

色散管理光纤锁模激光器在近零色散域的非线性优化

郭 婕¹, 闫东钰², 毕根毓¹, 丰傲然¹, 刘博文¹, 储玉喜¹, 宋有建¹, 胡明列¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 天津 300072;
2. 天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津 300222)

摘要: 目前, 飞秒激光脉冲因脉冲宽度窄和峰值功率高的特点被广泛运用在多种领域中。其中, 色散管理光纤锁模激光器因其特有的腔内呼吸机制使输出的激光脉冲能量更高, 光谱更宽、脉宽更窄。使用啾啾布拉格光纤光栅进行色散管理的光纤锁模激光器能够实现真正的全光纤结构, 提升激光器的紧凑性和稳定性, 因此基于啾啾布拉格光纤光栅进行色散管理的光纤锁模激光器具有更加实际的应用意义。采用数值模拟的方法, 研究了基于啾啾布拉格光纤光栅进行色散管理的掺镱光纤锁模激光器中单模光纤在腔内的不同分布对脉冲动力学过程和输出脉冲参数的影响。系统分析了谐振腔内净色散值不同时, 腔内单模光纤的分布对脉冲在腔内的动力学过程的影响。模拟结果表明, 在腔内净色散值为负时, 啾啾布拉格光纤光栅与增益光纤间的单模光纤越短, 光纤激光器维持稳定单脉冲运行的最大泵浦强度更高且输出光谱更宽, 从而能够获得脉宽更窄的去啾啾脉冲; 腔内净色散值越接近零时, 啾啾布拉格光纤光栅与增益光纤间的单模光纤长度对输出脉冲参数作用的影响越显著; 腔内净色散值为正时, 单模光纤在腔内的分布对输出脉冲影响逐渐减弱, 优化单模光纤分布提升锁模激光器性能并不明显。最后, 提出了一种通过改变单模光纤在腔内的分布来提高激光器输出性能的优化方法。

关键词: 光纤激光器; 锁模激光器; 超快激光; 啾啾布拉格光栅

中图分类号: TN241 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220226

Nonlinearity optimization of dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers with near-zero net cavity dispersion

Guo Jie¹, Yan Dongyu², Bi Genyu¹, Feng Aoran¹, Liu Bowen¹, Chu Yuxi¹, Song Youjian¹, Hu Minglie¹

(1. Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Femtosecond laser pulses are widely used in many fields due to their narrow pulse width and high peak power. The dispersion-managed fiber mode-locked laser has higher pulse energy, wider spectrum and narrower pulse due to its unique in-cavity breathing mechanism. The fiber mode-locked laser using chirped Bragg grating for dispersion management can realize the real all-fiber structure and improve the compactness and stability of the laser. Therefore, the fiber mode-locked laser using chirped Bragg grating for dispersion management has more practical significance. The effects of different distribution of single-mode fiber in ytterbium-doped fiber mode-locked laser based on chirped fiber Bragg grating on pulse dynamics and output

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (U1730115, 61805174, 618278221); 天津市自然科学基金 (20 JQNJJC01180); 天津市应用基金和先进技术研究计划 (17JJCJQC43500); 广东省重点领域研发计划 (2020B090922004)

作者简介: 郭婕, 女, 硕士生, 主要从事光纤飞秒激光放大器方面的研究。

导师简介: 刘博文, 男, 副教授, 博士, 主要从事飞秒激光技术及非线性光纤光学方面的研究。

pulse parameters are studied by numerical simulation. The influence of the distribution of single-mode fiber on the dynamic process of pulse in the cavity is analyzed when the net dispersion is different. The simulation results show that when the net cavity dispersion is negative, the shorter the single-mode fiber between the chirped fiber Bragg grating and the gain fiber, the higher the pumping threshold and the wider the output spectrum of the fiber laser can maintain the stable monopulsing operation, so that the narrow pulse width can be obtained. When the net cavity dispersion is close to zero, the effect of the length of single mode fiber between the chirped fiber Bragg grating and the gain fiber on the output pulse parameters is more significant. When the net cavity dispersion is positive, the influence of the single mode fiber distribution in the cavity on the output pulse gradually weakens, and the performance of the mode-locked laser is not significantly improved by optimizing the single-mode fiber distribution. Finally, an optimization method is proposed to improve the output performance of the laser by changing the distribution of single mode fiber in the cavity.

Key words: fiber laser; mode-locked laser; ultrafast laser; chirped fiber Bragg gratings

0 引言

近年来,超短脉冲激光被广泛应用于材料加工、光学频率测量、光学频率梳、显微技术等领域^[1-4]。光纤锁模激光器作为一种超短脉冲激光光源,具有结构紧凑、散热性能好、能保持长期稳定运行等优点^[5-6]。根据脉冲在激光器腔内的不同演化机制,脉冲可以分为孤子、色散管理孤子、自相似子和耗散孤子^[7-10]。而色散管理光纤锁模激光器由于脉冲在腔内的“呼吸”机制降低了脉冲的峰值功率和累积的非线性相移,从而允许输出更短脉冲宽度和更高脉冲能量的激光脉冲^[11-12]。对于这种激光器,色散补偿器件是必不可少的,特别是对于掺 Yb³⁺ 光纤激光器。啁啾光纤布拉格光栅 (Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG) 作为一种色散管理元件,无论在谐振腔内或是腔外都被广泛运用。与光栅对、棱镜对等空间色散元件相比较,CFBG 能够光纤激光器实现稳定紧凑的全光纤结构^[13]。但由于 CFBG 的反射带宽远小于掺 Yb³⁺ 光纤的增益带宽,CFBG 在腔内会产生较强的光谱滤波效应,从而影响脉冲在腔内的演化过程,并在腔内色散值近零时带来锁模不稳定现象^[14,15],而这个问题可以通过使用调制深度更高的可饱和吸收体 (Saturable absorption, SA) 来解决^[16]。

为了使输出脉冲各项参数更好,有必要研究色散管理激光器在接近零色散区域的净色散值和非线性对脉冲演化动力学过程的影响。以往的研究一直关注腔内净色散对输出脉冲特性的影响,腔内净色散值不同时输出脉冲的参数和脉冲在腔内的演化过程存

在着显著差异^[17-18]。增加泵浦强度可以积累更多的非线性相位从而使得输出脉冲光谱宽度更宽,但非线性、色散和耗散过程的相互作用会导致激光器出现不稳定态和多脉冲运行^[19]。由于光纤具有较强的非线性和色散特性,脉冲在光纤内传输时时域和频域特性都会发生较大的变化,因此,光纤激光器腔内结构对脉冲演化过程有着很大的影响。池涵、欧阳春梅等人研究了正色散非线性偏振旋转光纤锁模激光器中的非线性优化,当腔内净色散一定时,光纤锁模激光器中单模光纤的不同分布也会影响输出脉冲的特性^[20]。与上述研究不同的是,CFBG 作为色散管理元件的光纤锁模激光器具有较强的滤波效应。对于基于 CFBG 进行色散管理的光纤锁模激光器在近零色散区域时单模光纤在腔内分布对输出脉冲参数的影响尚未被人研究。

文中建立了以 CFBG 为色散补偿元件的掺 Yb³⁺ 光纤色散管理锁模激光器的数值模型,数值研究了 CFBG 色散管理光纤激光器中的不同净色散值下,单模光纤在腔内分布对输出脉冲特性的影响。提出了一种通过改变色散管理光纤锁模激光器中单模光纤的分布来优化腔内非线性的方法,以提高维持稳定的单脉冲运转的最大泵浦强度,并获得更宽的输出光谱,从而支持输出脉宽更窄的去啁啾脉冲。

1 色散管理光纤锁模激光器数值模型

以 CFBG 为色散补偿元件的掺 Yb³⁺ 光纤色散管理锁模激光器的数值模型结构如图 1 所示。它由两段单模光纤 (SMF1 和 SMF2)、一段增益光纤 (YDF)、

可饱和吸收体 (SA) 和一段 CFBG 组成。增益光纤是一段增益带宽为 40 nm、中心波长为 1030 nm 的掺 Yb³⁺ 光纤。SMF1、SMF2 和 YDF 的二阶色散系数 ($\beta^{(2)}$) 为 0.023 ps²/m。位于 SMF2 后的可饱和吸收体作为腔内的锁模元件, 调制深度为 34%, 非饱和损耗为 22%, 恢复时间为 700 fs, 饱和通量为 70 μ J/cm²。采用 CFBG 作为腔内色散管理元件, 在模拟中, 使用一个光耦合器表示 CFBG 的输出, 一个滤波器模拟 CFBG 的光谱滤波效应, 和一段用于模拟 CFBG 色散管理的色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF)。光耦合器的耦合比为 89%; 色散补偿光纤在中心波长为 1030 nm 提供 -1 ps²/m 的群速度色散其长度为 0.1 m; 滤波器带宽为 17.5 nm, 其中心波长为 1030 nm。



图 1 CFBG 色散管理激光器模拟示意图, 字母 A-E 依次代表 SMF1、YDF、SMF2、SESAM、SMF2、YDF、SMF1、CFBG

Fig.1 Schematic illustration of the dispersion-managed fiber laser cavity, the letters A-E represents SMF1, YDF, SMF2, SESAM, SMF2, YDF, SMF1, and CFBG in turn. OC: output coupler, DCF: dispersion compensating fiber

通过非线性薛定谔方程模拟了脉冲在色散管理光纤锁模激光器中的演化过程^[21]:

$$\frac{\partial A(z, \tau)}{\partial z} + \frac{i}{2} \left(\beta^{(2)} + ig \frac{1}{\Omega_g} \right) \frac{\partial^2 A(z, \tau)}{\partial \tau^2} = \frac{g}{2} A(z, \tau) + \frac{\beta^{(3)}}{6} \frac{\partial^3 A(z, \tau)}{\partial \tau^3} + i\gamma |A(z, \tau)|^2 A(z, \tau) \quad (1)$$

式中: $A(z, \tau)$ 为脉冲包络的振幅; z 为传播坐标; τ 为时间延迟参数; $\beta^{(2)}$ 和 $\beta^{(3)}$ 分别为光纤的二阶和三阶色散系数; γ 为非线性系数; Ω_g 为 YDF 的增益带宽; YDF 的增益系数 g 为:

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{E}{E_{sat}}} \quad (2)$$

式中: g_0 为小信号增益; E 为腔内能量; E_{sat} 为增益饱和能量。可饱和吸收体模型由以下方程建立:

$$T = 1 - \Delta T / (1 + P_{ave} / P_{sat}) - \alpha_{ns} \quad (3)$$

式中: $\Delta T = A_0 - \alpha_{ns}$ 为 SA 的调制深度; P_{ave} 为脉冲的平均功率; P_{sat} 为饱和功率; α_{ns} 为 SA 的非饱和损耗。

使用分步傅里叶算法对非线性薛定谔方程求解。如果两个相邻循环输出脉冲能量差值的绝对值小于 10^{-9} , 则认为所得到的解是收敛的。如果在 3000 圈内不能得到收敛解, 认为激光器是不稳定的。

2 结果与分析

在数值模拟中, 将 YDF 长度固定, 通过改变单模光纤的总长度改变腔内净色散值, 改变 YDF 的增益饱和能量来模拟腔内泵浦强度的变化。模拟了光纤锁模激光器工作在色散管理区域的不同净色散下时, 单模光纤在腔内的不同分布对腔内能维持稳定单脉冲运行的最大泵浦强度、腔内能累积的最大非线性相移量和输出脉冲最大光谱宽度 (光谱半高全宽) 的影响, 模拟中使用 B 积分参量来衡量积累的非线性相移, B 积分通过 $B = \int \gamma P(z) dz$ 计算获得, 其中 $P(z)$ 为脉冲在位置 z 时的峰值功率。计算表明腔内净色散值近零时 (-5.34×10^{-3} ps² ~ 3.86×10^{-3} ps²), 单模光纤在腔内的不同分布对输出脉冲性质影响更为明显, 此时对应的单模光纤总长范围为 1.8~2.0 m。在这个范围内, 模拟了单模光纤总长分别为 1.8 m、1.9 m 和 2 m 的三种情况。

单模光纤总长度为 1.8 m 时, 腔内净色散值为 -5.34×10^{-3} ps²。固定单模光纤总长度不变, 改变 SMF1 和 SMF2 的长度占比实现单模光纤在腔内的不同分布, 计算了 SMF 的不同分布对输出脉冲最大谱宽的影响。如图 2(a) 所示, 当 SMF1 长度小于 0.6 m 时, 随着 SMF1 长度的减小, 能输出的脉冲最大光谱宽度减小, 是因为腔内维持单脉冲运转的最大泵浦强度减小, B 积分也随之减小。SMF1 长度大于 0.6 m 时, 腔内维持单脉冲运转的最大泵浦强度趋于稳定, 因此 B 积分和能输出的最大光谱宽度也都趋于稳定。在 SMF1 长度为 0.1 m 时, 输出啁啾脉冲脉宽最窄, 如图 2 (a) 插图所示, 此时脉冲宽度为 110 fs。选取了 SMF1 长度分别为 0.1 m 和 1.7 m 且设置相同的泵浦强度, 模拟输出脉冲光谱形状随循环圈数的变化过程。由于部分情况下得到收敛解需要的循环圈数较多, 在循环圈数较小时就已经能明显地观察到变化规律, 因此在结果中只取前三百圈来观察脉冲时域和频

域形状的变化趋势。SMF1 长度为 0.1 m 时,如图 2(d) 所示,脉冲光谱形状的变化随循环圈数增加逐渐减小,认为得到的解趋于收敛。SMF1 长度为 1.7 m 时,如图 2(e)~(f) 所示,脉冲和光谱形状随循环圈数增加出现不稳定态,认为此时腔内能维持稳定单脉冲运转的泵浦强度更低。为了研究单模光纤的分布对脉冲演化过程的影响,模拟了 SMF1 分别为 0.1 m 和 1.7 m 时,脉冲宽度和光谱宽度沿着腔方向的变化,结果如图 2(b)~(c) 所示。在这两种情况下,脉冲光谱宽度在 SMF1、YDF 和部分 SMF2 中逐渐下降。在 SMF2 中,由于经过 CFBG 反射的脉冲呈负啁啾,脉冲光谱宽度减小到最小值。在后续光纤的传输中,脉冲逐渐变成正啁啾,由于自相位调制效应,光谱宽度也同时增加。脉冲传输至 CFBG 中时,由于其强烈的耗散效应,脉冲宽度达到最窄,随后因其光谱滤波效应,从 CFBG 输出的脉冲光谱变窄。

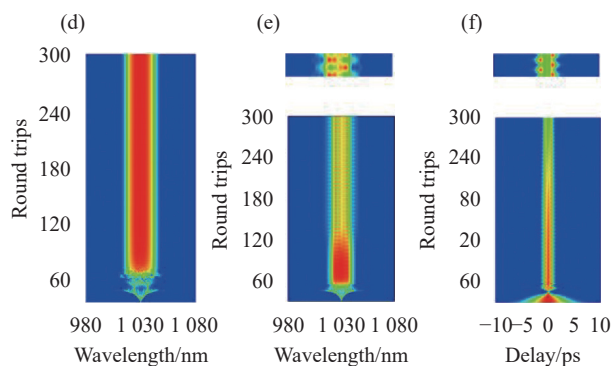
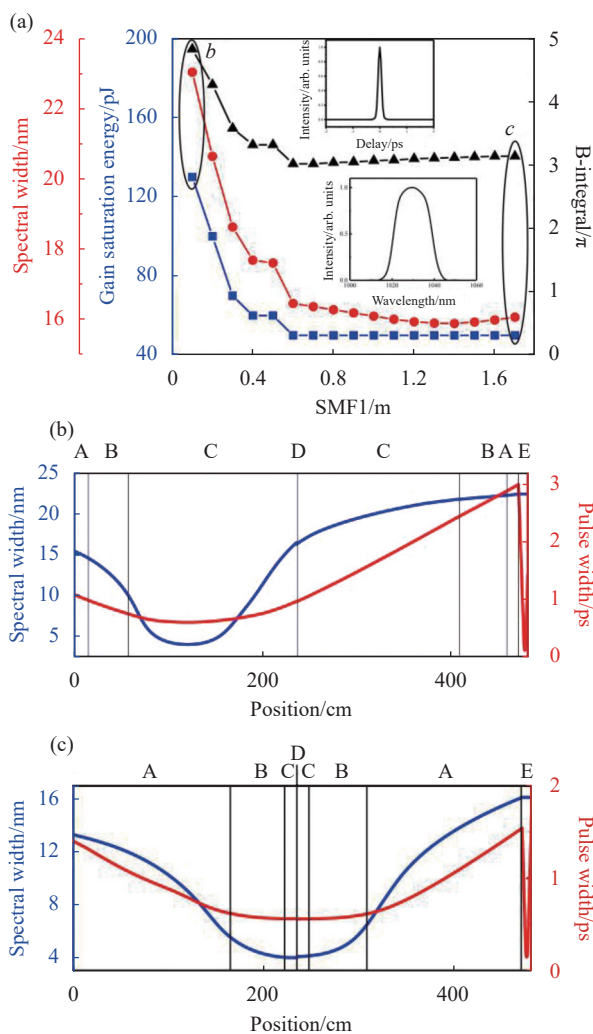


图 2 (a) 最大输出光谱宽度、最大泵浦强度和 B 积分随 SMF1 长度的变化;插图:上:当 SMF1 长度为 0.1 m 时,去啁啾脉冲的自相关迹;下:当 SMF 长度为 0.1 m 时,稳定锁模输出的光谱;(b)~(c) 脉冲和光谱宽度在腔内的演化过程;(d) 脉冲光谱随循环圈数演化图;(e)~(f) 脉冲时域和频域分别随循环圈数演化图

Fig.2 (a) The output maximum spectral width, the maximum pump strength, and B-integral versus the length of SMF1. Inset: The auto correlation trace of dechirped pulse when the SMF1 length is 0.1 m; (b)~(c) The evolution of the spectral width and the pulse duration in the cavity; (d) Evolution of pulse spectrum with the number of round trips; (e)~(f) the spectral width and the pulse duration evolve with the number of round trips



单模光纤总长为 1.9 m 时,腔内净色散值为 $-7.4 \times 10^{-4} \text{ ps}^2$ 。如图 3(a) 所示,SMF1 长度在小于 1.1 m 时,单模光纤的不同分布对腔内能维持单脉冲运转的最大泵浦强度影响较小,因此能输出的脉冲最大光谱宽度和 B 积分也基本不变。但 SMF1 长度超过 1.1 m 之后,腔内维持单脉冲运行的最大泵浦强度迅速下降,输出脉冲的最大光谱宽度也随之下降。在 SMF1 长度分别为 1 m 和 1.1 m 时设置相同的泵浦强度,如图 3(d) 所示,SMF1 长度为 1 m 时,光谱形状随循环圈数的增加逐渐趋于稳定,得到了收敛解。SMF1 长度为 1.1 m 时,如图 3(e)~(f) 所示,CFBG 引入的光谱滤波效应导致脉冲出现分裂现象^[22]。同时模拟了两种情况下脉冲在腔内的演化过程。与单模光纤总长度为 1.8 m 时类似,脉冲宽度在 CFBG 处达到最小值,因为脉冲啁啾正负的变化,脉冲光谱在腔内均经历了先压缩后展宽的过程,单模光纤的不同分布没有改变脉冲在腔内的演化过程。

上述模拟结果表明光纤锁模激光器净色散值接近 0 时,SMF1 长度对输出脉冲的最大光谱宽度有着较大影响。对比了各种情况下脉冲光谱在腔内的演

化过程,均为先压缩后展宽,脉冲的演化过程不会随着单模光纤在腔内的分布不同而被改变。SMF 的分布决定了维持腔内单脉冲稳定运行的泵浦强度上限,输出脉冲的最大谱宽仅由最大泵浦强度确定。

单模光纤总长为 2 m 时,腔内净色散值为 $4 \times 10^{-3} \text{ ps}^2$ 。如图 4(a) 所示,SMF1 长度小于 0.3 m 时,SMF1 的长度对腔内维持稳定单脉冲运转的最大泵浦强度影响较小,因此能输出的脉冲最大光谱宽度基本不变。但随着 SMF1 长度继续增加会出现一个跃变点,维持稳定单脉冲运转的最大泵浦强度急剧上升,输出脉冲光谱宽度也增大。这个点之后腔内能输出的光谱宽度的最大值也几乎不受 SMF1 长度变化的影响。模拟了跃变点前后的两种情况下,脉冲在腔内的演化过程。SMF1 长度为 0.3 m 时,如图 4(b) 所示,与前述情况相似,因为脉冲啁啾正负的变化,脉冲光谱沿着传输方向先压缩后展宽,脉冲宽度在 CFBG 内达到最小值。SMF1 长度为 0.2 m 时,脉冲沿着传输方向啁啾为正,因此光谱在腔内被直接展宽。在这一净色散值下,单模光纤的不同分布会对腔内脉冲的演化过程造成影响。在 SMF1 长度为 0.3 m 时,经 CFBG 反射后的脉冲在时域和频域上均经历了一个呼吸过程;但 SMF1 长度为 0.2 m 时,经 CFBG 反射后的脉冲在时域和频域上均直接单调增加,两种情况下脉冲演化过程不相同,因此输出脉冲光谱宽度也不相同。

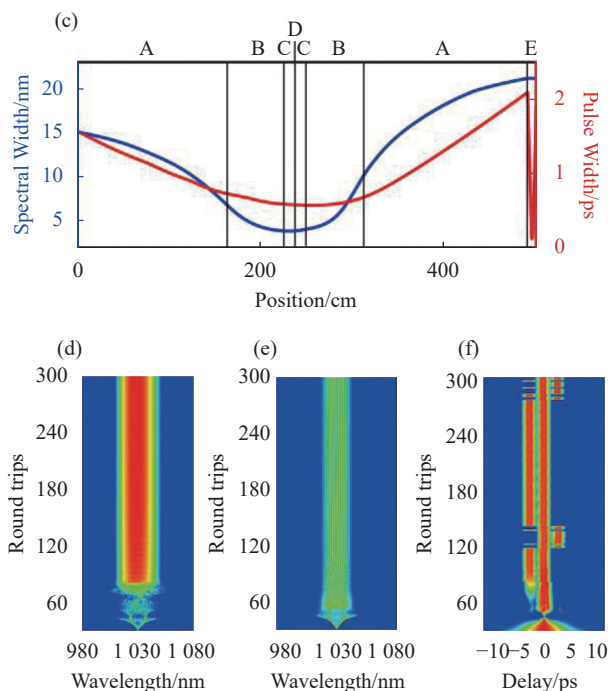
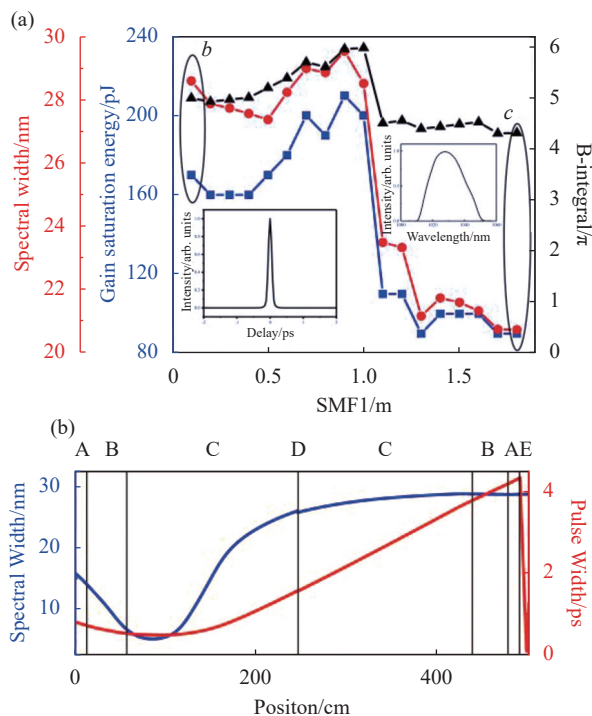


图 3 (a) 最大输出光谱宽度、最大泵浦强度和 B 积分随 SMF1 长度的变化;插图:左:当 SMF1 长度为 0.1 m 时,去啁啾脉冲的自相关迹;右:当 SMF 长度为 0.1 m 时,稳定锁模输出的光谱;(b)~(c) 脉冲和光谱宽度在腔内的演化过程;(d) 脉冲光谱随循环圈数演化图;(e)~(f) 脉冲时域和频域分别随循环圈数演化图

Fig.3 (a) The output maximum spectral width, the maximum pump strength, and B-integral versus the length of SMF1. Inset: The auto correlation trace of dechirped pulse when the SMF1 length is 0.1 m; (b)~(c) The evolution of the spectral width and the pulse duration in the cavity; (d) Evolution of pulse spectrum with the number of round trips; (e)~(f) the spectral width and the pulse duration evolve with the number of round trips

腔内单模光纤总长进一步增加时,腔内净色散值逐渐偏正。当单模光纤总长为 2.1 m 时,腔内净色散为 $6 \times 10^{-3} \text{ ps}^2$ 。如图 5(a) 所示,随着 SMF1 长度的改变,腔内维持单脉冲运转的最大泵浦强度变化较小,这也导致 B 积分稳定在 1.1π 左右,因此脉冲最大输出光谱宽度也基本不变。之后进一步模拟了 SMF1 长度分别为 0.1 m 和 2.0 m 时脉冲在腔内的演化过程,如图 5(b)~(c) 所示,脉冲传输方向啁啾为正,光谱在腔内被直接展宽。

最后模拟了在相同泵浦强度下,色散管理光纤锁模激光器在不同净色散时的最大谱宽。如图 6 所示,SMF 长度为 2.0 m 时,输出光谱宽度达到最大值。当

SMF 的总长度小于 2.0 m 时, 脉冲光谱在腔内先压缩后展宽。当 SMF 的总长度大于 2.0 m 时, 脉冲啁啾为

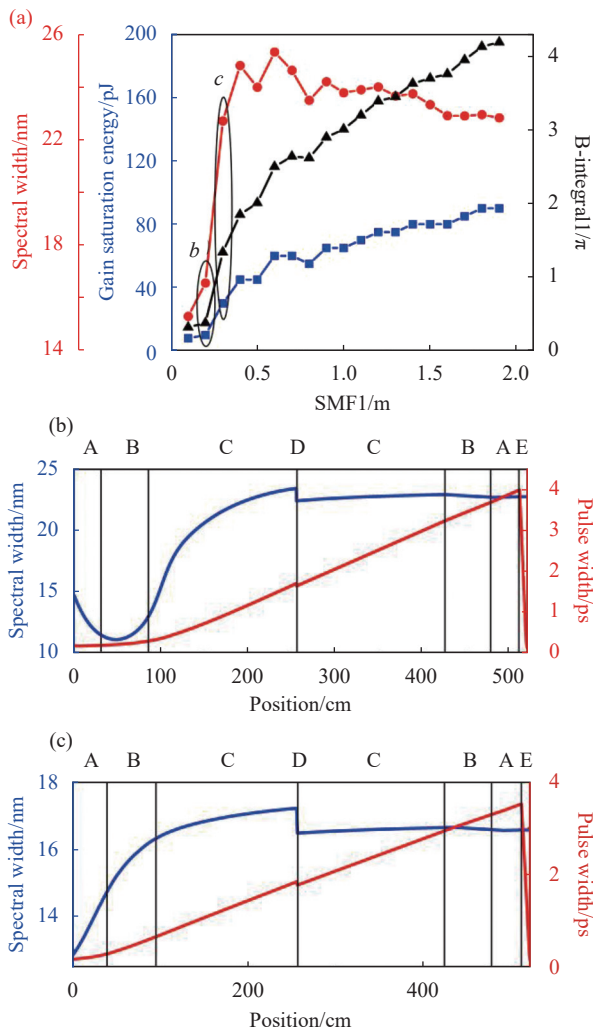


图 4 (a) 最大输出光谱宽度、最大泵浦强度和 B 积分随 SMF1 长度的变化; (b)-(c) 脉冲和光谱宽度在腔内的演化过程

Fig.4 (a) The output maximum spectral width, the maximum pump strength and B-integral versus the length of SMF1; (b)-(c) The evolution of the spectral width and the pulse duration in the cavity

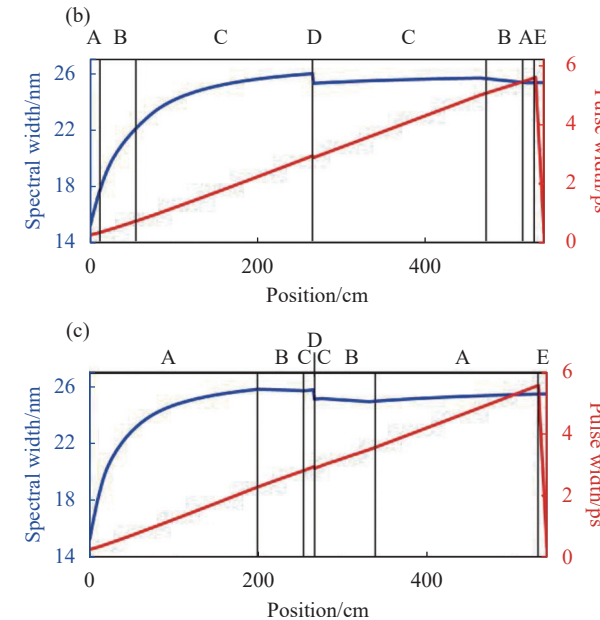
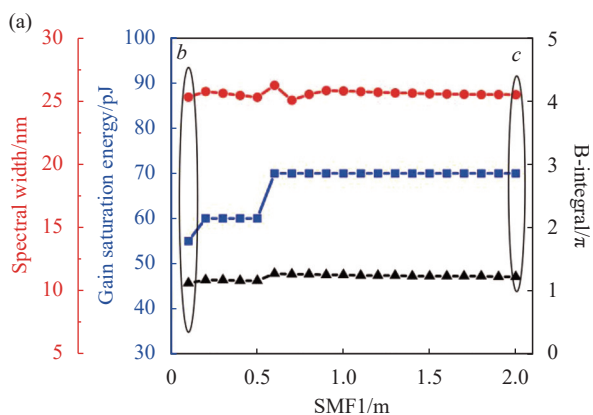


图 5 (a) 最大输出光谱宽度、最大泵浦强度和 B 积分随 SMF1 长度的变化; (b)-(c) 脉冲和光谱宽度在腔内的演化过程

Fig.5 (a) the maximum spectral width, the maximum pump strength and B-integral versus the length of SMF1; (b)-(c) the evolution of the spectral width and the pulse duration in the cavity

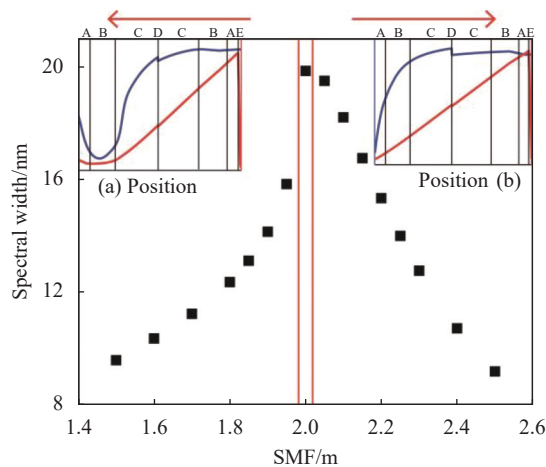


图 6 在相同泵浦强度下, 腔内净色散值不同时输出脉冲光谱宽度最大值。(a)-(b) 为腔内光谱宽度和脉冲持续时间的两种不同演化情况

Fig.6 The maximum spectral width in the cavity under the same pump strength with different NCDs. Inset (a)-(b) two different evolutions of the spectral width and the pulse duration in the cavity

正, 光谱沿着传输方向直接展宽。认为单模光纤总长为 2.0 m 时是脉冲不同演化过程的分界点, 此时腔内单模光纤的不同分布会改变脉冲的演化过程, 可以通

过优化单模光纤的分布获得最宽的输出光谱宽度,进而支撑更窄的去啾啾脉冲宽度。

3 结 论

建立了 CFBG 色散管理光纤锁模激光器的数值模拟模型,探究了近零色散下腔内单模光纤的不同分布对输出脉冲最大谱宽的影响,提出了一种通过改变 CFBG 色散管理光纤锁模激光器中单模光纤的分布来优化腔内非线性的方法,从而获得光谱宽度更宽的脉冲。模拟结果表明,在腔内净色散值为负时,CFBG 与增益光纤间的单模光纤越短,腔内维持稳定单脉冲运转的最大泵浦强度越高, B 积分越大,因此输出脉冲光谱越宽。腔内净色散值越接近零时, SMF1 长度对输出脉冲参数作用的影响越显著;腔内净色散值为正时, SMF 在腔内的分布对输出脉冲影响逐渐减弱,优化单模光纤分布对提升锁模激光器性能效果并不明显。利用此方法,可以在腔内净色散值不相同同时优化腔内结构来获得输出光谱更宽的脉冲,从而使去啾啾后的脉冲宽度更窄,对全光纤结构的锁模激光器输出参数的优化具有很好的指导意义。

参考文献:

- [1] Fermann M, Hartl I. Ultrafast fiber laser technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 191-206.
- [2] Martinez A, Yamashita S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6155-6163.
- [3] Peng J, Liu T, Shu R. Optical frequency counter based on two mode-locked fiber laser combs [J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(4): 513-518.
- [4] Clowes J. Next generation light sources for biomedical applications [J]. *Optik & Photonik*, 2015, 3(1): 36-38.
- [5] Kieu K, Wise F. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11453-8.
- [6] Wu T, Kieu K, Peyghambarian N, et al. Low noise erbium fiber fs frequency comb based on a tapered-fiber carbon nanotube design [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5313-8.
- [7] Zeng C, Liu X, Yun L. Bidirectional fiber soliton laser mode-locked by single-wall carbon nanotubes [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18937-18942.
- [8] Turitsyn S, Bale B, Fedoruk M. Dispersion-managed solitons in fibre systems and lasers [J]. *Physics Reports*, 2012, 521(4): 135-203.
- [9] Baumgartl M, Ortaç B, Lecaplain C, et al. 130 nJ 77 fs Dissipative soliton fiber laser[C]//Lasers & Electro-optics. IEEE, 2010.
- [10] Dudley J, Finot C, Richardson D, et al. Self-similarity in ultrafast nonlinear optics [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(9): 597-603.
- [11] Tamura K, Ippen E, Haus H, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080.
- [12] Ma D, Cai Y, Zhou C, et al. 37.4 fs pulse generation in an Er: fiber laser at a 225 MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2858-2860.
- [13] Lim H, Ilday FÖ, Wise F. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 660-2.
- [14] Ortaç B, Plötner M, Schreiber T, et al. Experimental and numerical study of pulse dynamics in positive net-cavity dispersion modelocked Yb-doped fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15595-15602.
- [15] Yan D, Liu B, Guo J, et al. Route to stable dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers with near-zero net cavity dispersion [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29766.
- [16] Liu H, Chow K. Enhanced stability of dispersion-managed mode-locked fiber lasers with near-zero net cavity dispersion by high-contrast saturable absorbers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 150-153.
- [17] Jeon J, Lee J, Ju H. Numerical study on the minimum modulation depth of a saturable absorber for stable fiber laser mode locking [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 32(1): 31-37.
- [18] Chong A, Renninger W, Wise F. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2008, 14(21): 10095.
- [19] Alsaleh M, Uthayakumar T, Felenou E, et al. Pulse breaking through spectral filtering in dispersion-managed fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(2): 276.
- [20] Han C, Liu B, Song Y, et al. Nonlinearity optimization of dissipative-soliton fiber laser for generation of pulses with 350 kW peak power [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: 27.
- [21] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics(Fifth Edition)[M]. Netherlands: Elsevier, 2013.
- [22] Wen Z, Lu B, Qi X, et al. Effects of spectral filtering on pulse dynamics in a mode-locked fiber laser with a bandwidth tunable filter [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(4): 952-958.