

光折变有机聚合物中的双色光空间孤子*

王晓生 余卫龙**

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 对光折变有机聚合物中的双色光空间孤子进行了理论分析, 证明双色信号光的两个频率成分相互作用可以在折射率改变为正的有机聚合物中形成暗暗和亮暗空间孤子, 在折射率改变为负的有机聚合物中形成亮亮和亮暗空间孤子。与单色光孤子的情况不同, 对于双色光孤子情况, 通过与一形成暗孤子的频率成分相互作用, 另一频率成分在折射率改变为正的有机聚合物中也可形成亮孤子; 通过与一形成亮孤子的频率成分相互作用, 另一频率成分在折射率改变为负的材料中也可形成暗孤子。

关键词: 非线性光学; 空间孤子; 光折变有机聚合物; 双色光; 孤子相互作用

中图分类号: O437 文献标识码: A

Polychromatic Spatial Solitons in Photorefractive Polymers

Wang Xiaosheng She Weilong

(The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologic,
Zhongshan University, Guangzhou 510275)

(Received 20 January 2003)

Abstract: The theoretical study shows that the two frequency components of a polychromatic light can interact each other in photorefractive polymers, and the bright-bright, dark-dark and bright-dark polychromatic spatial soliton solutions for optical wave evolution equations are presented under some steady-state conditions. A bright soliton can be formed in the photorefractive polymers with positive refractive index perturbation supported by a proper dark soliton, and a dark soliton can be formed in the photorefractive polymers with negative refractive index perturbation supported by a proper bright soliton.

Key words: nonlinear optics; spatial soliton; photorefractive polymer; polychromatic light; interaction between solitons

1 引 言

自从 1992 年 Segev 等^[1]首次在理论上预言光折变光学空间孤子以来, 光折变空间孤子的研究一直是科学研究的热点及前沿。在非线性光学介质中, 光强引起折射率变化是光与物质相互作用过程中发生的最普遍的现象之一。光折变材料是一种重要的非线性介质, 其光学非线性是由光激发载流子迁移、被陷,

空间电荷分离形成空间电荷场, 经线性电光效应(泡克耳斯效应)引起折射率变化而表现出来的。目前研究得较多的是无机的光折变材料, 已报道的无机光折变材料中的光折变空间孤子有三种基本的类型, 即准稳态孤子^[1~4]、屏蔽孤子^[5,6]和光伏孤子^[7~15]。在光伏晶体上外加直流电场也可以形成屏蔽-光伏空间孤子^[16~21]。随着有机聚合物光折变材料的出现^[22~25], 人们发现光折变聚合物是一种很有希望的光折变材料。它具有制备容易, 可根据需要进行人为设计, 成本低等特点。以光电导聚合物为基体, 掺杂有高浓度非线性生色团的主客体式聚合物就是一种良好的光折变聚合物^[26]。源于非线性生色团转动灵活性的取向增强效应^[27,28]使这种材料具有高效的光折变效应。它的光折变效应表现为: 在光照下, 材料中的光敏化

* 国家自然科学基金(10074082)、教育部科学技术重点项目基金(99197)、广东省自然科学基金(001192)、广东省自然科学基金(980359)、广东省科技计划项目(A1060201)资助课题。

** E-mail: stils02@zsu.edu.cn

收稿日期: 2003-01-20

剂提供了可迁移的电荷,在扩散作用和外加电场作用下这些电荷被迁移至别处,并在迁移的过程中被各种陷阱俘获而固定下来,从而在材料中形成光强调制的空间电荷场,这个空间电荷场进而使聚合物的非线性生色团重新取向,并通过取向增强效应和电光效应使材料的折射率发生改变。如果这种材料的折射率改变对光束产生的聚焦作用能够抵消光束的衍射效应,则可以在光折变聚合物材料中形成光学空间孤子。

人们从理论上分析了在有机聚合物光折变材料形成光学空间孤子的可能性。Shih 等^[29]首先预言主客体式光折变聚合物可以支持亮、暗空间孤子,侯春风等^[30]则给出了稳态情况下光折变聚合物中光波演化方程的亮、暗和灰孤子解,刘劲松等^[31]分析了光折变聚合物中空间孤子的演化。上述的理论分析都是针对单色光空间孤子进行的,理论分析的结果表明,在折射率改变为正的光折变聚合物中只能形成暗孤子,而在折射率改变为负的光折变聚合物中则只能形成亮孤子^[29~30]。本文对光折变聚合物中的双色光空间孤子进行理论分析,证明具有两个频率成分的信号光束可以在光折变聚合物中形成亮亮、暗暗和亮暗空间孤子。理论分析还表明,在折射率改变为正的光折变聚合物中可以形成亮孤子,不过这时需要一个适当的暗孤子与其相互作用;同样地,在折射率改变为负的材料中可以形成暗孤子,而这时需要一个适当的亮孤子与其相互作用。

2 理论分析

一般在光折变聚合物上外加一个直流电场及一个均匀的背景光。外加电场沿 x 方向,入射光束沿 z 方向传播,考虑一维空间孤子的情况,光束沿 x 方向衍射。对于信号光为两个频率成分 (ray 1 和 ray 2) 的双色光的情况,在稳态情况和光场慢变振幅近似下,光折变聚合物光折变效应的速率方程、电流连续性方程、高斯定理和光束的亥姆霍兹方程如下^[29]:

$$\phi(N - N^-)(s_1 I_1 + s_2 I_2 + s_b I_b) - \frac{e\mu}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rho N^- = 0, \quad (1)$$

$$\frac{e\mu}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rho(T - T^+) - \gamma T^+ = 0, \quad (2)$$

$$J = e\mu\rho E - eD \frac{\partial \rho}{\partial x} = \text{const}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (\rho - N^- + T^+), \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) E_{\text{opt}j} + (k_{0j} n_j)^2 E_{\text{opt}j} = 0, \quad (5)$$

这里 ρ 为空穴浓度, N 为敏化剂浓度, N^- 为离子化

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, γ 为解俘获系数, s_1 、 s_2 和 s_b 分别为 ray 1、ray 2 和背景光的光电离截面, μ 为空穴迁移率, ϕ 为量子效率, ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常量和相对介电常量, e 为基本电荷, J 为电流密度, E 为总电场, $E_{\text{opt}j}$ 为 ray j ($j = 1, 2$, 下同) 光场的电场分量的振幅, I_j 、 k_{0j} 和 n_j 分别为 ray j 的入射光强、真空圆波数和材料的折射率, I_b 为背景光光强。

根据昂萨格 (Onsager) 理论^[32], 当电场强度在 $10 \sim 100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 范围内时, 量子效率 ϕ 与电场 E 有如下关系:

$$\phi \propto E^m, \quad (6)$$

其中 m 为材料参量, 取值可以比 1 还小, 也可以比 3 还大。

与文献[30]类似处理我们可以得到

$$E^{m+1} = E_\infty^{m+1} \frac{s_1 I_{1\infty} + s_2 I_{2\infty} + s_b I_b}{s_1 I_1 + s_2 I_2 + s_b I_b},$$

其中 E_∞ 约等于外电场。

设 $E_{\text{opt}j} = u_j(x, z) \exp(ik_{0j} n_{bj} z) \sqrt{\frac{s_b I_b}{s_j}}$, 此时 $u_j^2 = s_j I_j / (s_b I_b)$, 其中 n_{bj} 为本底折射率。我们得到

$$E^{m+1} = E_\infty^{m+1} \frac{u_{1\infty}^2 + u_{2\infty}^2 + 1}{u_1^2 + u_2^2 + 1}, \quad (7)$$

(5)式变为

$$iu_{jz} + \frac{1}{2k_j} u_{jxx} + \frac{k_{0j}^2}{2k_j} \Delta(n_j^2) u_j = 0, \quad (8)$$

其中 $k_j = k_{0j} n_{bj}$, $\Delta(n_j^2) = n_j^2 - n_{bj}^2$ 。对于掺杂有 2,5-二甲苯-4-(对硝基苯基偶氮)苯甲醚 (DMNPAA) [2,5-dimethyl-4-(p-nitrophenylazo) anisole] 或 (N-2-丁基-2,6-二甲基-4H-吡啶酮-4-叶立德氰基甲基乙酸酯 [DHP (N-2-butyl-2,6-dimethyl-4H-pyridone-4-ylidene cyanomethyl-acetate)] 等非线性生色团的主客体式光折变聚合物, 材料的光折变效应主要起因于非线性生色团的取向增强效应, 此时 x 偏振或 y 偏振入射光引起的材料折射率改变分别为

$$\Delta(n_j^2) = C_j E^2, \quad (9)$$

这里 C_j 可正可负, 其正负由材料及入射光的偏振 (x 或 y) 状态决定^[30]。

令 $u_j = Y_j(x) \exp(i\Gamma_j z)$, 这里 $Y_j(x)$ 为入射面处第 j 个孤子横截面上的振幅分布, Γ_j 为孤子传播常量。利用 (7) 式 ~ (9) 式并设 $\zeta = x/x_0$, 其中 $x_0 = (\pm k_{10}^2 C_1 E_\infty^2)^{-1/2}$, 整理可得无量纲化的孤子方程组:

$$\frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} Y_1(\zeta) = \pm Y_1(\zeta) \left[b_1 - \left(\frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_1^2 + Y_2^2 + 1} \right)^{2/(m+1)} \right], \quad (10a)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} Y_2(\zeta) = \pm \eta Y_2(\zeta) \left[b_2 - \left(\frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_1^2 + Y_2^2 + 1} \right)^{2/(m+1)} \right], \quad (10b)$$

其中

$$\eta = k_{20}^2 C_2 / (k_{10}^2 C_1),$$

$$b_1 = 2\Gamma_1 k_1 / (k_{10}^2 C_1 E_{\infty}^2),$$

$$b_2 = 2\Gamma_2 k_2 / (k_{20}^2 C_2 E_{\infty}^2),$$

$$Y_{j\infty} = Y_j(\infty).$$

C_j 为正时方程右边取正号, C_j 为负时方程右边取负号。孤子应满足的边界条件为:亮孤子要求 $Y_j(\infty) \rightarrow 0, \partial Y_j(0)/\partial \zeta = 0, \partial^2 Y_j(0)/\partial \zeta^2 < 0$, 当 $\zeta \rightarrow \pm \infty$ 时 $Y_j(\infty)$ 的各阶导数都趋于零;暗孤子要求 $Y_j(0) = 0, Y_j(\infty) \neq 0, \partial Y_j(0)/\partial \zeta$, 为实数, 当 $\zeta \rightarrow \pm \infty$ 时 $Y_j(\infty)$ 的各阶导数都趋于零。

对于折射率改变为负的材料, 即 C_j 为负, 我们以 $m = 2$ 的情况为例考察方程组(10)的亮亮孤子解。我们取 $Y_1(0) = 2.0, Y_2(0) = 1.0, \eta = 1.5$, 根据亮孤子的边界条件, 利用数值方法确定 $b_1 = 0.49720, b_2 = 0.46256$, 进一步由龙格-库塔法得到的亮亮孤子数值解如图 1 所示。 Y_1 的无量纲化半峰全宽为 5.33, Y_2 的无量纲化半峰全宽为 4.78。

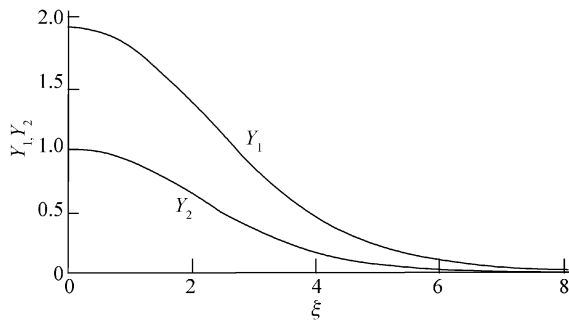


Fig. 1 Bright-bright soliton solutions for $C_j < 0, Y_1(0) = 2.0, Y_2(0) = 1.0, \eta = 1.5$ and $m = 2$. The dimensionless full width at half maximum of Y_1 and Y_2 are 5.33 and 4.78 respectively

我们进一步考察在折射率改变为负的材料中形成一亮一暗孤子的可能性(设 Y_1 为亮孤子, Y_2 为暗孤子)。我们知道形成空间孤子的实质是使光折变材料中折射率变化形成一个自聚焦型的折射率透镜(光束中心的折射率应大于光束边缘的折射率), 并利用折射率透镜对光束的自聚焦来抵消光束的衍射。换句话说, 要在光折变材料中形成孤子必须要求光折变材料中的光致折射率变化产生的折射率透镜是聚焦型的。在 C_j 为负的材料中要实现光束中

心的折射率大于光束边缘的折射率, 根据(9)式, 并利用(7)式, 我们要求

$$\frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_{10}^2 + Y_{20}^2 + 1} < \frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}, \quad (11)$$

这里 $Y_{j0} = Y_j(0)$ 。我们取 $Y_1(0) = 2.0, Y_2(\infty) = 1.0, \eta = 1.5$, 满足(11)式。利用亮、暗孤子边界条件, 得到 $b_1 = 0.6740, b_2 = 1, \partial Y_2(0)/\partial \zeta = 0.011979$, 亮暗孤子的数值解如图 2 所示。 Y_1 的无量纲化半峰全宽为 6.20, Y_2 的无量纲化半峰全宽为 1.28。

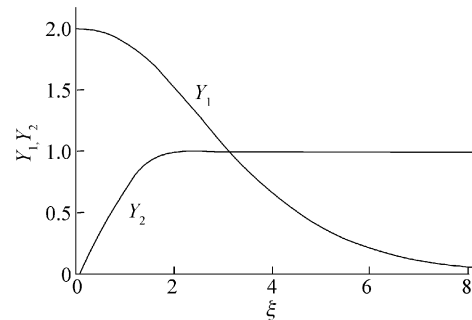


Fig. 2 Bright-dark soliton solution for $C_j < 0, Y_1(0) = 2.0, Y_2(\infty) = 1.0, \eta = 1.5$ and $m = 2$. The dimensionless full width at half maximum of Y_1 and Y_2 are 6.20 and 1.28 respectively

对于折射率改变为正的材料, 即 C_j 为正, 我们仍然以 $m = 2$ 的情况为例考察方程组(10)的暗暗孤子解。我们取 $Y_1(\infty) = 2.0, Y_2(\infty) = 1.0, \eta = 1.5$, 根据暗孤子的边界条件, 我们得到 $b_1 = b_2 = 1, \partial Y_1(0)/\partial \zeta = 0.01684, \partial Y_2(0)/\partial \zeta = 0.01552$, 进一步由龙格-库塔法得到的暗暗孤子数值解如图 3 所示。 Y_1 的无量纲化半峰全宽为 1.66, Y_2 的无量纲化半峰全宽为 0.9。

我们进一步考察在折射率改变为正的材料中形成一亮一暗孤子的可能性(设 Y_1 为亮孤子, Y_2 为暗孤子)。与前面的分析类似, 在 C_j 为正的 material 中要实现光束中心的折射率大于光束边缘的折射率, 我们要求

$$\frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_{10}^2 + Y_{20}^2 + 1} > \frac{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}{Y_{1\infty}^2 + Y_{2\infty}^2 + 1}, \quad (12)$$

我们取 $Y_1(0) = 1.0, Y_2(\infty) = 2.0, \eta = 1.5$ 满足(12)式。利用亮、暗孤子边界条件, 得到 $b_1 =$

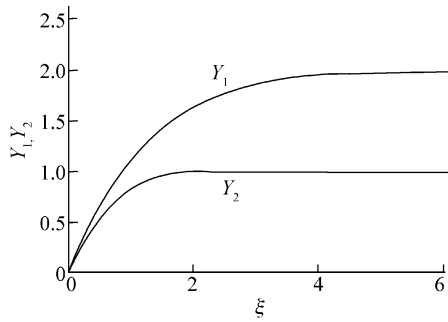


Fig. 3 Dark-dark soliton solutions for $C_j > 0$, $Y_1(\infty) = 2.0$, $Y_2(\infty) = 1.0$, $\eta = 1.5$ and $m = 2$. The dimensionless full width half maximum of Y_1 and Y_2 are 1.66 and 0.9, respectively

1.32955, $b_2 = 1$, $\partial Y_2(0)/\partial \xi = 0.016498$, 亮暗孤子的数值解如图 4 所示。 Y_1 的无量纲化半峰全宽为 4.00, Y_2 的无量纲化半峰全宽为 1.64。

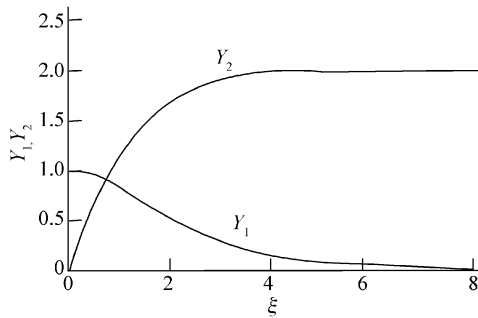


Fig. 4 Bright-dark soliton solutions for $C_j > 0$, $Y_1(0) = 1.0$, $Y_2(\infty) = 2.0$, $\eta = 1.5$ and $m = 2$. The dimensionless full width half maximum of Y_1 and Y_2 are 4.00 and 1.64, respectively

3 讨 论

我们以 C_{jx} 为正的 光折变聚合物为例估计形成孤子的宽度, 此时 $C_{jy} = -C_{jx}/2$ 。这里 C_{jx} 、 C_{jy} 分别指入射光束沿 x 方向和 y 方向偏振时的情况。根据文献[29]的材料参量, 我们取: $m = 2$, $n_{b1} \approx 1.6$, $\Delta n_{1x} \approx 1.3 \times 10^{-2}$, $E_{\infty} = 100 \text{ V}/\mu\text{m}$, $\lambda = 700 \text{ nm}$ 。当光束沿 y 方向偏振时 $C_1 = C_{1y}$, 此时无量纲化常数 $x_0 = 0.772 \mu\text{m}$ 。对应图 1 的亮亮孤子半峰全宽分别为 $W_{Y1} = 4.12 \mu\text{m}$, $W_{Y2} = 3.69 \mu\text{m}$; 对应于图 2 的亮暗孤子半峰全宽分别为 $W_{Y1} = 4.79 \mu\text{m}$, $W_{Y2} = 0.988 \mu\text{m}$ 。当光束沿 x 方向偏振时 $C_1 = C_{1x}$, 此时无量纲化常数 $x_0 = 0.546 \mu\text{m}$ 。对应图 3 的暗暗孤子半峰全宽分别为 $W_{Y1} = 0.906 \mu\text{m}$, $W_{Y2} = 0.491 \mu\text{m}$; 对应于图 4 的亮暗孤子半峰全宽分别为 $W_{Y1} = 2.18 \mu\text{m}$,

$W_{Y2} = 0.895 \mu\text{m}$ 。

从上面的分析可以看出, 对于具有两个频率成分的双色信号光, 两个频率成分可以分别形成孤子, 表观上看来就是一个双色光空间孤子。对于单色光孤子的情况, 折射率改变为正的材料中只能形成暗孤子, 而折射率改变为负的材料中只能形成亮孤子。由于光折变聚合物中折射率的改变与外加电场的方向无关^[30], 亮暗孤子的转换只能通过改变入射光的偏振方向。双色光孤子中亮暗孤子转换则可以不用改变入射光的偏振方向, 在折射率改变为正的材料中要形成亮孤子只需用一束适当的暗孤子光束与其相互作用; 在折射率改变为负的材料中形成暗孤子的情况与此类似。

结论 理论分析的结果表明, 在光折变聚合物材料中可以形成双色光空间孤子, 双色信号光的两个频率成分相互作用可以形成亮亮、暗暗和亮暗空间孤子。与单色光孤子的情况不同, 对于双色光孤子情况, 通过与一暗孤子相互作用, 在折射率改变为正的有机聚合物中也可形成亮孤子; 通过与一亮孤子相互作用, 在折射率改变为负的材料中也可形成暗孤子。

参 考 文 献

- 1 Segev M, Crosignani B, Yariv A *et al.*. Spatial solitons in photorefractive media. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(7): 923~926
- 2 Maufroy J, Fressengeas N, Wolfersberger D *et al.*. Simulation of the temporal behavior of soliton propagation in photorefractive media. *Phys. Rev. (E)*, 1999, **59**(5): 6116~6121
- 3 She W L, Lee K K, Lee W K. All optical quasi-steady-state photorefractive spatial solitons. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(12): 2498~2501
- 4 She W L, Lee W K. All optical double-quasi-steady-state spatial soliton. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(5): 886~891 (in Chinese)
- 5 Castillo M D I, Aguilar P A M, Sanchez-Mondragon J J *et al.*. Spatial soliton in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ with drift mechanism of nonlinearity. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(4): 408~410
- 6 Segev M, Valley G C, Crosignani B *et al.*. Steady-state spatial soliton in photorefractive material with external applied field. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(24): 3211~3214
- 7 Segev M, Valley G C, Bashaw M C *et al.*. Photovoltaic spatial solitons. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1997, **14**(7): 1772~1781
- 8 Ling Z F, Guo R, Liu S M *et al.*. Optical vortex solitons in photovoltaic-photorefractive medium. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2000, **49**(3): 0455~0459 (in Chinese)

- Chinese)
- 9 Valley G C, Segev M, Crosignani B *et al.*. Dark and bright photovoltaic spatial solitons. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(6):R4457~R4460
 - 10 Taya M, Bashaw M C, Fejer M M *et al.*. Observation of dark photovoltaic spatial solitons. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **52**(4):3095~3100
 - 11 She W L, Lee K K, Lee W K. Observation of two-dimensional bright photorefractive spatial solitons. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(16) 3182~3185
 - 12 Wang Xiaosheng, He Guogang, She Weilong *et al.*. Polychromatic photovoltaic spatial soliton. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(3):496~500 (in Chinese)
 - 13 Wang Xiaosheng, She Weilong. Partially spatially incoherent photovoltaic spatial soliton. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2002, **51**(3):573~577 (in Chinese)
 - 14 She W L, Chan C W, Lee W K. Dark and bright photovoltaic spatial solitons in photorefractive crystals with positive refractive-index perturbation. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1093~1095
 - 15 She Weilong, Wang Xiaosheng, He Guogang *et al.*. One-dimensional dark solitons in photovoltaic media with a positive perturbation on photorefractive index. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(11):2166~2171 (in Chinese)
 - 16 Liu Jinsong, Lu Keqing. Spatial solitaire wave in biased photovoltaic-photorefractive crystals. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**(9):1509~1514 (in Chinese)
 - 17 Lu Keqing, Tang Tiantong. Spatial solitons in photovoltaic photorefractive crystals in a external bias field. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1999, **48**(11):2070~2075 (in Chinese)
 - 18 Hou Chunfeng, Yuan Baohong, Sun Xiudong *et al.*. Incoherently coupled screening-photovoltaic sooiton pairs. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2000, **49**(10):1969~1972 (in Chinese)
 - 19 Lu Keqing, Zhang Yanping, Li Ba *et al.*. Self-deflection of steady-state spatial solitons in biased photorefractive-photovoltaic crystals. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2):134~138 (in Chinese)
 - 20 Zhang Duying, Liu Jinsong, Liang Changhong. Self-deflection of solitary wave evolution of a Gauss beam in photorefractive-photovoltaic crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **23**(6):697~701 (in Chinese)
 - 21 Zhang Duying, Liu Jinsong, Liang Changhong. Dynamic evolution of spatial screening-photovoltaic bright soliton under weak amplitude condition. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):809~812 (in Chinese)
 - 22 Meerholz K, Volodin B L, Sandalphon *et al.*. A photorefractive polymer with high optical gain and diffraction efficiency near 100%. *Nature*, 1994, **371**(6492):497~500
 - 23 Liphardt M, Goonesekera A, Jones B E *et al.*. High-performance photorefractive polymers. *Science*, 1994, **263**(5140):367~369
 - 24 Ducharme S, Scott J C, Twieg R J *et al.*. Observation of the photorefractive effect in a polymer. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(14):1846~1849
 - 25 Donckers M C J M, Silence S M, Walsh C A *et al.*. Net two-beam-coupling gain in a polymeric photorefractive material. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13):1044~1046
 - 26 Moerner W E, Silence S M. Polymeric photorefractive materials. *Chem. Rev.*, 1994, **94**(1):127~155
 - 27 Moerner W E, Silence S M, Hache F *et al.*. Orientationally enhanced photorefractive effect in polymers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(2):320~330
 - 28 Moylan C R, Wortmann R, Twieg R J *et al.*. Improved characterization of chromophores for photorefractive application. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1998, **15**(2):929~932
 - 29 Shih M F, Sheu F W. Photorefractive polymeric optical spatial solitons. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(24):1853~1855
 - 30 Hou C F, Abdurusul, Du C G *et al.*. Spatial solitons in photorefractive organic polymers. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(11):2159~2165 (in Chinese)
 - 31 Hao Z H, Liu J S. Dynamical evolution of spatial bright solitons propagating in guest-host photorefractive polymers. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2002, **51**(4):818~822 (in Chinese)
 - 32 Onsager L. Deviations from Ohm's law in weak electrolytes. *J. Chem. Phys.*, 1934, **2**:599~615