

光纤激光器中亮暗孤子对的传输特性

石佳, 王娟芬*, 张聪, 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 030600

摘要 基于简化的光纤激光器模型, 采用分步傅里叶方法, 数值研究亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性。研究表明, 在光纤激光器中, 亮暗孤子对是否稳定存在与群速度色散有关, 亮暗孤子对在零色散区可以保持波形不变的稳定传输。同时亮暗孤子对受光纤激光器的小信号增益系数、饱和能量、初始脉宽、偏振角度等因素的影响。小信号增益系数越大, 饱和能量越大, 则亮暗孤子对的峰值强度越大, 脉宽越窄。当峰值强度增加到一定程度, 亮暗孤子对发生分裂。偏振控制器可以控制亮暗孤子对的输出。本研究结果可为光纤激光器中亮暗孤子对信号源的产生研究提供一定的理论依据。

关键词 非线性光学; 亮暗孤子对; 光纤激光器; 非线性薛定谔方程

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0519001

Transmission Characteristics of Bright-Dark Soliton Pair in Fiber Lasers

Shi Jia, Wang Juanfen, Zhang Cong, Zhang Zhaoxia, Yang Lingzhen

College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030600, China

Abstract Based on the simplified model of fiber laser, the transmission characteristics of bright-dark soliton pair in fiber laser are studied numerically by the split-step Fourier method. The results show that the stable existence of the bright-dark soliton pair is related to the group velocity dispersion, and the bright-dark soliton pair can maintain the stable transmission in the zero dispersion region. At the same time, the bright-dark soliton pair is influenced by the small signal gain coefficient, saturated energy, initial pulse width, and polarization angle in fiber laser. The larger the small signal gain coefficient or the saturation energy, the peak intensity of the bright-dark soliton pair is greater with the width narrower. When the peak intensity increases to a certain degree, the bright-dark soliton pair is split. The polarization controller can control the output of the bright-dark soliton pair. These results can provide some theoretical basis for the research on the generation of signal sources of bright-dark soliton pair in fiber laser.

Key words nonlinear optics; bright-dark soliton pair; fiber lasers; nonlinear Schrödinger equation

OCIS codes 190.4370; 060.5530; 190.5530

1 引言

光纤激光器具有体积小、质量轻、增益特性好、转换效率高、阈值低、输出光束质量好、与现有光通信系统相兼容等特点, 在激光加工、光通信、医疗器械、军事等方面具有潜在的应用价值。随着超快光学领域的快速发展, 近年来光纤激光器产生的超短脉冲受到人们广泛的关注^[1-3]。迄今为止, 在光纤激

光器的实验中可观察到不同类型的脉冲, 例如光孤子^[4]、飞秒脉冲^[5]、矩形脉冲^[6]、多波长脉冲^[7]等。光孤子是由介质中的线性效应和非线性效应达到精确平衡时产生的特殊超短光脉冲, 因它在全光通信中具有信息容量高、传输距离长、传输速率大、误码率低、保密性好及抗干扰力强等优点被学者们广泛研究^[8-10]。2009年, 新加坡南洋理工大学的研究小组首次在光纤激光器中实现暗脉冲输出^[11-14]; 2010年,

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61675144, 61575137)

作者简介: 石佳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光脉冲传输方面的研究。E-mail: tyutshijia@163.com

导师简介: 王娟芬(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 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)

Feng 等^[15]在量子点激光器中观测到稳定的暗脉冲输出;2012年,Ning 等^[16-18]首次利用锁模光纤激光器在实验中观察到亮暗孤子对;2015年,Ge 等^[19]通过数值模拟方法首次揭示了光纤激光器中初始条件对暗孤子脉冲形成的影响。然而亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性鲜有报道。

本文基于简化的光纤激光器模型,通过 MATLAB 软件采用分步傅里叶变换算法,数值研究亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性,并讨论不同的光纤长度、增益系数、饱和能量、初始脉冲宽度以及偏振角度对亮暗孤子对传输的影响。

2 理论模型和数值模拟

光纤激光器的平均化传输方程模型——修正的非线性薛定谔方程^[20]为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2 \cdot A + \frac{g}{2}A + \frac{gT_1}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中: A 为脉冲包络振幅; z 为传输坐标; α 为损耗系数; t 为延迟时间; β_2 为二阶群速度色散; γ 为光纤的非线性参数; T_1 为偶极子弛豫时间; g 为饱和增益,且

$$g = \frac{g_0}{1 + \int |A|^2 dt / E_{\text{sat}}}, \quad (2)$$

式中: g_0 为小信号增益系数; E_{sat} 为饱和能量;激光器中的耦合输出比为 70:30。为了方便计算,引入变量 $E\sqrt{P_0} = A, Z = z/L_d, T = t/T_0, L_{\text{NL}} = 1/\gamma P_0, L_d = T_0^2/|\beta_2|, N^2 = L_d/L_{\text{NL}} = 1, \Gamma = \alpha L_d, T_2 = T_1/T_0, I_s = E_{\text{sat}}/(P_0 T_0), G = g_0 L_d / (1 + \int |A|^2 d\tau / I_s)$, 其中 L_{NL} 和 L_d 分别为非线性长度和色散长度, T_0 为入射光脉冲宽度, P_0 为脉冲峰值功率,经变量代换后,(1)式可写为

$$\frac{\partial E}{\partial Z} = -\frac{\Gamma}{2}E - \frac{i}{2}\text{sgn}(\beta_2) \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + iN^2|E|^2 \cdot E + \frac{G}{2}E + \frac{GT_2}{2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial T^2}. \quad (3)$$

参数设置为:脉冲峰值功率 $P_0 = 2$ W,损耗系数 $\alpha = 0.15$ dB/km,腔长 $L = 10$ m,非线性系数 $\gamma = 3$ W⁻¹ · km⁻¹,入射光脉冲宽度 $T_0 = 1$ ps,偶极子弛豫时间 $T_1 = 100$ fs,小信号增益系数 $g_0 = 0.01$ m⁻¹,因此非线性长度 $L_{\text{NL}} = 0.167 \times 10^3$ m。图 1 所示为亮孤子 $V(0, T) = \text{sech}(T)$,暗孤子 $U(0, T) = \tanh(T)$

以及亮暗孤子对 $E(0, T) = \text{sech}(T) + \tanh(T)$ 的场振幅和强度分布曲线。暗孤子考虑的是文献[21]中当背景振幅 $\eta = 1$ 及下陷深度 $B = 1$ 时的一般情况。

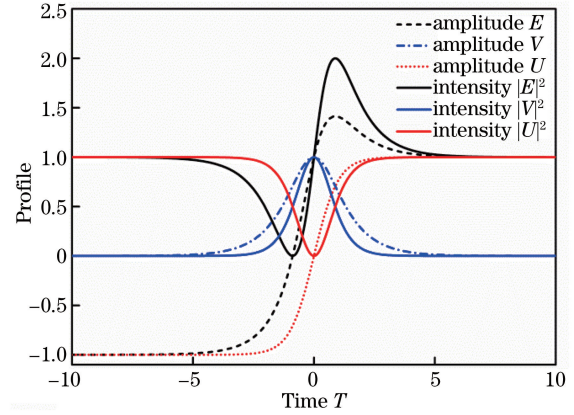


图 1 亮孤子、暗孤子和亮暗孤子对的振幅和强度曲线
Fig. 1 Amplitudes and intensities of bright soliton, dark soliton, and bright-dark soliton pair

从图 1 可以看出,亮孤子 V 的强度是零背景上的能量凸起,暗孤子 U 表现为平面波背景上的能量凹陷,并且由于参量 $B = 1$,其下陷中心强度为 0。而亮孤子和暗孤子的叠加形成亮暗孤子对 E ,其强度并没有相互抵消,而表现为平面波背景上的一个能量凸起与一个能量凹陷,凸起的中心强度为 2,凹陷的中心强度为 0。下面以亮暗孤子对 $E(0, T) = \text{sech}(T) + \tanh(T)$ 作为初始输入脉冲来研究亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性。图 2 所示为在不同群速度色散区,亮孤子,暗孤子以及亮暗孤子对在光纤激光器中的传输演化。

图 2(a)、(b)、(c)中, $\beta_2 = 6$ ps²/km,即在正常色散区,此时非线性长度 $L_d = 0.167 \times 10^3$ m,亮孤子发生展宽,暗孤子可以稳定传输,亮暗孤子对中亮脉冲发生展宽。而图 2(d)、(e)、(f)中, $\beta_2 = -6$ ps²/km,即在反常色散区,亮孤子可以稳定传输,由于小信号增益的影响,峰值功率不断增加,暗孤子发生展宽分裂,亮暗孤子对也发生展宽分裂。图 2(g)、(h)、(i)中, $\beta_2 = 0$ ps²/km,即在零色散区,亮孤子和暗孤子都可以稳定传输,亮暗孤子对也能无畸变传输,其三维传输过程如图 3 所示。

在实际光纤中,完全零色散的光纤几乎不存在,但通过色散管理可以使光纤激光器腔内的平均色散几乎为零。于是考虑一种简化的光纤激光器模型^[22],如图 4 所示,该光纤激光器由一段正常色散的掺铒光纤(EDF),一段反常色散的单模光纤(SMF)和耦合器(OC)组成,耦合输出比为 70:30。

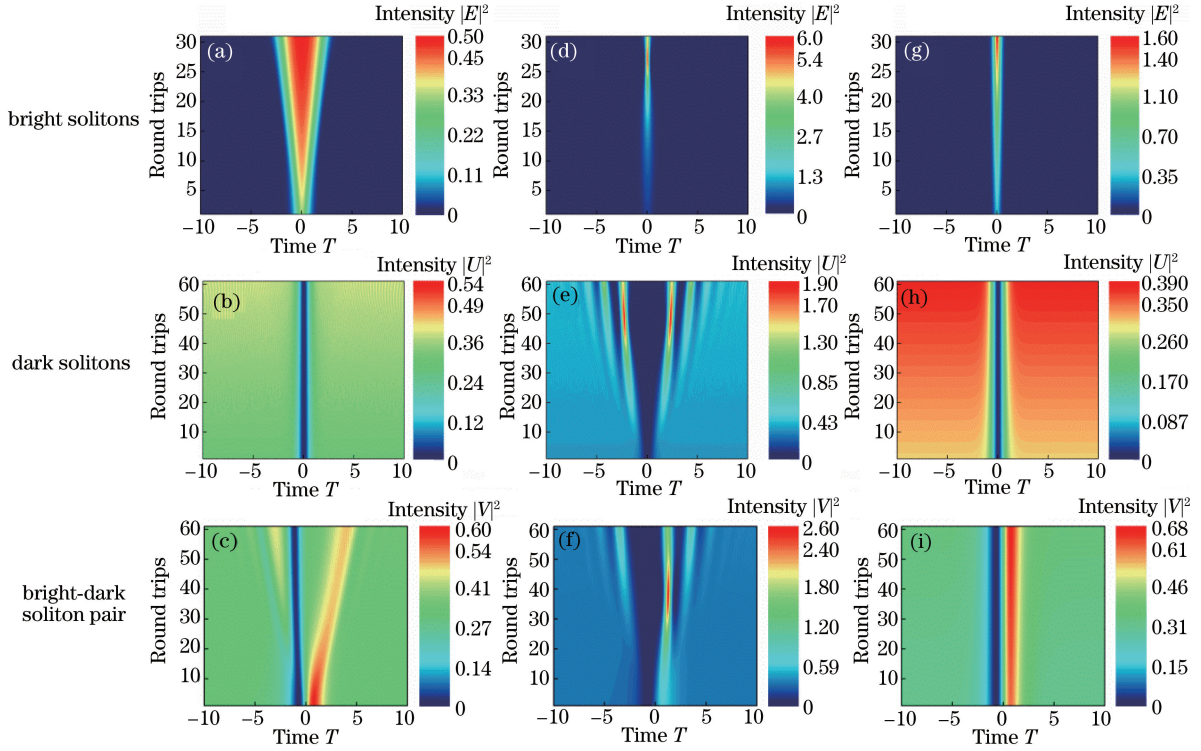


图 2 β_2 取不同值时亮孤子,暗孤子以及亮暗孤子对在光纤激光器中的演化。

(a), (b), (c) $\beta_2 = 6 \text{ ps}^2/\text{km}$; (d), (e), (f) $\beta_2 = -6 \text{ ps}^2/\text{km}$; (g), (h), (i) $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$

Fig. 2 Evolution of bright solitons, dark solitons and bright-dark soliton pair in fiber laser with different β_2 values.

(a), (b), (c) $\beta_2 = 6 \text{ ps}^2/\text{km}$; (d), (e), (f) $\beta_2 = -6 \text{ ps}^2/\text{km}$; (g), (h), (i) $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$

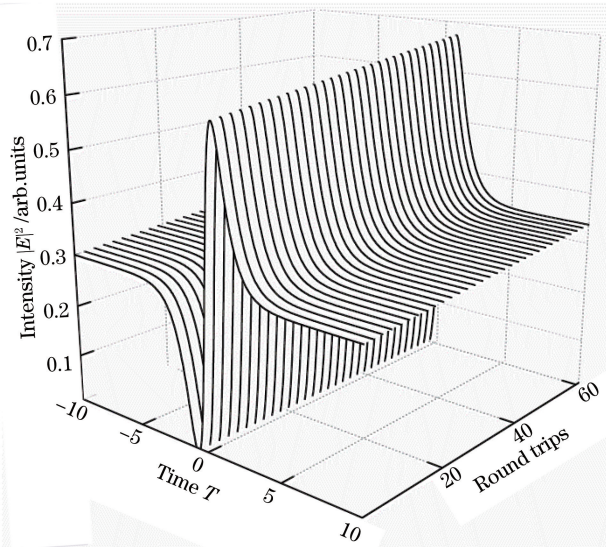


图 3 $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$ 时亮暗孤子对 E 在光纤激光器中的传输图

Fig. 3 Propagation of the bright-dark soliton pair E in fiber laser when $\beta_2 = 0 \text{ ps}^2/\text{km}$

光脉冲在掺铒光纤中的传输可用(3)式来描述,但由于亮暗孤子对 E 是亮孤子和暗孤子的相互叠加,而(3)式没有考虑亮孤子和暗孤子之间的耦合作用。当考虑亮暗孤子对之间的相互耦合作用时,

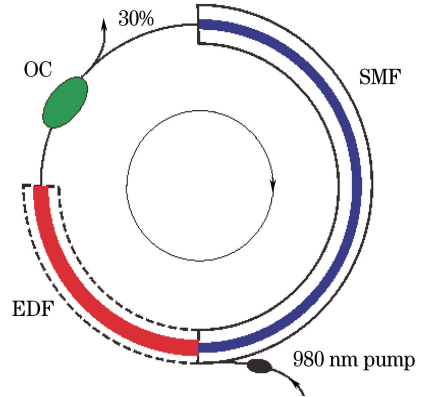


图 4 光纤激光器简化模型图

Fig. 4 Simple model of the fiber laser

(3)式可修正为耦合非线性薛定谔方程^[23-24]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\Gamma}{2}U - \frac{i}{2}\text{sgn}(\beta'') \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + iN^2 \cdot \left(|U|^2 + \frac{2}{3}|V|^2 \right) \cdot U + \frac{G}{2}U + \frac{GT_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \\ \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\Gamma}{2}V - \frac{i}{2}\text{sgn}(\beta'') \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} + iN^2 \cdot \left(|V|^2 + \frac{2}{3}|U|^2 \right) \cdot V + \frac{G}{2}V + \frac{GT_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \end{cases} \quad (4)$$

当小信号增益系数 $g_0 = 0$ 时,(4)式描述了光

脉冲在单模光纤中的传输。许多学者已通过实验研究了在一定条件下光纤激光器中亮暗孤子对的产生^[25]。而本文基于耦合非线性薛定谔方程通过数值模拟的方法讨论亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性。

1)考虑初始输入脉冲为两个同偏振同波长的暗孤子 $U(0, T) = \tanh(T)$ 和亮孤子 $V(0, T) = \text{sech}(T)$, 采用参数: $\beta''_{\text{SMF}} = -22 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta''_{\text{EDF}} = 19 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma_{\text{SMF}} = 2 \text{ w}^{-1} \text{ km}^{-1}$, $\gamma_{\text{EDF}} = 3 \text{ w}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 。通过改变光纤激光器中掺铒光纤和单模光纤的长度进行色散管理, 进而改变腔中的净腔色散。

图 5 所示为光纤激光器中净腔色散为不同值时亮暗孤子对的传输。图 5(a)中单模光纤长度为 1 m, 掺铒光纤长度为 5 m, 净腔色散为 0.06 ps^2 时, 亮暗孤子对中亮脉冲不能稳定传输, 发生展宽分裂, 暗脉冲基本保持稳定传输; 图 5(b)中取单模光纤长度为 4 m, 掺铒光纤长度为 5 m, 净腔色散为 0 时, 亮暗孤子对基本可以稳定传输。但由于增益系数的影响, 孤子产生轻微的脉冲压缩; 图 5(c)中单模光纤长度为 7 m, 掺铒光纤长度为 5 m, 净腔色散为 -0.06 ps^2 时, 亮暗孤子对均不能稳定传输, 发生明显的展宽分裂。

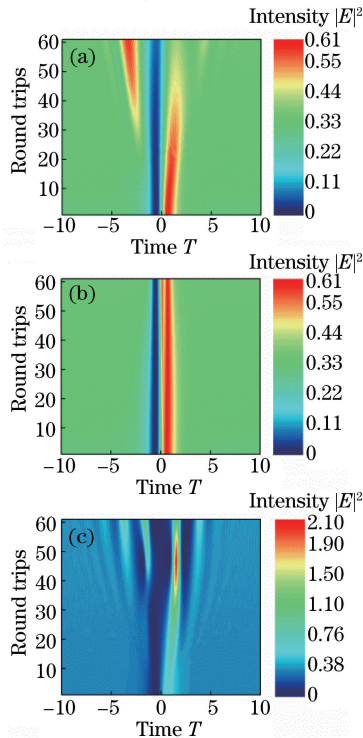


图 5 光纤激光器的净腔色散分别为(a) 0.06 ps^2 ; (b) 0 ps^2 ; (c) -0.06 ps^2 时亮暗孤子对的演化
Fig. 5 Evolution of bright-dark soliton pair in the fiber laser when the net cavity dispersion values are (a) 0.06 ps^2 , (b) 0 ps^2 , (c) -0.06 ps^2

因此,亮暗孤子对可以在净腔色散为 0 的光纤激光器中稳定存在。但在实际中,净腔色散完全为 0 不易实现,所以考虑通过色散管理使净腔色散趋近于 0。图 6 所示为净腔色散为 0.002 ps^2 且小信号增益系数 g_0 取不同值时,亮暗孤子对在传输 20 圈后的输出强度分布。从图 6 可以看出,随着 g_0 的增大,孤子的峰值强度不断增大,脉冲宽度逐渐减小。

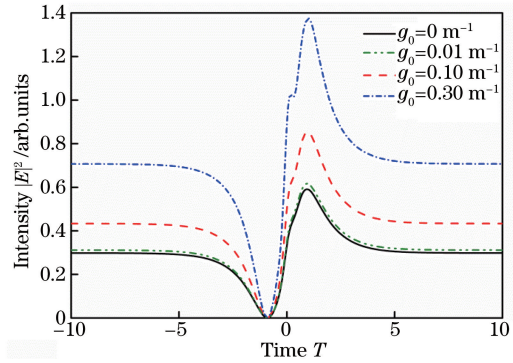


图 6 小信号增益系数 g_0 取不同值时亮暗孤子对传输 20 圈后的输出强度分布

Fig. 6 Intensity distributions of bright-dark soliton pair after 20 round times with different small signal gain coefficients

图 7 所示为当 g_0 取 $0, 0.01, 0.10, 0.30 \text{ m}^{-1}$ 时亮暗孤子对的传输演化。从图 7(a)~(c)可以看出,亮暗孤子对基本可以稳定传输,并且在传输过程中脉冲逐渐被压缩,峰值强度逐渐增强;暗脉冲的压缩速度比亮脉冲快,而且随着 g_0 的增大,脉宽压缩越窄,峰值强度越大。当增益 g_0 增大到 0.30 m^{-1} 时,腔内的孤子脉冲发生分裂,如图 7(d)所示。

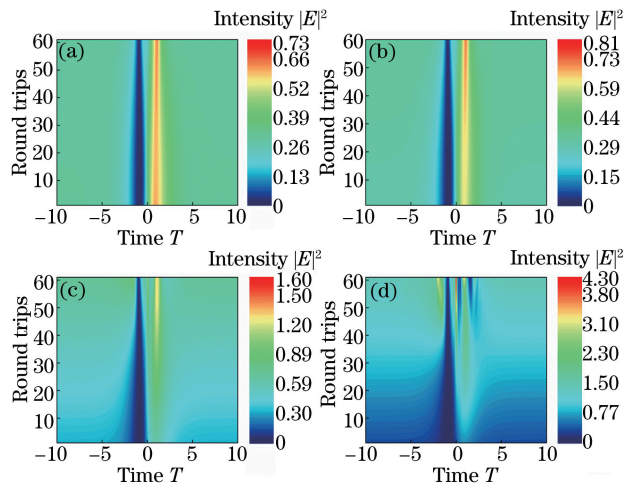


图 7 亮暗孤子对的演化图。(a) $g_0 = 0 \text{ m}^{-1}$; (b) $g_0 = 0.01 \text{ m}^{-1}$; (c) $g_0 = 0.10 \text{ m}^{-1}$; (d) $g_0 = 0.30 \text{ m}^{-1}$
Fig. 7 Evolution of bright-dark soliton pair with different small signal gain coefficients. (a) $g_0 = 0 \text{ m}^{-1}$; (b) $g_0 = 0.01 \text{ m}^{-1}$; (c) $g_0 = 0.10 \text{ m}^{-1}$; (d) $g_0 = 0.30 \text{ m}^{-1}$

图 8 所示为饱和能量 E_{sat} 取不同值时,亮暗孤子对在传输 40 圈后的输出强度分布。随着饱和能量 E_{sat} 的增大,亮暗孤子对的强度不断增大,脉冲发生压缩,当 $E_{\text{sat}} = 120 \text{ pJ}$ 时,孤子表现出不稳定性,亮脉冲出现了旁瓣。图 9 所示为 E_{sat} 分别取 1.2, 12, 120 pJ 时亮暗孤子对的传输演化。从图 9 可以看出,亮暗孤子对在传输过程中,脉冲发生压缩,而且暗脉冲比亮脉冲压缩得更快。当 E_{sat} 取 120 pJ 时,脉冲宽度压缩到最窄,并且峰值功率增加,随后亮暗孤子对发生分裂。

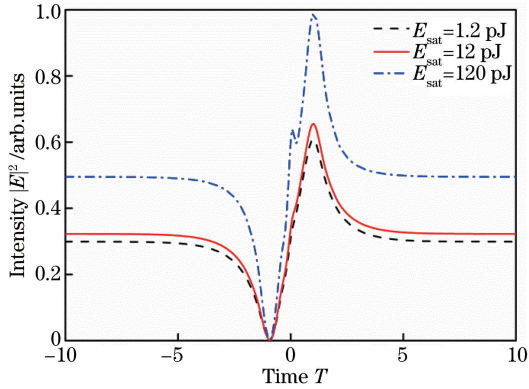


图 8 饱和能量 E_{sat} 取不同值时亮暗孤子对的强度分布
Fig. 8 Intensity distribution of bright-dark soliton pair with different values of the saturation energy E_{sat}

2) 考虑初始脉宽对亮暗孤子对传输的影响。图 10 所示为初始脉宽 T_0 取不同值时,亮暗孤子对的传输演化。由图 10 可以看出,当 $T_0 = 0.2 \text{ ps}$ 时,亮暗孤子的脉冲对随着传输过程发生展宽现象;当 $T_0 = 0.6 \text{ ps}$ 时,亮暗孤子对稳定传输;当 T_0 增大到 1 ps 时,脉冲发生了明显的压缩现象;当 T_0 增大到 2 ps 时,孤子压缩后发生分裂。

3) 考虑光纤双折射的情况,并假设亮孤子 $V(0, T) = \text{sech}(T)$ 和暗孤子 $U(0, T) = \tanh(T)$ 分别沿光纤快轴和光纤慢轴传输,在光纤激光器输出端加偏振控制器^[26-27]。此时光纤激光器的输出为 $E = U \cos \theta + V \sin \theta$, 其中 θ 为偏振控制器与光纤快轴之间的夹角。图 11 所示为当 $\theta = 0, \theta = \pi/6, \theta = \pi/4, \theta = \pi/3$ 和 $\theta = \pi/2$ 时孤子脉冲在传输 40 圈的输出强度分布。

从图 11 可知,不同的偏振角度会输出不同的脉冲,当 $\theta = 0$ 时,通过偏振控制器输出的只有暗脉冲,如图 11(a)所示。当偏振角度从 0 逐渐增加的过程中,暗脉冲的幅度逐渐减小,而亮脉冲的幅度逐渐增大,如图 11(b)所示。当偏振角度为 $\pi/4$ 时,亮、暗脉冲幅度相等,形成等幅的亮暗孤子对,如图 11(c)

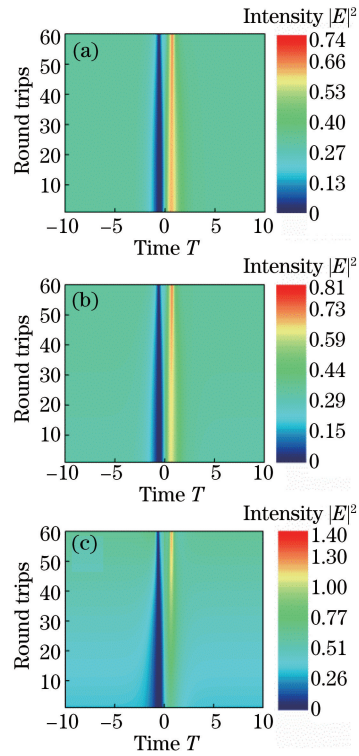


图 9 E_{sat} 取不同值时亮暗孤子对的演化。

(a) $E_{\text{sat}} = 1.2 \text{ pJ}$; (b) $E_{\text{sat}} = 12 \text{ pJ}$; (c) $E_{\text{sat}} = 120 \text{ pJ}$
Fig. 9 Evolution of bright-dark soliton pair with the different saturation energies. (a) $E_{\text{sat}} = 1.2 \text{ pJ}$; (b) $E_{\text{sat}} = 12 \text{ pJ}$; (c) $E_{\text{sat}} = 120 \text{ pJ}$

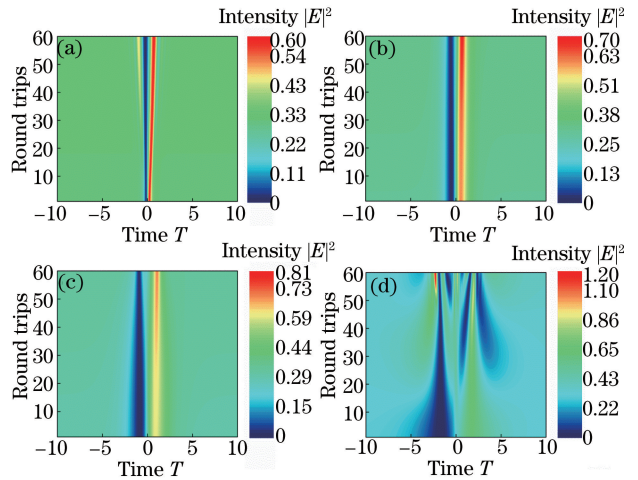


图 10 T_0 取不同值时亮暗孤子对在光纤激光器中的演化。

(a) $T_0 = 0.2 \text{ ps}$; (b) $T_0 = 0.6 \text{ ps}$;
(c) $T_0 = 1 \text{ ps}$; (d) $T_0 = 2 \text{ ps}$

Fig. 10 Evolution of bright-dark soliton pair in different initial pulse widths. (a) $T_0 = 0.2 \text{ ps}$; (b) $T_0 = 0.6 \text{ ps}$; (c) $T_0 = 1 \text{ ps}$; (d) $T_0 = 2 \text{ ps}$

所示。当偏振角度继续增大,亮脉冲幅度大于暗脉冲幅度,如图 11(d)所示。当偏振角度为 $\pi/2$ 时,偏振控制器只输出亮脉冲,如图 11(e)所示。这说明

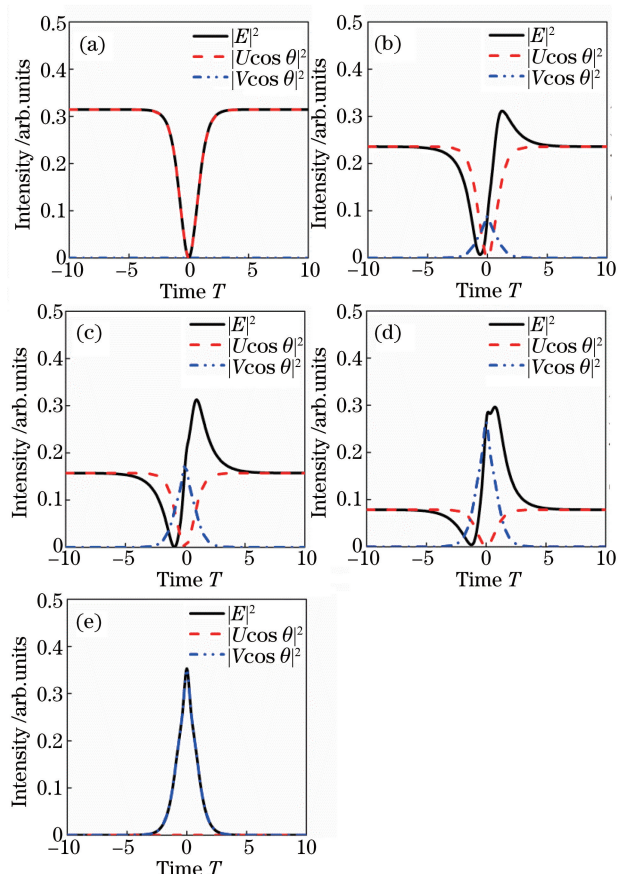


图 11 θ 取不同值时,亮孤子、暗孤子以及亮暗孤子对通过偏振控制器后的强度分布。(a) $\theta=0$; (b) $\theta=\pi/6$;
(c) $\theta=\pi/4$; (d) $\theta=\pi/3$; (e) $\theta=\pi/2$

Fig. 11 Intensity distributions of bright solitons, dark solitons and bright-dark soliton pair with the different polarization angles. (a) $\theta=0$; (b) $\theta=\pi/6$;
(c) $\theta=\pi/4$; (d) $\theta=\pi/3$; (e) $\theta=\pi/2$

通过改变偏振控制器可以改变光纤激光器的输出,产生亮暗孤子对,这也验证了文献[28]中的实验结果。

3 结 论

基于简化的光纤激光器模型,采用分步傅里叶方法讨论了亮暗孤子对在光纤激光器中的传输特性。首先,通过光纤激光器的平均化方程得出结论:亮暗孤子对只有在零色散区时光纤激光器才能实现形状不变的稳定传输。其次,对光纤激光器进行分段处理,通过色散管理,在净腔色散为 0 的区域得到稳定存在的亮暗孤子。随着小信号增益系数的增大,亮暗孤子的脉冲对在传输的过程中不断被压缩,峰值强度逐渐增大,当强度增加到一定程度,亮暗孤子对会发生分裂。随着饱和能量的增大,孤子脉冲同样被压缩,峰值强度逐渐增大,但是亮暗孤子对对饱和能量的变化不敏感。最后,讨论了偏振控制器对孤子传输的影

响,通过调节偏振控制器的角度,可以改变光纤激光器的输出状态,产生亮孤子、暗孤子或亮暗孤子对。

参 考 文 献

- [1] Chong A, Buckley J, Renninger W, *et al.* All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Cai M, Painter O, Vahala K J, *et al.* Fiber-coupled microsphere laser[J]. Optics Letters, 2000, 25(19): 1430-1432.
- [4] Stegeman G I, Segev M. Optical spatial solitons and their interactions: universality and diversity[J]. Science, 1999, 286(5444): 1518-1523.
- [5] Lecaplain C, Ortaç B, Hideur A, *et al.* High-energy femtosecond pulses from a dissipative soliton fiber laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3731-3733.
- [6] Zhang X, Gu C, Chen G, *et al.* Square-wave pulse with ultra-wide tuning range in a passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(8): 1334-1336.
- [7] Jiang Y, Yu J L, Zhang L T, *et al.* Generation of multi-wavelength optical pulses and electrical clock signal utilizing optoelectronic oscillator with single light source [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2093-2098.
江阳, 于晋龙, 张立台, 等. 利用单光源光电振荡器实现多波长光脉冲与电时钟信号产生[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2093-2098.
- [8] Smith J A. Fiber-optic communication systems, by Govind P. Agrawal[J]. Optics & Photonics News, 1998, 9(6): 54-55.
- [9] Khasilev V Y. Optimal control of all-optical communication soliton systems[C]. SPIE, 1996, 2919: 177-188.
- [10] Armstrong S. Optical communication: all-optical storage[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 636-637.
- [11] Zhang H, Tang D Y, Zhao L M, *et al.* Dark pulse emission of a fiber laser [J]. Physical Review A, 2009, 80(4): 3383-3387.
- [12] Li H P, Xia H D, Jing Z, *et al.* Dark pulse generation in a dispersion-managed fiber laser [J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 261-264.
- [13] Yin H, Xu W, Luo A P, *et al.* Observation of dark pulse in a dispersion-managed fiber ring laser [J]. Optics Communications, 2010, 283(21): 4338-4341.
- [14] Tomlinson W J, Hawkins R J, Weiner A M, *et al.*

- Dark optical solitons with finite-width background pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(3): 329-334.
- [15] Feng M M, Silverman K L, Mirin R P, *et al.* Dark pulse quantum dot diode laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13385-13395.
- [16] Ning Q Y, Wang S K, Luo A P, *et al.* Bright-dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1647-1652.
- [17] Guo B, Yao Y, Tian J, *et al.* Observation of bright-dark soliton pair in a fiber laser with topological insulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 701-704.
- [18] Meng Y, Zhang S, Li H, *et al.* Bright-dark soliton pairs in a self-mode locking fiber laser[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 064302.
- [19] Ge Y Q, Luo J L, Li L, *et al.* Initial conditions for dark soliton generation in normal-dispersion fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): 71-75.
- [20] Agrawal G P. Optical pulse propagation in doped fiber amplifiers [J]. *Physical Review A*, 1991, 44(11): 7493-7501.
- [21] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics: applications of nonlinear fiber optics[M]. Jia D F, Yu Z H, Wang Z Y, *et al.* Transl. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 105-108.
阿戈沃·戈文德磷. 非线性光纤光学: 原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 王肇颖, 等, 译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 105-108.
- [22] Soto-Crespo J M, Grelu P, Akhmediev N, *et al.* Dissipative rogue waves: extreme pulses generated by passively mode-locked lasers[J]. *Physical Review E*, 2011, 84(1): 016604.
- [23] Yue B H, Yang L Z, Wang J F, *et al.* Evolution of dark-dark soliton pairs in a dispersion managed erbium-doped fiber ring laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(7): 075106.
- [24] Liu X M. Soliton formation and evolution in passively-mode-locked lasers with ultralong anomalous-dispersion fibers[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(2): 023835.
- [25] Ma C, Gao B, Wu G, *et al.* Observation of dissipative bright soliton and dark soliton in an all-normal dispersion fiber laser [J]. *International Journal of Optics*, 2016: 1-7.
- [26] Mou C B, Zou C H, Huang Q Q, *et al.* Research progress in polarization lock and polarization processing vector soliton based on carbon nanotube mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703003.
牟成博, 邹传杭, 黄千千, 等. 基于碳纳米管锁模光纤激光器的偏振锁定和偏振进动矢量孤子的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703003.
- [27] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0505002.
戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0505002.
- [28] Wang H Y, Xu W C, Cao W, *et al.* Experimental observation of bright-dark pulse emitting in an all-fiber ring cavity laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 282-285.