 和 ψ 表达式中能得非相干耦合亮-暗空间孤子对强度包络。

这里取光伏光折变聚合物 PVK-PBA:DR1:TNF 为研究对象, 入射光选为 x 偏振光, 材料参量如下^[10]: $n_b = 1.7, \Delta n = 1.9 \times 10^{-4}, \lambda = 663 \text{ nm}, x_0 = 40 \text{ }\mu\text{m}$, β 的计算公式为^[12]

$$\beta = \beta_x = 2k_0^2 x_0^2 n_b \Delta n_x,$$

用前述相关参量, 可以算出 $\beta_x = 102.06$, 当 $\sigma = 6/7$,



$\delta = 1/7, G = 0.5$, 取 $r = 9.5, \gamma = 10$, 可算出 $\theta = -0.0455 < 0$ 。图 2 给出入射光为 x 偏振, 在上述参量下亮-暗非相干耦合孤子对强度包络, 可以看出亮孤子的峰值强度是稍小于暗孤子的最大强度。图 3 给出入射光为 x 偏振的孤子对亮孤子和暗孤子在光伏光折变聚合物中动态演化特性, 可以看出, 孤子对的亮孤子和暗孤子都能在光伏光折变聚合物中沿 z 方向稳定地向前传播。

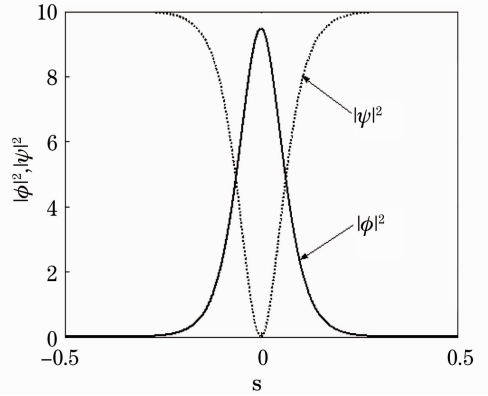


图 2 $\beta_x = 102.06, r = 9.5, \gamma = 10$ 时非相干耦合亮-暗孤子对强度包络

Fig. 2 Intensity profiles of incoherently coupled bright-dark pairs when $\beta_x = 102.06, r = 9.5, \gamma = 10$

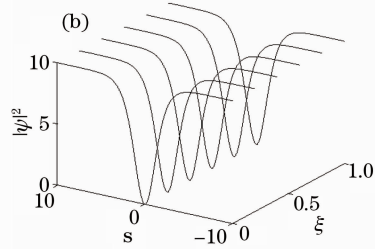


图 3 x 偏振两分量 ϕ 和 ψ 的稳定传播

Fig. 3 Stable propagation of two x -polarized components ϕ and ψ

当入射光取为 y 偏振光, 用前述相关参量, 可以算出 $\beta_y = -51.03$, 当 $\sigma = 6/7, \delta = 1/7, G = 0.5$ 。取 $r = 10, \gamma = 9.5$, 可算出 $\theta = 0.0455 > 0$, 图 4 给出取 y 偏振光的非相干耦合亮-暗孤子对的强度包络, 可以看出亮孤子的峰值强度稍大于暗孤子的最大强度。图 5 给出的是入射光为取 y 偏振的非相干耦合孤子对中的亮孤子和暗孤子在相应参量下, 在光伏光折变聚合物中传播行为, 可看出亮孤子和暗孤子都能稳定地在光伏光折变聚合物中稳定演化。图 6 给出的是当入射光强度出现 10% 的扰动下, 即取 $r = 9, \gamma = 8.55$ 时, 非相干耦合亮-暗孤子对中的亮孤子和暗孤子在光伏光折变聚合物中的演化行为。可以看出, 在扰动不太大的情况下, 孤子对中

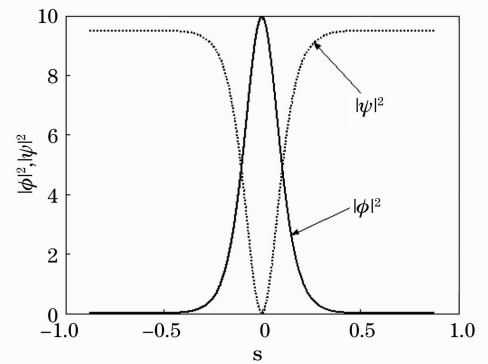


图 4 $\beta_y = -51.03, r = 10, \gamma = 9.5$ 时非相干耦合亮-暗孤子对强度包络

Fig. 4 Intensity envelopes of incoherently coupled bright-dark pairs when $\beta_y = -51.03, r = 10, \gamma = 9.5$

的亮孤子和暗孤子都可以克服扰动在光伏光折变有机聚合物中演化成稳定的孤子光束,在有机聚合物

中沿 z 方向稳定传播。

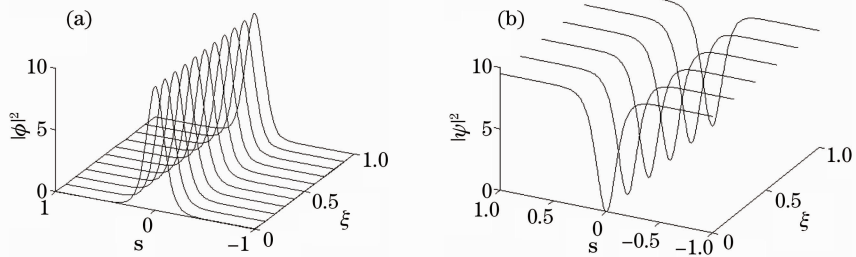


图5 y 偏振两分量 ϕ 和 ψ 的动态演化

Fig. 5 Dynamical evolutions of two y -polarized components ϕ and ψ

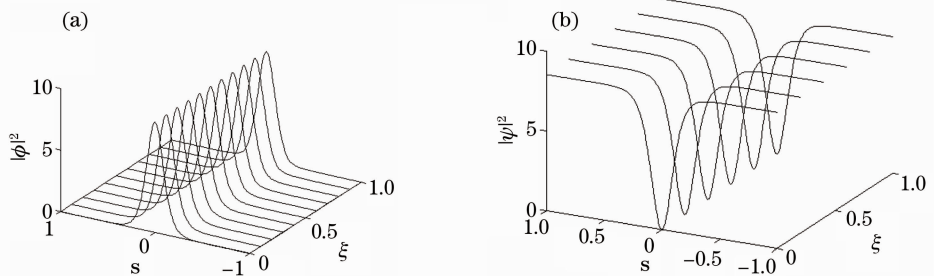


图6 10%的强度扰动下 y 偏振两分量 ϕ 和 ψ 的动态演化

Fig. 6 Dynamical evolutions of two y -polarized components ϕ and ψ when its intensity is perturbed by 10% at the input

4 结 论

理论证明了光伏光折变聚合物 PVK-PBA:DR1:TNF 中存在非相干耦合亮-暗空间孤子对。数值模拟了入射光分别 x 偏振和 y 偏振的情况下,孤子对中的亮孤子和暗孤子在光伏光折变聚合物的动态演化特性,在给定适当参量或入射光扰动不太大的情况下,孤子对中亮孤子和暗孤子在光伏光折变有机聚合物中都能演化为稳定的孤子光束。研究还表明:在平行于生色团偶极距方向的一阶极化率大于垂直于生色团偶极距方向的一阶极化率情况下,聚合物中支持亮孤子峰值小于暗孤子最大光强 x 偏振的空间孤子对或亮孤子峰值大于暗孤子最大光强 y 偏振的空间孤子对。反之,在平行于生色团偶极距方向的一阶极化率小于垂直于生色团偶极距方向的一阶极化率情况下,材料中支持的是亮孤子峰值小于暗孤子最大光强 y 偏振的空间孤子对或亮孤子峰值大于暗孤子最大光强 x 偏振的空间孤子对。

参 考 文 献

1 M. Segev, B. Crosignani, A. Yariv *et al.*. Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(7):

923~926

- 2 G. C. Duree, J. L. Shult, G. J. Salamo *et al.*. Observation of self-trapping of an optical beam due to the photorefractive effect [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(4): 533~536
- 3 D. N. Christodoulides, M. Carvalho. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9): 1628~1633
- 4 Zhang Guangyong, Liu Jinsong. Self-deflection characteristics of dark photovoltaic spatial solitons in closed circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1559~1561
- 张光勇, 刘劲松. 闭路光伏暗空间孤子自偏转特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1559~1561
- 5 Peng Xiaolan, Zhou Yamin, Wang Hongcheng. Incoherently coupled bright-dark soliton pairs and their propagation properties in unbiased photovoltaic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0619001
- 彭小兰, 周亚民, 王红成. 无偏压光伏晶体中的非相干耦合亮暗孤子对及其传输特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0619001
- 6 J. S. Liu, K. Q. Lu. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic-photorefractive crystals and their self-deflection [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(4): 550~555
- 7 M. Liphardt, A. Goonesekera, B. E. Jones *et al.*. High-performance photorefractive polymers [J]. *Science*, 1994, **263**(5145): 367~369
- 8 S. Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg *et al.*. Observation of the photorefractive effect in a polymer[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(14): 1846~1849
- 9 W. E. Moerner, S. M. Silence. Polymeric photorefractive materials[J]. *Chem. Rev.*, 1994, **94**(1): 127~155
- 10 M. F. Shih, F. W. Sheu. Photorefractive polymeric optical spatial solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(24): 1852~1855
- 11 Hou Chunfeng, Abdurusul, Du Chunguang *et al.*. Spatial

- solitons in photorefractive organic polymers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(11): 2159~2165
侯春风, 阿不都热苏力, 杜春光等. 光折变有机聚合物种的空间孤子[J]. *物理学报*, 2001, **50**(11): 2159~2165
- 12 C. F. Hou, Y. Y. Jiang, B. H. Yuan *et al.*. Incoherently coupled soliton pairs in photorefractive polymer [J]. *Opt. Mater.*, 2002, **19**(3): 377~381
- 13 Hao Zhonghua, Liu Jinsong. Dynamical evolution of spatial bright solitons propagating in guest-host photorefractive polymes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(4): 818~822
郝中华, 刘劲松. 主客体式光折变聚合物种空间明孤子的动态演化特性[J]. *物理学报*, 2002, **51**(4): 818~822
- 14 C. F. Hou, X. D. Sun, B. H. Yuan *et al.*. Grey spatial solitons in photorefractive polymer[J]. *J. Modern Opt.*, 2003, **50**(5): 825~832
- 15 C. F. Hou, F. F. Yao, Z. X. Zhon *et al.*. Grey-grey incoherently coupled spatial soliton pairs in guest-host photorefractive polymers [J]. *Chin. Phys.*, 2004, **13**(10): 1738~1741
- 16 Ji Xuanmang, Jiang Qichang, Liu Jinsong. Separate spatial soliton pairs in biased series photorefractive polymer circuit [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 034212
吉选芒, 姜其畅, 刘劲松. 外加电场光折变有机聚合物串联回路中独立空间孤子对[J]. *物理学报*, 2011, **60**(3): 034212
- 17 L. Y. Li, Y. Y. Zhao, F. M. Li *et al.*. Orientation-enhanced photorefractive effect in PVK-PBA : DR1 : TNT polymer [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(8): 1535~1538
- 18 Pan Shu. Study of Photovoltaic Space Optical Solitons in Photorefractive Polymer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
潘舒. 光折变聚合物光伏空间孤子的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011

栏目编辑: 李文喆