

文章编号:1001-5078(2007)04-0304-04

高能量、无波分裂的超短脉冲光源的研究进展

涂成厚,雷霆,朱辉,李勇男,郭文刚,魏岱,吕福云,周寿桓
(南开大学物理科学学院,天津 300071)

摘要:近来提出的在有正群速度色散的增益光纤中可以实现脉冲的自相似演化及传输的现象,给飞秒脉冲光纤放大器及激光器开辟了广阔的应用前景。应用脉冲自相似演化技术在光纤放大器及激光器中获得的脉冲能量比目前的水平高一、二个量级,且脉冲不会在高能量状态下分裂,脉冲经过去啁啾后可以得到飞秒超短脉冲,可以实现兆瓦量级的峰值功率。本文主要介绍了运用此技术的光纤放大器和激光器的实验研究及发展现状。

关键词:自相似脉冲;非线性薛定谔方程;光纤放大器;光纤激光器

中图分类号:TN242 **文献标识码:**A

Development Progress of High Energy and Wave-breaking-free Ultra-short Pulse Optical Source

TU Cheng-hou, LEI Ting, ZHU Hui, LI Yong-nan, GUO Wen-gang, WEI Dai, LÜ Fu-yun, ZHOU Shou-huan
(College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The phenomenon is put forward recently that pulse can self-similarly evolve and propagate in optical fibers with normal GVD and gain has a bright prospect for given femtosecond fiber amplifier and lasers. The pulse energy obtained by self-similar evolution technique is one or two orders of magnitude larger than that of existing lasers. The pulse will not break at high power level, and it can be de-chirped to obtain a femtosecond pulse, from which million watts peak power has been realized. This paper introduces the current situation and progress of amplifiers and lasers using self-similar technique.

Key words: self-similar pulse; nonlinear Schrödinger equation; fiber amplifier; fiber laser

1 引言

如何避免波分裂而获得高能量的超短脉冲,是个一直受关注的问题^[1-3]。2000年,M. E. Fermann指出线性啁啾的抛物脉冲是有常数增益的非线性薛定谔方程(NLSE)的渐近近似解,在传输过程中脉冲不分裂,脉冲能量逐渐被放大,可以实现自相似演化^[4]。自相似抛物脉冲很好地解决了在光纤中传输时脉冲能量受限的问题。

在一定条件下,初始脉冲在放大器中可演化成抛物形脉冲,其演化只与初始脉冲的能量有关,与形状没有关系。它的另一个特性是引入了严格的线性啁啾,脉冲经放大后,借助脉冲压缩器将其压缩,从而获得脉冲能量极大的无波分裂脉冲^[4],其能量可以比孤子和色散管理孤子大一、二个量级^[5-6]。

2002年,J. Limpert等用大模面积Yb光纤得到了平均输出功率17W,重复频率75MHz的抛物脉冲,脉冲能量约为230nJ,压缩后脉宽80fs,峰值功率达1.7MW^[7]。自相似脉冲放大器和激光器的研究具有很大的实用意义,已成为国际上超短脉冲领域一个新的研究热点。

2 脉冲自相似演化与传输的理论

当忽略高阶色散及除自相位调制以外的其他非线性效应,且脉冲的带宽小于放大器的增益带宽及

基金项目:国家自然科学基金(No. 60677013)资助。

作者简介:涂成厚(1976-),男,南开大学在读博士研究生,主要从事超短脉冲放大器、激光器及非线性现象的理论实验研究。
E-mail: tuchenghou@mail.nankai.edu.cn

收稿日期:2006-06-20; **修订日期:**2006-10-18

没有增益饱和的情况下,脉冲在放大器中的演化可由式(1)描述^[8-9]:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - \gamma |\psi|^2 \psi + i \frac{g}{2} \psi \quad (1)$$

其中, ψ 为脉冲的慢变包络; z 为传输距离; $T = t - z/v_g$ 是相对延时系时间; β_2 为二阶色散系数; γ 为非线性系数; g 为高掺杂光纤的增益系数。

当 β_2 为正时,在渐近极限 $z \rightarrow \infty$ 时可以得到式(1)的一个渐近自相似抛物脉冲解^[8]:

$$\psi(z, T) = A_0 \exp\left(\frac{g}{3}z\right) [1 - T^2/T_p^2(z)]^{1/2} \exp[i\phi(z, T)] \quad (2)$$

$$|T| \leq T_p(z)$$

在 $|T| > T_p(z)$ 时, $\psi(z, T) = 0$ 。 U_{in} 为初始输入脉冲的能量,常数 A_0 如下:

$$A_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{g U_{in}}{\sqrt{\gamma \beta_2 / 2}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

有效脉冲宽度 $T_p(z)$ 和相位 ϕ 分别为:

$$T_p(z) = \frac{6(\gamma \beta_2 / 2)^{1/2} A_0}{g} \exp\left(\frac{g}{3}z\right) \quad (4)$$

$$\phi(z, T) = \varphi_0 + \frac{3\gamma A_0^2}{2g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) - \frac{g}{6\beta_2} T^2 \quad (5)$$

式(2)为有抛物形状的脉冲,由式(5)可看出,其拥有线性的啁啾,可以借助脉冲压缩器对其线性啁啾进行补偿,从而将其压缩,可以得到超短脉冲^[8-12]。渐近自相似抛物脉冲的振幅和脉宽指数增长,其演化只跟初始脉冲能量有关,而和脉冲的特定初始形状、宽度无关。

采用固定相位法,得到渐近自相似抛物脉冲的频谱为^[8]:

$$|\psi(z, \omega)|^2 = \frac{3|\beta_2| A_0^2}{g} \exp\left(\frac{2}{3}gz\right) \left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2(z)}\right] \quad (6)$$

$$|\omega| \leq \omega_p(z)$$

当 $|\omega| > \omega_p(z)$ 时, $|\psi(z, \omega)|^2 = 0$, 可以看出式(6)表示的也是一个抛物型的函数。频谱宽度为:

$$\omega_p(z) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\beta_2}} A_0 \exp\left(\frac{g}{3}z\right) \quad (7)$$

文献[8]、[9]采用分步傅里叶方法或其他方法验证了自相似抛物脉冲的上述性质。研究证明了脉冲的渐近极限自相似演化与初始脉冲的形状及宽度等无关的特性^[8,13]。另外文献还研究了受激拉曼散射和有限增益带宽对自相似抛物脉冲形成的影响^[14-16]。

3 自相似抛物脉冲的放大器和激光器进展

由于脉冲的自相似抛物演化和传输成功解决了波分裂的问题,因而自从 2000 年 M. E. Fermann 提

出在正常色散区域工作的光纤放大器中可以实现抛物型自相似脉冲传输以来,很多研究者进行了自相似无波分裂高能量、高功率的放大器和激光器的研究。

3.1 自相似抛物脉冲的放大器

在正常色散掺 Yb 光纤中利用抛物脉冲自相似放大技术已经成为获得高功率和高能量脉冲的有效技术手段。放大的脉冲可以利用光纤光栅^[12,17]、单模光纤^[18-20]、体光栅对^[7,21] 等来压缩,从而获得飞秒超短脉冲。

M. E. Fermann 在理论提出抛物脉冲可以在光纤放大器中产生后,又同时给出了验证实验,其获得了 68fs 的压缩脉冲,脉冲峰值功率为 80kW^[4]。

2002 年, J. Limpert 等报道了采用掺镱光纤放大器获得了高功率的飞秒脉冲,平均输出为 17W,脉冲重复频率为 75MHz,相应脉冲能量为 230nJ。对脉冲进行压缩后,获得了峰值功率 1.7MW,脉宽为 80fs 的超短脉冲^[7],其脉冲产生典型实验装置如图 1 所示。

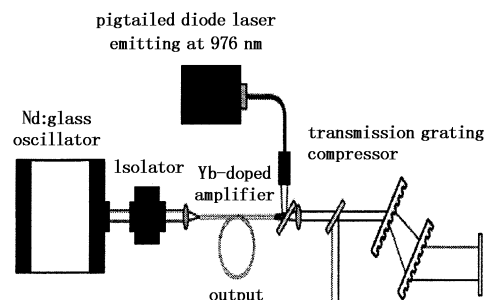


图1 产生抛物脉冲的光纤放大器实验装置图

2003 年, Christophe Finot 等首先数值模拟了拉曼放大器的自相似抛物脉冲产生的可能性,接着实验研究了基于 NZ-DSF 光纤拉曼放大器产生抛物脉冲的特性;经对输出脉冲压缩,最后得到了峰值功率为 172W,脉宽为 1.4ps 的输出脉冲^[22-23]。2004 年,他们又用实验证实了抛物脉冲的渐近特性^[9]。同年,他们又研究了采用 NZ-DSF 光纤拉曼放大器和啁啾 FBG 得到 1550nm 基于自相似抛物脉冲的合成脉冲,峰值功率将近 20W,脉冲宽度为 1.9ps,其实验方案如图 2 所示^[24],该方案展示了一个全光纤化的自相似脉冲产生及脉冲压缩装置。数值研究表明基于光子晶体光纤的拉曼放大器也可以支持自相似抛物脉冲的产生^[25]。2004 年, Toshihiko Hirooka 等用色散渐减光纤实现自相似脉冲,并获得了 100fs 的脉冲^[26]。

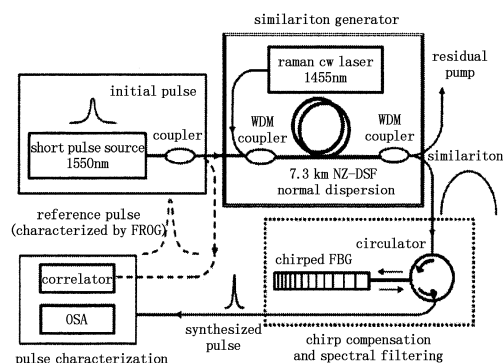


图2 基于拉曼光纤放大器和啁啾 FBG 的脉冲合成实验装置

3.2 自相似抛物脉冲激光器

由于光纤激光器具有小巧和杰出的稳定性等特点,它已成为传统固体激光器的非常有潜力的替代品。但目前从光纤激光器中获得的能量较低,制约着光纤激光器的广泛应用。孤子脉冲能量受孤子面积定理的限制,脉冲能量在 0.1nJ 左右,若能量更高,则出现波分裂而形成多脉冲。脉冲展宽激光器 1996 年已经产生了 100fs、能量为 2.7nJ 的脉冲^[27]。2003 年, F. Ö. Ilday 等报道了锁模掺铒光纤激光器中获得脉宽为 50fs、能量为 5nJ 的脉冲^[28]。但若脉冲能量再高一些时,则面临波分裂的挑战。根据预测,自相似抛物脉冲激光器可以产生比目前的展宽脉冲激光器高 1~2 个量级的脉冲能量^[5],这将大大提升光纤激光器的性能。

2004 年, F. Ö. Ilday 等理论和实验研究了在激光器中实现自相似抛物脉冲的可能性,并提出了典型的抛物型自相似脉冲激光器的构成图,如图 3 所示。一段有正常 GVD 的 SMF(单模光纤)组成了激光腔的主要部分,放大是由可提供增益的很小一段增益光纤实现的。在放大过程中,脉冲经历了可忽略的色散和非线性,这使得脉冲不受有限增益带宽的影响。增益光纤后为饱和吸收体(SA),它也充当着输出口。最后的一个元件就是 DDL,其提供负的 GVD,并且有可忽略的非线性。腔是环形的,在经过 DDL 后,脉冲又回到 SMF。从时域上看,累积的啁啾都由 DDL 补偿掉了。脉冲的演化由图 3 的时间-带宽积和谱宽在腔中的位置来描述,激光器可以实现自启动并稳定运转^[5],典型的激光器工作原理如图 4 所示^[6],输出的自相似抛物脉冲经压缩即可获得高峰值功率的脉冲。

2005 年,是自相似抛物脉冲激光器发展迅速的一年, Axel Ruehl 等报道了从被动锁模全光纤铒振荡器中产生 1550nm 的无波分裂脉冲,即自相似抛物脉冲。激光器的平均输出功率为 675mW(受泵浦功率的限制),脉冲重复频率为 108MHz,能量为

6.2nJ,经腔外压缩后,可得 64fs 的去啁啾脉冲^[29]; C. K. Nielsen 等实现了自启动的自相似全偏振保持掺铒光纤激光器,获得了能量为 1nJ,重复频率为 17MHz 的脉冲,经腔外压缩获得了 280fs 的脉冲^[30]; J. R. Buckley 等报道了从掺铒光纤激光器中获得了能量为 14nJ 的脉冲,经去啁啾后可得峰值功率达 100kW、脉宽 170fs 的高能量超短脉冲^[6,11]; M. J. Messerly 等报道采用和图 4 类似的实验装置实现了能量达 25nJ 的脉冲,压缩后脉宽小于 200fs^[31]。

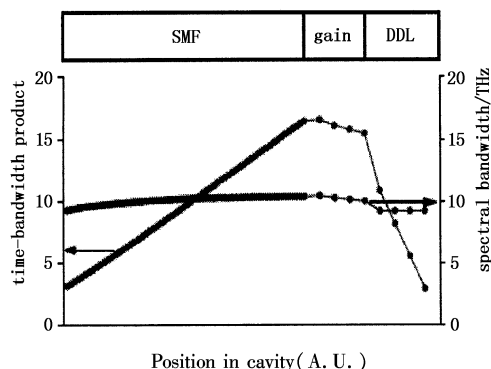


图3 自相似激光器组成原理图

上面:激光器的主要组成部分;

下面:时间-带宽积和谱宽在腔中的变化

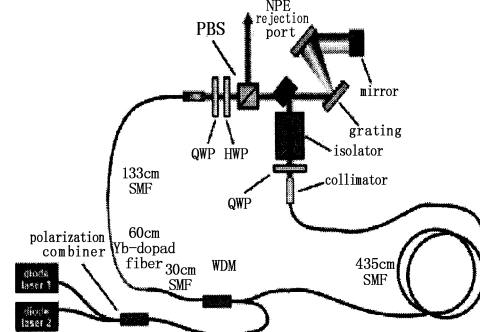


图4 自相似抛物脉冲激光器原理图

4 总结和展望

到目前为止,基于自相似抛物脉冲的理论已经发展得相对成熟,已经从理论和实验上证实了在光纤放大器和激光器中可以实现自相似抛物脉冲,但还有没涉及的方面,需进一步研究。目前在放大器中实现的最大脉冲能量为 230nJ,在光纤激光器中的为 25nJ,比在光纤中用其他方法获得的脉冲能量高很多。另外,目前限制实验报道的功率提高的因素主要是泵浦功率。自相似抛物脉冲放大器或激光器的实验研究目前都是在 1060nm 波段,而 1550nm 波段的基本没有研究,下一步可能会有更多更好的结果。

参考文献:

- [1] J E Rothenberg. Femtosecond optical shocks and wave breaking in fiber propagation [J]. Opt. Soc. Am. B, 1989 (6): 2392-2341.

- [2] D Anderson, M Desaix, M Lisak, et al. Wave breaking in nonlinear optical fibers [J]. Opt. Soc. Am. B, 1992 (9): 1358 – 1361.
- [3] D Anderson, M Desaix, M Karlsson, et al. Wave breaking free pulses in nonlinear optical fibers [J]. Opt. Soc. Am. B, 1993 (10): 1185 – 1190.
- [4] 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): 6010 – 6013.
- [5] 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): 213902.
- [6] J R Buckley, F W Wise, F Ö Ilday, et al. Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ [J]. Opt. Lett., 2005 (30): 1888 – 1890.
- [7] J Limpert, T Schreiber, T Clausnitzer, et al. High power femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Opt. Express, 2002 (10): 628 – 638.
- [8] V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey, et al. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. Opt. Soc. Am. B, 2002 (19): 461 – 469.
- [9] Christophe Finot, Guy Millot, John M Dudley. Asymptotic characteristics of parabolic similariton pulses in optical fiber amplifiers [J]. Opt. Lett., 2004, 29 (21): 2533 – 2535.
- [10] G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Third Edition. San Francisco: Academic Press, 2001.
- [11] J R Buckley, F W Wise, F Ö Ilday, et al. 14 nJ pulses from a femtosecond Yb fiber laser [J]. CLEO, 2005: CTUK4.
- [12] N G R Broderick, D Taverner, D J Richardson, et al. Optical pulse compression in fiber Bragg gratings [J]. Phys. Rev. Lett., 1997 (79): 4566 – 4569.
- [13] Christophe Finot, Francesca Parmigiani, Periklis Petropoulos, et al. Parabolic pulse evolution in normally dispersive fiber amplifiers preceding the similariton formation regime [J]. Opt. Express, 2006 (14): 3161 – 3170.
- [14] Daniel B S Soh, Johan Nilsson, Anatoly B Grudinin. Efficient femtosecond pulse generation using a parabolic amplifier combined with a pulse compressor: I. Stimulated Raman-scattering effects [J]. Opt. Soc. Am. B, 2006 (23): 010001 – 9.
- [15] Daniel B S Soh, Johan Nilsson, Anatoly B Grudinin. Efficient femtosecond pulse generation using a parabolic amplifier combined with a pulse compressor: II. Finite gain-bandwidth effects [J]. Opt. Soc. Am. B, 2006 (23): 010010 – 10.
- [16] G Chang, A Galvanauskas, H G Winful, et al. Dependence of parabolic pulse amplification on stimulated Raman scattering and gain bandwidth [J]. Opt. Lett., 2004 (29): 2647 – 2649.
- [17] 杨广强, 宋继恩等. 基于均匀级联光纤光栅的全光纤脉冲压缩器的数值模拟 [J]. 量子电子学报, 2005, 22 (2): 292 – 285.
- [18] 袁明辉, 孙晓菡, 曹文华. 基于 DDF – NOLM 的高阶孤子脉冲压缩 [J]. 激光与红外, 2003, 33 (4): 294 – 296.
- [19] 吴再华, 曹文华. 色散渐减光纤及其应用 [J]. 激光与红外, 2004, 34 (6): 408 – 411.
- [20] D Anderson, M Lisak, P Anderson. Nonlinear enhanced chirp pulse compression in single-mode fibers [J]. Opt. Lett., 1985 (10): 134 – 136.
- [21] E B Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1969, QE – 5: 454 – 458.
- [22] C Finot, G Millot, S Pitois, et al. Numerical and experimental study of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibers [J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2004 (10): 1211 – 1218.
- [23] Christophe Finot, Guy Millot, Cyril Billet, et al. Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fiber [J]. Opt. Express, 2003 (11): 1547 – 1552.
- [24] C Finot, G Millot. Synthesis of optical pulses by use of similaritons [J]. Opt. Express, 2004 (12): 5104 – 5109.
- [25] A C Peacock, N G R Broderick, T M Monro. Numerical study of parabolic pulse generation in microstructured fibre Raman amplifiers [J]. Opt. commun, 2003 (218): 167 – 172.
- [26] Toshihiko Hirooka, Masataka Nakazawa. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. Opt. Lett., 2004, 29 (5): 498 – 500.
- [27] L E Nelson, S B Fleischer, G Lenz, et al. Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser [J]. Opt. Lett., 1996, 21: 1759.
- [28] F Ö Ilday, J R Buckley, H Lim, et al. Generation of 50 fs, 5 nJ pulses at 1.03 μ m from a wave-breaking-free fiber laser [J]. Opt. Lett., 2003 (28): 1365 – 1367.
- [29] Axel Ruehl, Holger Hundertmark, Dieter Wandt, et al. 0.7 W all-fiber Erbium oscillator generating 64 fs wave breaking-free pulses [J]. Opt. Express, 2005 (13): 6305 – 6309.
- [30] C K Nielsen, B Ortac, T Schreiber, et al. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. Opt. Express, 2005 (13): 9346 – 9350.
- [31] M J Messerly, J W Dawson, C P J Barty, et al. 25 nJ passively mode-locked fiber laser at 1080 nm [J]. CLEO 2005, CThC7.