

文章编号: 0253-2239(2006)10-1559-3

# 闭路光伏暗空间孤子的自偏转特性研究\*

张光勇<sup>1,2</sup> 刘劲松<sup>1</sup>

(1 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)  
(2 中国地质大学物理系, 武汉 430074)

**摘要:** 通过考虑扩散效应的影响,采用数值方法,研究了一维稳态闭路光伏暗空间孤子的自偏转特性。结果表明,在扩散项的影响下,光伏暗空间孤子光束的中心沿一个抛物线轨迹在光折变晶体光轴方向上产生偏转;孤子中心偏转距离随光伏场以及入射孤子波强度的增加而单调增加。光伏暗空间孤子与明孤子的自偏转规律有明显不同。

**关键词:** 非线性光学; 空间光孤子; 光折变效应; 光伏效应; 自偏转

中图分类号: O437.5 文献标识码: A

## Self-Deflection Characteristics of Dark Photovoltaic Spatial Solitons in Closed Circuit

Zhang Guangyong<sup>1,2</sup> Liu Jinsong<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)  
(2 Department of Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract:** The self-deflection characteristic of dark photovoltaic spatial solitons in one-dimensional stable closed circuit is investigated by taking diffusion effects into account by use of numerical method. The results show that dark photovoltaic spatial soliton possesses a self-deflection process in the direction of the crystal's axis during propagation and the center of the dark solitary beam moves on a parabolic trajectory. The self-bending distance of the dark solitary beam increases monotonously with the photovoltaic field and the soliton input intensity. The self-deflection of dark photovoltaic solitons is very different from that of bright ones.

**Key words:** nonlinear optics; spatial optical solitons; photorefractive effects; photovoltaic effects; self-deflection

## 1 引 言

光折变空间光孤子是非线性光学近年来的研究热点,已经证明有三种稳态光折变空间孤子:屏蔽<sup>[1]</sup>、光伏<sup>[2~4]</sup>和屏蔽光伏孤子<sup>[5,6]</sup>。实际上,屏蔽光伏空间孤子在一定的参量设定下可以退化为屏蔽孤子或光伏孤子,因此屏蔽光伏孤子是屏蔽孤子和光伏孤子的统一形式<sup>[5]</sup>。与此同时,关于孤子的稳定性<sup>[3~5]</sup>、孤子对、孤子间的相互作用<sup>[7]</sup>和孤子的自偏转<sup>[8,9]</sup>也得到了广泛的研究。最近,朱楠等<sup>[4]</sup>研究了光伏灰空间孤子的归一化横向传播速度随归一化

的背景光强和孤子灰度的变化关系,他们的研究表明;在忽略扩散的情况下,当灰度为零,即灰空间孤子对应为暗孤子时,暗孤子相对背景波无横向运动。然而,考虑扩散效应的影响,对明孤子的研究表明<sup>[8,9]</sup>,光孤子的中心沿着一条抛物线轨迹偏转。本文通过考虑扩散效应的影响,利用数值方法,分析了光伏暗空间孤子的自偏转特性,并就明、暗孤子的自偏转特性进行了对比。结果表明,明、暗孤子的自偏转规律有明显不同。

\* 国家自然科学基金(10574051,10174025)和中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划资助课题。

作者简介:张光勇(1976~),男,山东济南人,华中科技大学激光技术国家重点实验室博士研究生,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail:zhgyong@163.com

导师简介:刘劲松(1959~),男,陕西人,华中科技大学电子科学与工程学院院长,特聘教授,主要从事激光物理与新型激光器、非线性光学与孤子驱动光子器件、图像处理与光电对抗方面的研究。E-mail:jsliu4508@vip.sina.com

收稿日期:2006-01-10;收到修改稿日期:2006-03-13

## 2 基本理论

设有一束只在  $X$  方向偏振和衍射的光波沿  $Z$  方向在光伏光折变晶体中传播,晶体的  $C$  轴取为  $X$  方向,令  $I = I(x, z)$  为光波光强,光波光强还可以表示为  $I = I_d |U|^2$ ,  $I_d$  为暗辐射强度,  $U$  为归一化的光波包络.通过适当的坐标和变量代换,忽略晶体损耗,得到归一化的光波包络满足如下动态演化方程<sup>[2,5]</sup>:

$$iU_\xi + \frac{1}{2}U_{ss} - \alpha \frac{(\rho - |U|^2)U}{1 + |U|^2} + \gamma \frac{(|U|^2_s)U}{1 + |U|^2} = 0, \quad (1)$$

其中  $\alpha = (k_0 x_0)^2 (n_e^4 r_{33} / 2) E_p$ ,  $\gamma = (k_0^2 x_0 n_e^4 r_{33}) K_B T / (2e)$ ,  $\alpha$  和  $\gamma$  分别是与光伏场和扩散场相联系的无量纲量.  $E_p = k_p \gamma_R N_A / (e\mu)$  是光伏场常量,  $k_p$  是光伏常量,  $\gamma_R$  是载流子的复合速率,  $N_A$  是受主密度,  $e$  和  $\mu$  分别为基本电荷和电子迁移率.

$$\begin{aligned} \rho &= I_\infty / I_d, \\ I_\infty &= I(x \rightarrow \pm \infty, z), \\ k_0 &= 2\pi / \lambda_0, \end{aligned}$$

$\lambda_0$  是光波在自由空间的波长.  $r_{33}$  是电光系数,  $n_e$  是晶体的非常光折射率.  $K_B$  是玻耳兹曼常量,  $T$  是绝对温度.无量纲坐标  $\xi = z / (k x_0^2)$ ,  $s = x / x_0$ , 其中  $x_0$  是任意空间宽度,  $U_\xi = \partial U / \partial \xi$ ,  $U_{ss} = \partial^2 U / \partial s^2$ .

令  $U = \rho^{1/2} y(s) \exp(i\nu \xi)$ , 其中  $\nu$  表示光波传播常量的空间移动,  $y(s)$  是一个归一化的实函数,  $0 \leq y(s) \leq 1$ . 将  $U$  的表达式和  $\gamma = 0$  代入(4)式, 并应用暗孤子的边界条件  $y(0) = 0, \dot{y}(\infty) = 0$  和  $y(s \rightarrow \pm \infty) = 1$  得到

$$(\dot{y})^2 = -2\alpha \left[ (y^2 - 1) - \frac{\rho + 1}{\rho} \ln \left( \frac{1 + \rho y^2}{1 + \rho} \right) \right], \quad (2)$$

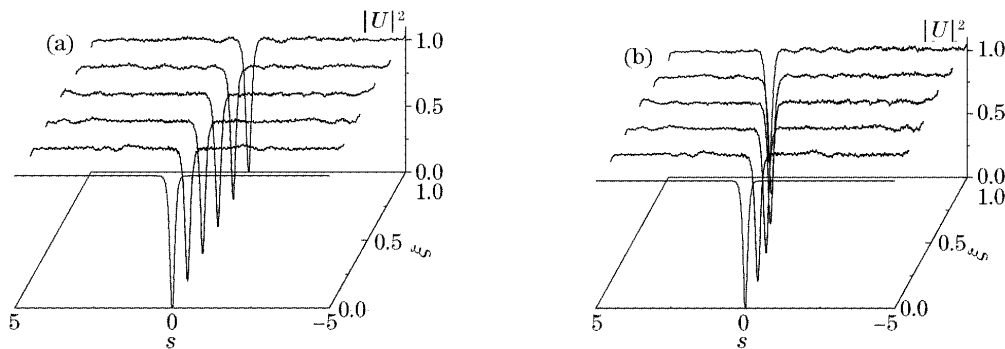


图 1 暗空间孤子强度包络演化规律  $\rho=1, \alpha=-158$ . (a)  $\gamma=0$ , (b)  $\gamma=0.204$

Fig. 1 Dynamical evolutions of the intensity profile of dark spatial solitons with  $\rho=1, \alpha=-158$ . (a)  $\gamma=0$ , (b)  $\gamma=0.204$

图 2 给出了暗孤子中心偏转距离 ( $\Delta S$ ) 随光伏场变化的演化规律. 图 2 的结果表明,暗空间孤子

数值求解(2)式可得到暗孤子波的归一化的强度包络.很明显,只有  $a < 0$ , (2)式才有解.(2)式还表明,归一化的暗孤子强度包络  $y(s)$  是  $\alpha$  和  $\rho$  的函数.我们数值计算的结果表明,  $\alpha$  的绝对值越大,归一化强度包络  $y(s)$  就越窄.  $\rho$  值越大,归一化强度包络  $y(s)$  也越窄.(1)式最后一项表明,孤子偏转量同孤子归一化强度包络对  $s$  的偏导数有关,偏导数越大,偏转量就越大.空间宽度越窄的孤子,这一偏导数就越大.因此,有较大  $\alpha$  的绝对值和较大  $\rho$  的光伏暗空间孤子,传播过程中将会产生较大的自偏转.

## 3 光伏暗空间孤子的自偏转

在考虑了扩散项的影响后,孤子在传播过程中存在自偏转特性<sup>[8,9]</sup>.以  $BaTiO_3$  晶体中的暗孤子为研究对象,设入射孤子波长  $\lambda_0 = 0.5 \mu m$ , 晶体参量取为  $n_e = 2.365, \gamma_{33} = 80 \times 10^{-12} m/V, N_A = 10^{17} cm^{-3}$ , 任意空间宽度  $x_0 = 40 \mu m$ , 晶体的光伏场取  $E_p = -5 \times 10^5 V/m$ . 这样就得到扩散系数  $\gamma = 0.204$ , 光伏系数  $\alpha = -158$ . 在  $\rho=1, \alpha=-158$  条件下,数值求解(2)式,将得到孤子波解作为入射暗孤子包络,在  $\gamma=0$  和  $\gamma=0.204$  条件下分别数值求解(1)式,图 1 给出了相应孤子包络的演化规律.由图 1(a)可以看出,不考虑扩散效应的影响,暗孤子将保持孤子包络基本不变沿一条直线在晶体中传播,即暗孤子无横向传播,这与文献[4]在孤子灰度为零时的结论是相符的.图 1(b)结果表明,考虑扩散效应的影响,暗空间孤子在传播过程中保持孤子包络基本不变,并且在光轴方向上产生自偏转.而明孤子总是在逆光轴方向上产生偏转<sup>[8,9]</sup>.

沿抛物线轨迹产生自偏转,且偏转距离随光伏场绝对值的增加而增加.暗空间孤子的这一偏转特性与

明孤子类似。因为  $\alpha$  的绝对值越大,暗孤子的包络越窄,孤子包络对  $s$  的导数越大,孤子会有更大的自偏转产生。

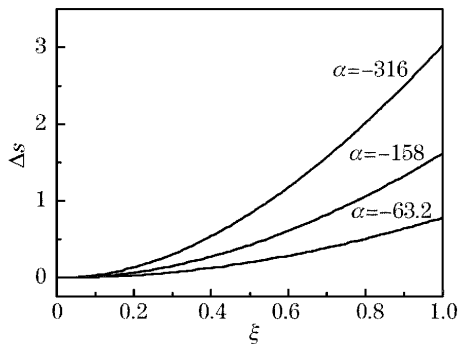


图 2 在  $\rho=1$  和  $\gamma=0.204$  下暗孤子中心偏转随光伏场的变化曲线

Fig. 2 Dependence of spatial shift of dark soliton center on photovoltaic fields with  $\rho=1$  and  $\gamma=0.204$

现在研究入射孤子波的强度对暗孤子自偏转的影响。为此,令光伏系数  $\alpha=-63.2$ 。在  $\rho=1,10,100$  时数值求解(2)式,将得到的孤子波解作为入射暗孤子包络,数值求解(1)式来研究不同入射强度下暗孤子的自偏转特性。图 3 给出了不同入射孤波强度的暗孤子中心偏转距离的演化规律。由图 3 可以看出,暗空间孤子沿一条抛物线轨迹产生偏转,且偏转距离随入射光强的增加而单调增加。光伏场一定,入射光强越大,暗孤子包络越窄,孤子包络对  $s$  的导数越大,暗孤子就会有更大的自偏转产生。暗孤子的这一自偏转特性与明空间孤子有明显不同。明空间孤子的自偏转随入射光强不是单调变化的,明孤子归一化包络  $y(s)$  在  $r$ (明孤子入射光强与暗辐射强度之比)约为 10 处最窄,此时  $y(s)$  对  $s$  的偏导数有最大值,所以偏转距离在  $r$  约为 10 处取得最大值,且明孤子

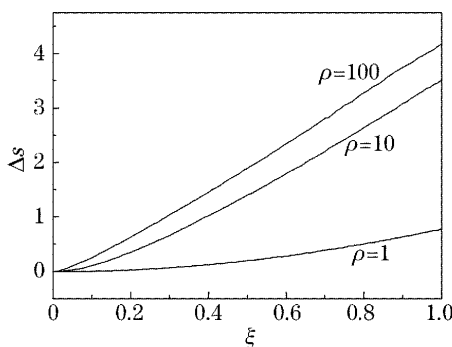


图 3 在  $\alpha=-63.2$  和  $\gamma=0.204$  下暗孤子中心偏转随入射强度的变化曲线

Fig. 3 Dependence of spatial shift of dark soliton center on input intensity with  $\alpha=-63.2$  and  $\gamma=0.204$

总是在逆光轴方向上产生自偏转的<sup>[8,9]</sup>。

## 4 结 论

本文利用一维稳态光折变空间孤子理论,在考虑扩散效应的影响下,采用数值方法分析了光折变光伏暗空间孤子的自偏转特性。结果表明,光伏暗孤子与明孤子的自偏转有明显不同。虽然明、暗孤子波光束中心均沿抛物线轨迹偏转,但是两者的偏转方向不同,明孤子在逆光轴方向产生偏转,而暗孤子则是沿光轴方向产生偏转。暗空间孤子光束中心偏转距离随光伏场绝对值的增加而增加,这与明孤子的偏转类似。暗孤子光束中心偏转距离随入射光强的增加而单调增加,而明孤子光束中心偏转距离随入射光强非单调变化。可以通过适当调节入射孤子波光强以及晶体光伏场,控制暗光伏孤子在沿晶体光轴方向上的自偏转距离。

## 参 考 文 献

- 1 D. N. Christodoulides, M. I. Carvalho. Bright, dark and gray spatial soliton states in photorefractive media[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9): 1628~1633
- 2 M. Segev, G. C. Valley, M. C. Bashaw *et al.*. Photovoltaic spatial solitons[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1772~1781
- 3 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 (in Chinese)  
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
- 4 Zhu Nan, Guo Ru, Liu Simin *et al.*. Photovoltaic gray spatial solitons in photorefractive crystal[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 903~907 (in Chinese)  
朱楠,郭儒,刘思敏等. 光折变晶体中的光生伏打灰空间孤子[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 903~907
- 5 Liu Jinsong, Lu Keqing. Screening-photovoltaic spatial solitons in biased photovoltaic photorefractive crystals and their self-deflection[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(4): 550~555
- 6 E. Fazio, F. Renzi, R. Rinaldi *et al.*. Screening-photovoltaic bright solitons in lithium niobate and associated single-mode waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2193~2195
- 7 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
- 8 M. I. Carvalho, S. R. Singh, D. N. Christodoulides. Self-deflection of steady-state bright spatial solitons in biased photorefractive crystals[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **120**(5~6): 311~315
- 9 Zhonghua Hao, Jinsong Liu. Self-deflection of bright soliton in a separate bright-dark screening soliton pair based on higher-order space charge field[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 353~356