

低振幅屏蔽亮孤子在光折变晶体中的自偏转特性

鄢曼 覃亚丽 刘鲜 任宏亮 薛林林

浙江工业大学信息工程学院光纤通信与信息工程研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 研究了低振幅下的(1+1)维屏蔽亮孤子在光折变介质中的传输特性。数值仿真结果表明,当光束线性传输时会自然衍射;当光束非线性传输时,若忽略扩散机制,可以保持孤子形态且直线传输,若考虑光折变介质的扩散作用,孤子就会发生自偏转,偏转方向及程度与温度有关。最后分析了偏转距离绝对值随温度的变化关系,在某一温度下偏转距离绝对值有最大值,因此可以通过控制温度来改变偏转距离。

关键词 非线性光学;亮孤子;光折变晶体;自偏转

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.101901

Self-deflection of Low Amplitude Screening Bright Soliton in Photorefractive Crystal

Yan Man Qin Yali Liu Xian Ren Hongliang Xue Linlin

Institute of Fiber-Optic Communication and Information Engineering, College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract The propagation performance of a low amplitude one-dimensional screening bright soliton in photorefractive media is studied in this paper. Numerical simulations show that, the beam would present linear diffraction in the isotropic media. While in the anisotropic nonlinear media, without taking the diffusion effect into account, the input beam would keep shape and transmit in a straight line. The beam would be self-bending when considering the diffusion effect. What's more, the direction and degree of self-deflection are related to the temperature. At last, The relationship between self-bending distance and the temperature is analyzed. At a special temperature, we can get the biggest distance and the deflection distance can be controlled by changing the temperature.

Key words nonlinear optics; bright solitons; photorefractive crystal; self-deflection

OCIS codes 190.4400; 190.5330; 160.5320; 060.4370

1 引言

孤子是自然界普遍存在的非线性现象,是非线性科学研究(孤子、分形、混沌)的三个理论之一。孤子是一种自陷或被局域的波,并且在传播过程中能量不扩散,波形不发生变化或呈现周期性的变化。而光折变介质中存在三种类型的孤子:瞬态孤子^[1-2],屏蔽孤子^[3-4]及光伏孤子^[5-6]。孤子在光折变介质中的传输是漂移机制和(或)光伏机制及扩散机制共同作用的结果。由于扩散机制与温度有关^[7],所以,温度对光折变空间孤子有较大的影响。尤其在低振幅^[8]的情况下,温度的影响会变得更大。目前为止,人们对光折变晶体中的扩散作用对孤子的影响做了许多研究工作。施瑶瑶等^[9]利用梯度折射率材料实现控制自由空间无衍射艾里光束自弯曲性质的方法。董亮伟等^[10]研究了光折变材料中的空间孤子的自弯曲效应。Hao等^[11]提出独立亮暗屏蔽孤子对中亮孤子的自偏转是基于高阶空间电荷场。Chen等^[12]分析了在具有外偏压的光折变晶体中温度特性对部分空间相干光孤子的影响。

收稿日期: 2015-03-15; 收到修改稿日期: 2015-04-08; 网络出版日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275124, 60978010, 61205121)

作者简介: 鄢曼(1989—),女,硕士研究生,主要从事光孤子及非线性光学方面的研究。E-mail: 295169505@qq.com

导师简介: 覃亚丽(1963—),女,博士,教授,主要从事光孤子及非线性光学、微波通信及电磁计算、遥感信号处理等方面的研究。E-mail: ylqin@zjut.edu.cn

本文数值仿真了低振幅下的(1+1)维屏蔽亮孤子光束在光折变晶体中的传输现象。结果发现,光束在非线形介质中传输,且考虑扩散作用,孤子会发生自偏转,偏转方向及程度与温度有关。分析了偏转距离绝对值随温度的变化关系,发现在某一温度下有最大值,因此可以通过控制温度来改变偏转距离,这种性能对光交换网络有潜在的应用价值。

2 传输模型

假设光折变晶体的光轴 c 沿 x 方向放置,其上施加有沿 x 方向的外电场,入射光束只在 x 横向维上发生偏振和衍射,沿 z 方向在晶体中传播。当外加电场方向与晶体的 c 轴方向相同时,晶体呈现自聚焦非线性,忽略光伏效应及扩散效应时,光束在自聚焦饱和非线性铌酸锆钽(SBN)晶体中的传输可用如下归一化非线性薛定谔方程^[4]描述:

$$i\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \beta\frac{u}{1+|u|^2} + \gamma\frac{|u|^2 u}{1+|u|^2} = 0, \quad (1)$$

式中 u 表示光束的慢变包络,其光场表达形式为 $u = r^{1/2} \operatorname{sech}(3.1x)$, 取 $r = 0.5$, $\beta = (k_0 x_0)^2 n_c^4 \gamma_{33} E_0 / 2$, $\gamma = k_0^2 x_0 n_c^4 \gamma_{33} k_B T / (2q)$, $k_B T$ 是玻尔兹曼常数与绝对温度的乘积, q 为电子电量, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示波数, n_c 表示光的折射率, E_0 则是外加电场强度。仿真结果如图 1 所示,图 1(a)和(b)分别对应其幅度和强度分布,可看出,其幅度类似高斯形状,且幅度 $u > 0$, 在 $x = 0$ 处,幅度最大,在 $x \rightarrow \pm\infty$ 处,其幅度趋于零。计算中,入射光波长为 $\lambda = 488 \text{ nm}$, $n_c = 2.33$, $\gamma_{33} = 235 \text{ pm/V}$, 取光束宽度 $x_0 = 14 \text{ }\mu\text{m}$ 。传输距离归一化单位为 $k_0 n_c x_0^2$, 两个横向坐标归一化单位为 x_0 , 所以 $z = 1$ 相当于 5.8 mm 。

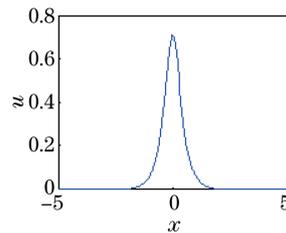


图 1 入射低振幅屏蔽亮孤子的幅度

Fig.1 Amplitude distribution of the low amplitude screening bright solitons

3 数值仿真结果与分析

3.1 线性传输

下面考虑光束在各向同性介质中的线性传输情况,即 $\beta = \gamma = 0$ 。介质中空间孤子的形成是由于光束的衍射效应与非线性效应相互平衡的结果。光束在光折变介质中传输时,如果外加电场消失那么非线性效应也随之消失,此时光束传输了一段距离之后就会因为衍射效应的作用而出现展宽现象,图 2 是孤子传输 $z = 1$ 后的结果,显然,随着传输距离的增加,光束逐渐发生衍射,光束展宽,并且能量分布于整个平面。

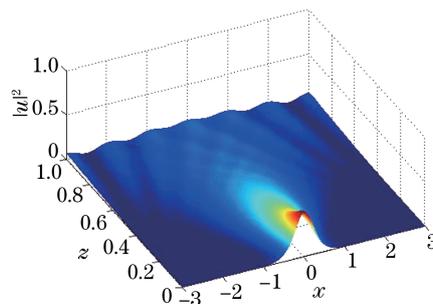


图 2 输入光束的线性传输

Fig.2 Linear propagation of input beam

3.2 非线性传输

讨论光束在各向异性的光折变介质中的非线性传输情况,即 $E_0 \neq 0$ 。在下面的仿真结果中,没有特别

说明时外加电场强度为 $E_0 = 1.2 \times 10^5 \text{ V/m}$, 计算得 $\beta = 27.5$ 。在 $\gamma = 0$ 时, 输入光束可以稳定传输, 形成孤子, 如图 3(a) 所示, 图 3(b) 描述了孤子在 $z = 0$ 和 $z = 5$ 的能量在 x 方向的分布情况, 可以看出, 孤子在晶体中传播的形状保持不变, 强度大小也没变化, 输入输出完全重合, 而图 3(c) 则是光束在传输过程中, 沿 x 和 z 方向的能量分布。当考虑扩散作用时, 即 $\gamma = 0.27$, 其数值仿真结果如图 3(d)~(f) 所示, 很明显, 孤子不再保持直线传输, 而是发生了一定的偏转, 所以扩散机制会引起孤子光束的偏转。

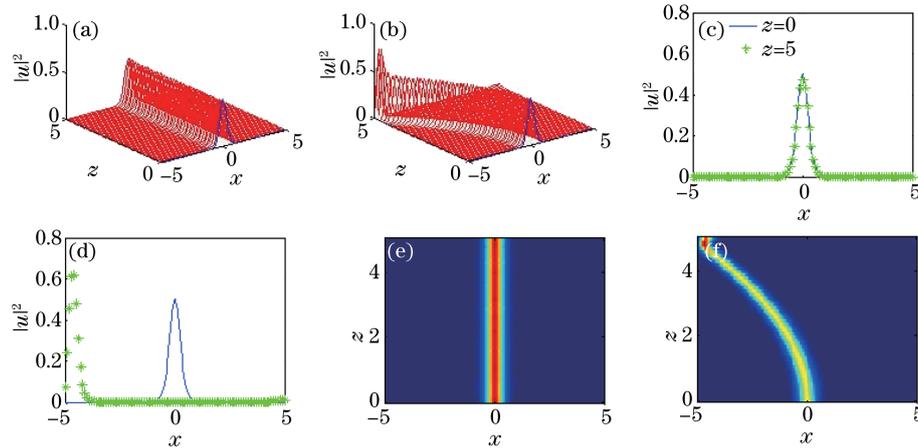


图3 $\beta = 27.5$ 时光束传输 $z = 5$ 的结果

Fig.3 Nonlinear propagation of input beam in the case of $\beta = 27.5$ for $z = 5$

3.3 温度特性对孤子自偏转的影响

由于扩散机制与晶体的温度有着密切的联系, 所以有必要研究温度特性对孤子自偏转的影响。事实上, 扩散机制与温度有关的主要因素是光折变效应依赖于晶体的温度, 例如光耦合和四波混频等光折变效应。Cheng 和 Partovi^[7]给出了 γ 随温度变化的关系式:

$$\gamma = \gamma_0 \frac{T}{300}, \quad (2)$$

式中 γ_0 是 γ 在 $T = 300 \text{ K}$ 时的值, $\gamma_0 = 0.27$ 。 γ 与 T 呈线性关系, 随着 T 的增大, γ 也逐渐增大。

图 4 中的曲线显示了不同温度条件下, 孤子自偏转的程度是不同的。当温度 $T > 0 \text{ K}$ 时, 孤子光束向左偏转, 如图 4(a)~(d) 所示, 并且随着温度的增加, 偏转程度也逐渐增大。图 4(e) 和 (f) 表明当 $T < 0 \text{ K}$ 时, 孤子光束向相反的方向偏转, 此时, 随着温度的降低, 自偏转程度增大。一般绝对零度及以下温度是不可能达到的, 但已知粒子数反转体系远离热平衡状态, 体系温度 $T < 0 \text{ K}$, 因而说体系处于负温度状态。因此实验中可以通过调整晶体的温度来控制亮孤子的偏转。

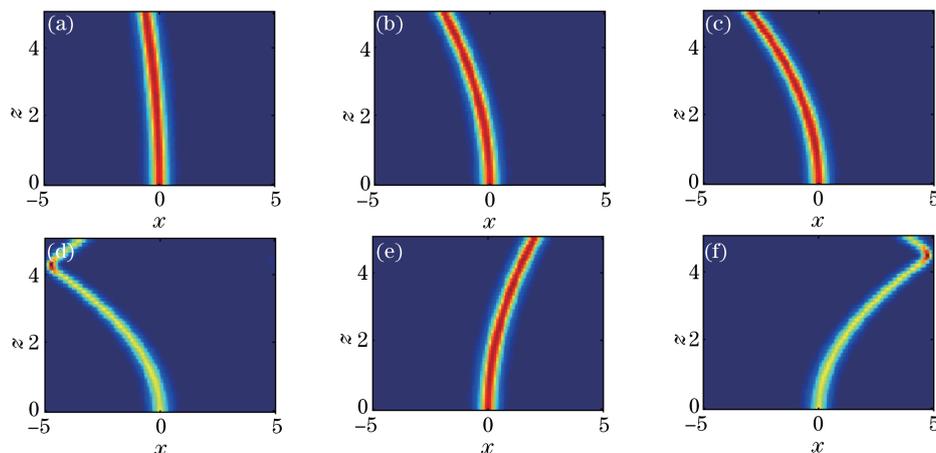


图4 不同温度下的光束自偏转程度。(a) $T = 30 \text{ K}$; (b) $T = 100 \text{ K}$; (c) $T = 150 \text{ K}$; (d) $T = 350 \text{ K}$; (e) $T = -100 \text{ K}$; (f) $T = -300 \text{ K}$

Fig.4 Self-deflection of input beam in different temperatures. (a) $T = 30 \text{ K}$; (b) $T = 100 \text{ K}$; (c) $T = 150 \text{ K}$; (d) $T = 350 \text{ K}$; (e) $T = -100 \text{ K}$; (f) $T = -300 \text{ K}$

若给定一个入射光束(r 值固定),光束的自偏转的距离 Δs 随温度 T 的变化关系由文献[7]给出:

$$\Delta s(T) = 2\beta\gamma(T)K[r(T)], \quad (3)$$

$$K(r) = \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{2ru^2(x)}{1+ru^2(x)} \times \{u^2(x)\ln(1+r) - \ln[1+ru^2(x)]\} \times \left[\int_{-\infty}^{\infty} ru^2(x)ds \right]^{-1}. \quad (4)$$

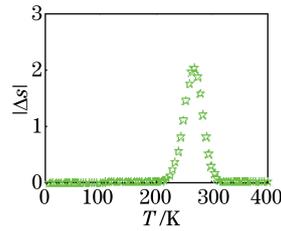


图5 自偏转距离 $|\Delta s|$ 随温度 T 的变化关系图

Fig.5 Relationship of the self-deflection distance $|\Delta s|$ with the temperature T

图5给出了自偏转距离 Δs 的绝对值随温度 T 的曲线关系,其中 $\beta = 27.5$, $\gamma_0 = 0.27$ 。结果显示 Δs 的绝对值在其特征温度 T_c 处达到最大值;当 $T < T_c$ 时,其值随着 T 的增大而逐渐增大;相反,当 $T > T_c$ 时,其值随着 T 的增大而逐渐减小。由此可以选择一个恰当的晶体温度参数去调整光折变晶体中亮孤子的自偏转距离 Δs 。

4 结 论

研究了自聚焦饱和非线性 SBN 晶体中光孤子的传输,通过数值仿真给出了低振幅下的(1+1)维屏蔽亮孤子光束在光折变介质中的传输特性。发现屏蔽亮孤子在晶体中非线性传输时,若忽略扩散机制,可以保持孤子形态沿直线传输;而若考虑扩散作用,孤子会发生自偏转,偏转方向及程度与温度有关。通过分析偏转距离绝对值随温度的变化关系,发现 $|\Delta s|$ 在其特征温度 T_c 处达到最大值;当 $T < T_c$ 时,其值随着 T 的增大而逐渐增大;相反,当 $T > T_c$ 时,其值随着 T 的增大而逐渐减小。由此可以选择一个恰当的晶体温度参数去调整和控制光折变晶体中亮孤子的自偏转距离 Δs ,所以调控温度是改变孤子空间形态的重要手段之一。

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 Duree G C, Shultz J L, Salamo G J, *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 Segev M, Valley G C, Crosignani B, *et al.*. Steady-state spatial screening solutions in photorefractive materials with external applied field[J]. Phys Rev Lett, 1994, 73(24): 3211-3214.
- 4 Christodoulides D N, Carvalho M I. Bright, dark, and gray spatial soliton states in photorefractive media[J]. J Opt Soc Am B, 1995, 12(9): 1628-1633.
- 5 Valley G C, Segev M, Crosignani B, *et al.*. Dark and bright photovoltaic spatial solutions[J]. Phys Rev A, 1994, 50(6): R4457-R4460.
- 6 Taya M, Bashaw M C, Fejer M M, *et al.*. Observation of dark photovoltaic spatial solutions[J]. Phys Rev A, 1995, 52(4): 3095-3100.
- 7 Cheng L J, Partovi A. Temperature and intensity dependence of photorefractive effect in GaAs[J]. Appl Phys Lett, 1986, 49(21): 1456-1458.
- 8 Ji Xuanmang, Liu Jinsong. Temperature dependence of the low-amplitude screening spatial solitons in photorefractive crystal[J]. Journal of Yuncheng University, 2004, 22(5): 5-7.
吉选芒, 刘劲松. 光折变晶体中低振幅屏蔽孤子的温度特性[J]. 运城学院学报, 2004, 22(5): 5-7.
- 9 Shi Yaoyao, Wu Tong, Liu Youwen, *et al.*. Control of self-bending Airy beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1404-1407.
施瑶瑶, 吴彤, 刘友文, 等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1404-1407.
- 10 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.
- 11 Hao Zhonghua, Liu Jinsong. Self-deflection of a bright soliton in a separate bright-dark spatial soliton pair based on a higher-order space charge field[J]. Chin Phys B, 2003, 12(10): 1124-1134.
- 12 Chen Ke, Qin Yali, Ren Hongliang, *et al.*. The temperature properties of partially spatially coherent beams in biased photorefractive crystal[C]. 2010 9th International Conference on Optical Communications and Networks, 2010: 286-289.

栏目编辑: 殷建芳