

艾里-高斯光束在光折变介质中的孤子脱落

白小琴, 王宇浩, 张静, 肖燕*

山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006

摘要 以非线性薛定谔方程为理论模型, 采用分步傅里叶方法研究了光折变介质中艾里-高斯光束的传播特性。结果表明: 满足一定条件时, 光折变介质中会形成周期振荡的空间孤子; 介质的非线性系数越大, 形成空间孤子所需的传输距离越短, 孤子的振荡周期越小; 当艾里-高斯光束的初始入射功率在一定范围内时, 光折变介质中才会形成稳定的空间孤子; 在空间孤子形成时, 由于局部能量竞争, 会出现光束分裂成丝现象。此外, 还研究了微噪声扰动对艾里-高斯光束在光折变介质中传输稳定性的影响。

关键词 光纤光学; 艾里-高斯光束; 光折变; 孤子

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0805001

Soliton Shedding from Airy-Gaussian Beams in Photorefractive Media

Bai Xiaoqin, Wang Yuhao, Zhang Jing, Xiao Yan*

College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract Starting from the nonlinear Schrodinger equation and by means of split-step Fourier numerical simulation, we study the propagation characteristics of Airy-Gaussian (AiG) beams in a photorefractive media. The results show that a specific set of parameters can result in soliton with periodic oscillation in the photorefractive media. The bigger the nonlinear factor is, the shorter the distance required to form soliton is, and the smaller the oscillation period of the soliton is. When the initial incident power of the Airy-Gaussian beam is within a certain range, the stable soliton can form. In the process of soliton formation, local energy competition leads to beam splitting. In addition, we also check the stability of the beam by perturbing the initial Airy-Gaussian beam.

Key words fiber optics; Airy-Gaussian beams; photorefractive media; soliton

OCIS codes 060.2310; 060.4370; 190.4370; 190.6135

1 引言

1979年, Berry等^[1]发现艾里函数是薛定谔方程的一个特解, 场分布满足艾里函数的艾里波包包含着无限能量, 这样的波包在实际中无法得到。2007年, Siviloglou等^[2]在实验上得到了有限能量的艾里光束, 这一发现引发了研究人员对艾里光束的研究热潮。国内外学者通过研究发现, 艾里光束具有自加速、无衍射和自愈^[3-7]等特性, 且艾里光束在光子弹^[8]、电子加速^[9]、等离子体通道^[10-12]和微粒操控^[13-14]等方面具有很大的应用价值。

艾里-高斯光束由艾里光束经过高斯光阑调制后得到, 具有有限能量, 通过分布因子可以调节其场

分布。基于此, 艾里-高斯光束近年来受到了人们的广泛关注。2015年, Chen等^[15]发现, 当艾里-高斯光束的初始入射功率比较大时, 其在传输过程中会产生准呼吸孤子, 且分布因子越大, 形成准呼吸孤子所需的初始入射功率越小。2016年, Zhang等^[16]对非局域非线性介质中艾里-高斯光束的传播特性进行研究后发现, 非局域性能够使艾里-高斯光束周期、反向振荡, 从而使得艾里-高斯光束形成稳定的束缚态。Chen等^[17-18]报道了艾里-高斯光束在饱和非线性介质中的传播特性, 即在一定功率范围内, 调节光束的初始振幅与光场分布, 会形成传输方向可控的呼吸孤子。Zhang等^[19-20]先后发现了啁啾对艾里-高斯光束在抛物势介质中传输特性的重要影响,

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-03-28; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61575115, 61378039)

* E-mail: xiaoyan@sxu.edu.cn

即在抛物势介质中,啁啾艾里-高斯光束会呈现谐波振荡的传输状态。此外,艾里-高斯光束在克尔介质和饱和介质等非线性介质中的相互作用^[21-22]也引起了人们的广泛关注,但关于艾里-高斯光束在光折变介质中传输特性的报道^[23]却很少。

光折变介质是一种能产生光感生折射率变化的介质。入射光将介质中的杂质和缺陷形成的电子或空穴激发出来,从而在介质中出现光感生电场。光感生电场通过电光效应使介质的折射率发生变化。当折射率对光束的约束作用与光束的衍射效应相当时,光束发生自陷,形成光孤子。光折变介质具有独特的效应^[24-28],已引起了人们的广泛关注。其中艾里光束^[29-30]和高斯光束^[31-32]等在光折变介质中的各种特性更是吸引了国内外学者的极大兴趣。

本文以非线性薛定谔方程为理论模型,采用分别处理衍射和非线性效应得到近似结果的分步傅里叶数值模拟方法^[33-34],研究了艾里-高斯光束在光折变介质中的传输演化特性,分析了分布因子、非线性系数和振幅等参数对呼吸孤子形成的影响。结果表明,在光折变介质中,当艾里-高斯光束的光强比较小时也能形成空间孤子,这使其在光学信息处理方面有着一定的研究价值。此外,通过改变非线性系数和分布因子等参数,可以调整空间孤子的倾斜角度和振荡周期等,利用这些性质可以制成光学开关和光学逻辑门等器件。

2 理论模型

在傍轴近似下,光折变介质中沿 X 方向衍射、 Z 方向传输的 $1+1$ 维艾里-高斯光束满足的归一化非线性薛定谔方程为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - \beta \frac{U}{1 + |U|^2} = 0, \quad (1)$$

式中: U 表示艾里-高斯光束的慢变包络; $X = x/x_0$ 和 $Z = z/(kx_0^2)$ 分别表示归一化横向坐标和传输距离,其中 x 表示未归一化的横向坐标, x_0 表示初始光束的横向尺寸参数, z 表示未归一化的传输距离, $k = k_0 n_e = (2\pi/\lambda_0) n_e$, λ_0 表示自由空间波长, n_e 表示非常光折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 表示自由空间中的波数; $\beta = E_0 (k_0 x_0)^2 n_e^4 r_{33} / 2$ 表示非线性强度,其中 r_{33} 表示电光系数, E_0 表示外电场的强度。

初始入射艾里-高斯光束的光强分布为

$$U(X, 0) = A_0 Ai(X) \exp(aX) \exp(-\chi_0^2 X^2), \quad (2)$$

式中: A_0 表示入射光束的振幅; $Ai(X)$ 表示艾里函

数; a 表示截断系数(取 $a = 0.1$); χ_0 表示分布因子, $\chi_0 \rightarrow 0$ 时艾里-高斯光束的光强分布趋近于艾里函数, $\chi_0 \rightarrow \infty$ 时艾里-高斯光束的光强分布趋近于高斯函数。

3 数值仿真

基于(2)式,考虑不同参数的影响,采用数值模拟法给出了艾里-高斯光束在光折变介质中的演化特性。

图 1 描述了光折变介质中非线性系数 β 和分布因子 χ_0 对艾里-高斯光束传输特性的影响。由图 1 可见:当 $\beta = 0$ 时,光束在线性介质中传输,但由于光束的衍射效应,在传输一段距离后,光束迅速展宽,能量很快损失;当 $\beta \neq 0$ 但取值较小时,由于介质的自聚焦效应小于光束的衍射效应,光束基本保持自加速传输,无孤子产生,如图 1(a2)、(b2) 和 (c2) 所示;随着 β 的增大,能量开始会聚,当介质的自聚焦效应与光束的衍射效应相当时,能量会聚在主瓣位置处,并在此处出现能量脱落,形成周期性振荡的空间孤子; β 越大,介质的自聚焦效应越大,旁瓣的能量越容易会聚到主瓣处,形成空间孤子所需的传输距离越短;同时,孤子的振荡周期越小,旁瓣的能量越弱,如图 1(a3)-(a5) 和图 1(b3)-(b5) 所示。需要注意的是,由于光束的自加速特性,空间孤子在传输时会沿着光束的自加速方向偏转,从而与 Z 轴形成一定的夹角,且 β 越大,该夹角越大。因此,可以通过改变 β 来调节光束的倾斜角度。当 χ_0 增大时,艾里-高斯光束逐渐趋近于高斯光束,旁瓣越来越少;当 χ_0 取值较大时,随着 β 的增大,也会形成沿 z 轴稳定传输的空间孤子,但由于此时艾里-高斯光束趋近于高斯光束,自加速特性减弱,空间孤子与 Z 轴的夹角非常小。

图 2(a) 是 $\chi_0 = 0.1, A_0 = 3, \beta$ 取不同值时,光折变介质中艾里-高斯光束的最大峰值强度与传输距离之间的关系图。图中表明, χ_0 取值一定时, β 越大,空间孤子的振荡周期越小。这是因为非线性系数 β 越大,介质的自聚焦效应越强,对光束的约束作用越大,自聚焦效应越容易与光束的衍射效应达到平衡,从而使所形成的空间孤子的振荡周期变小。此外, β 越大,空间孤子的能量越大。这是由于随着 β 的增大,介质的自聚焦效应逐渐增大,旁瓣的能量逐渐转移到空间孤子中,从而使得空间孤子的能量变强。当传输距离较大时,由于光束的衍射效应,光束的传输变得不稳定,如 $\beta = 2, Z > 40$ 。图 2(b) 是

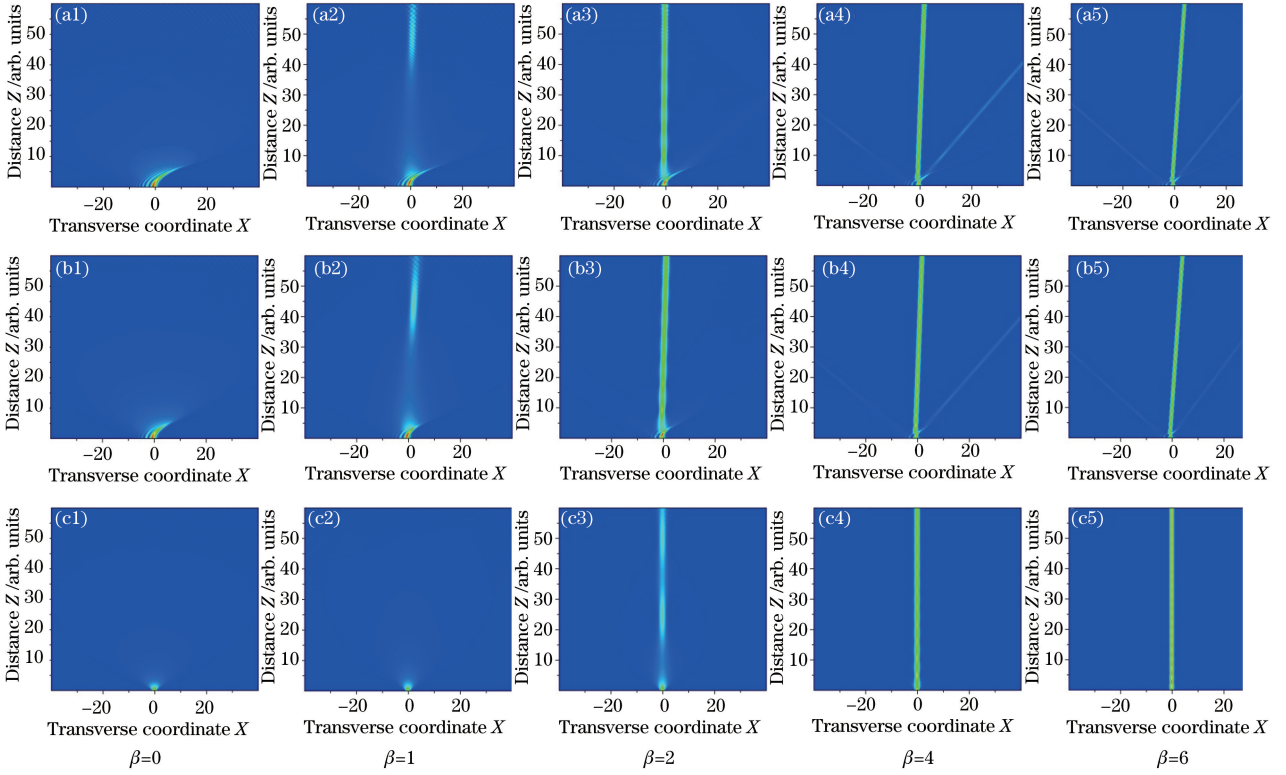


图1 $A_0=3$ 时, χ_0 取不同值的光折变介质中艾里-高斯光束的传输演化示意图。

(a1)-(a5) $\chi_0=0.01$; (b1)-(b5) $\chi_0=0.1$; (c1)-(c5) $\chi_0=1$

Fig. 1 Diagrams of transmission evolution of AiG beam in photorefractive media for different χ_0 when $A_0=3$.

(a1)-(a5) $\chi_0=0.01$; (b1)-(b5) $\chi_0=0.1$; (c1)-(c5) $\chi_0=1$

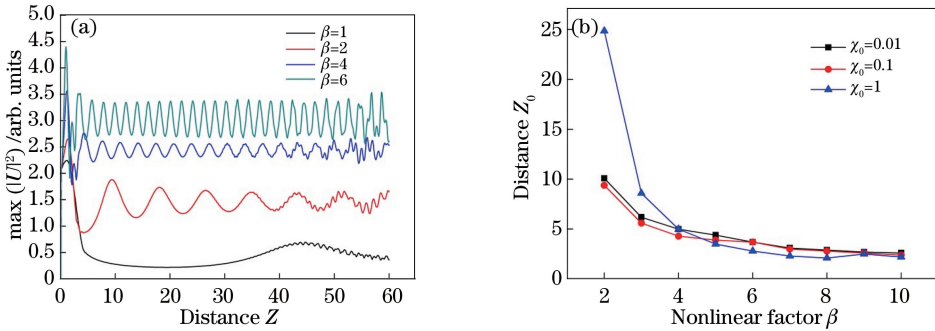


图2 艾里-高斯光束的最大峰值强度与传输距离之间的关系图及形成空间孤子所需的传输距离 Z_0 与非线性系数 β 之间的关系图。(a) $\chi_0=0.1, A_0=3, \beta$ 取不同值时, 光折变介质中艾里-高斯光束的最大峰值强度与传输距离之间的关系图; (b) $A_0=3$ 时, 形成空间孤子所需的传输距离 Z_0 与非线性系数 β 之间的关系图

Fig. 2 Maximum peak intensity of AiG beams versus propagation distance and propagation distance Z_0 to form soliton versus nonlinear factor β . (a) Maximum peak intensity of AiG beams versus propagation distance under different β when $\chi_0=0.1$ and $A_0=3$; (b) propagation distance Z_0 to form soliton versus nonlinear factor β when $A_0=3$

$A_0=3$ 时, 形成空间孤子所需的传输距离 Z_0 与非线性系数 β 之间的关系图。图中表明, β 越大, 形成空间孤子所需的传输距离 Z_0 越短, 且随着 β 的增大, χ_0 的大小对 Z_0 的影响越来越小。因此, 可以通过调节 β 的大小来控制形成空间孤子所需的传输距离。

图3展示了光折变介质中艾里-高斯光束的初

始振幅 A_0 和分布因子 χ_0 对艾里-高斯光束传输特性的影响。由图3(a1)、(b1)和(c1)可知: 当初始入射光束的振幅 A_0 较小时, 光束的初始入射功率较小, 会聚效应较弱, 无空间孤子形成; 随着 χ_0 的增加, 光束的旁瓣越来越少, 自加速效应越来越弱。由图3(a4)、(b4)和(c4)可见, 当初始入射光束的振幅

A_0 非常大时,会聚效应远大于光束的衍射效应,导致了较差的光束质量,也没有稳定的空间孤子形成。也就是说,稳定空间孤子的形成与光束的初始入射功率有关,即光束的初始入射功率必须大于临界功率且小于某一功率阈值时,才会形成稳定的空间孤子。从图 3(a2)、(b2)、(a3)和(b3)可以看出,当 χ_0

取值较小时,在能够形成稳定的空间孤子的情况下,随着 χ_0 的增大,空间孤子会发生角度偏转,且 χ_0 越大,角度偏转越大。从图 3(c2)、(c3)中可以看出,当 χ_0 取值较大时,在一定的初始入射功率下,由于光束的自加速特性非常弱,能量主要集中于光束中心,空间孤子会沿着 Z 轴稳定传输。

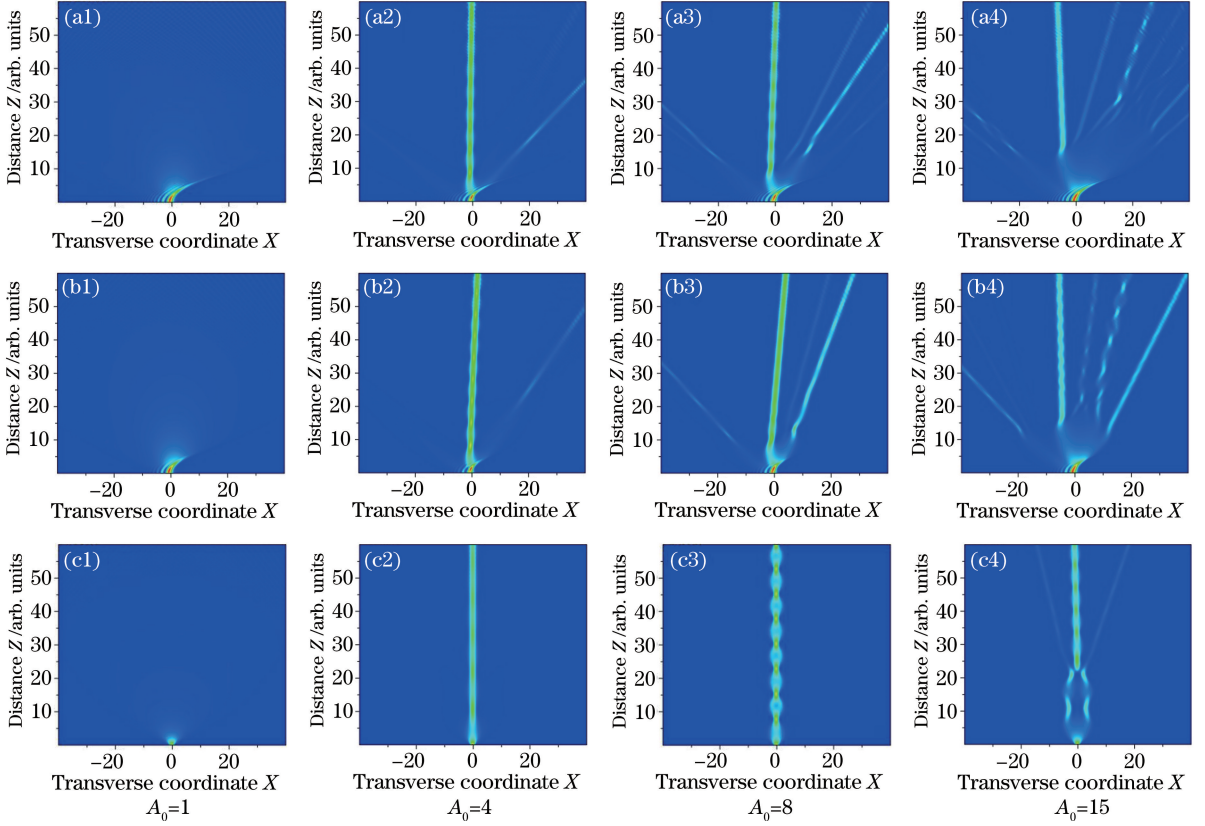


图 3 光折变介质中艾里-高斯光束的初始振幅 A_0 和分布因子 χ_0 对艾里-高斯光束传输演化的影响。

(a1)-(a4) $\chi_0 = 0.01$; (b1)-(b4) $\chi_0 = 0.1$; (c1)-(c4) $\chi_0 = 1$

Fig. 3 Effects of initial amplitude A_0 and distribution factor χ_0 of AiG beam on transmission evolution in photorefractive media. (a1)-(a4) $\chi_0 = 0.01$; (b1)-(b4) $\chi_0 = 0.1$; (c1)-(c4) $\chi_0 = 1$

图 4 是 $\chi_0 = 0.1$ 、 β 和 A_0 取不同值时,光折变介质中艾里-高斯光束的传输演化示意图。对比图 4 (a1)、(b1)、(c1)可以看出:当 A_0 、 β 较小时,不会形成空间孤子;当 A_0 较小、 β 较大时,会形成稳定的空间孤子。这是因为,相对小的初始入射功率会导致相对弱的会聚效果。当 β 较小时,介质的自聚焦效应也较小,这会使光束旁瓣的能量无法会聚到主瓣处,从而无法形成空间孤子;但当 β 较大时,介质的自聚焦效应和初始入射功率所导致的会聚效应共同作用,这时会有空间孤子形成。如图 4(a2)、(b2)、(c2)和图 4(a3)、(b3)、(c3)所示, A_0 一定时, β 越大,光束产生的角度偏转越大,空间孤子的振荡周期越小;如图 4(b2)、(b3)和(b4)所示, β 取一定值时, A_0 越大,产生空间孤子的位置处的光束质量越差;

如图 4(c3)、(c4)所示,当 A_0 和 β 同时取较大的值时,在传输的初期,光束会发生周期、反向振荡,且 β 越大,该传输的初期距离越大;经过这个初期距离后,光束会变成周期振荡的空间孤子。

图 5(a)、(b)和(c)分别为 $A_0 = 3$ 、 $\beta = 4$ 、 χ_0 取 0.01、0.1 和 0.3 时,不同传输距离上艾里-高斯光束的传输波形图。当 $A_0 = 3$ 、 $\beta = 4$ 时,由前述研究结果可知,光束在传输过程中会形成周期振荡的空间孤子。如图 5(a)、(b)所示,当 χ_0 取值较小时,光束在传输过程中旁瓣的能量会逐渐会聚在主瓣处,且随着传输距离的增加会形成稳定的空间孤子,而此空间孤子包含了光束的大部分能量。需要注意的是,在会聚过程中光束的宽度不断减小,光束主瓣处的光强不断增大,在空间孤子形成时,光束中心位置

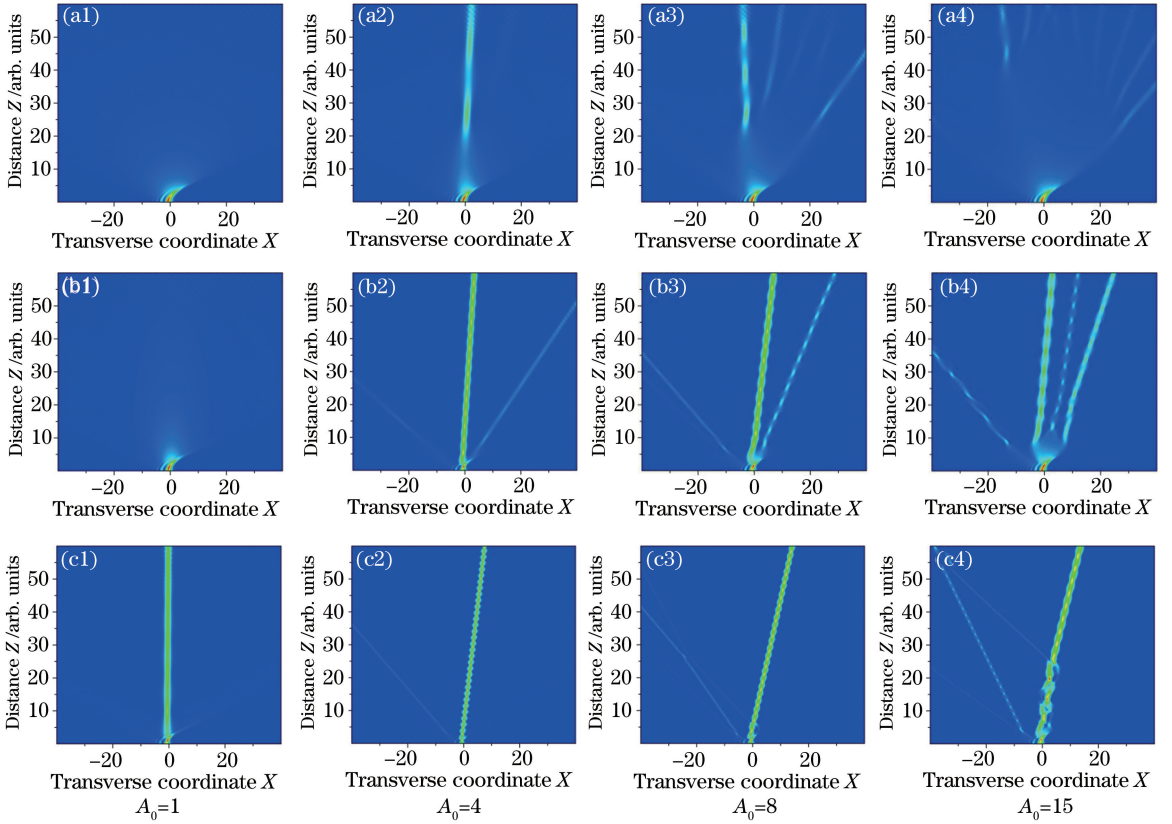


图 4 $\chi_0=0.1$ 、 β 和 A_0 取不同值时,光折变介质中艾里-高斯光束的传输演化示意图。

(a1)-(a4) $\beta=1$; (b1)-(b4) $\beta=3$; (c1)-(c4) $\beta=7$

Fig. 4 Diagrams of transmission evolution of AiG beams in photorefractive media under different A_0

and β when $\chi_0=0.1$. (a1)-(a4) $\beta=1$; (b1)-(b4) $\beta=3$; (c1)-(c4) $\beta=7$

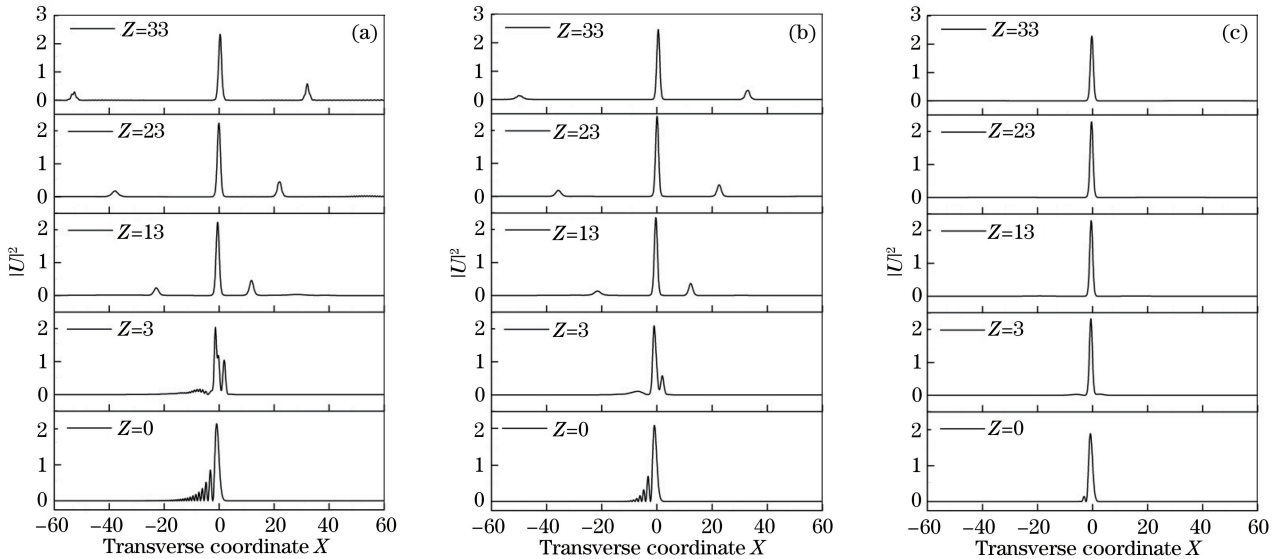


图 5 $A_0=3, \beta=4, \chi_0$ 取不同值时,不同传输距离上艾里-高斯光束的传输波形图。

(a) $\chi_0=0.01$; (b) $\chi_0=0.1$; (c) $\chi_0=0.3$

Fig. 5 Waveforms of AiG beams under different χ_0 when $A_0=3$ and $\beta=4$.

(a) $\chi_0=0.01$; (b) $\chi_0=0.1$; (c) $\chi_0=0.3$

附近出现局部的能量竞争,从而导致光束分裂成丝, 如图 5(a)、(b)中间位置两侧的凸起所示,这种现象

与文献[35]所得结果类似。而这一现象也可以在图 1、3 和 4 中被直观地观测到;当 χ_0 较大时,艾里-高

斯光束趋近于高斯光束,旁瓣很少。如图 5(c) 所示,当 $\chi_0=0.3$ 、 $Z=3$ 时,旁瓣几乎消失。这种情况下也会形成空间孤子,但没有出现光束分裂成丝的现象。

未加微噪声扰动的艾里-高斯光束的传输演化

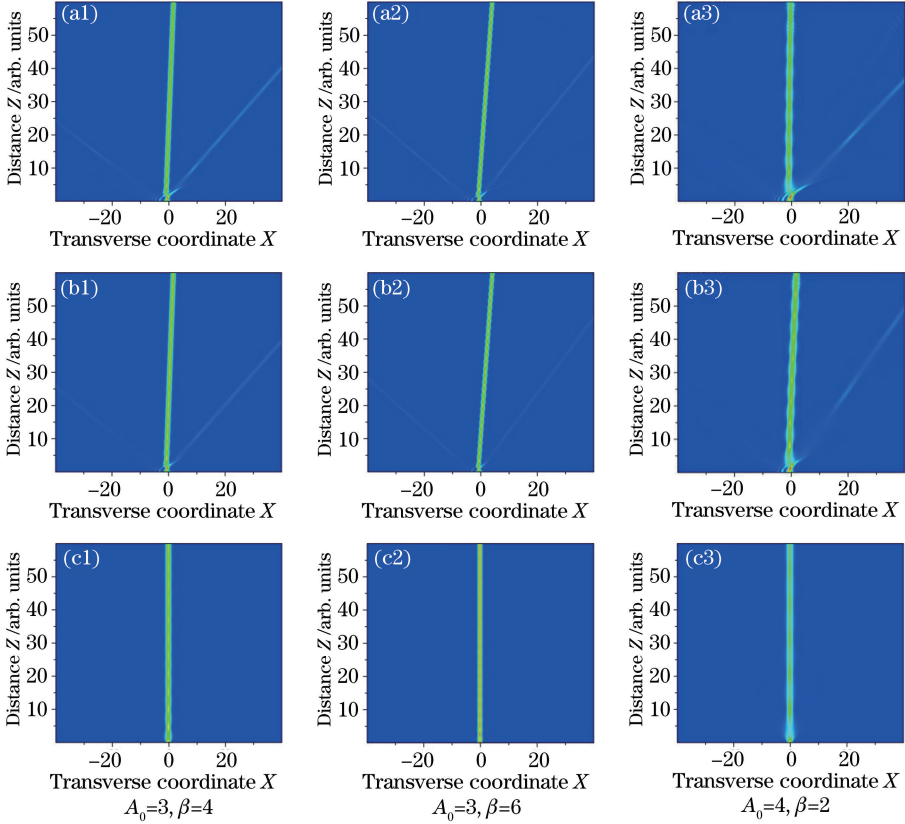


图 6 在初始入射光束中加入 2% 随机噪声扰动时,艾里-高斯光束的传输稳定性。

(a1)-(a3) $\chi_0=0.01$; (b1)-(b3) $\chi_0=0.1$; (c1)-(c3) $\chi_0=1$

Fig. 6 Transmission stability of AiG beams when adding 2% random noise perturbation to initial incident beam.

(a1)-(a3) $\chi_0=0.01$; (b1)-(b3) $\chi_0=0.1$; (c1)-(c3) $\chi_0=1$

4 结 论

基于非线性薛定谔方程,采用分步傅里叶方法数值模拟了光折变介质中艾里-高斯光束的传输演化特性。结果表明,当满足一定条件时,艾里-高斯光束在传输时会发生能量脱落,从而产生周期振荡的空间孤子。非线性系数 β 、初始入射光束的振幅 A_0 和分布因子 χ_0 对空间孤子的产生和传输具有重要影响:只有当 β 比较大时,自聚焦效应才会导致空间孤子形成。 β 越大,形成空间孤子所需的传输距离越短,空间孤子振荡的周期越小,空间孤子的角度偏转越大。只有当初始入射光束的入射功率在一定范围内时,才会形成稳定的空间孤子。在给定 A_0 时, χ_0 越大,空间孤子的角度偏转越大。此外,在入射艾里-高斯光束加入微噪声扰动后,传输过程中仍

图在图 1 和图 3 中已经描述过。在相同的参数下,图 6 给出了在初始入射光束中加入 2% 随机噪声扰动后,艾里-高斯光束的传输稳定性。研究结果表明,加入微噪声扰动时,艾里-高斯光束在光折变介质中仍然能够产生稳定传输的空间孤子。

形成了空间孤子,并能够稳定传输。

参 考 文 献

- [1] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets [J]. American Journal of Physics, 1979, 47(3): 264-267.
- [2] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- [3] Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [4] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [5] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams [J]. Optics Letters, 2007,

- 32(8): 979-981.
- [6] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 207-209.
- [7] Bandres M A, Rodríguez-Lara B M. Nondiffracting accelerating waves: Weber waves and parabolic momentum[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(1): 013054.
- [8] Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D G, *et al.* Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253901.
- [9] Voloch-Bloch N, Lereah Y, Lilach Y, *et al.* Generation of electron Airy beams[J]. *Nature*, 2013, 494(7437): 331-335.
- [10] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229-232.
- [11] Salandrino A, Christodoulides D N. Airy plasmon: a nondiffracting surface wave [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 2082-2084.
- [12] Zhang P, Wang S, Liu Y M, *et al.* Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3191-3193.
- [13] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, *et al.* Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [14] McGloin D, Reid J P. Forty years of optical manipulation[J]. *Optics and Photonics News*, 2010, 21(3): 20-26.
- [15] Chen C D, Chen B, Peng X, *et al.* Propagation of Airy-Gaussian beam in Kerr medium[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(3): 035504.
- [16] Zhang X P. Bound states of breathing Airy-Gaussian beams in nonlocal nonlinear medium [J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 364-371.
- [17] Chen W J, Lu K Q, Hui J L, *et al.* Propagation and interactions of Airy-Gaussian beams in saturable nonlinear medium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(24): 244202.
陈卫军, 卢克清, 惠娟利, 等. 饱和非线性介质中艾里-高斯光束的传输与交互作用 [J]. *物理学报*, 2016, 65(24): 244202.
- [18] Chen W J, Yang J K, Liu C Y, *et al.* Generation and propagation regulation of Airy solitons in saturable nonlinear medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0119001.
陈卫军, 杨继凯, 刘春阳, 等. 饱和非线性介质中艾里孤子的产生与传输调控 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0119001.
- [19] Zhang L P, Deng F, Peng Y L, *et al.* Chirped Airy-Gaussian beam in a medium with a parabolic potential [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(1): 015404.
- [20] Zhang L, Bai X Q, Wang Y H, *et al.* Interaction of Airy beams in a medium with parabolic potential[J]. *Optik*, 2018, 161: 106-110.
- [21] Peng Y L, Peng X, Chen B, *et al.* Interaction of Airy-Gaussian beams in Kerr media [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 116-122.
- [22] Zhou M L, Peng Y L, Chen C D, *et al.* Interaction of Airy-Gaussian beams in saturable media [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(8): 084102.
- [23] Jiang Q C, Su Y L, Ma Z W, *et al.* Propagation properties of Airy-Gaussian beams in centrosymmetric photorefractive media[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(19): 2243-2249.
- [24] Segev M, Valley G C, Bashaw M C, *et al.* Photovoltaic spatial solitons [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(7): 1772-1781.
- [25] Gao L X, Lu K Q, Zhao C, *et al.* Study on sequence of odd and even gap solitons in self-focusing photovoltaic-photorefractive crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0908001.
高立许, 卢克清, 赵冲, 等. 自聚焦光伏光折变晶体中奇偶间隙孤子序列研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0908001.
- [26] Ji X M, Jiang Q C, Liu J S. Separate screening-photovoltaic soliton pairs in series two-photon photorefractive crystal circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2370-2376.
吉选芒, 姜其畅, 刘劲松. 双光子光折变晶体串联回路中独立屏蔽光伏孤子对 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2370-2376.
- [27] Lu K Q, Li K H, Zhang Y P, *et al.* Gray photorefractive polymeric optical spatial solitons[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(23): 4741-4748.
- [28] Zhang T H, Ren X K, Wang B H, *et al.* Surface waves with photorefractive nonlinearity[J]. *Physical Review A*, 2007, 76: 013827.
- [29] Wiersma N, Marsal N, Sciamanna M, *et al.* Airy beam self-focusing in a photorefractive medium [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35078.
- [30] Jia S, Lee J, Fleischer J W, *et al.* Diffusion-trapped Airy beams in photorefractive media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253904.
- [31] Christodoulides D N, Coskun T H. Diffraction-free planar beams in unbiased photorefractive media[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(18): 1460-1462.
- [32] Jiang Q C, Su Y L, Nie H X, *et al.* Propagation and interaction of cos-Gaussian beams in photorefractive

- crystals[J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(28): 2246-2249.
- [33] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 4th ed. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2008.
- [34] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics*[M]. Jia D F, Yu Z H, Tan B, Transl. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 2版. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [35] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(11): 628-630.