

## PT 对称介质中 Airy 光束的演化特性研究

文 兵<sup>1,2</sup>, 邓杨保<sup>1\*</sup>, 张赛文<sup>1</sup>, 韦家谋<sup>2</sup>, 邓曙光<sup>1</sup>, 张光富<sup>1</sup>

- (1. 湖南城市学院 信息与工程学院 全固态储能材料与器件湖南省重点实验室, 湖南 益阳 413002;  
2. 湖南大学 物理与微电子科学学院 微纳光电器件教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 利用分步傅里叶方法, 研究了 PT 对称介质中 Airy 光束的演化特性, 并从截断系数、调制深度、调制宽度三个参数, 研究了其对 Airy 光束所脱落出的孤子的传输特性的影响。研究发现: Airy 光束在 PT 对称介质中传输时, 在主峰位置处脱落出一个周期性变化的孤子并且孤子波形会产生一个横向位置的偏移; 另外发现, 截断系数  $a$  越小、调制深度  $P$  和调制因子  $w$  越大, Airy 光束脱落出的孤子的峰均比越大, 产生的光束干扰和光束畸变越大, 阻碍光纤通信; 调制深度  $P$  越小、调制因子  $w$  越大, Airy 光束脱落出的孤子的峰值和峰均比出现了明显的跳跃, 传输的稳定性减小, 但是脱落出的孤子依然能够稳定地长距离传输。

**关键词:** Airy 光束; PT 对称; 脱落孤子; 演化

**中图分类号:** O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200165

## Study on the evolution of Airy beam in PT symmetric medium

Wen Bing<sup>1,2</sup>, Deng Yangbao<sup>1\*</sup>, Zhang Saiwen<sup>1</sup>, Wei Jiamou<sup>2</sup>, Deng Shuguang<sup>1</sup>, Zhang Guangfu<sup>1</sup>

- (1. All-Solid-State Energy Storage Materials and Devices Key Laboratory of Hunan Province, College of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang 413002, China;  
2. Key Laboratory for Micro-/Nano-Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The evolution characteristics of an Airy beam in PT symmetric medium by using split-step Fourier method was investigated. Then the impact of truncation width, modulation depth, and modulation width on the propagation properties of soliton generated from an Airy beam was discussed in detail. The results illustrate that when an Airy beam propagates in a PT symmetric medium, a soliton with periodic variation is shedded at the main peak position and a lateral offset is generated. Moreover, it is demonstrated that with decreasing truncation width  $a$ , increasing modulation depth  $P$  and modulation factor  $w$ , the peak-to-average power ratio of a soliton from Airy beam increases, which causes the beam interference and beam distortion become more and more. With decrement of modulation depth  $P$  and increment of modulation factor  $w$ , the peak intensity and peak-to-average power ratio of a soliton from an Airy beam jump obviously, leading to decreasing propagation stability of a soliton. However, the shedding soliton can still propagates stably in a long distance.

**Key words:** Airy beam; PT symmetric; shedding soliton; evolution

收稿日期: 2020-05-01; 修订日期: 2020-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(11947088, 61605045); 湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(19B100, 19B098);

全固态储能材料与器件湖南省重点实验室开放项目(2017TP1024)

作者简介: 文兵(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: wenbing0409@126.com

通讯作者: 邓杨保(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事超短脉冲的传输、控制、测量及应用方面的研究。Email: dyb5202008@aliyun.com

## 0 引言

近年来,有限能量 Airy 光束作为一种新型的光束被引入光学领域<sup>[1]</sup>。由于自加速(自减速)<sup>[2]</sup>、自修复<sup>[3]</sup>和准无衍射<sup>[4]</sup>等独特特性,有限能量 Airy 光束有可能实现光捕获和操纵<sup>[5]</sup>、拉曼诱导频移控制<sup>[6]</sup>、梯度折射率孤子动力学<sup>[7]</sup>和光弹产生<sup>[8]</sup>。又由于 Airy 光束经过非线性介质远距离传输时,由于受到各种非线性效应的影响,使得远距离传输后光束质量严重下降,因此利用各种材料调控光束的演化特性,以获得高光束质量的激光是非常重要的。另外,Airy 光束在光纤中有一系列的应用。利用 Airy 光束的无衍射、自恢复和自弯曲特性抑制大气湍流效应,实现远距离无线光通信,对部分 Airy 光束在大气湍流中传输时的光强演化进行了研究<sup>[9]</sup>。研究者在实验中利用线偏振模式和涡旋光模式在 1.1 km 少模光纤中进行模式编码通信,成功实现图像传输,并提升模式编码速率<sup>[10]</sup>。同时分析了传统多模光纤中涡旋光束特性,进行了多模光纤中涡旋光束信息传输研究,成功在传统多模光纤中传输了四个不同的光束<sup>[11]</sup>。

随着材料科学的不断发展,许多新型的非线性材料不断被发现,例如宇称时间对称(PT-symmetric)介质。在过去的十几年里,Christodoulides 等<sup>[12-13]</sup>创造性地将 PT 对称性引入光波段,并研究光束在该介质中的传输特性。PT 对称结构在光学材料上的构造相对容易,在光学格子中可通过周期性加入增益和损耗来制作具有 PT 对称结构的光学格子。2012 年,Regensburger 等<sup>[14]</sup>在《Nature》上报道了人工合成 PT 对称光学格子材料,于是众多领域的学者开始大量开展有关 PT 对称方面的研究。PT 对称结构的光学格子介质拥有一些独特性质,特别是在 PT 对称分裂区域附近,使得激光光束在该介质中传输时会产生许多新现象和新特性,例如双折射<sup>[15-16]</sup>、功率振荡<sup>[17]</sup>、单向衍射模式<sup>[18-19]</sup>以及 PT 孤子<sup>[20-21]</sup>等。由于满足 PT 对称性光学格子中空间光孤子在传输过程中所表现出的独特性,其存在性、稳定性及其传输特性的研究引起了广大科研工作者的研究热潮。

非线性科学的一个重要课题是研究和探索非线性介质中的激光的局部化结构。呼吸孤子是一种新的具有时间或空间周期振荡的结构形式,广泛存在

于各种非线性物理系统中,如玻色-爱因斯坦凝聚体<sup>[18]</sup>、颗粒晶格<sup>[22]</sup>、流体力学<sup>[23]</sup>、光学<sup>[24]</sup>等。与传统的形状不变的基阶孤子相比,呼吸孤子在时域或者空域内波形经历周期性的压缩和拉伸并且呼吸孤子的能量也由于位于中心和旁边的光谱成分之间的交换而出现周期性变化。研究者从理论和数值模拟上发现孤子在具有 PT 对称势的非均匀非线性介质中传输时,其能量发生周期性的变化<sup>[25]</sup>。更重要的是,研究 PT 对称介质中的呼吸孤子动力学及其相关机制,将进一步拓展其不同非线性物理系统中的应用范围,完善呼吸孤子动力学的基本理论。然而,由于 Airy 函数的不可积分性增加了理论研究 Airy 光束在 PT 对称介质中传输的复杂性,其产生的呼吸孤子的物理规律仍然是难以捉摸的<sup>[26-27]</sup>。但是 Airy 光束在非线性介质中传输时,能够在主瓣处脱落出一个孤子并且能够绝大部分集中在脱落孤子上<sup>[28]</sup>,而孤子在 PT 对称势的作用下会演变成为呼吸子。

到目前为止,已有激光波形在高斯型 PT 对称介质中的传输特性研究。但是激光频率作为测量基准值,被广泛应用于长度、速度、角度、平面度、直线度和垂直度等的测量,是精密计量、精密机械和微电子工业领域重要的测量参数,而精确地测量频率大小和稳定性是保证测量准确性和量值溯源的关键,因此,研究 Airy 光束在 PT 对称介质中的频域演化特性及其稳定性有重要的意义。文中研究了 PT 对称介质中正反 Airy 光束的传输特性。首先建立一个具有 PT 对称结构的非线性薛定谔方程,用来描述 Airy 光束在 PT 对称光学格子介质中的非线性传输;然后分别讨论了在不同的截断系数、调制深度、调制宽度下,正反 Airy 光束的演化特性,并详细分析了正反 Airy 光束脱落出孤子的最大强度、峰均比、空域宽度、频域宽度。

## 1 理论模型

在傍轴近似中,光束在 PT 对称介质中传输时,可用非线性薛定谔方程来描述<sup>[29]</sup>:

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + p[V(x) + W(x)]\varphi = 0 \quad (1)$$

式中: $\varphi(x, z)$ 为光束的包络的慢变振幅; $z=Z/Z_0$ 表示光束传输方向上的归一化传输长度; $x=X/X_0$ 表示归一化的横线距离; $V(x)$ 和  $W(x)$ 分别是 PT 对称介质

中无量纲复折射率的实部和虚部, 实部代表折射率的分布, 虚部代表增益-损耗的分布,  $P$  为调制深度。探索基于 PT 对称的非均匀介质可以从基本的单频正余弦 PT 对称结构介质入手, 文中的 Airy 光束的传输演化研究, 采用普通正余弦周期 PT 对称结构介质, 表达式如下<sup>[26]</sup>:

$$V(x)=\exp(-(\omega x)^2) \quad (2)$$

$$W(x)=iW_0(\omega x)\exp(-(\omega x)^2) \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为复势的调制因子。对于复 PT 对称高斯势, 当势的实部强于虚部时, 所有特征值都是实的。文中  $W_0$  的值设置为 0.5。初始输入的 Airy 光束为:

$$\varphi(x, z=0)=F(a)Ai(ax)\exp(ax) \quad (4)$$

式中:  $F(a)$  为用来调节 Airy 光束的峰值功率, 为 1;  $Ai(ax)$  代表一个 Airy 函数, 其具体的表达式为:

$$Ai(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left[i\left(\frac{u^3}{3}+xu\right)\right]du \quad (5)$$

为了确保 Airy 光束的多峰结构, 截断系数  $a$  的取值范围为  $0 < a < 1$ , 当  $a$  越接近于 0, 拖尾的多峰结构越明显, 反之,  $a$  值越接近于 1, 越接近于高斯光束。  $Ai(x)$  表示 Airy 函数。

## 2 数值计算结果分析

Airy 光束的截断因子对 Airy 光束的形态以及 PT 对称光子晶格对介质的非线性响应对 Airy 呼吸子的存在性、稳定性、能量分布和宽度等性能有很大的影响, 这部分, 详细地讨论了不同的参数选择对呼吸子的调控。

从 Airy 的空域演化图(图 1(a1)~(c1)), 当 Airy 光束在 PT 对称介质中传输时, 由衍射引起的展宽和 PT 对称光学格子调制效应达到平衡时, 就可以形成 PT 空间孤子。笔者等发现由于衍射和 PT 对称光学格子调制效应的共同作用, 其主瓣在初始截断经历过一个压缩阶段。主瓣的峰值功率的增加, 进一步导致调制效应的增加。这样的结果导致 Airy 光束在传输的初始阶段, 主峰位置处脱落出孤子。Airy 光束在色散介质中传输时将不产生啁啾。然而, 当 Airy 光束受到 PT 对称势的调制作用, 将不能保持无啁啾的特性。因此, 发现由自相位调制作用引起的 Airy 光束产生一个啁啾, 从而导致 Airy 光束的形状在时频域内周期性地变化。脱落出的孤子在传输的过程

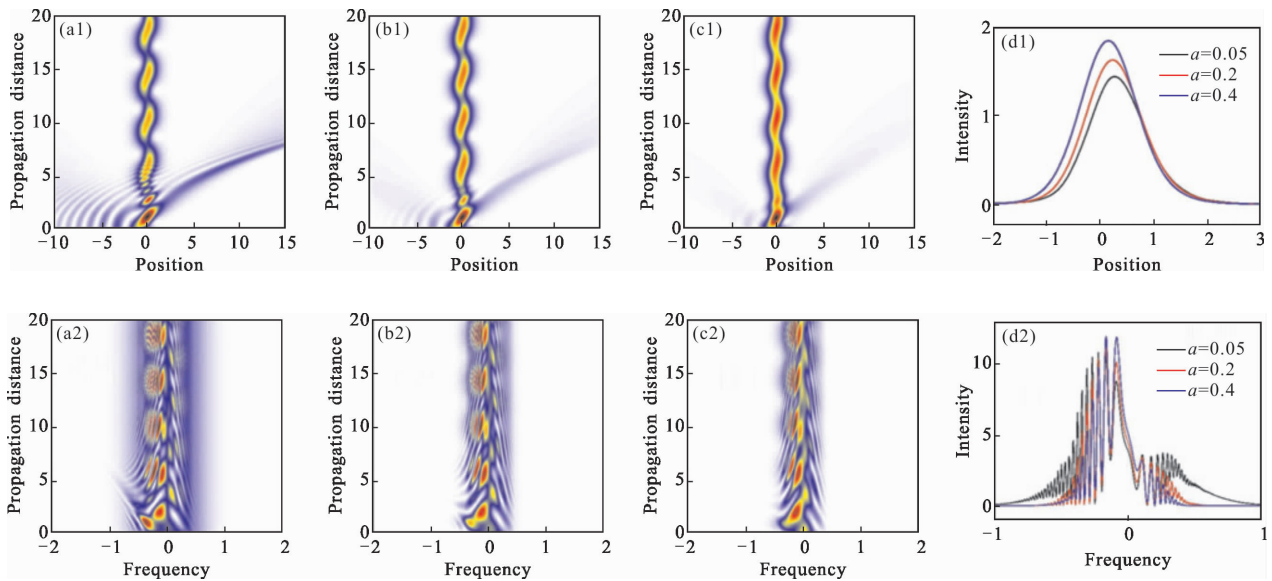


图 1 PT 对称光子晶格中, 当  $P=3, w=1$ , 三个不同截断系数  $a$  的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的空域和频域演化图: (a1)~(a2)  $a=0.05$ , (b1)~(b2)  $a=0.2$ , (c1)~(c2)  $a=0.4$ 。(d1)~(d2) 为归一化传输距离  $Z=15$  和截断系数分别为  $a=0.05$ (黑线)、 $a=0.2$ (红线)和  $a=0.4$ (蓝线)时, 低功率 Airy 脉冲相应的空域和频域图

Fig.1 Spatial and spectral evolutions of the Airy beam with  $P=3, w=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different truncation coefficient: (a1)~(a2)  $a=0.05$ , (b1)~(b2)  $a=0.2$ , (c1)~(c2)  $a=0.4$ . (d1)~(d2) Corresponding spatial and spectral intensities distributions at the normalized distance  $Z=15$  for  $a=0.05$ (black curve),  $a=0.2$ (red curve) and  $a=0.4$ (blue curve), respectively



中最终稳定成为一个能量、空域和频域的宽度周期性变化的呼吸子，并且此时此空间孤子包含了光束的大部分能量。而且 Airy 光束的主峰脱落出一个孤子而失去了大部分的能量，但是它还能沿着抛物线轨迹自加速运动，这是由于 Airy 光束的自愈特性使得主峰形状得到了恢复。Airy 光束为多峰结构，截断系数  $a$  能够控制主峰和旁瓣的能量分布。 $a$  为 0.1 时，Airy 光束有许多振荡拖尾的旁瓣，故主峰占有光束总能量比例较小(图 1(a1));当  $a$  增大时，光束振荡拖尾部分的旁瓣迅速减少，而光束总能量不变，即拖尾旁瓣能量转移到了主峰;当  $a$  增加到 0.4 以后，光束旁瓣越来越少直至消失，光束几乎演变成高斯形状，主峰能量达到最大值，光束几乎失去了横向自加速的特性(图 1(c1))，同时 PT 对称光学格子调制效应也相应地增加，脱落出的孤子的峰值功率也增加，并且其能量发生的横向偏移也相应地增加(图 1(d1))。

从 Airy 光束的光谱演化图(图 1(a2)~(c2))，笔者等发现由于衍射效应和 PT 对称光学格子调制效应的共同作用，光谱发生了显著的变化。PT 对称光学格子调制效应会产生一个正的频率啁啾，但是衍射

会产生一个负的频率啁啾。PT 对称光学格子调制效应产生的正啁啾导致脱落孤子光束的前沿发生红移，衍射产生的负啁啾导致脱落孤子的后延发生蓝移。另外，最值得注意的是当截断系数增加时，主峰的能量越大，所产生的调制效应对光束的束缚能力越差，频谱的宽度也进一步被压缩，并由于啁啾的原因，频谱在整个范围内伴随着一个周期性对称的震荡结构(图 1(d2))。

Airy 光束通过 PT 对称光子晶格时，产生的非对称的 Airy 呼吸孤子能够保持形状稳定，不失真的传输很远的距离，但是呼吸孤子的峰值、峰均比、空域和频域的宽度均会发生有规律的周期性振荡，并且孤子的峰值随截断系数的增加而增加(图 2(a))，但是峰均比、空域和频域的宽度随着截断系数的增大而逐渐减小(图 2(b)~(d))。Airy 光束传输一定距离的光波是由多个独立经过 PT 对称调制的波叠加而成的，当各个子波相同或者相近时，叠加信号便会受到相同初始相位信号的调制，从而产生较大的瞬时功率峰值，由此进一步带来较高的峰值平均功率比。峰均比较大的光波极易进入光子晶格的非线性区域，导

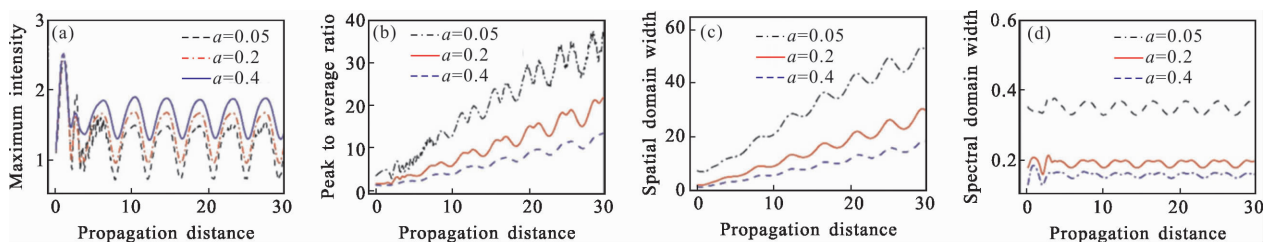


图 2 PT 对称光子晶格中，当  $P=3, w=1$ ，三个不同截断系数  $a$  的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的峰值(a)、峰均比(b)、空域宽度(c)、频域宽度(d)与传输距离的关系图

Fig.2 Variation plots of the (a) maximum intensity, (b) peak to average ratio, (c) spatial domain width, (d) spectral domain width of Airy beam with transmission distance when  $P=3, w=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different truncation coefficients

致光波产生非线性失真，造成明显的频谱扩展干扰以及带内信号畸变，导致整个系统性能严重下降。高峰均比已成为光纤通信的一个主要技术阻碍。 $a$  越大，Airy 光束的多峰结构越明显， $a$  越小，Airy 光束越接近为高斯光束。所以截断因子越小的 Airy 光束产生的光束干扰和光束畸变越大，阻碍光纤通信。

图 3 展示了截断系数为 0.05，调制因子  $w$  为 1，PT 对称光子晶格中 Airy 光束在不同的调制深度下的空域、频域演化图 and 不同位置时 Airy 呼吸子的波

形及频谱图。

调制强度是对孤子的存在性、稳定性以及传输特性有很大影响的一个因素。通过空域图(图 3(a1)~(c1))，发现由于 PT 对称势的调制的作用 Airy 脉冲的主峰在初始截断被压缩、传输减慢并脱落出一个直线传输的能量和宽度均周期性变化的呼吸孤子。Airy 光束剩下的部分由于自愈特性使得其形状得到了恢复还能沿着抛物线轨迹自加速运动。在 PT 对称势的作用下，首先远离中心运动，到达左边边界后与

边界碰撞后反射回来向中心运动,这表明了 PT 对称势对呼吸孤子产生了从中心指向两侧的吸引力,但是到达边界后会发生一个弹性碰撞而改变运动方向。呼吸孤子由于碰撞后向中心运动,到达中心后继续沿原来的方向运动。但在外势场的作用下,孤子远离中心运动的速度逐渐减小,当运动速度减小到零后改变原来的运动方向后向中心运动。这样重复上次运动,这与弹簧振子做简谐振动的运动规律相同。另外,PT 对称势能够使呼吸孤子的能量在空域发生

一个明显的横线偏移,并且随着调制深度的增加,横线偏移也增加(图 3(d1))。

在频率域(图 3(a2)~(c2)),发现由于衍射效应和 PT 对称光学格子调制效应的共同作用,光谱发生了显著的变化。PT 对称光学格子调制效应对 Airy 光束的频谱产生了一个强烈的压缩影响。Airy 光束的频谱在开始阶段发生了压缩现象,但是由于 PT 对称光学格子调制效应会产生一个正的频率啁啾,当 Airy 光束的频谱宽度压缩到一定程度时,会发生一个剧

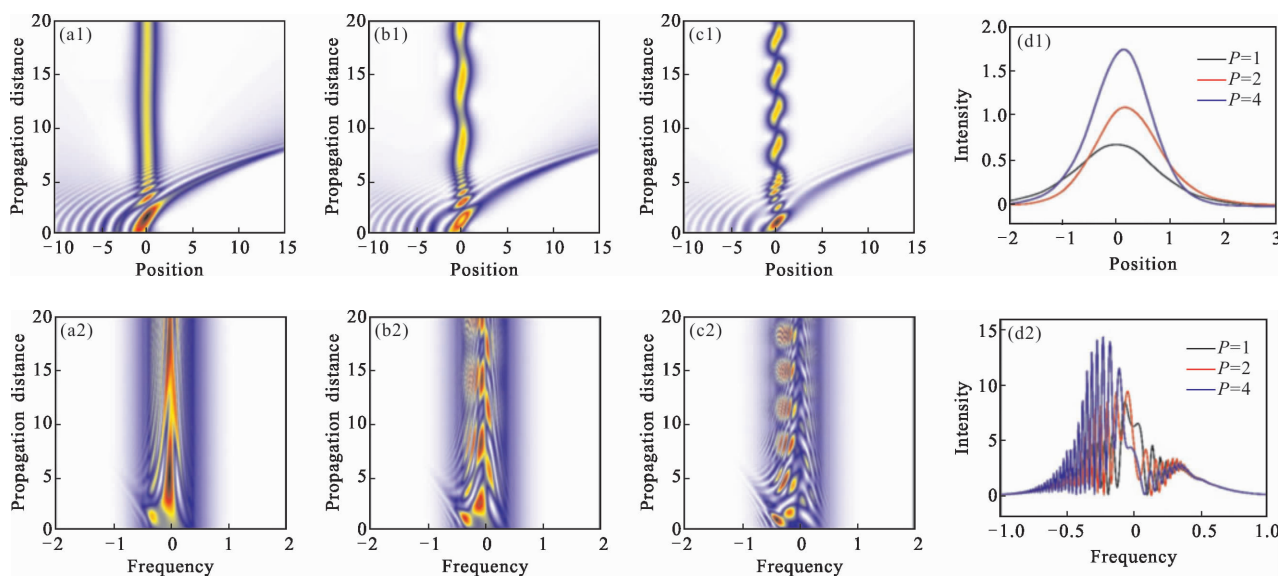


图 3 PT 对称光子晶格中, Airy 光束的  $a=0.05, w=1$ , 三个不同调制深度的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的空域和频域演化图:(a1)~(a2)  $P=1$ ; (b1)~(b2)  $P=2$ ; (c1)~(c2)  $P=4$ ; (d1)~(d2) 为归一化传输距离  $Z=15$  和调制深度分别为  $P=1$  (黑线)、 $P=2$  (红线) 和  $P=4$  (蓝线) 时, Airy 光束相应的空域和频域强度图

Fig.3 Spatial and spectral evolutions of the Airy beam with  $a=0.05, w=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different modulation intensity: (a1)~(a2)  $P=1$ , (b1)~(b2)  $P=2$ , (c1)~(c2)  $P=4$ , (d1)~(d2) Corresponding temporal and spectral intensities distributions at the normalized distance  $Z=15$  for  $P=1$  (black curve),  $P=2$  (red curve) and  $P=4$  (blue curve), respectively

烈的展宽现象。这样 Airy 光束的频谱就出现了先压缩后展宽的周期性变化。另外,发现当调制深度增加时,所产生的调制效应对光束的影响越明显, Airy 光束的横向偏移也相应地增加,频谱宽度也就越宽。另外,频谱由于啁啾的原因出现了强烈的起伏并在中间位置出现了坍塌现象(图 3(d2))。

调制强度  $P$  对孤子稳定性以及传输特性有很大影响。调制强度的不同对 Airy 呼吸孤子的最大强度、空域宽度和空域宽度的大小影响不大,但是随着调制强度的增加,PT 调制效应所产生的啁啾剧烈的增加,孤子的各传输参数均发生剧烈的震荡(图 4(a)~

(d))。Airy 呼吸子的 PPAR 和空域宽度先增加后减小然后再次增加,整体上呈现出一条震荡向上的曲线(图 4 (b)~(c)), 而 Airy 呼吸子的峰值和频域宽度只存在一个震荡现象(图 4(a),(d))。

调制深度对 Airy 呼吸子产生了两个显著的影响。第一,随着调制深度的增加, Airy 呼吸子的峰均比增加。那是因为调制深度越大,PT 对称调制的强度越大,光波是由多个独立经过 PT 对称调制的波叠加而成的,叠加信号便受到相同初始相位信号的调制,从而产生更大的瞬时功率峰值,由此进一步带来较高的峰值平均功率比,导致光波产生非线性失真,

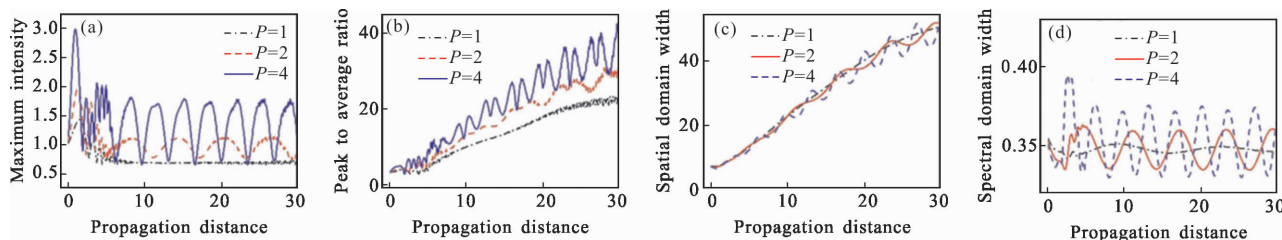


图 4 PT 对称光子晶格中, Airy 光束的  $a=0.05, w=1$ , 三个不同调制深度的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的峰值(a)、峰均比(b)、空域宽度(c)、频域宽度(d)与传输距离的关系图

Fig.4 Variation plots of the (a) maximum intensity, (b) peak to average ratio, (c) spatial domain width, (d) spectral domain width of Airy beam with transmission distance when  $a=0.05, w=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different modulation intensities

造成明显的频谱扩展干扰以及带内信号畸变, 导致整个系统性能严重下降。所以调制深度越大的 Airy 光束产生的光束干扰和光束畸变越大, 阻碍光纤通信。另外一个显著的影响是, 调制深度  $P$  越小, 呼吸子的峰值和峰均比出现了明显的跳跃(图 4(a)~(b))。尽管调制深度弱的 PT 对称晶格中所产生的呼吸子的峰值和峰均比会出现跳跃导致传输的不稳定, 但是这种震荡不稳定很微弱, 因此不稳定导致的孤子失真几乎可以忽略。这个结果表明在调制深度很大

的范围内, PT 对称光子晶体光纤的结构可以用来捕获和控制光束。

调制因子  $w$  是对孤子的存在性、稳定性以及传输特性有很大影响的另外一个因素。当调制因子  $w$  为 0.3 时, Airy 光束不能脱离出一个稳定的孤子。随着调制宽度的增加, Airy 光束脱离出的能量和宽度周期性变化的呼吸孤子, 在整个传输过程中出现了收缩及震荡减小的现象(图 5(a1)~(c1))。这是因为, 随着调制因子  $w$  的增大, 呼吸孤子变得更加局域并

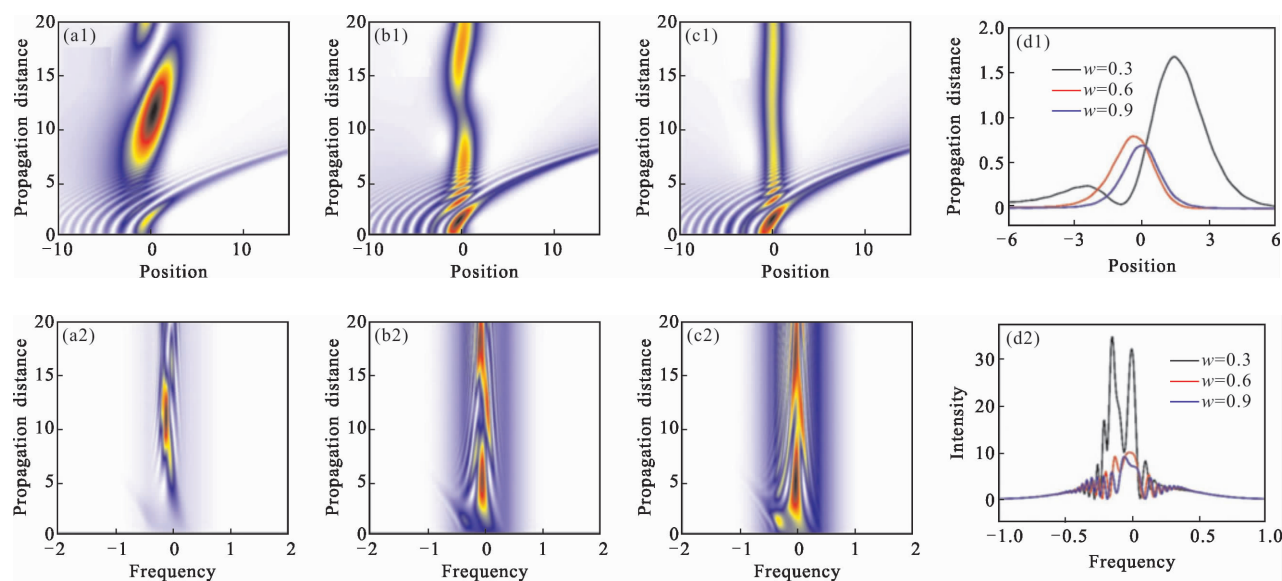


图 5 PT 对称光子晶格中, Airy 光束的  $a=0.05, P=1$ , 三个不同调制因子  $w$  的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的空域和频域演化图:(a1)~(a2)  $w=0.3$ ; (b1)~(b2)  $w=0.6$ ; (c1)~(c2)  $w=0.9$ ; (d1)~(d2) 为归一化传输距离  $Z=15$  和调制因子分别为  $w=0.3$ (黑线)、 $w=0.6$ (红线)和  $w=0.9$ (蓝线)时, Airy 光束相应的空域和频域图

Fig.5 Spatial and spectral evolutions of the Airy beam with  $a=0.05, P=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different modulation factor: (a1)~(a2)  $w=0.3$ , (b1)~(b2)  $w=0.6$ , (c1)~(c2)  $w=0.9$ ; (d1)~(d2) Corresponding temporal and spectral intensities distributions at the normalized distance  $Z=15$  for  $w=0.3$  (black curve),  $w=0.6$  (red curve) and  $w=0.9$  (blue curve), respectively



且实部与虚部最大值之比减小, 孤子在调制效应存在的区域扩展的很慢。当调制宽度  $W > 0.9$  时, 呼吸孤子的周期性变化逐渐消失。另外, 发现随着调制因子  $w$  的增加, 呼吸孤子的能量在空域发生的横向偏移也相应的减小(图 5(d1))。

在频率域(图 5(a2)~(d2)), 发现由于衍射效应和 PT 对称光学格子调制效应的共同作用, 光束在接近势垒时会有一个能量汇聚的过程, 而在经过势垒后光束出现了一个能量展宽的震荡的过程, 这样 Airy 光束的光谱出现了先压缩后展宽的周期性变化。另外, 发现当调制因子  $w$  增加时, 由于调制效应的实部与虚部最大值之比减小, 所产生的啁啾相应的减小, Airy 光束的光谱压缩和展宽的速度也就越慢。

PT 对称光学格子虚部强度的调制因子  $w$  对呼吸孤子的存在性、稳定性和传输特性也有很大影响。只有当调制因子达到一定值( $w > 0.3$ )时, Airy 光束在

PT 对称介质中才能够完全的脱落出一个孤子。当 Airy 光束可以完全脱落出一个周期性变化的呼吸子时, 继续增加调制因子, 发现: 调制因子  $w$  的不同对 Airy 呼吸孤子的最大强度、空域宽度和空域宽度的大小影响不大, 但是调制因子  $w$  越小, PT 调制效应所产生的啁啾剧烈的增加, 孤子的各传输参数均发生剧烈的震荡(图 6(a)~(d))。Airy 呼吸子的 PPAR 和空域宽度先增加后减小然后再次增加, 整体上呈现出一条震荡向上的曲线(图 6(b)~(c)), 而 Airy 呼吸子的峰值和频域宽度只存在一个震荡现象(图 6(a)、(d))。

调制因子  $w$  对 Airy 呼吸子产生了两个显著的影响。第一, 随着调制因子  $w$  的增加, Airy 呼吸子的峰均比增加。所以调制因子  $w$  越大的 Airy 光束产生的光束干扰和光束畸变越大, 阻碍光纤通信。另外一个显著的影响是, 调制因子  $w$  增加, 呼吸子的峰值和峰均比出现了明显的跳跃(图 6(a)~(b))。尽管调制深

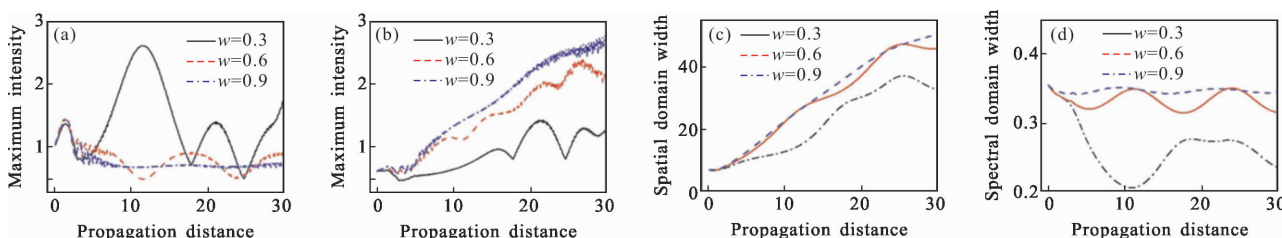


图 6 PT 对称光子晶格中, Airy 光束的  $a=0.05, P=1$ , 三个不同调制因子  $w$  的 Airy 光束在衍射效应、PT 对称调制效应的共同作用下的峰值(a)、峰均比(b)、空域宽度(c)、频域宽度(d)与传输距离的关系图

Fig.6 Variation plots of the (a) maximum intensity, (b) peak to average ratio, (c) spatial domain width, (d) spectral domain width of Airy beam with transmission distance when  $a=0.05, P=1$  in PT symmetric photonic lattice under the combined action of diffraction and PT symmetric modulation effect with three different modulation factors

度强的 PT 对称晶格中所产生的呼吸子会出现跳跃导致传输的不稳定, 但是这种震荡不稳定很微弱, 因此不稳定导致的孤子失真几乎可以忽略。这个结果表明在调制深度很大的范围内, PT 对称光子晶体光纤的结构可以用来捕获和控制光束。

### 3 结论

由于 PT 对称光学格子介质具有许多奇异特性, 使得激光光束在该介质中传输时会产生许多新现象和新特性, 例如双折射、功率振荡、单向衍射模式以及 PT 孤子等, 所以它成为了研究热点。光孤子在全光通信、光-光控制、全光路由和光逻辑运算等方面有着很

大的潜在应用价值。文章报道了 PT 对称光子晶格中 Airy 呼吸子的产生并从截断系数、调制深度、调制宽度对 Airy 呼吸孤子传输特性进行操控。Airy 光束在 PT 对称光子晶格中传输, 在主峰位置处脱落出一个峰值、峰均比、空域和频域的宽度都周期性变化的呼吸子; 截断系数越小、调制深度  $P$  和调制因子  $w$  越大, 峰均比越大, 产生的光束干扰和光束畸变越大, 阻碍光纤通信; 调制深度  $P$  越小、调制因子  $w$  越大, 呼吸子的峰值和峰均比出现了明显的跳跃, 传输的稳定性减小, 但是呼吸孤子依然能够稳定的长距离传输。笔者等的研究表明, 通过合理的参数选择可以操控 Airy 呼吸子的传输使产生的呼吸孤子的形态丰富多样, 能够

很好地完善孤子理论,为今后其在实际光纤通信技术中的应用提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Zhang L F, Zhong H Z. Modulation instability of finite energy Airy pulse in optical fiber[J]. *Opt Express*, 2014, 22: 17107–17115.
- [2] Wu Z K, Wang Z P, Guo H, et al. Self-accelerating Airy Laguerre-Gaussian light bullets in a two-dimensional strongly nonlocal nonlinear medium [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 30468–30478.
- [3] Banerjee A, Roy S. Self-healing dynamics and absolute temporal focusing of a truncated Airy pulse under higher-order phase modulations [J]. *J Opt Soc Am B*, 2018, 35: 878–885.
- [4] Imran M, Li R J, Jiang Y Y, et al. Airy beams on two dimensional materials[J]. *Opt Commun*, 2018, 414: 40–44.
- [5] Cheng K, Zhong X Q, Xiang A. Propagation dynamics and optical trapping of a radial Airy array beam[J]. *Optik*, 2014, 125: 3966–3971.
- [6] Shi X, Tan C, Bai Y, et al. Dressed dynamics of two time reversed shapes of Airy pulses in a relaxing nonlinear medium[J]. *J Opt Soc Am B*, 2015, 32: 1816–1823.
- [1] Deng Z X, Chen Y, Liu J, et al. Graded-index breathing solitons from Airy pulses in multimode fibers [J]. *Opt Express*, 2019, 27: 483–493.
- [8] Peng X, Peng Y L, Zhang L P, et al. Reversed Airy Gaussian and Airy Gaussian vortex light bullets in harmonic potential[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 055002.
- [9] Ke X Z, Wang S. Evolution of the intensity of partially coherent Airy Beam in Atmospheric turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0710001. (in Chinese)
- [10] Zhu L, Wang J. Simultaneous generation of multiple orbital angular momentum (OAM) modes using a single phase-only element[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26221–26233.
- [11] Zhu L, Wang J. Demonstration of obstruction-free data-carrying N-fold Bessel modes multicasting from a single Gaussian mode[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5463–5466.
- [12] Carl M Bender, Stefan Boettcher. Real spectra in Non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(24): 5243–5246.
- [13] El-Ganainy R, Makris K G, Christodoulides D N, et al. Theory of coupled optical PT-symmetric structures [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2632–2634.
- [14] Alois Regensburger, Christoph Bersch, Mohammad-Ali Miri, et al. Parity-time synthetic photonic lattices [J]. *Nature*, 2012, 488(7410): 167–171.
- [15] Makris K G, El-Ganainy R, Christodoulides D N. Beam dynamics in PT symmetric optical lattices[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 103904.
- [16] Nixon S, Zhu Y, Yang J. Nonlinear dynamics of wave packets in parity-time symmetric optical lattices near the phase transition point[J]. *Opt Lett*, 2012, 37: 4874–4876.
- [17] Cole J T, Makris K G, Musslimani Z H, et al. Two fold PT-symmetry in doubly exponential optical lattices [J]. *Phys Rev A*, 2016, 93: 013803.
- [18] Huang C, Zeng J. Solitons stabilization in PT-symmetric potentials through modulation the shape of imaginary component[J]. *Opt Laser Technol*, 2017, 88: 104–110.
- [19] Nixon S, Ge L, Yang J. Stability analysis for solitons in PT-symmetric optical lattice[J]. *Phys Rev A*, 2012, 85: 023822.
- [20] He Y, Zhu X, Dumitru M, et al. Lattice solitons in PT-symmetric mixed linear-nonlinear optical lattices[J]. *Phys Rev A*, 2012, 85: 013831.
- [21] Hao R. Optical soliton control in inhomogeneous nonlinear media with the parity time symmetric potentials [J]. *Opt Communications*, 2015, 338: 265–268.
- [22] Flach S, Willis C R. Discrete breathers[J]. *Phys Rep*, 1998, 295(5): 181–264.
- [23] Chabchoub A, Hoffmann N P, Akhmediev N. Rogue wave observation in a water wave tank [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 106(20): 204502.
- [24] Dudley J M, Dias F, Erkintalo M, et al. Instabilities, breathers and rogue waves in optics[J]. *Nat Photonics*, 2014, 8(10): 755–764.
- [25] Deng Yangbao, Deng Shuguang, Tan Chao, et al. Study on propagation characteristics of temporal soliton in Scarff II PT-symmetric potential based on intensity moments [J]. *Opt Laser Technol*, 2016, 79: 32–38.
- [26] Wright L G, Renninger W H, Christodoulides D N, et al. Spatiotemporal dynamics of multimode optical solitons [J]. *Opt Express*, 2015, 23(3): 3492–3506.
- [27] Renninger W H, Wise F W. Optical solitons in graded-index multimode fibres[J]. *Nat Commun*, 2013, 4(1): 1719.
- [28] Wen Bing, Deng Yangbao, Shi Xiaohui, et al. Evolution of finite-energy Airy pulse interaction with high-power soliton pulse in optical fiber with higher-order effects [J]. *Optik*, 2018, 152: 61–68.
- [29] Hu S, Ma X, Lu D, et al. Solitons supported by complex PT-symmetric Gaussian potentials[J]. *Phys Rev A*, 2011, 84: 043818.