

文章编号: 1001-3806(2021)05-0566-05

基于啾啾补偿技术的自相似脉冲压缩光纤设计

李沐霖¹, 张巧芬^{2*}, 史圣达¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广东工业大学 精密微电子制造技术重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了获得高功率优质的超短脉冲光源, 利用色散渐增光纤产生的强线性啾啾对自相似脉冲进行了啾啾补偿光纤设计。首先利用色散补偿光纤得到了半峰全宽为 52.6 fs、峰值功率为 684.5 W 的超短脉冲输出。在此基础上研究了色散渐增的补偿光纤设计, 讨论了色散线性渐增光纤和色散指数渐增光纤对自相似脉冲的压缩影响。当色散渐增系数取 1km^{-1} , 5km^{-1} , 10km^{-1} 时, 通过数值仿真得出了最短的输出脉宽、峰值功率以及所需的补偿光纤长度。结果表明, 色散渐增光纤能缩短补偿光纤的长度, 减小脉冲压缩时产生的损耗, 得到半峰全宽为 61.8 fs 和 64.4 fs 的高功率超短脉冲输出。这一结果对自相似脉冲压缩光纤的设计是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 色散渐增光纤; 啾啾补偿; 自相似脉冲

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.05.005

Design of self-similar pulse compression fiber based on chirp compensation technology

LI Mulin¹, ZHANG Qiaofen², SHI Shengda¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Precision Microelectronic Manufacturing Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to obtain high power and high quality ultrashort pulse light source, the chirp compensation fiber design of self-similar pulse was studied for the first time using strong linear chirp generated by the dispersion decreasing fiber (DDF). Firstly, the ultra-short pulse output with half height full width of 52.6 fs and peak power of 684.5 W was obtained by using dispersion compensation fiber. On this basis, the design of dispersion increasing compensation fiber was studied, and the effects of dispersion-linear-increased fiber and dispersion-exponential-increased fiber on the compression of self-similar pulses were emphatically discussed. When the dispersion increasing coefficient was respectively set to 1km^{-1} , 5km^{-1} , 10km^{-1} , the shortest output pulse width, peak power and the required compensated fiber length were obtained by numerical simulation. The results show that the dispersion increasing fiber can shorten the length of the compensated fiber greatly, which is beneficial to reduce the loss caused by pulse compression, and finally obtain high power ultrashort pulse output with half height full width of 61.8 fs and 64.4 fs. This result is helpful to the design of self-similar pulse compression fiber.

Key words: fiber optics; dispersion increasing fiber; chirp compensation; self-similar pulse

引言

获得高功率优质的超短脉冲光源一直是国内外光纤光学研究的热点问题。2000年, FERMANN 等人^[1]首次在理论和实验上证明了带有增益的光纤放大器能够产生自相似脉冲。所谓自相似脉冲是指产生于色散

渐减光纤 (dispersion decreasing fiber, DDF) 或光纤放大器正色散区的一类啾啾近乎线性、时域波形类似抛物线形状的渐进性脉冲。自相似脉冲具有许多优点^[2-3]: 传输特性只与入射脉冲的能量和和光纤参量有关, 与入射脉冲形状无关; 因其产生的啾啾具有很强的线性, 所以高功率传输时有抵御光波分裂的能力, 能显著提升脉冲压缩的质量, 故如何利用自相似脉冲来产生超短脉冲输出便成为了研究的热点^[4]。自相似脉冲的压缩方法主要采用啾啾补偿技术, 常利用色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF)^[5-6]、啾啾光纤光栅^[7]等色散补偿器件或采用预啾啾处理^[8]等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61705045)

作者简介: 李沐霖 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为导波光学与光通信技术。

* 通讯联系人。E-mail: zhqf@gdut.edu.cn

收稿日期: 2020-09-03; 收到修改稿日期: 2020-10-19

方法来进行啁啾补偿,其中 DCF 因补偿效果好、技术相对成熟且使用方便得到了广泛的应用。近年来,绝大部分的研究都主要集中在如何获取高线性啁啾的脉冲进行后期的压缩补偿,而对于补偿光纤的设计却鲜有报道。因此,本文中基于啁啾补偿技术研究自相似脉冲啁啾补偿光纤的设计,采用色散渐增光纤进行自相似脉冲的啁啾补偿。首先基于 DDF 产生具有强线性啁啾的自相似脉冲,进而基于啁啾特性研究自相似脉冲的后续压缩补偿问题,啁啾补偿光纤的设计采用普通色散补偿光纤以及色散渐增光纤,探讨了两种类型的压缩光纤对自相似脉冲的线性啁啾补偿效果以及高功率压缩脉冲输出性能的影响。

1 脉冲在 DDF 中的自相似演化

当忽略高阶色散和非线性效应时,光脉冲在 DDF 中的传输可由薛定谔方程^[9-10]表示:

$$i \frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} A(z, T) + \frac{\beta_2}{2} D(z) \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \gamma |A(z, T)|^2 A(z, T) \quad (1)$$

式中, $A(z, T)$ 为脉冲的包络的慢变振幅, T 是随脉冲以群速度移动的参考系中时间的量度, z 为传输的距离, α 为光纤的损耗系数, β_2 为 $z=0$ 时的 2 阶群速度色散 (group velocity dispersion, GVD) 参量, $D(z)$ 为色散变化参量, γ 为非线性系数。当忽略光纤的损耗时,该方程便演变为以下的非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} D(z) \frac{\partial^2 A(z, T)}{\partial T^2} - \gamma |A(z, T)|^2 A(z, T) \quad (2)$$

此时脉冲在 DDF 中的演化主要受 2 阶色散和低频非线性影响。通过傅里叶变换,将(2)式改写为以下形式:

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N}) A(z, T) \quad (3)$$

式中, $\hat{D} = \frac{-\beta_2}{2} D(z) \frac{\partial^2}{\partial T^2}$, 表示 2 阶色散作用, $\hat{N} = \gamma |A(z, T)|^2 A(z, T)$, 表示非线性作用。由分步傅里叶方法可知,当光场通过一小段距离 h 时,色散和非线性效应可以分别作用。故每经过一小段距离 h 后的光脉冲的慢变振幅 $A(z+h, T)$ 可由下式表示:

$$A(z+h, T) = \exp(h \hat{D}) \exp(h \hat{N}) A(z, T) \quad (4)$$

本文中,DDF 2 阶色散随着光纤长度 z 以双曲型

变化,即 $D(z) = \frac{1}{1+Hz}$, 其中 H 为增益系数,归一化 $D(0) = 1$, 采用无啁啾的高斯脉冲作为输入脉冲, T_0 为初始脉宽,输入脉冲表达式为:

$$A(0, T) = \exp\left(\frac{-T^2}{2T_0^2}\right) \quad (5)$$

初始输入高斯脉冲的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) $T_{\text{FWHM}} = 1\text{ps}$, 中心波长为 1550nm , 当 $z=0$ 时, 2 阶色散系数 $\beta_2 = 1.36\text{ps}^2/\text{km}$, 非线性系数 $\gamma = 3.5(\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$, 增益系数 $H = 22\text{km}^{-1}$ 。通过计算色散长度 $L_d = 1.0608\text{km}$, 非线性长度 $L_{\text{NL}} = 0.0068\text{km}$, 实验中设置光纤长度为 4 倍的色散长度 L_d , 此时由于光纤长度远大于非线性长度, GVD 效应会对光脉冲传输起主要作用。通过前面的分步傅里叶法,可得到脉冲在 DDF 中不同位置的演化的数值仿真值。图 1 和图 2 中分别给出脉冲的时域演化趋势和输出脉冲的啁啾曲线。

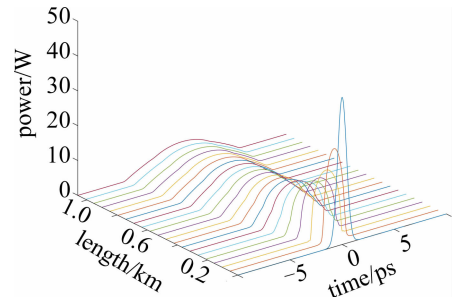


Fig. 1 Schematic diagram of pulse evolution in DDF

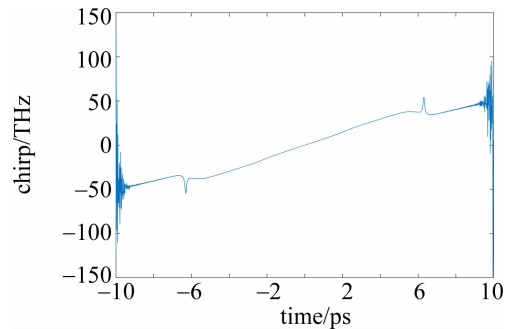


Fig. 2 Schematic diagram of output pulse chirp

从图 1 中可以看到,随着传输距离的增大,时域内脉冲不断进行展宽。其展宽的原因在传输前期主要来自于 2 阶 GVD 效应,但随着 2 阶 GVD 效应的减小,非线性效应 (self-phase modulation, SPM) 会逐渐变强,当 GVD 和 SPM 满足一定关系^[11]时,就会产生具有线性啁啾的自相似脉冲,因此需要合理选择 DDF 的长度,保证光脉冲完成自相似演化。当光脉冲经过 4 倍的 L_d 之后,可以看到,输出脉冲的啁啾具有较大的线性

范围,此时 SPM 效应所产生的非线性啁啾在整个脉冲范围内几乎被正常 GVD 效应线性化,可以认为此时脉冲已经完成了自相似演化。

2 自相似脉冲啁啾补偿光纤设计

2.1 啁啾补偿技术理论分析

由于自相似脉冲在传输的过程中其 GVD 效应远大于 SPM 效应,因此对演化完成后的自相似脉冲进行色散补偿后,便可以对自相似脉冲进行压缩。对色散进行补偿^[11-13]的做法是在 DDF 后引入一段带有相反色散的光纤。对于引入相反色散光纤进行压缩脉冲可以这样理解,对于无初始啁啾的高斯脉冲在经过适当距离的 DDF 后,产生具有线性啁啾的自相似脉冲后在进入反常色散的光纤时,可以看作是带有啁啾的高斯脉冲,其入射场可表示为:

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{(1 + iC)T^2}{2T_0^2}\right] \quad (6)$$

式中, C 为线性啁啾参量,由于高斯脉冲经过了带有正常色散 DDF,所以自相似脉冲感应的是正啁啾,因此啁啾参量 $C > 0$ 。当不考虑非线性效应时,脉冲在具有线性色散介质光纤时满足以下线性微分方程:

$$i \frac{\partial U(z, T)}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U(z, T)}{\partial T^2} \quad (7)$$

当输入脉冲为带啁啾的高斯脉冲时,可求得上述方程的解为:

$$U(z, T) = \frac{T_0}{[T_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)]^{1/2}} \times \exp\left\{\frac{-(1 + iC)T^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)]}\right\} \quad (8)$$

通过计算得到在传输距离为 z 时的脉冲宽度 T_1 与初始脉冲脉宽 T_0 存在以下关系:

$$T_1 = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} T_0 \quad (9)$$

从(9)式可以看出,若初始脉冲啁啾与光纤的 2 阶色散参量符号相反时,在传输适当的距离内啁啾高斯脉冲会被压缩,且存在一个最窄的压缩脉宽 T_1 ,与光纤的 2 阶色散参量和长度有关。同样对于带有线性正啁啾的自相似脉冲也是一样,通过引入一段带有反常色散的光纤,在经过适当的距离后,就能够对自相似脉冲进行压缩。

2.2 普通色散补偿光纤和色散线性渐增光纤对自相似脉冲压缩的影响

理论上,只要引入一段带有反常色散的光纤都能

实现脉冲压缩的目的,因此本文中分别引入带有反常色散的色散补偿光纤(2 阶色散为常量)和带有反常色散的线性渐增光纤来对自相似脉冲进行压缩,以探究不同类型的反常色散光纤对自相似脉冲的压缩影响。取色散补偿光纤的 2 阶色散 $\beta_2 = -1.36(\text{ps}^2/\text{km})$,非线性系数 $\gamma = 1(\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$;色散线性渐增光纤 2 阶色散 $\beta_2(z) = \beta_2(0)(1 + pz)$,其中初始 2 阶色散系数 $\beta_2(0) = -1.36(\text{ps}^2/\text{km})$,色散渐增系数 p 取为 1km^{-1} ,非线性系数与色散补偿光纤保持一致。通过数值仿真可以得到自相似脉冲经过各段反常色散光纤后的脉冲压缩情况。图 3 和图 4 分别为自相似脉冲经过普通色散补偿光纤和色散线性渐增光纤的压缩示意图,图 5 为自相似脉冲经过色散补偿和色散线性渐增光纤脉冲

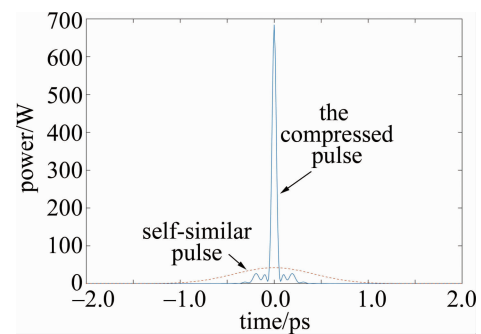


Fig. 3 Schematic diagram of pulse compression of ordinary dispersion compensation fiber

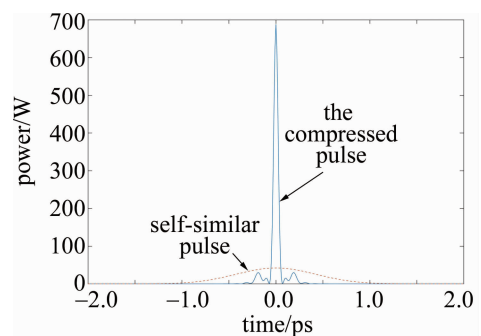


Fig. 4 Schematic diagram of pulse compression for linearly increasing dispersion fiber

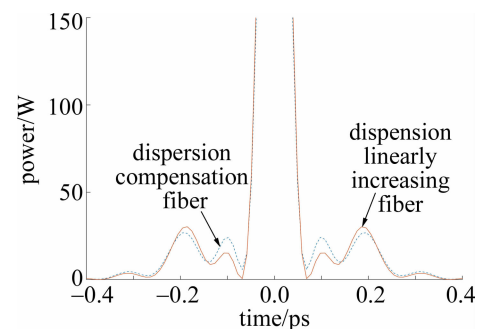


Fig. 5 Partial enlarged view of pulse compression of dispersion compensation fiber and linearly increasing dispersion fiber

后的压缩对比图。

通过数值仿真,当获得最佳超短脉冲输出时,色散补偿光纤长度为 97.8m,超短输出脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 52.6\text{fs}$,输出脉冲峰值功率为 684.5W;而色散线性渐增光纤长度为 93.0m,超短输出脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 53.8\text{fs}$,输出脉冲峰值功率为 688.2W。可以看到,当色散渐增系数 $p = 1\text{km}^{-1}$ 时,色散线性渐增光纤与色散补偿光纤一样能将自相似脉冲压缩至 50fs 量级,但色散线性渐增光纤与色散补偿光纤所产生的脉冲基座略有不同,色散线性渐增光纤的基座波动相对较小,且色散线性渐增光纤的光纤长度也小于色散补偿光纤。因此,相比较于普通色散补偿光纤,色散线性渐增光纤能获得较高质量的自相似脉冲压缩。

为了进一步探究色散渐增系数 p 对压缩质量的影响,在保持其它参量不变的情况下改变 p 值,观察脉冲在色散线性渐增光纤中的演化情况。图 6 是 p 为 5km^{-1} 和 10km^{-1} 时的最佳超短脉冲输出示意图。

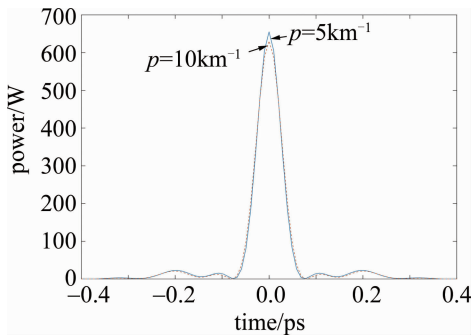


Fig. 6 Schematic diagram of pulse compression of fibers with linearly increasing dispersion at $p = 5\text{km}^{-1}, 10\text{km}^{-1}$

Table 1 Numerical simulation results of fibers with linearly increasing dispersion

	$p = 1\text{km}^{-1}$	$p = 5\text{km}^{-1}$	$p = 10\text{km}^{-1}$
optimal compensation fiber length/m	93.0	81.0	74.2
full width at half maximum of ultrashort pulse output/fs	53.8	58.0	61.8
peak power of output pulse/W	688.2	655.1	630.6

表 1 为自相似脉冲经过不同 p 值的色散线性渐增光纤后输出最短脉冲的数值模拟值。通过数值仿真可知,当 $p = 5\text{km}^{-1}$ 时,压缩至最短脉冲所需的光纤长度缩短为 81.0m,最短脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 58.0\text{fs}$;当 $p = 10\text{km}^{-1}$ 时,所需的光纤长度缩短为 74.2m,最短脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 61.8\text{fs}$ 。由以上结果可以得出:当保持光纤其它参量不变时,增大色散线性渐增系数 p 可以明显缩短超短脉冲输出时的补偿光纤长度,有利于减小脉冲在传输过程中产生的损耗,从而有效提高

自相似脉冲的压缩质量,但随着色散渐增系数 p 迅速提高,其输出脉冲的峰值功率和脉宽也会略微有所降低。最终在 $p = 10\text{km}^{-1}$ 时获得功率为 630.6W、脉宽为 61.8fs 的超短脉冲输出。

2.3 色散指数渐增光纤对自相似脉冲压缩的影响

为了验证其它类型的色散渐增光纤是否也有类似的规律,又引入了色散指数渐增光纤来压缩自相似脉冲。色散指数渐增光纤的 2 阶色散可以表示为: $\beta_2(z) = \beta_2(0)\exp(pz)$, 其中初始 2 阶色散系数 $\beta_2(0) = -1.36(\text{ps}^2/\text{km})$, 与色散线性渐增光纤一样分别取 p 为 $1\text{km}^{-1}, 5\text{km}^{-1}, 10\text{km}^{-1}$, 非线性系数与上述光纤保持一致,通过数值仿真得出自相似脉冲在色散指数渐增光纤中的演化结果。图 7 是 p 分别为 $1\text{km}^{-1}, 5\text{km}^{-1}, 10\text{km}^{-1}$ 时色散指数渐增光纤的脉冲压缩示意图。

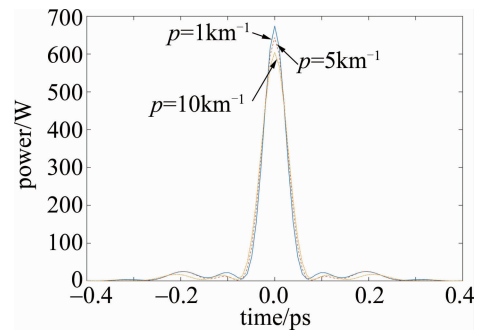


Fig. 7 Schematic diagram of pulse compression of fiber with increasing dispersion index at $p = 1\text{km}^{-1}, 5\text{km}^{-1}, 10\text{km}^{-1}$

Table 2 Numerical simulation results of fibers with increasing dispersion index

	$p = 1\text{km}^{-1}$	$p = 5\text{km}^{-1}$	$p = 10\text{km}^{-1}$
optimal compensation fiber length/m	92.5	82.5	70.3
full width at half maximum of ultrashort pulse output/fs	54.2	59.4	64.4
peak power of output pulse/W	674.2	643.3	604.4

表 2 为自相似脉冲经过不同 p 值的色散指数渐增光纤后输出最短脉冲的数值模拟值。当色散渐增系数 $p = 1\text{km}^{-1}$ 时,压缩至最短脉冲所需的色散指数渐增光纤长度为 92.5m,最短脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 54.2\text{fs}$,输出脉冲峰值功率为 674.2W;当色散渐增系数 $p = 5\text{km}^{-1}$ 时,压缩至最短脉冲所需的光纤长度为 82.5m,最短脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 59.4\text{fs}$,输出脉冲峰值功率为 643.3W;当色散渐增系数 $p = 10\text{km}^{-1}$ 时,压缩至最短脉冲所需的光纤长度缩短为 70.3m,最短脉冲半峰全宽 $T_{FWHM} = 64.4\text{fs}$,输出脉冲峰值功率为 604.4W。

上述结果与利用色散线性渐增光纤压缩脉冲得出

的结论不谋而合,因此可以认为:当保持其它参量不变时,增大色散渐增系数,能有效地缩短脉冲压缩所需的补偿光纤长度,在实际的光纤线路中,缩短补偿光纤长度就意味着能避免更多的损耗,从而提高脉冲的压缩质量,得到高质量的超短脉冲输出,但随着色散渐增系数的迅速增加,输出功率和脉宽也会略微减小,因此需要合理地选择色散渐增系数,在保证脉冲压缩质量的前提下缩短压缩光纤的长度。同时,在比较指数型色散渐增光纤和线性型色散渐增光纤时可以发现,当色散渐增系数相等时,线性型色散渐增光纤的压缩效果要比指数型色散渐增光纤的压缩效果好。

3 结 论

利用 DDF 产生了具有线性啾啾的自相似脉冲,采用啾啾补偿技术进行了自相似脉冲压缩。输入半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 1\text{ps}$ 、峰值功率为 42W 的高斯脉冲,经过 DDF 后形成带有线性啾啾的自相似脉冲,随后又通过长度为 97.8m 的普通色散补偿光纤后得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 52.6\text{fs}$ 、峰值功率为 684.5W 的超短脉冲输出。在此基础上,讨论了色散线性渐增光纤和色散指数渐增光纤对压缩脉冲的影响,当自相似脉冲通过色散渐增系数 $p = 1\text{km}^{-1}$ 、长度为 93.0m 的色散线性渐增光纤后得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 53.8\text{fs}$ 、峰值功率为 688.2W 的超短脉冲输出;通过色散渐增系数 $p = 5\text{km}^{-1}$ 、长度为 81.0m 的色散线性渐增光纤后得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 58.0\text{fs}$ 、峰值功率为 655.1W 的超短脉冲输出;通过色散渐增系数 $p = 10\text{km}^{-1}$ 、长度为 74.2m 的色散线性渐增光纤后得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 61.8\text{fs}$ 、峰值功率为 630.6W 的超短脉冲输出。当自相似脉冲通过色散渐增系数 $p = 1\text{km}^{-1}$ 、长度为 92.5m 的色散指数渐增光纤后,得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 54.2\text{fs}$ 、峰值功率为 674.2W 的超短脉冲输出;通过色散渐增系数 $p = 5\text{km}^{-1}$ 、长度为 82.5m 的色散指数渐增光纤后,得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 59.4\text{fs}$ 、峰值功率为 643.3W 的超短脉冲输出;通过色散渐增系数 $p = 10\text{km}^{-1}$ 、长度为 70.3m 的色散指数渐增光纤后,得到半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 64.4\text{fs}$ 、峰值功率为 604.4W 的超短脉冲输出。结果表明,利用色散渐增光纤作为啾啾补偿光纤能明显缩短补偿光纤的

长度,在保证其它参量不变的情况下,增大色散渐增系数会进一步缩短脉冲压缩所需的光纤长度,但随着色散渐增系数的迅速增加,输出功率和脉宽也会略微减小。

参 考 文 献

- [1] FERMANN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, *et al.* Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 156-159.
- [2] QIAO F Zh, JIAN G. Generation of excellent self-similar pulses in a dispersion-decreasing fiber[J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 122(19): 256-259.
- [3] QIAO F Zh, YAO H D. Influence of gain coefficient on the self-similar pulses propagation in a dispersion-decreasing fiber[J]. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(12): 98-104.
- [4] SHI Sh D, ZHANG Q F, WU L M. Analysis of transmission characteristics of pulses in super-Gaussian dispersion-decreasing fibers[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(3): 388-392(in Chinese).
- [5] XU K, YANG O. Theoretical and numerical characterization of a 40 Gbps long-haul multi-channel transmission system with dispersion compensation[J]. *Digital Communication Networks*, 2015, 1(3): 222-228.
- [6] RAJNEESH K, KALER R. Comparison of dispersion mapping techniques with fiber nonlinearities in carrier suppressed RZ system[J]. *Optik*, 2014, 4(7): 1416-1421.
- [7] WANG K, YU J, YU L Y. Research on dispersion compensation with chirped fiber grating[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2008, 36(1): 77-80(in Chinese).
- [8] LIU W, SCHIMPF D N, EIDAM T, *et al.* Pre-chirp managed nonlinear amplification in fibers delivering 100W, 60fs pulses[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 203-205.
- [9] BOSCOLO S, TURITSYN S K, NOVOKSHENOV Y V, *et al.* Self-similar parabolic optical solitary waves[J]. *Theoretical and Mathematical Physics*, 2002, 133(3): 320-324.
- [10] LIMPET J, SCHREIBER T, ZÖLLNER K, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 628-631.
- [11] ZOU Y Q, MA J Sh. Simulation of different compensation method of the dispersion compensation fiber[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(5): 11-16(in Chinese).
- [12] WU Q, YU Ch X, XIN Y, *et al.* Analysis on dispersion compensation with DCF[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(3): 186-188(in Chinese).
- [13] LONG X. Research on dispersion compensation technology and development in fiber-optic system[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, 33(10): 58-59(in Chinese).