

# 非均匀梯度折射率波导中自相似光波的形成和管理

王大可 王娟芬 党婷婷 张朝霞 杨玲珍

(太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要** 以描述光波在非均匀梯度折射率波导中传输的变系数非线性薛定谔方程为模型, 讨论亮、暗自相似光波在不同波导系统中的形成和管理。根据该方程的光学自相似解, 分别研究自相似光波在克尔非线性平面波导、均匀的梯度折射率平面波导、周期分布的梯度折射率波导和双曲分布的梯度折射率波导中的演化。结果表明, 自相似光波的形成与波导系统的线性折射率分布和非线性折射率分布有关。在均匀系统和双曲分布的系统中, 都可实现对自相似光波的压缩和放大, 但在双曲分布系统中, 自相似光波的传输距离会受到更大的限制。在周期振荡系统中, 则可形成周期振荡且稳定传输的自相似光波。

**关键词** 非线性光学; 自相似光波; 变系数非线性薛定谔方程; 非均匀梯度折射率波导

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0719002

## Generation and Management of Optical Self-Similar Waves in Inhomogeneous Graded-Index Waveguides

Wang Dake Wang Juanfen Dang Tingting Zhang Zhaoxia Yang Lingzhen

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** Based on the nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients, which can describe the transmission of optical wave in inhomogeneous graded-index waveguide, the generation and management of bright and dark self-similar waves in different waveguides are discussed. According to the exact optical self-similar solutions of the equation, the evolutions of the self-similar waves in the Kerr nonlinear plane waveguide, the homogeneous graded-index waveguide, and the inhomogeneous graded-index waveguides with periodic distribution and with hyperbolic distribution are studied in detail respectively. The results show that the generation of the self-similar wave relates to the distributions of the linear and nonlinear refractive indexes. The self-similar waves can be compressed and amplified in both homogeneous system and hyperbolic system. However, in the hyperbolic system, the transmission distance of self-similar waves can be more limited. In a periodic oscillation system, self-similar waves with a periodic oscillation can be generated and propagate stably.

**Key words** nonlinear optics; self-similar wave; nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients; inhomogeneous graded-index waveguide

**OCIS codes** 190.6135; 190.3270; 230.7370; 260.2710

## 1 引 言

自相似是自然界的一种普遍现象, 在物理学的许多领域中都有着广泛地研究和应用, 例如: 非线性光学、流体动力学、凝聚态物理、等离子体物理、量子场论和生物物理学等<sup>[1-2]</sup>。特别是在非线性光学中, 由于自相似光波在高功率传播时, 具有抵御光波

分裂的能力, 且具有严格的线性啁啾, 易于进行高效的脉冲整形和压缩, 因此近年来已得到了广泛的研究和关注。自相似光波是指在传输过程中波形保持不变, 而它的振幅和宽度成比例的在非线性介质中演化的一种光波。自相似光波可以分为两类: 1) 渐进型的自相似光波, 主要是指在光纤放大器中, 初始

**收稿日期**: 2013-12-20; **收到修改稿日期**: 2014-01-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(61001114, 611107033)

**作者简介**: 王大可(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学传输方面的研究。E-mail: rabbitwang0403@126.com

**导师简介**: 王娟芬(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非线性光学传输方面的研究。E-mail: wangjuanfen@126.com

(通信联系人)

输入一种子波,可以是高斯型、双曲型或超高斯型光脉冲,在光纤放大器中各个参量的相互作用下,可逐渐演化成一个抛物型光脉冲<sup>[2-15]</sup>;2)精确型的自相似光波,理论上,它是非线性薛定谔方程的类孤子解,包括有亮暗自相似解,非线性周期自相似解等<sup>[16-26]</sup>,其中在梯度折射率波导中的自相似光波,近年来也得到了广泛地关注<sup>[22-26]</sup>。在理想的梯度折射率波导中,Ponomarenko等<sup>[22]</sup>首次给出了该波导中的亮暗空间自相似光波以及周期自相似光波解,并讨论了自相似光波在该波导中的演化行为。随后,当在非均匀增益波导中,即波导的线性折射率和增益是传输距离的函数时,通过变量代换法,获得了在非均匀增益波导中的亮暗自相似光波<sup>[23]</sup>。Raju等<sup>[24]</sup>研究了在含有额外源的双芯光纤放大器中的自相似光波演化。Goyal等<sup>[25]</sup>研究了线性折射率分布呈双曲型和抛物型分布的波导中自相似光波的演化行为。当在非均匀梯度折射率波导中,即线性折射率分布、克尔非线性分布和增益分布都是传输距离的函数时,得到了更为广泛的一组亮暗空间自相似解,并详细地讨论了亮自相似光波的非线性隧穿行为<sup>[26]</sup>,但未讨论在更为广泛地波导系统中,亮、暗自相似光波的形成和管理。

本文基于文献[26]中的亮、暗光学自相似解,分别讨论在4种不同波导系统中的亮、暗自相似光波的演化特性。

## 2 亮暗自相似光波的精确解

考虑一个非均匀的梯度折射率波导,其折射率分布为<sup>[26]</sup>

$$n(z, x) = n_0 + n_1 F(z) x^2 + n_2 R(z) I(z, x), \quad (1)$$

式中  $I(z, x)$  代表光强,  $n_0$  为线性折射率,  $n_1$  和  $n_2$  分别代表线性和非线性系数,  $F(z)$  和  $R(z)$  为无量纲函数。(1)式前两项代表折射率的线性部分,后一项  $n_2 R(z) I(z, x)$  代表克尔非线性。由(1)式可发现,该波导在横向  $x$  方向呈二次型分布,因而称为梯度折射率波导,该波导具有类透镜的性质。假设线性系数  $n_1 > 0$ , 无量纲函数  $F(z)$  可正可负,分别表示波导中的线性自散焦或自聚焦类透镜效应。非线性系数  $n_2$  可正或负,分别表示非线性自聚焦或自散焦效应,而无量纲函数  $R(z) > 0$ 。无量纲函数  $F(z)$  和  $R(z)$  分别表示该波导的线性折射率和克尔非线性沿轴向  $z$  具有一定的几何分布,说明该波导在轴向呈非均匀性。近年来,关于非均匀非线性波导中光波传播的研究也比较广泛<sup>[21,23-28]</sup>。波导的非均匀

性主要由两方面原因引起:1)波导在实际生产制作过程中,由于制作工艺的影响而带来的一种不可避免的非均匀性,这类影响在模型上可用在理想值附近的一个小的周期性扰动系统来表示;2)人为因素,是指人为的通过对波导进行掺杂、拉伸压缩形变和热处理等操作,改变波导的均匀性以满足对波导的实际应用需求。例如,为了得到锥形波导的形状,可以通过加热几个或者多个光纤达到这种材料的软化临界点温度,然后再进行拉伸到要求的形状<sup>[25]</sup>。此外,在介质中加入一些杂质,也可以改变波导的均匀性而达到实际应用的需求<sup>[29]</sup>。在(1)式的基础上,可以得到描述光波在该波导中传输的变系数非线性薛定谔方程如下:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + k \frac{n_1}{n_0} F(z) x^2 A + k \frac{n_2}{n_0} R(z) |A|^2 A = \frac{ig(z)}{2} A, \quad (2)$$

式中  $A$  代表光波的慢变包络,波数  $k = 2\pi n_0 / \lambda$ ,  $\lambda$  为光波的波长,  $g(z)$  为增益/损耗系数 [ $g(z) > 0$  为增益,而  $g(z) < 0$  为损耗]。引入归一化变换  $U = (k |n_2| L_D / n_0)^{1/2} A$ ,  $X = x / \omega_0$ ,  $Z = z / L_D$ ,  $G(Z) = g(z) / L_D$ , 其中  $\omega_0 = (2k^2 n_1 / n_0)^{-1/4}$  和  $L_D = k \omega_0^2$  分别代表横向特征长度和衍射长度。于是(2)式归一化后可写成下面的无量纲形式

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{1}{2} F(Z) X^2 U + \sigma R(Z) |U|^2 U = i \frac{G(Z)}{2} U, \quad (3)$$

式中  $\sigma = n_2 / |n_2| = \pm 1$ , 其中“ $\pm$ ”分别代表波导中的非线性自聚焦或自散焦效应。

(3)式具有如下形式的亮、暗自相似光波的精确解析解<sup>[26]</sup>:

$$U_B(X, Z) = \frac{1}{W(Z) \sqrt{R(Z)}} \operatorname{sech} \left[ \frac{X - X_c(Z)}{W(Z)} \right] \times \exp[iB(X, Z) - i\eta(Z)], \quad (4)$$

$$U_D(X, Z) = \frac{1}{W(Z) \sqrt{R(Z)}} \tanh \left[ \frac{X - X_c(Z)}{W(Z)} \right] \times \exp[iB(X, Z) - i\eta(Z)], \quad (5)$$

式中  $W(Z)$ 、 $X_c(Z)$  分别表示光波的宽度和中心位置,它们都是传输距离  $Z$  的实函数,  $\eta(Z)$  和  $B(X, Z)$  是自相似光波的相位,

$$B(X, Z) = C_2(Z) X^2 + C_1(Z) X + C_0(Z), \quad (6)$$

其中,  $C_0(Z)$ 、 $C_1(Z)$ 、 $C_2(Z)$  分别表示相移、频移和相前曲率参数。由(4)、(5)式可以看出,该光波的振幅和宽度在传播过程中都以同一比例函数  $W(Z)$  的

变化而变化,因此该光波可称为自相似光波。各个参数之间需满足如下关系:

$$\frac{d^2 W}{dZ^2} = FW, \quad (7a)$$

$$\eta(Z) = \int_0^Z \frac{d\xi}{W^2(\xi)}, \quad (7b)$$

$$X_c(Z) = W(0)C_1(0)W \int_0^Z \frac{d\xi}{W^2(\xi)} + \frac{X_c(0)}{W(0)}W, \quad (7c)$$

$$C_0(Z) = C_0(0) - \frac{C_1^2(0)W^2(0)}{2} \int_0^Z \frac{d\xi}{W^2(\xi)}, \quad (7d)$$

$$C_1(Z) = \frac{C_1(0)W(0)}{W}, \quad (7e)$$

$$C_2(Z) = \frac{1}{2W} \frac{dW}{dZ}, \quad (7f)$$

式中  $W(0), X_c(0), C_0(0), C_1(0)$  分别是  $W(Z), X_c(Z), C_0(Z)$  和  $C_1(Z)$  的初始值。另外求解过程中需满足如下的限制条件:

$$G = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dZ} - \frac{1}{R} \frac{dR}{dZ}. \quad (8)$$

由(6)和(7)式可看出,  $X_c(Z), \eta(Z)$  和  $B(X, Z)$  与光波宽度  $W(Z)$  有关,只要  $W(Z)$  确定,则自相似光波中的参数  $X_c(Z), \eta(Z)$  和  $B(X, Z)$  便可确定。而由(7a)式可看出,光波宽度  $W(Z)$  则由波导中的线性折射率分布  $F(Z)$  决定。因此自相似光波的形状完全由波导中的线性折射率分布  $F(Z)$  和非线性分布  $R(Z)$  来决定,  $F(Z)$  和  $R(Z)$  的分布形式不同,则形成的自相似光波的形状也不同。下面基于(4)~(8)式,依次讨论当  $F(Z)$  分别取 0, 一个不为零的实常数和距离  $Z$  的实函数的情况下,即在克尔非线性平面波导,均匀的梯度折射率平面波导和非均匀的梯度折射率平面波导的系统中,自相似光波的演化行为。

### 3 自相似光波的演化

选取波导的非线性分布函数  $R(Z)$  为下面的形式:

$$R(Z) = 1 + \beta \sin(g_1 Z), \quad (9)$$

式中  $\beta$  和  $g_1$  为两个实参数,且  $\beta$  是个小量。(9)式表示非线性分布函数  $R(Z)$  会随着传输距离  $Z$  的演化在理想值附近有一个微小的扰动,可用来近似描述波导在实际制作过程中不可避免引起的克尔非线性非均匀性。

#### 3.1 克尔非线性平面波导

首先选取线性折射率分布函数

$$F(Z) = 0, \quad (10)$$

即该波导是一个普通的克尔非线性平面波导。于是,从(7a)式可得到光波宽度为

$$W(Z) = \theta Z + W(0), \quad (11)$$

式中  $\theta$  为一个实数。根据(8)式,可得到增益/损耗系数为

$$G(Z) = \frac{\theta}{\theta Z + W(0)} - \frac{\beta g_1 \cos(g_1 Z)}{1 + \beta \sin(g_1 Z)}. \quad (12)$$

因为光波宽度  $W(Z) > 0$ ,由(11)式可得,  $\theta$  必须满足  $\theta > -\frac{W(0)}{Z}$ 。

图 1 分别给出了当  $\theta = -0.1, 0, 0.1$  的情况下,非线性分布参数  $R(Z)$ 、增益/损耗系数  $G(Z)$  及光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的演化图,以及亮、暗自相似光波的演化图。从图 1(a1), (b1) 和 (c1) 可看出,非线性分布参数  $R(Z)$  和增益/损耗系数  $G(Z)$  都随传播距离  $Z$  呈现周期性的振荡变化。 $R(Z)$  在 1 附近有一个微小的振荡,表明波导克尔非线性非均匀性,而增益/损耗  $G(Z)$  随着传输距离  $Z$  会在增益和损耗之间周期性地转化。区别是:

1) 图 1(a1) 中,  $\theta = -0.1$ , 光波宽度  $W(Z)$  则随传播距离  $Z$  的增加不断减小,即光波在传播过程中会逐渐被压缩。但由于光波宽度逐渐趋于 0 时,光波会发生破裂,因此在该系统中,根据所取的参数,光波传播的归一化距离极限是  $Z = 10$ 。图 1(a2) 和图 1(a3) 分别给出了亮、暗自相似光波在该系统中的演化图。从图中可看到亮、暗自相似光波在该系统中有限长的距离内可以稳定地传播,并且随着传输距离  $Z$  的增加,其强度总体上在不断地增强,且伴随着周期性的振荡。

2) 图 1(b1) 中,  $\theta = 0$ , 由(11)式可知光波宽度  $W(Z) = W(0)$  为一个恒定值,不随传播距离  $Z$  而变化,此时自相似光波转变为光孤子,因此可以说光孤子是自相似光波的特例。图 1(b2) 和图 1(b3) 分别给出在这种情况下亮、暗孤子在该系统中的演化图。可以看到亮、暗孤子在传播过程中,除强度受到周期性的调制以外,总体上可以保持不变形的传输。

3) 图 1(c1) 中,  $\theta = 0.1$ , 光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的增加而不断增加,说明光波在传播过程中,光波宽度在逐渐被展宽。图 1(c2) 和图 1(c3) 分别给出了在这种情况下亮、暗自相似光波在该系统中的演化图。与  $\theta = -0.1$  的情况相比,该系统中的亮、暗自相似光波的强度除有周期振荡外,总体上在不断地衰减。

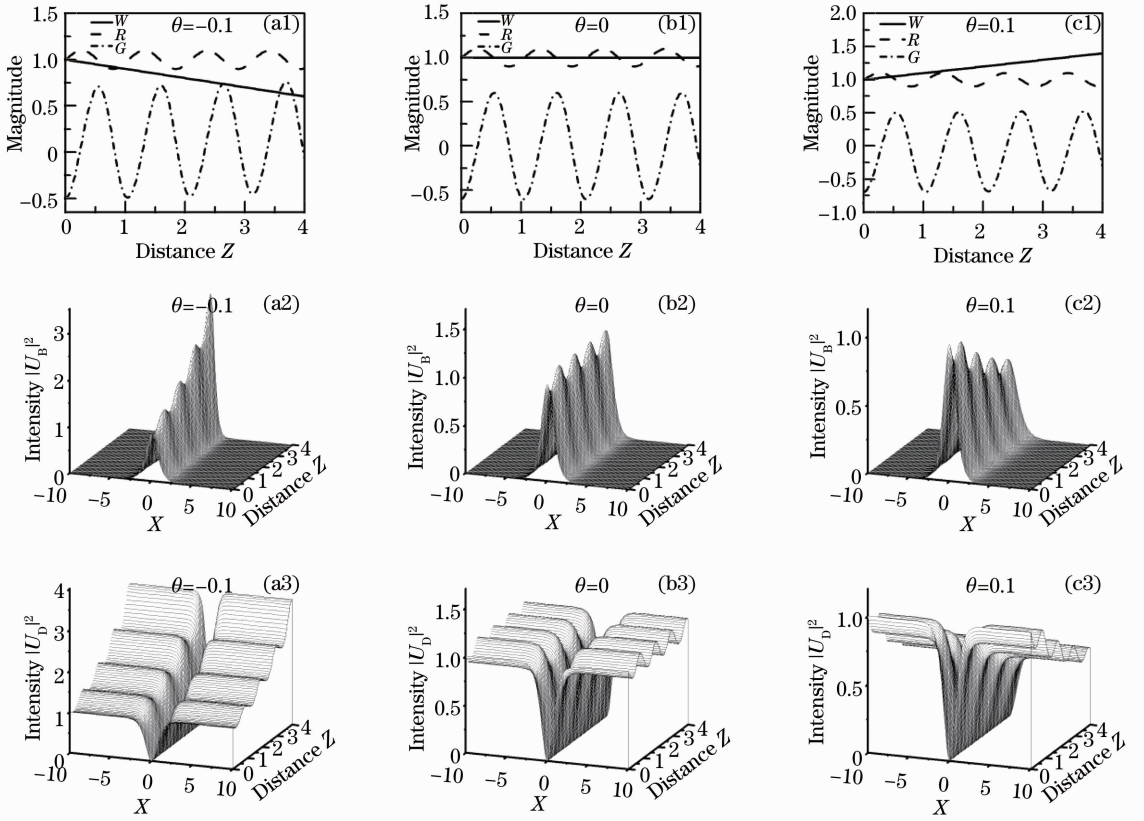


图 1 (a1)、(b1)、(c1)光波宽度  $W(Z)$ 、非线性分布参数  $R(Z)$  以及增益/损耗系数  $G(Z)$  的曲线图；(a2)、(b2)、(c2) 亮自相似光波的演化图；(a3)、(b3)、(c3) 暗自相似光波的演化图 [ $\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1$ ]  
 Fig. 1 (a1), (b1), (c1) Profiles of width  $W(Z)$ , nonlinear parameter  $R(Z)$  and gain-loss function  $G(Z)$ ; (a2), (b2), (c2) evolutions of bright self-similar waves; (a3), (b3), (c3) evolutions of dark self-similar waves [ $\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1$ ]

### 3.2 均匀的梯度折射率平面波导

考虑线性折射率分布函数为

$$F(Z) = g_2^2, \quad (13)$$

式中  $g_2$  是个实数。则该波导是一个线性分布均匀的梯度折射率平面波导, 于是, 从(7a)式可以得到光波宽度为

$$W(Z) = W(0)\exp(-g_2 Z). \quad (14)$$

根据(8)式, 可以得到增益/损耗系数为

$$G(Z) = g_2 - \frac{\beta g_1 \cos(g_1 Z)}{1 + \beta \sin(g_1 Z)}. \quad (15)$$

图 2 给出了线性分布参数  $F(Z)$ 、非线性分布参数  $R(Z)$ 、增益/损耗系数  $G(Z)$  及光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的演化图。

由图 2 可知, 非线性分布参数  $R(Z)$  和增益/损耗系数  $G(Z)$  仍然随传播距离  $Z$  呈周期性的振荡变化, 而光波宽度  $W(Z)$  会随传播距离  $Z$  的增加而不断减小, 即光波在传播过程中不断被压缩。需要注意的是, 图 2 与图 1 非常相似, 但实际上二者完全不同, 图 1 中光波宽度随传输距离  $Z$  成线性关系, 而

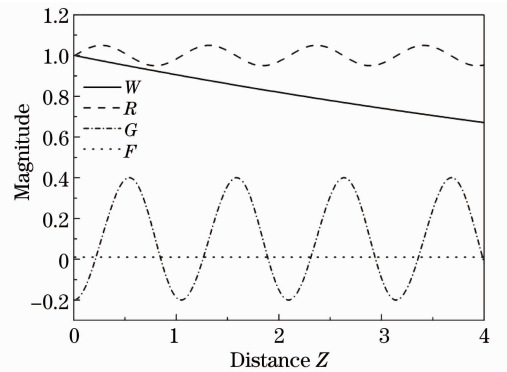


图 2 光波宽度  $W(Z)$ 、非线性分布参数  $R(Z)$ 、线性分布参数  $F(Z)$  以及增益/损耗系数  $G(Z)$  曲线 [ $\beta=0.05, g_1=6, g_2=0.1, W(0)=1$ ]  
 Fig. 2 Profiles of width  $W(Z)$ , nonlinear parameter  $R(Z)$ , linear parameter  $F(Z)$  and gain-loss function  $G(Z)$  [ $\beta=0.05, g_1=6, g_2=0.1, W(0)=1$ ]

图 2 中成指数关系, 因此在所选系统其他参数相同的情况下, 图 2 中自相似光波稳定传输的有效距离较长。图 3(a)和图 3(b)分别为亮、暗自相似光波在

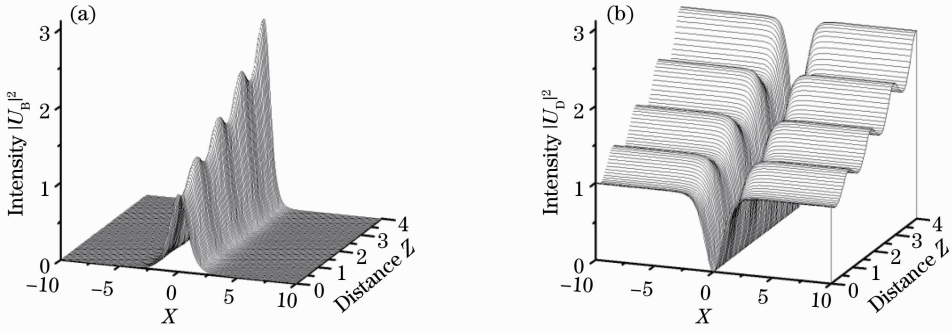


图3 自相似光波的演化。(a)亮自相似光波;(b)暗自相似光波 $[\beta=0.05, g_1=6, g_2=0.1, W(0)=1]$

Fig. 3 Evolutions of self-similar waves. (a) Bright self-similar wave; (b) dark self-similar wave

$$[\beta=0.05, g_1=6, g_2=0.1, W(0)=1]$$

该系统中的演化图。可以看到,亮、暗自相似光波在传播过程中,其强度逐渐增强,并伴随着周期振荡。

上述两种情况分析了线性分布参数  $F(Z)$  为常数的情况,即考虑的是线性折射率分布均匀的波导系统。随后,将讨论两种非均匀的梯度折射率平面波导,即沿着波导的光轴  $Z$ ,其线性折射率函数  $F(Z)$  具有一定的几何分布。

### 3.3 周期分布的梯度折射率平面波导

取线性折射率具有如下的分布:

$$F(Z) = -\frac{g_2^2 \beta_2 \sin(g_2 Z)}{1 + \beta_2 \sin(g_2 Z)}, \quad (16)$$

式中  $\beta_2$  和  $g_2$  为两个实参数。由(16)式可以看出,

线性分布  $F(Z)$  是一个周期函数,说明该波导是一个呈周期分布的梯度折射率平面波导。周期分布的梯度折射率平面波导可以近似模拟由于制作过程的缺陷导致波导线性分布的不均匀性。于是,从(7a)式可以得到光波宽度为

$$W(Z) = W(0)[1 + \beta_2 \sin(g_2 Z)]. \quad (17)$$

根据(8)式,可以得到增益/损耗系数为

$$G(Z) = -\frac{\beta_2 g_2 \cos(g_2 Z)}{1 + \beta_2 \sin(g_2 Z)} - \frac{\beta_1 g_1 \cos(g_1 Z)}{1 + \beta_1 \sin(g_1 Z)}. \quad (18)$$

图4为线性分布函数  $F(Z)$ 、非线性分布函数  $R(Z)$ 、增益/损耗系数  $G(Z)$  及光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的演化图。

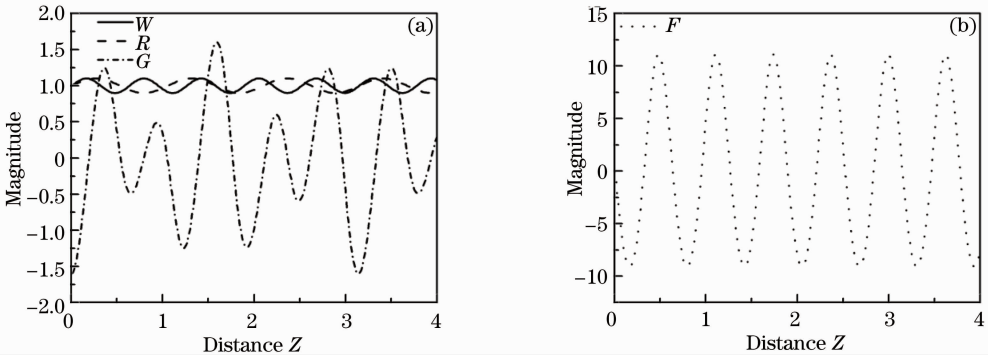


图4 (a)光波宽度  $W(Z)$ 、非线性分布参数  $R(Z)$ 、增益/损耗系数  $G(Z)$  和(b)线性分布参数  $F(Z)$  曲线图

$$[\beta=0.1, g_1=6, \beta_2=0.1, g_2=10, W(0)=1]$$

Fig. 4 Profiles of (a) width  $W(Z)$ , nonlinear parameter  $R(Z)$ , gain-loss function  $G(Z)$  and (b) linear parameter

$$F(Z) [\beta=0.1, g_1=6, \beta_2=0.1, g_2=10, W(0)=1]$$

由图4可以看到除非线性分布函数  $R(Z)$  和增益/损耗系数  $G(Z)$  随传播距离  $Z$  呈周期性的振荡以外,线性分布函数  $F(Z)$  和光波宽度  $W(Z)$  也呈周期性的变化。图4直观地证明了线性分布函数  $F(Z)$  直接影响着光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的变化。图5(a)和图5(b)分别为亮、暗自相似光波在该系统中的演化图,可以看到亮、暗自相似光波在该系统中可以稳定地传播,其强度和宽度都呈周期性的变化。

### 3.4 双曲分布的梯度折射率平面波导

考虑线性折射率具有如下分布<sup>[23,26]</sup>:

$$F(Z) = 1 - 2\text{sech}^2(Z), \quad (19)$$

则该波导是一个线性部分沿光轴呈双曲分布的梯度折射率平面波导,此波导可以通过掺杂来实现。由(7a)式可得到光波宽度为

$$W(Z) = W(0)\text{sech}(Z). \quad (20)$$



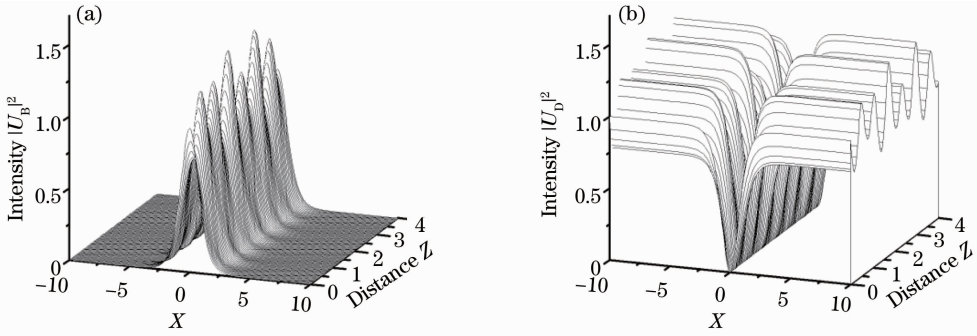


图 5 自相似光波的演化。(a)亮自相似光波；(b)暗自相似光波 $[\beta=0.1, g_1=6, \beta_2=0.1, g_2=10, W(0)=1]$   
 Fig. 5 Evolutions of self-similar waves. (a) Bright self-similar wave; (b) dark self-similar wave  $[\beta=0.1, g_1=6, \beta_2=0.1, g_2=10, W(0)=1]$

根据(8)式,可得到增益/损耗系数为

$$G(Z) = \tanh(Z) - \frac{\beta g_1 \cos(g_1 Z)}{1 + \beta \sin(g_1 Z)}. \quad (21)$$

线性分布函数  $F(Z)$ 、非线性分布函数  $R(Z)$ 、增益/损耗系数  $G(Z)$  及光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的演化图如图 6 所示。

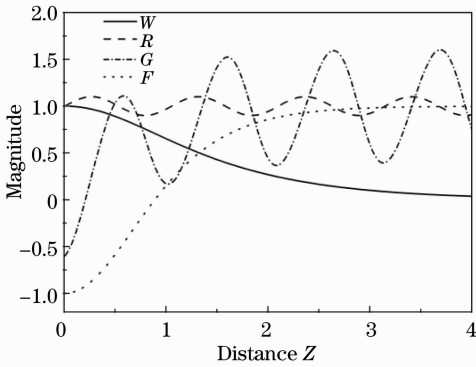


图 6 光波宽度  $W(Z)$ 、非线性分布函数  $R(Z)$ 、线性分布函数  $F(Z)$  以及增益/损耗系数  $G(Z)$  曲线 $[\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1]$

Fig. 6 Profiles of width  $W(Z)$ , nonlinear parameter  $R(Z)$ , linear parameter  $F(Z)$  and gain-loss function  $G(Z)$   $[\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1]$

由图 6 可以看到非线性分布参数  $R(Z)$  和增益/损耗系数  $G(Z)$  仍随传播距离  $Z$  呈现周期性的变化。而与先前情况不同的是,线性分布参数  $F(Z)$  会从负值逐渐增加到正值,即波导先从线性自聚焦逐渐转变为线性自散焦,然后逐渐趋于稳定。而光波宽度  $W(Z)$  随传播距离  $Z$  的增加而迅速减小,在  $Z=2$  时光波宽度  $W(Z)$  已非常接近于 0。说明光波在传播过程中很快被压缩,但在该系统中自相似光波的有效传播距离不是很远。图 7(a)和图 7(b)分别为亮、暗自相似光波在该系统中的演化图,可以看到亮、暗自相似光波在该系统中有限的距离内可以稳定地传输,其强度迅速增强而宽度迅速减小。

综上所述,不同的  $F(Z)$  和  $R(Z)$  分布,就会得到不同的自相似光波的演化。所以可以通过人工的方法,例如对波导拉伸和添加杂质等,改变波导的折射率使其满足  $F(Z)$  和  $R(Z)$  分布,从而实现了对自相似光束的控制和管理。例如,上述讨论的在均匀系统和双曲分布的系统中,都可实现对自相似光波的压缩和放大,因此该系统可设计成一个波导放大器。本文的结果对在实验上研究自相似光波的控制和管理提供了一定的理论指导。

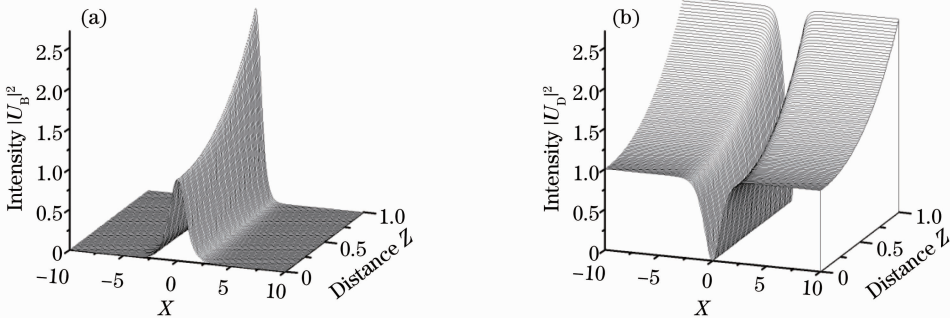


图 7 自相似光波的演化。(a)亮自相似光波；(b)暗自相似光波 $[\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1]$   
 Fig. 7 Evolutions of self-similar waves. (a) Bright self-similar wave; (b) dark self-similar wave  $[\beta=0.1, g_1=6, W(0)=1]$

## 4 结 论

主要以描述光波在非均匀梯度折射率平面波导中传输的理论模型—变系数非线性薛定谔方程,以及该方程的精确自相似解为基础,讨论了亮、暗自相似光波在4种不同的波导系统中的传输特性。研究表明:自相似光波的宽度由线性折射率的分布而决定,而振幅则由线性折射率分布和非线性折射率分布共同决定。要实现对自相似光波的管理,可以根据实际需要,通过选取不同的线性折射率分布和非线性折射率分布的波导系统,从而形成不同的自相似光波。例如在均匀系统和双曲分布的系统中,都可实现对自相似光波的压缩和放大,因此都可用作波导放大器。区别是在均匀的克尔非线性波导中,自相似光波的光波宽度与传播距离成线性关系,而均匀的梯度折射率平面波导中,自相似光波的光波宽度与传播距离成指数关系,在双曲分布的梯度折射率平面波导中,自相似光波的光波宽度与传播距离成双曲关系,因此在双曲系统中光波被压缩和放大的速度较快,传播距离较短。在周期振荡系统中,则可形成周期振荡且长距离稳定传输的自相似光波。该结果为进一步在实验上研究自相似光波的控制和管理提供一定的理论指导。

## 参 考 文 献

- 1 G I Barenblatt, Scaling, Self-Similarity, and Intermediate Asymptotics; Dimensional Analysis and Intermediate Asymptotics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- 2 Feng Jie, Xu Wencheng, Zhang Qiaofen, *et al.*. Self-similar pulse evolution in optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(10): 26–36.  
冯杰, 徐文成, 张巧芬, 等. 光纤中自相似脉冲研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(10): 26–36.
- 3 T M Monro, P D Miller, L Poladian, *et al.*. Self-similar evolution of self-written waveguides [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(4): 268–270.
- 4 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey, *et al.*. Self-similar propagation of high-power parabolic pulses in optical fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(24): 1753–1755.
- 5 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey, *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(3): 461–469.
- 6 M E Fermann, V I Kruglov, B C Thomsen, *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(26): 6010–6013.
- 7 C Finot, G Millot, C Billet, *et al.*. Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber [J]. *Opt Express*, 2003, 11(13): 1547–1552.
- 8 F Ö Ilday, J R Buckley, W G Clark, *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(21): 213902.
- 9 C Finot, G Millot. Interaction between optical parabolic pulses in a Raman fiber amplifier [J]. *Opt Express*, 2005, 13(15): 5825–5830.
- 10 J M Dudley, C Finot, D J Richardson, *et al.*. Self-similarity in ultrafast nonlinear optics [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(9): 597–603.

- 11 B Oktem, C Ülgüdür, F Ö Ilday. Soliton-similariton fiber laser [J]. *Nat Photonics*, 2010, 4(5): 307–311.
- 12 Li Xiuhua, Li Lu. Self-similar parabolic pulses in optical fiber amplifiers [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2012, 18(1): 54–58.  
李秀华, 李禄. 光纤放大器中的自相似脉冲[J]. *量子光学学报*, 2012, 18(1): 54–58.
- 13 Lü Hua, Zhang Qiaofen, Wu Xiao. Research of self-similar region in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0619002.  
吕华, 张巧芬, 吴肖. 色散渐减光纤中自相似脉冲传输区域的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0619002.
- 14 Li Liping, Zhang Ailing. Study on parabolic self-similar pulse generation in a nonlinearity increasing fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0805006.  
李莉苹, 张爱玲. 基于非线性渐增原理获得抛物线型自相似脉冲的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0805006.
- 15 Li Chao, Zhao Lei, Huang Zhihuang, *et al.*. Theory study on self-similar pulse in mode-locked fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602017.  
李超, 赵磊, 黄志华, 等. 自相似脉冲在锁模光纤激光器中产生的理论研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602017.
- 16 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey. Exact self-similar solutions of the generalized nonlinear Schrödinger equation with distributed coefficients [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(11): 113902.
- 17 T S Raju, P K Panigrahi, K Porsezian. Self-similar propagation and compression of chirped self-similar waves in asymmetric twin-core fibers with nonlinear gain [J]. *Phys Rev E*, 2005, 72(4): 046612.
- 18 S Chen, Y Li. Chirped self-similar solutions of a generalized nonlinear Schrödinger equation model [J]. *Phys Rev E*, 2005, 71(1): 016606.
- 19 S A Ponomarenko, G P Agrawal. Interactions of chirped and chirp-free similaritons in optical fiber amplifiers [J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 2963–2973.
- 20 S A Ponomarenko, S Haghgoo. Spatial optical similaritons in conservative nonintegrable systems [J]. *Phys Rev A*, 2010, 81(5): 051801.
- 21 Chaoqing Dai, Yueyue Wang, Jiefang Zhang. Nonlinear similariton tunneling effect in the birefringent fiber [J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17548–17554.
- 22 S A Ponomarenko, G P Agrawal. Do solitonlike self-similar waves exist in nonlinear optical media? [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(1): 013901.
- 23 S A Ponomarenko, G P Agrawal. Optical similaritons in nonlinear waveguides [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(12): 1659–1661.
- 24 T S Raju, P K Panigrahi. Optical similaritons in a tapered graded-index nonlinear-fiber amplifier with an external source [J]. *Phys Rev A*, 2011, 84(3): 033807.
- 25 A Goyal, R Gupta, C N Kumar, *et al.*. Controlling optical similaritons in a graded-index nonlinear waveguide by tailoring of the tapering profile [J]. *Opt Comm*, 2013, 300: 236–243.
- 26 Juanfen Wang, Lu Li, Suotang Jia. Nonlinear tunneling of optical similaritons in nonlinear waveguides [J]. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25(8): 1254–1260.
- 27 Zhang Jiefang, Zhao Bi, Hu Wencheng, *et al.*. Interaction propagation of optical vortex solitons in inhomogeneous nonlinear waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0419001.  
张解放, 赵辟, 胡文成, 等. 非均匀非线性波导中涡旋光孤子的相互作用传播[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0419001.
- 28 Zhang Jiefang, Lou Jihui. Line optical rogue waves and transmission controlling in inhomogeneous nonlinear waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0919001.  
张解放, 楼吉辉. 非均匀非线性波导中线光学畸形波及其传播控制[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0919001.
- 29 J C Campbell. Tapered waveguides for guided wave optics [J]. *Appl Opt*, 1979, 18(6): 900–902.