

文章编号: 1001-3806(2010)01-0078-03

匹配高斯光束在双光子光折变介质中的自偏转

姜其畅, 吉选芒, 苏艳丽, 谢世杰

(运城学院 物理与电子工程系, 运城 044000)

摘要: 为了研究有外加电场的双光子光折变介质中匹配高斯光束的动态演化及自偏转特性, 采用数值模拟的方法, 给出了匹配高斯光束在晶体中的动态演化及自偏转图形。结果表明, 对于给定的与双光子光折变介质参量匹配的高斯光束, 在介质中能演化为稳定的孤子波; 考虑扩散效应之后, 匹配高斯光束的光束中心将发生自偏转; 随着外加电场的增加, 高斯光束的自偏转程度增加, 当外加电场达到一定强度后, 高斯光束的自偏转程度随着外加电场的增加反而减小; 高斯光束的自偏转程度随着入射光强的变化关系与外加电场的情况相似。

关键词: 非线性光学; 高斯光束; 双光子光折变介质; 自偏转

中图分类号: O437; TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.022

Self-deflection of matching Gaussian beam in two-photon photorefractive media

JIANG Qi-chang, JI Xuan-mang, SU Yan-li, XIE Shi-jie

(Department of Physics and Electronics Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: In order to study the dynamic evolution and self-deflection of matching Gaussian beam in two-photon photorefractive media in external electric field, numerical simulation was used to obtain the dynamic evolution process and self-deflection graphics. The obtained results indicate that matching Gaussian beam can evolve into steady-state solitary wave for a given two-photon photorefractive crystal and the diffusion effect can cause self-deflection for the matching Gaussian beam. At first, the degree of self-deflection of matching Gaussian beam increases with the external electric field, however it decreases with the external electric field after a certain point. The relation between the degree of self-deflection of matching Gauss beam and the intensity of incident light is similar to external electric field.

Key words: nonlinear optics; Gaussian beam; two-photon photorefractive media; self-deflection

引言

光折变空间孤子是指在光折变介质中无衍射地向
前传播的光束, 由于它在光学信息处理、光学开关、光
学集成、光互联及光计算机等许多方面具有广阔的潜
在应用前景, 因而成为非线性光学领域中的一个研究
热点。至今, 人们已经研究了准稳态孤子、屏蔽孤子、
光伏孤子、屏蔽-光伏孤子等多种类型的光折变空间孤
子^[1-5]。

上述空间孤子都是针对单光子光折变介质, 2003
年 CASTRO-CAMUS 等人^[6]提出了一个新的双光子光
折变模型, 随后, HOU 等人^[7]率先对基于双光子光折
变效应的空间孤子进行了研究, 给出了初步的研究结
果。随后他们预测了亮孤子、暗孤子、灰孤子、非相干
耦合亮-亮、暗-暗及亮-暗双光子空间孤子对可以存在

于双光子光折变介质中^[8-10]。最近, LU 等人预言, 不
仅灰孤子, 灰孤子对和灰孤子簇也可以存在于双光子
光折变介质中^[11]。目前, 关于双光子光折变介质中孤
波演化特性的报道还比较少, 同时考虑到实际工作中,
入射的光束往往不是孤子波, 而是类孤子的光束, 如高
斯光束。所以本文中通过数值求解光波演化方程, 研究
匹配高斯光束在双光子光折变介质中的动态演化特性;
并在考虑扩散效应之后, 研究了匹配高斯光束的自偏转
特性。这些特性在工程实践中具有一定的实用价值。

1 理论模型

本文中所有的物理量均采用无量纲坐标。在具有
双光子光折变效应的介质中, 一束仅在 x 方向上发生
衍射的光线沿 z 轴传播, 并且光波的偏振方向和外加
电场方向均平行于 x 轴。利用 z 方向慢变包络近似可
以得到光波满足的傍轴方程:

$$i\phi_z + \frac{1}{2k}\phi_{xx} - \frac{k_0 n_e^3 r_{33} E_{sc}}{2}\phi = 0 \quad (1)$$

式中, $\phi_z = \partial\phi/\partial z$, $\phi_{xx} = \partial^2\phi/\partial x^2$, ϕ 为 z 方向光场慢变包

作者简介: 姜其畅(1980-), 男, 讲师, 主要从事物理教学
及非线性光学研究。

E-mail: jiangsir009@163.com

收稿日期: 2008-11-18; 收到修改稿日期: 2009-02-17

络, r_{33} 为晶体的电光系数, E_{sc} 是晶体内的空间电荷场, 从描述介质的光折变速率方程、电流方程及 Poisson 方程导出, HOU 等人^[7] 给出空间电荷场满足如下方程:

$$E_{sc} = E_0 \frac{(I_{2,\infty} + I_{2,d})(I_2 + I_{2,d} + \gamma_1 N_a / S_2)}{(I_{2,\infty} + I_{2,d} + \gamma_1 N_a / S_2)(I_2 + I_{2,d})} - \frac{D\gamma_1 N_a}{\mu S_2 (I_2 + I_{2,d} + \gamma_1 N_a / S_2)(I_2 + I_{2,d})} \frac{\partial I_2}{\partial x} \quad (2)$$

式中, E_0 为外加电场, $I_2 = I_2(x, z)$ 是光波的光强, $I_{2,\infty} = I_2(x \rightarrow \pm \infty, z)$, N_a 为受主数密度, γ_1 为双光子光折变晶体中的中间能级和价带之间的复合系数, $I_{2,d}$ 是暗辐射光强, 此处 $I_{2,d} = \beta_2 / S_2$, β_2 为双光子光折变晶体中的中间能级到导带的热激发常数, S_2 为光电离截面, D 为扩散系数, μ 为电子迁移率。

将(2)式代入(1)式, 同时采用无量纲坐标和变量代换: $\xi = z / (kx_0^2)$, $s = x/x_0$ 和 $U = (2\eta_0 I_{2,d} / n_e)^{-1/2} \phi$, 可得归一化的光波包络 U 满足如下动态演化方程:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta(1+\rho)}{1+\sigma+\rho} \left(1 + \frac{\sigma}{1+|U|^2}\right)U + \delta \frac{\sigma(|U|^2)_s}{(1+|U|^2+\sigma)(1+|U|^2)}U = 0 \quad (3)$$

式中, $\beta = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2) E_0$, $\sigma = \gamma_1 N_a / \beta_2$, $\delta = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2) [k_B T / (e x_0)]$, $\rho = I_{2,\infty} / I_{2,d}$, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, e 为单位电荷, 下标 ξ, ss, s

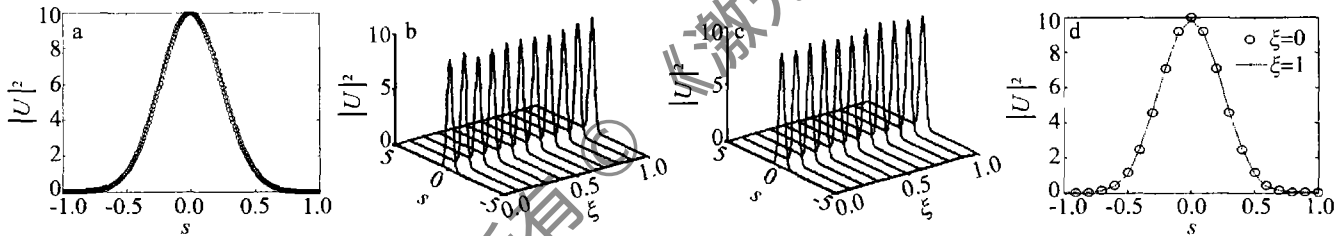


Fig. 1 a—the comparison in envelope of spatial bright soliton and matching Gaussian beam in intensity b—the evolution of spatial bright soliton c—the evolution of matching Gaussian beam $U = \sqrt{10} \exp(-s^2/0.48^2)$ d—the intensity envelope of beams $\xi=0, \xi=1$

为高斯光束。然后分别以空间明孤子和匹配高斯光束作为入射光波, 数值求解光波演化方程(4)式得到相应的演化特性。图 1b 是空间明孤子在双光子光折变介质中的演化特性, 这种光波将始终保持入射时的形状和振幅直线传播, 这一结果是显然的。图 1c 是匹配高斯光束演化特性, 图 1d 是图 1c 图中入射面($\xi=0$)与出射面($\xi=1$)所对应光波的强度包络, 可见匹配高斯光束入射到双光子光折变介质中也能演化成稳定的孤子波。

3 高斯光束自偏转特性

令 $\rho=0$, 由(3)式得到考虑扩散项的明孤子演化

$$\text{方程: } iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta}{1+\sigma} \left(1 + \frac{\sigma}{1+|U|^2}\right)U + \delta \frac{\sigma(|U|^2)_s}{(1+|U|^2+\sigma)(1+|U|^2)}U = 0 \quad (6)$$

分别为无量纲变量符号。如果忽略扩散效应的影响即 $\delta=0$, 相应的屏蔽明孤子演化方程:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \frac{\beta}{1+\sigma} \left(1 + \frac{\sigma}{1+|U|^2}\right)U = 0 \quad (4)$$

令 $U = r^{1/2} y(s) \exp(i\nu\xi)$, 式中, $r = I_2(0) / I_{2,d}$, ν 是传播量的非线性位移, $y(s)$ 是归一化的实函数 ($0 \leq y(s) \leq 1$)。明孤子的边界条件为: $y(0) = 1; y'(0) = 0; y(s \rightarrow \pm \infty) = 0$ 。将 U 的这个形式代入(4)式可得明孤子归一化包络解为:

$$s = \pm \int_y^1 \frac{[2\beta\sigma/(1+\sigma)]^{-1/2} r^{1/2} d\tilde{y}}{[\ln(1+r\tilde{y}^2) - \tilde{y}^2 \ln(1+r)]^{1/2}} \quad (5)$$

2 高斯光束动态演化特性

设入射的高斯光束为 $U = \sqrt{r} \exp(-s^2/\theta^2)$, 式中 $r = I_2(0) / I_{2,d}$, $I_2(0)$ 为光束的中心光强, θ 为描述高斯光束束腰的特征参量。取有关参量: $n_e = 2.2$, $\gamma_{33} = 30 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $\gamma_1 = 3.3 \times 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$, $N_a = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $\beta_2 = 0.05/\text{s}$, $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $x_0 = 40 \mu\text{m}$, $E_0 = 3 \times 10^5 \text{ V/m}$, 相应应有 $\beta = 26.6$, $\sigma = 6.6 \times 10^6$ 。取 $r = 10$, 将以上参量代入(5)式得到空间明孤子的数值解, 与其匹配的高斯光束为: $U = \sqrt{10} \exp(-s^2/0.48^2)$ 。图 1a 表明空间明孤子与匹配高斯光束的强度包络几乎相同, 实线为明孤子, 圆圈

取 $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $x_0 = 40 \mu\text{m}$, $E_0 = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。则 $\beta = 44.4$, $\sigma = 6.6 \times 10^6$, $\delta = 0.057$ 。以匹配高斯光束 $U = \sqrt{10} \exp(-s^2/0.37^2)$ 作为入射波得到相应的演化特性, 如图 2 所示, 图 2b 中 Δs 表示孤子中心随着传播距离的增加其自偏转距离的大小。

保持 $r = 10$, 外加电场的强度分别取: $E_0 = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$, $\beta = 44.4$; $E_0 = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$, $\beta = 88.8$; $E_0 = 2 \times 10^6 \text{ V/m}$, $\beta = 177$ 。得到匹配高斯光束的自偏转轨迹, 见图 3a。可见, 高斯光束的偏转程度首先随外加电场的增加而增加, 当外加电场达到一定程度后随着外加电场的增加偏转程度反而减小。然后固定外加电场 $E_0 = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$, 改变入射光强分别取 $r = 1, r = 10, r = 50$ 得到匹配高斯光束的自偏转轨迹, 见图 3b。可见, 高斯光束的自偏转程度首先随入射光强的增加而增

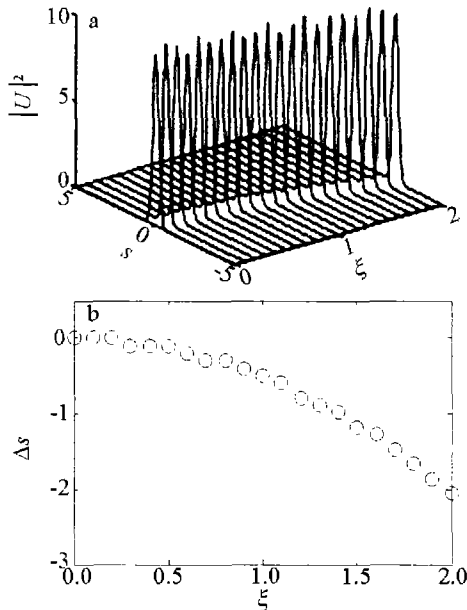


Fig. 2 a—self-deflection of the matching Gaussian beam b—spatial shift of the center for a matching Gaussian beam

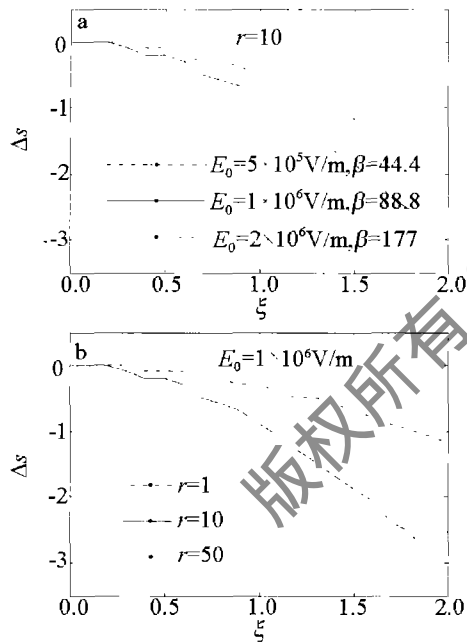


Fig. 3 a—spatial shift of the center for a matching Gaussian beam in deferent external electric field b—spatial shift of the center for a matching Gaussian beam in different incident light intensity

加,当光强达到一定程度后随着入射光强的增加偏转程度反而减小,与外加电场的情况相似。匹配高斯光束自偏转程度的这种先增后减情况,其原因解释如下:孤子波的半峰全宽取最小值时孤子的自偏转程度最大,而孤子波的半峰全宽并不随入射光强单调变化,即在入射光强某一特定值时取得最小值^[12];同时当外加电场增大到一定程度时,孤子波的半峰全宽减小的趋势变缓,而在(6)式中,偏转项的影响却因 β 的加大而

相对减小,所以高斯光束的自偏转程度随外加电场的增大也是先增后减。

4 结论

匹配高斯光束在有外加电场的双光子光折变介质中能演化成稳定的孤子波,考虑扩散效应的影响时,高斯光束的中心发生自偏转。对于给定的双光子光折变介质,匹配高斯光束的自偏转程度与外加电场和入射光强有关,在一定强度范围内,高斯光束的自偏转程度随外加电场和入射光强的增加而增加;当达到一定强度之后,自偏转程度随着外加电场和入射光强的增加反而减小。所以,可通过调节外加电场和入射光强的大小来控制“高斯孤子”在双光子光折变介质中的自偏转程度。

参考文献

- [1] SEGEV M, CROSIGNANI B, YARIV A, *et al.* Spatial solitons in photorefractive media [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 68(7): 923-926.
- [2] CHRISTODOULIDES D N, CARVALHO M I. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J O S A*, 1995, B12(9): 1628-1633.
- [3] SEGEV M, VALLEY G C, BASHAW M C, *et al.* Photovoltaic spatial solitons [J]. *J O S A*, 1997, B14(7): 1772-1781.
- [4] LIU J S, LU K Q. Spatial solitaire wave in biased photovoltaic-photorefractive crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, 47(9): 1509-1514 (in Chinese).
- [5] JI X M, XIE S J, WANG J L, *et al.* Temperature effect on the dynamical evolution of Gaussian beam in biased photovoltaic photorefractive crystal [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 97-99 (in Chinese).
- [6] CASTRO-CAMUS E, MAGANA L F. Prediction of the physical response for the two-photon photorefractive effect [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1129-1131.
- [7] HOU C F, PEI Y B, ZHOU Z X, *et al.* Spatial solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Phys Rev*, 2005, A71(5): 053817/1-053817/6.
- [8] HOU C F, ZHANG Y, JIANG Y Y, *et al.* Photovoltaic solitons in two-photon photorefractive materials under open-circuit conditions [J]. *Opt Commun*, 2007, 273(2): 544-548.
- [9] ZHANG Y, HOU C F, SUN X D. Grey spatial solitons due to two-photon photorefractive effect [J]. *Chinese Physics*, 2007, 16(1): 159-164 (in Chinese).
- [10] ZHANG Y, HOU C F, SUN X D. Incoherently coupled spatial soliton pairs in two-photon photorefractive media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3261-3265 (in Chinese).
- [11] LU K Q, ZHAO W, YANG Y L. One-dimensional incoherently coupled grey solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Appl Phys*, 2007, B87(3): 469-473.
- [12] ZHANG D Y, LIU J S, LIANG C H. Self-deflection of solitary wave evolution of a Gauss beam in photovoltaic-photorefractive crystal [J]. *Acta Optical Sinica*, 2002, 23(6): 697-701 (in Chinese).