

被动锁模光纤激光器中高阶色散对输出脉冲特性影响

陈炳 高博

Influence of high-order dispersion on output pulse characteristics in passively mode-locked fiber laser

CHEN Bingkun, GAO Bo

引用本文:

陈炳, 高博. 被动锁模光纤激光器中高阶色散对输出脉冲特性影响[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1102–1108. DOI: 10.5768/JAO202344.0507001

CHEN Bingkun, GAO Bo. Influence of high-order dispersion on output pulse characteristics in passively mode-locked fiber laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1102–1108. DOI: 10.5768/JAO202344.0507001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0507001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高信噪比多波长2 μm 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

色散管理掺铥光纤激光器高能量脉冲的产生

Generation of high-energy pulses in dispersion-managed Tm-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401004>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>

位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

应用光学. 2021, 42(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002>

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser

应用光学. 2018, 39(4): 585–589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-1102-07

被动锁模光纤激光器中高阶色散对输出脉冲特性影响

陈炳焜, 高 博

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 构建了被动锁模光纤激光器的理论模型, 通过数值仿真从时域和频域两个方面研究了高阶色散对输出脉冲特性的影响, 在时域方面, 三阶色散导致脉冲形状发生畸变, 脉冲时域轮廓不对称, 时域偏移等现象; 在频域方面, 三阶色散导致边带位置及强度发生变化。同时, 研究发现四阶色散可以展宽脉冲, 改变脉冲的边带强度。本文的研究结果对被动锁模掺铒光纤激光器的实际应用具有指导意义。

关键词: 激光器; 被动锁模激光器; 三阶色散; 四阶色散

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0507001

Influence of high-order dispersion on output pulse characteristics in passively mode-locked fiber laser

CHEN Bingkun, GAO Bo

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A theoretical model of passively mode-locked fiber laser was constructed, and the influences of high-order dispersion on output pulse characteristics were studied by numerical simulation in both time domain and frequency domain. In terms of time domain, the third-order dispersion resulted in distortion of pulse shape, asymmetry of pulse time-domain profile and temporal shift. In terms of frequency domain, the third-order dispersion caused changes in position and intensity of sidebands. At the same time, it was found that the fourth-order dispersion could broaden the pulse and change sidebands intensity of the pulse. The results are instructive for the practical applications of the passively mode-locked ytterbium-doped fiber lasers.

Key words: lasers; passively mode-locked laser; third-order dispersion; fourth-order dispersion

引言

超短脉冲目前已广泛应用于材料加工^[1-3]、光学频率梳^[4-6]、传感器^[7-8]、光谱学^[9-10]和其他领域^[11-12]。随着超快光学领域的快速发展, 被动锁模光纤激光器因其结构紧凑、脉冲稳定和成本低而得到广泛研究^[13-15]。

先前的理论和实验结果表明, 高阶色散是影响激光器输出脉冲的重要因素。三阶色散 (third-order dispersion, TOD) 会导致脉冲展宽或压缩、脉冲失真、脉冲混沌等现象。三阶色散可以增加锁模脉冲的持续时间^[16], 其能够压缩脉冲是因为相

速度和群速度匹配的色散波与锁模脉冲的共振作用^[17]。由于三阶色散的作用, 脉冲不对称并且中心波长发生偏移^[18]。同时, 研究人员也发现三阶色散可以抑制脉冲不稳定性, 它可以改变主脉冲与群速度和相速度匹配色散波之间的相互作用^[19]。在近零色散点附近, 通过增大三阶色散的参数值, 发现了脉冲混沌状态^[20]。一些有关四阶色散 (fourth-order dispersion, FOD) 的研究也大量展开。研究人员发现四阶色散和自相位调制作用可以产生孤子, 同时四阶色散可以导致脉冲展宽^[21]。RUNGE A F G 等人发现纯四次孤子脉冲, 脉冲的能量大幅

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 吉林省教育厅科技项目 (JKH20231170KJ)

作者简介: 陈炳焜 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器研究。E-mail: 3269349849@qq.com

通信作者: 高博 (1980—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事光纤激光器研究。E-mail: gaobo0312@jlu.edu.cn

度提升^[22]。

本文在被动锁模掺铒光纤激光器中对高阶色散参数进行了理论和仿真研究。首先, 介绍了被动锁模光纤激光器的模型和相应的方程。其次, 分析不同三阶色散值下孤子特性, 研究三阶色散对孤子特性的影响。时域方面, 三阶色散造成脉冲轮廓不对称及时域偏移等现象; 光谱方面, 三阶色散导致边带位置及强度发生变化。最后, 研究了四阶色散对被动锁模光纤激光器输出脉冲特性的影响。通过分析脉冲时域演化图及光谱图, 发现脉冲宽度随四阶色散发生改变, 造成脉宽展宽, 也对光谱边带产生影响。纯四次孤子具有较高的能量, 而本文关于高阶色散的研究对未来研究纯四次孤子有一定意义。

1 数值仿真模型

被动锁模掺铒激光器的腔设计如图1所示。掺铒光纤 (Yb-doped gain fiber, YDF) 由泵浦二极管泵浦, 在可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 之后, 使用耦合器输出一部分脉冲。另一部分光脉冲继续传输, 通过色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF)、单模光纤 (single-mode fiber, SMF), 再进入光隔离器, 从而形成闭合环路。

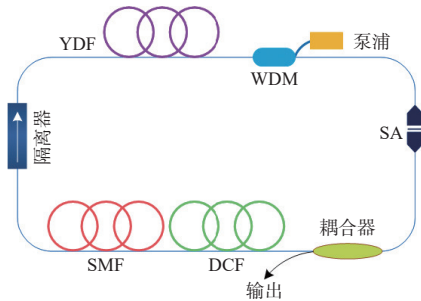


图1 被动锁模掺铒光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser

被动锁模掺铒光纤激光器可以由非线性薛定谔方程 NLSE 建模, 如下所示:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{g}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial U^2}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial U^3}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2A \quad (1)$$

式中: $A(z, t)$ 是 NLSE 描述的脉冲时间复包络; γ 是非线性系数; β_2 是群速度色散; β_3 是三阶色散参数; g 是掺杂光纤的增益系数, 可以用抛物线形增益谱 $g(w)$ 表示:

$$g(w) = \frac{g_0}{1 + (w/\Omega_g)^2 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中: g_0 是小信号增益; Ω_g 是增益带宽; E_{sat} 是增益饱和能量; $E_{\text{pulse}} = \int_{-T_R/2}^{T_R/2} |A(z, T)|^2 dT$ 阐述了脉冲能量。 T_R 是仿真时域窗口, 使用的可饱和吸收体模型如下:

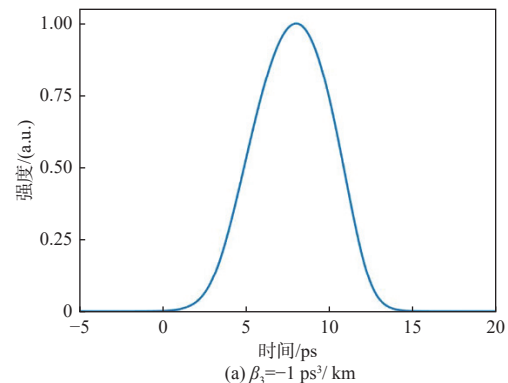
$$R = R_{\text{unsat}} + R_{\text{sat}} \left[1 - \frac{1}{1 + P(\tau)/P_{\text{sat}}} \right] \quad (3)$$

式中: R_{sat} 是饱和反射系数; R_{unsat} 是非饱和反射系数; $P(\tau)$ 是光脉冲时域中每点对应的瞬时光功率; P_{sat} 是可饱和吸收体的饱和功率。该模型采用分布傅里叶算法求解。下面的数值用于本次仿真: g_0 为 8 m^{-1} , γ 为 $0.5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, Ω_g 为 15 THz , E_{sat} 为 20 pJ ; R_{unsat} 为 0.6 , R_{sat} 为 0.3 , P_{sat} 为 2.6625 W ; 耦合器分光比为 $20 : 80$; 掺铒光纤长度为 0.25 m , β_2 为 $25 \text{ ps}^2/\text{km}$; 色散补偿光纤长度为 3.5 m , β_2 为 $-25 \text{ ps}^2/\text{km}$; 单模光纤长度为 6 m , β_2 为 $25 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。仿真中心波长为 1030 nm , 这与掺铒光纤的实际波长一致。

2 仿真分析与讨论

2.1 三阶色散对孤子特性影响的数值仿真

当腔内群速度色散接近零, 三阶色散是一个重要因素。为了研究三阶色散对输出脉冲的影响, 保持其他参数不变, 线性减小三阶色散从 0 到 $-15 \text{ ps}^3/\text{km}$, 间隔为 $-0.2 \text{ ps}^3/\text{km}$ 。通过线性降低三阶色散数值, 观察到脉冲的时域轮廓变得不对称, 形状出现畸变。当三阶色散数值降到 $-6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时, 脉冲出现不对称的震荡拖尾结构。这是因为忽略非线性效应, 只考虑色散效应, 可以解 NLSE 方程: $i\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\beta_2}{2}\frac{\partial U^2}{\partial T^2} + \frac{i}{6}\beta_3\frac{\partial U^3}{\partial T^3}$, 并得到: $U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(0, w) \exp\left(\frac{i}{2}\beta_2 w^2 z + \frac{i}{6}\beta_3 w^3 z - iwT\right) dw$, 所以只考虑 β_2 这一参数, 脉冲时域轮廓不变。当考虑到 β_3 时, 脉冲时域轮廓发生畸变, 并在脉冲前沿或者后沿产生不对称震荡结构。脉冲的时域轮廓如图2所示。



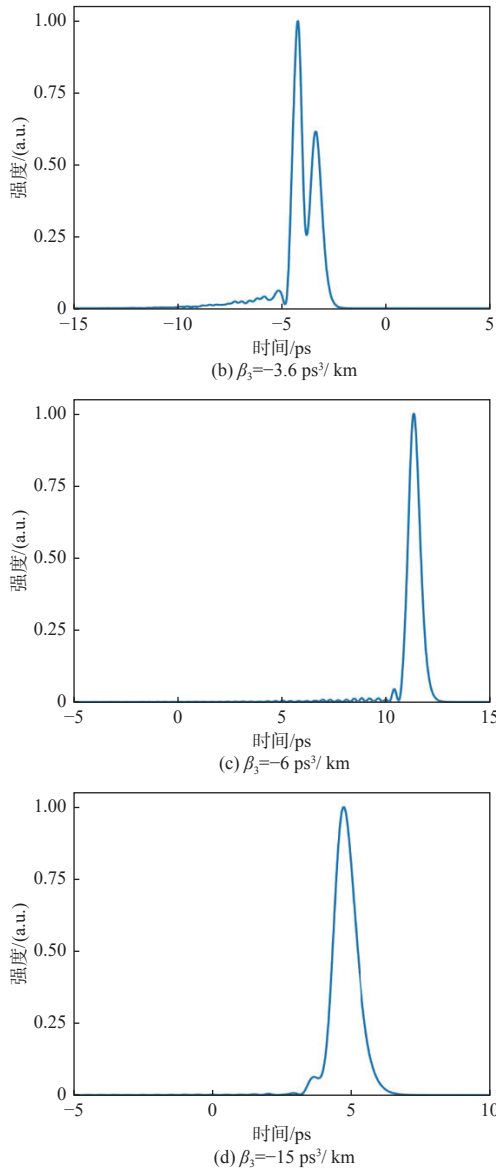


图2 不同三阶色散下,脉冲时域轮廓

Fig. 2 Pulse temporal profile under different third-order dispersion

此外,当三阶色散为正时,震荡发生在脉冲的后沿;当三阶色散为负时,震荡发生在脉冲的前沿,如图3所示。数值仿真结果表明,当三阶色散从 $-6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 变化到 $-15 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时,脉冲持续时间从 0.78 ps 到 1.1 ps 不断增加,而脉冲峰值功率从 31.1307 W 减小到 24.3268 W ,这影响了脉冲的传输质量。

继续观察在三阶色散影响下的脉冲频谱,将三阶色散从 $-1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 降低到 $-15 \text{ ps}^3/\text{km}$,间隔为 $-0.2 \text{ ps}^3/\text{km}$ 。最初脉冲顶部开始出现倾斜,如图4(a)所示。当三阶色散降低到 $-3.4 \text{ ps}^3/\text{km}$,脉冲出现凯利边带。随着三阶色散继续减小,脉冲频谱变得更加不对称,频谱形状近似三角形,如图4(b)所示。

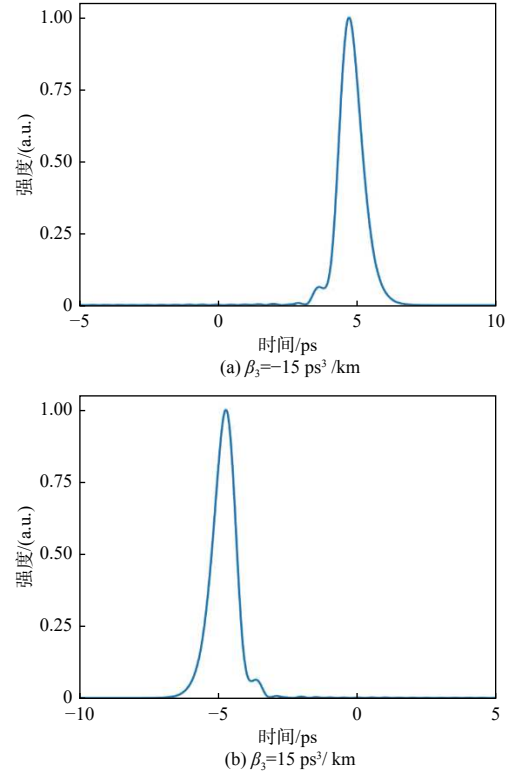


图3 三阶色散绝对值相同时,脉冲时域轮廓

Fig. 3 Pulse temporal profile with the same absolute value of third-order dispersion

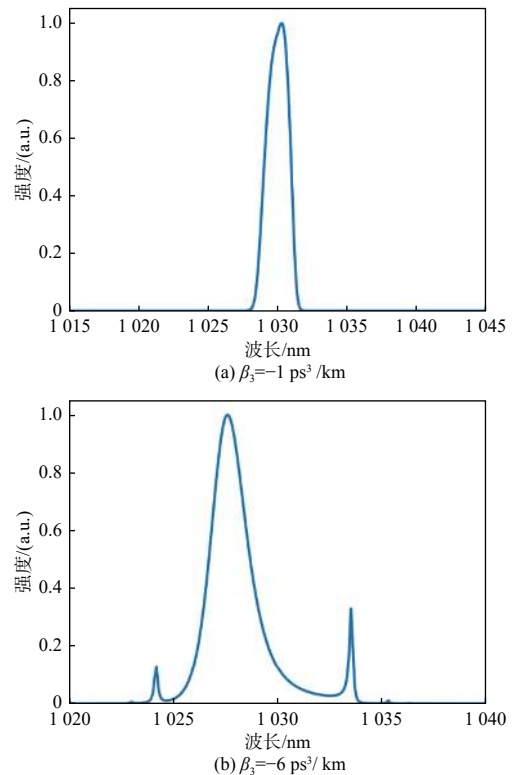


图4 不同三阶色散下,脉冲频谱

Fig. 4 Pulse frequency spectrum under different third-order dispersion

图5记录了边带的位置分布和强度。当三阶色散从 $-3.4 \text{ ps}^3/\text{km}$ 降低到 $-15 \text{ ps}^3/\text{km}$, 即从右向左读取横坐标。左边带位置和主峰位置从 1030 nm 左侧接近 1030 nm , 右边带位置从 1030 nm 右侧接近 1030 nm 。图5在三阶色散为 $-6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 这一点时, 变化很大, 推测这与该点的脉冲形状变化有关。在 $-3.4 \text{ ps}^3/\text{km} \sim -6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 内, 左边带强度持续增加, 然后在 $-6 \text{ ps}^3/\text{km} \sim -15 \text{ ps}^3/\text{km}$ 内, 左边带强度持续降低。在整个区域内, 右边带强度持续降低。左右边带强度的差异可以解释如下: 在三阶色散的影响下, 边带频率相对频率中心不对称, 再结合有限增益带宽的影响, 导致一侧的边带强度更强^[23]。此外, 当三阶绝对值相同时, 脉冲频谱关于 1030 nm 镜像对称。

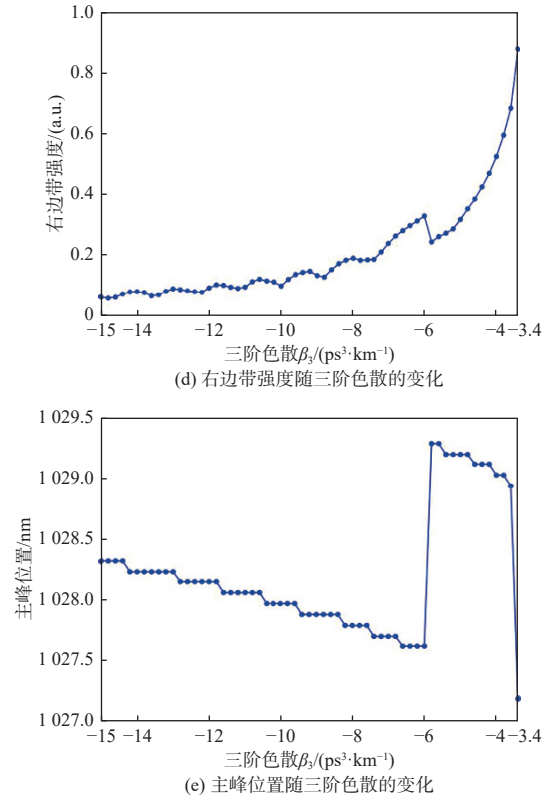
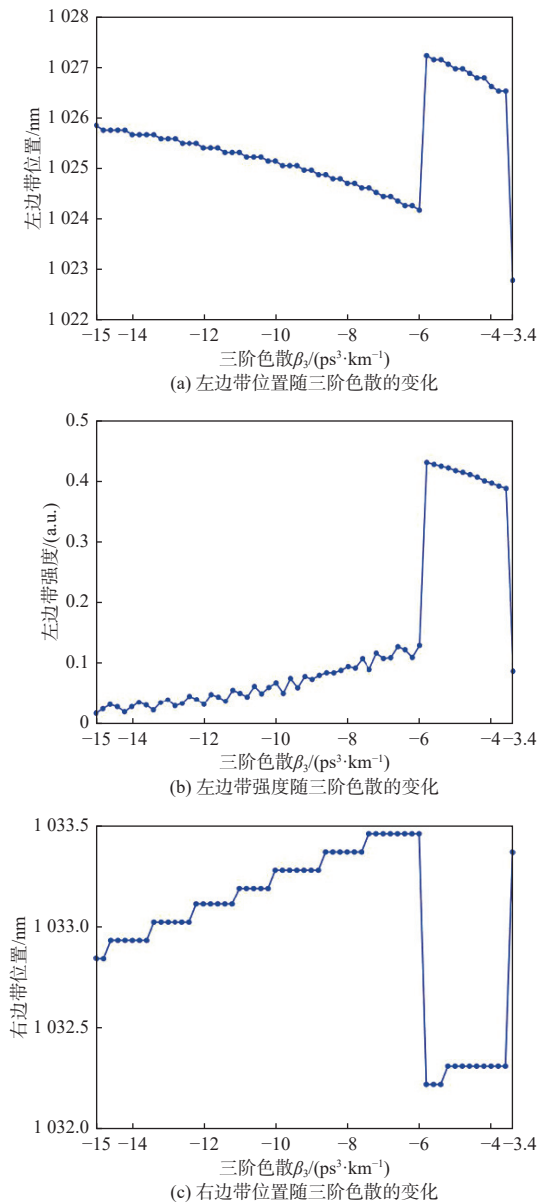


图5 脉冲边带的位置和强度随三阶色散的变化

Fig. 5 Position and intensity of pulse sidebands vary with third-order dispersion

观察三阶色散下的脉冲演化, 可以发现三阶色散的一个作用是提前或者延迟脉冲, 使得脉冲在时域发生偏移^[24]。在这里定义: 脉冲时域偏移=偏移时间/循环数, 其符号为正时, 脉冲在时域向右移动, 符号为负时, 脉冲在时域向左移动。当三阶色散从 $-1 \text{ ps}^3/\text{km}$ 变化到 $-15 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时, 观察到脉冲在时域向左偏移, 并且偏移程度越来越大, 如图6所示。在 $-3.4 \text{ ps}^3/\text{km}$ 和 $-6 \text{ ps}^3/\text{km}$ 的两点变化可能归因于脉冲形状的变化。

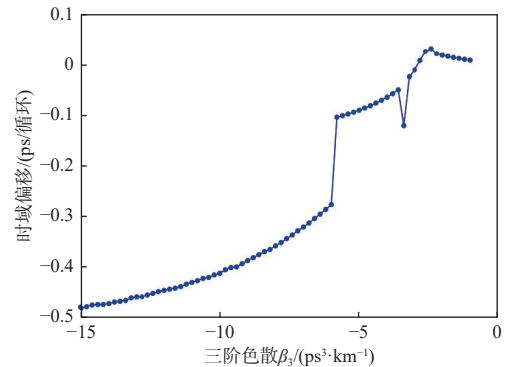


图6 三阶色散对脉冲偏移的影响

Fig. 6 Influence of third-order dispersion on pulse shift

2.2 四阶色散对孤子特性影响的数值仿真

进一步研究四阶色散对脉冲的影响, β_4 是四阶色散参数。考虑到三阶色散比四阶色散对脉冲的影响更大, 让 β_3 参数为零, 去消除三阶色散的影响, β_2 以及其他参数仍然保持最初仿真数值。线性降低 β_4 数值, 从 $-10 \text{ ps}^4/\text{km}$ 降低到 $-100 \text{ ps}^4/\text{km}$, 间隔为 $-10 \text{ ps}^4/\text{km}$ 。四阶色散参数和光脉冲传输方程参照相关文献[22,25]。

当考虑到四阶色散时, 光脉冲传输方程如下:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{g}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial U^2}{\partial T^2} + i\frac{\beta_4}{24}\frac{\partial U^4}{\partial T^4} + i\gamma|A|^2A \quad (4)$$

四阶色散可以使脉冲展宽[21]。这是因为负四阶色散使脉冲的蓝移快于红移, 与群速度色散使脉冲展宽的原理相似。当四阶色散从 $-10 \text{ ps}^4/\text{km}$ 降低到 $-100 \text{ ps}^4/\text{km}$ 时, 脉宽从 0.62 ps 展宽到 1.42 ps , 如图7所示。

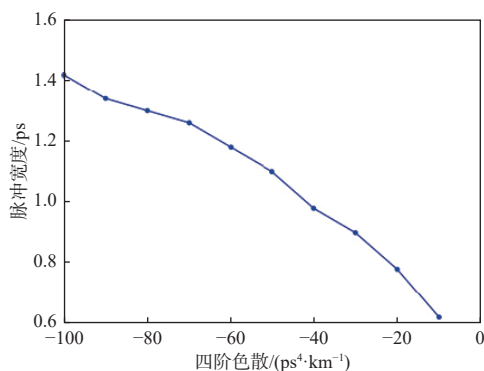
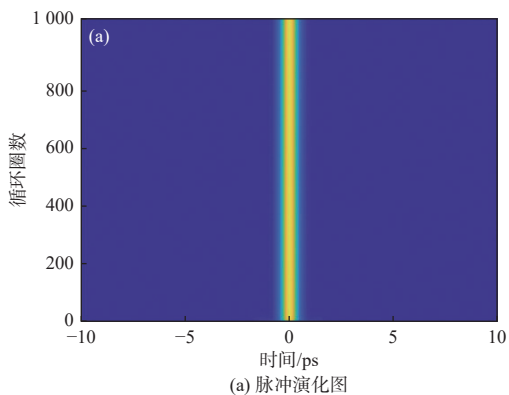


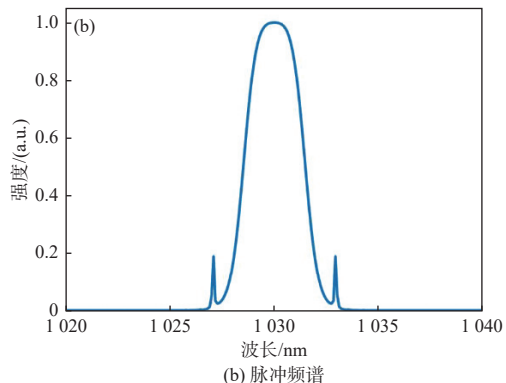
图7 脉宽时间随四阶色散的变化

Fig. 7 Variation of pulse width time with fourth-order dispersion

图8记录了四阶色散为 $-20 \text{ ps}^4/\text{km}$ 情况下, 脉冲的演化过程以及频谱。在小饱和能量 E_{sat} 为 20 pJ 的条件下, 受到四阶色散影响的脉冲频谱依旧呈对称结构, 这与三阶色散导致脉冲频谱的不对称有所不同。同时脉冲也未产生长拖尾结构, 也未发生时域偏移。



(a) 脉冲演化图



(b) 脉冲频谱

图8 当 $\beta_4 = -20 \text{ ps}^4/\text{km}$ 时的脉冲演化图与脉冲频谱

Fig. 8 Pulse evolution diagram and pulse spectrum while $\beta_4 = -20 \text{ ps}^4/\text{km}$

在四阶色散影响下, 脉冲的频谱呈现对称结构的凯利边带, 如图8(b)所示。当四阶色散从 $-10 \text{ ps}^4/\text{km}$ 变化到 $-100 \text{ ps}^4/\text{km}$ 时, 记录边带强度的变化。随着四阶色散的减小, 边带强度逐渐减小, 变化趋势如图9所示。

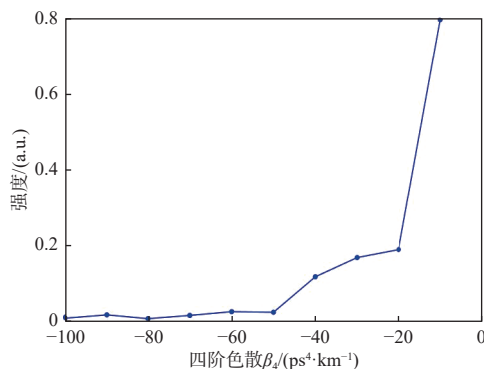


图9 边带强度随四阶色散的变化

Fig. 9 Variation of sideband intensity with fourth-order dispersion

3 结论

本文研究了被动锁模掺铒光纤激光器中高阶色散对输出脉冲的影响。首先, 探索了三阶色散对输出孤子脉冲特性的影响。通过数值仿真, 发现三阶色散在时域上改变了脉冲时域轮廓, 并可以提前或者延迟脉冲。在频域上, 三阶色散造成了频谱的不对称, 影响了脉冲频谱边带的位置和强度。最后, 探索了四阶色散对锁模脉冲特性的影响, 给出孤子脉冲的时域演化图及频谱图。仿真过程中, 脉冲未产生时域偏移和长拖尾结构, 这与三阶色散有所不同。通过仿真发现, 脉冲宽度随四阶色散的变化发生改变, 四阶色散类似于

群速度色散,也可以展宽脉冲,同时引起频谱边带的强度发生改变。四阶色散可以产生高能的四次孤子,关于四阶色散的研究对理解四次孤子有一定的指导意义。这项工作有利于更好地理解高阶色散,对光纤激光器的实际应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] SUGIOKA K, CHENG Y. Ultrafast lasers——reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.
- [2] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [3] 刘友强, 曹银花, 潘飞, 等. 激光加工用半导体激光器的光束变换[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 455-461.
LIU Youqiang, CAO Yinhua, PAN Fei, et al. Beam transformation of diode lasers used in laser processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 455-461.
- [4] 赵力杰, 周艳宗, 夏海云, 等. 飞秒激光频率梳测距综述[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1006008.
ZHAO Lijie, ZHOU Yanzong, XIA Haiyun, et al. Overview of distance measurement with femtosecond optical frequency comb[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1006008.
- [5] 谢建东, 严利平, 陈本永, 等. 可调谐激光器激光波长宽范围自动偏频锁定[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 211-219.
XIE Jiandong, YAN Liping, CHEN Benyong, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 211-219.
- [6] 高宇炜, 方守龙, 武腾飞, 等. 双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 157-175.
GAO Yuwei, FANG Shoulong, WU Tengfei, et al. Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 157-175.
- [7] KAMATA M, OBARA M, GATTASS R R, et al. Optical vibration sensor fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(5): 1442.
- [8] ZHANG C, JIANG Z S, FU S N, et al. Femtosecond laser enabled selective micro-holes drilling on the multicore-fiber facet for displacement sensor application[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10777.
- [9] XU C, WISE F W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 875-882.
- [10] OZEKI Y, ASAI T, SHOU J W, et al. Multicolor stimulated Raman scattering microscopy with fast wavelength-tunable Yb fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 25(1): 1-11.
- [11] SCHWEITZER C, BREZIN A, COCHENER B, et al. Femtosecond laser-assisted versus phacoemulsification cataract surgery (FEMCAT): a multicentre participant-masked randomised superiority and cost-effectiveness trial[J]. *The Lancet*, 2020, 395(10219): 212-224.
- [12] POPMINTCHEV T, CHEN M CH, POPMINTCHEV D, et al. Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV X-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers[J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1287-1291.
- [13] 况庆强, 桑明煌, 聂义友, 等. 被动锁模掺铒光纤激光器中的有理数谐波锁模[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2719-2723.
KUANG Qingqiang, SANG Minghuang, NIE Yiyu, et al. Rational harmonic mode-locking of passively mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2719-2723.
- [14] TANG D Y, ZHAO L M, ZHAO B, et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043816.
- [15] 赵德双, 刘永智, 黄绣江, 等. 飞秒被动锁模光纤激光器的稳定性研究[J]. *应用光学*, 2005, 26(4): 26-29.
ZHAO Deshuang, LIU Yongzhi, HUANG Xiujiang, et al. Stability of passively mode-locked femtosecond fiber laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(4): 26-29.
- [16] HAUS H A, MOORES J D, NELSON L E. Effect of third-order dispersion on passive mode locking[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 51-53.
- [17] LOGVIN Y, KALOSHA V P, ANIS H. Third-order dispersion impact on mode-locking regimes of Yb-doped fiber laser with photonic bandgap fiber for dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 985.
- [18] DENNIS M L, DULING I N. Third-order dispersion in femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(21): 1750-1752.
- [19] LOGVIN Y, ANIS H. Suppression of multi-period in-

- stabilities by third-order dispersion in mode-locked Yb-doped fiber lasers[J]. [Journal of the Optical Society of America B](#), 2008, 25(4): 622-632.
- [20] SAKAGUCHI H, SKRYABIN D V, MALOMED B A. Stationary and oscillatory bound states of dissipative solitons created by third-order dispersion[J]. [Optics Letters](#), 2018, 43(11): 2688-2691.
- [21] BLANCO-REDONDO A, DE STERKE C M, SIPE J E, et al. Pure-quartic solitons[J]. [Nature Communications](#), 2016, 7: 10427.
- [22] RUNGE A F J, HUDSON D D, TAM K K K, et al. The pure-quartic soliton laser[J]. [Nature Photonics](#), 2020, 14(8): 492-497.
- [23] OLIVIER M, ROY V, PICHÉ M. Third-order dispersion and bound states of pulses in a fiber laser[J]. [Optics Letters](#), 2006, 31(5): 580-582.
- [24] PICHÉ M, CORMIER J F, ZHU X N. Bright optical soliton in the presence of fourth-order dispersion[J]. [Optics Letters](#), 1996, 21(12): 845-847.
- [25] ZHANG Z X, LUO M, CHEN J X, et al. Pulsating dynamics in a pure-quartic soliton fiber laser[J]. [Optics Letters](#), 2022, 47(7): 1750-1753.