

5 GHz 的 16.2 ps 超短光脉冲的产生*

余建军^{1, 2} 杨伯君² 管克俭¹

1, 北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088

2, 北京邮电大学基础科学部, 北京 100088

摘 要 对采用法布里-珀罗腔和正常色散光纤联合消啁啾进行了理论和实验上的研究。实验得到了啁啾小于孤子形成临界值, 重复频率为 5 GHz、脉宽为 16.2 ps 的超短光脉冲, 并对消啁啾后的超短光脉冲进行了孤子传输实验。

关键词 超短光脉冲, 法布里-珀罗腔, 正常色散光纤, 孤子传输。

1 引 言

得到接近变换极限的超短光脉冲是实现孤子传输的关键技术之一。目前用作超短光脉冲的光源主要有光纤环形激光器, 增益开关分布反馈激光器(GS-DFB-LD), 分布反馈激光器与电吸收调制器组合在一起使用的方法等几种^[1-6]。增益开关分布反馈激光器由于具有结构简单的优点而被广泛使用在孤子传输实验系统中^[4], 但是当它被高速调制时, 将产生较大的频率负啁啾^[3], 用作孤子源时必须对它进行消啁啾。可以采用法布里-珀罗(F-P)腔消啁啾, 也可以采用正常色散光纤消啁啾^[5, 6]。本文作者发现当调制频率较高时, 这两种方式由于它们本身的局限性, 采用其中的任一种方法消啁啾都难以得到理想的结果, 如果采用这两种方式结合在一起消啁啾则比较理想。本文作者对此进行了实验上的研究, 并且采用它作光源进行了孤子传输实验。

2 实验原理

由于增益开关法产生超短光脉冲时半导体激光器区的载流子发生强烈的变化, 调制频率越高, 载流子变化越激烈, 而激活区的折射率与载流子浓度密切相关, 因此, 调制频率越高, 则激活区的折射率变化越快, 从而使得产生的超短光脉冲具有更加严重的频率啁啾^[3]。图 1 给出了在相同的调制幅度和相同的激光器条件下, 调制频率不同时脉冲的频谱特性, 实线为较低调制频率时的情况, 虚线为较高频率时的情况。可以看到调制频率越高, 不同的频率成分越多, 脉冲的谱宽越宽, 因而产生的光脉冲具有的啁啾(包括线性啁啾和非线性啁啾)越大, 在中心频率附近的能量越小。当调制频率较高时使用法布里-珀罗腔消啁啾, 由于它主要

* 邮电部重点资助项目和国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1996-12-11; 收到修改稿日期: 1997-02-28

是压缩谱宽来实现消啁啾的^[4]，如果要得到变换极限的光脉冲，大部分能量必定会被损耗掉，而且由于在使用法布里-珀罗腔消啁啾的过程中脉冲的时域特性也会发生变化，当能量损耗太大时脉冲的形状将会发生较大的变化，产生的脉冲可能在光纤中不能演化成孤子，这将给孤子传输带来致命的缺点。当采用正常色散光纤消啁啾时，其原理是利用脉冲在正常色散光纤中传输产生线性正啁啾来补偿初始光脉冲的频率负啁啾^[5, 6]，因此决定了它只能消线性啁啾。如果只使用正常色散光纤消啁啾将不能消除非线性啁啾，而非线性啁啾部分的能量在脉冲演化成孤子的过程中将会形成色散波损失，并且这部分色散波对孤子有一定的作用。采用正常色散光纤消啁啾时，主要对脉冲时域有影响。脉冲时域表现为脉冲压缩，因而能够得到较窄的光脉冲，这种光脉冲有益于光的时分复用。如果将法布里-珀罗腔和正常色散光纤结合起来将会达到较好的效果。本文作者先采用法布里-珀罗腔消增益开关分布反馈激光器产生的非线性啁啾，再用正常色散光纤消线性啁啾可以将光脉冲的线性和非线性啁啾消尽，而且还能够压缩脉宽，保持较好的脉冲形状。

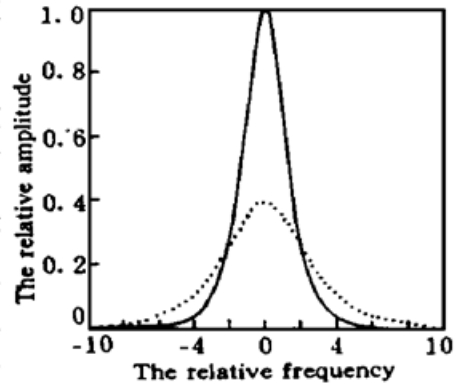


Fig. 1 The frequency domain feature in different modulation frequency. (The solid curve and dashed curve represent the cases of the low modulation frequency and the high modulation frequency, respectively.)

3 实验及其结果

实验装置如图 2 所示。实验系统中所用激光器为增益开关分布反馈激光器。加在增益开关分布反馈激光器上的偏置电流为 28 mA，调制信号频率为 5 GHz，产生的脉冲中心波长为 1553.4 nm。实验中采用的光纤放大器参数如下：放大器用了两个 1480 nm 的中功率半导体激光器作泵浦源，饱和输出平均光功率为 9 dBm，小信号增益为 35 dB。掺铒光纤放大器噪声系数小于 6 dB。

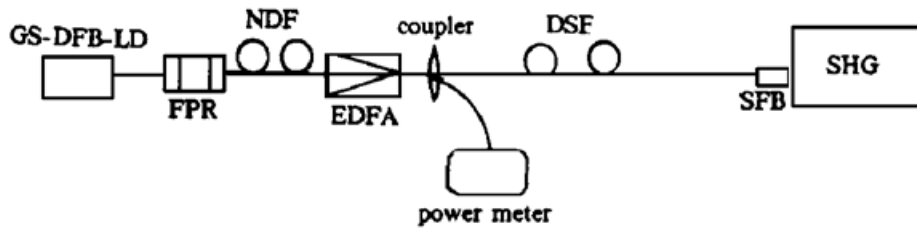


Fig. 2 The schematic diagram of eliminating chirp and soliton transmission system

DSF: dispersion shifted fiber, FPR: F-P resonator, NDF: normal dispersion fiber, GS-DFB-LD: gain switching distributed feedback laser diodes, EDFA: erbium doped fiber amplifier, SFB: self-focus bar

实验所用的强度自相关仪采用的晶体为 LiIO₃ 晶体，该仪器的精度为 0.1 ps。光谱仪的最小分辨率为 0.1 nm。实验中所用的所有光纤的损耗为 0.3 dB/km，光纤有效面积为 56 (μm)²，克尔系数为 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。对光脉冲采用法布里-珀罗腔消啁啾，消啁啾后脉冲宽度为 22.6 ps，谱宽为 0.36 nm，此时脉冲自相关曲线如图 3(a) 所示，经过拟合后脉冲形状近似高斯形脉冲，脉冲频谱特性如图 4 所示，此时时间带宽积为 1.015，按照高斯形脉冲计算此时脉冲啁啾为 -2.07，啁啾绝对值大于临界值 1.64^[8]，脉冲在光纤中传输将不能形成孤子。将此时的光脉冲经过光纤放大器放大，在色散值为 1 ps/nm/km，长度为 8 km 的光纤中传输，无论怎样加大能

实验所用的强度自相关仪采用的晶体为 LiIO₃ 晶体，该仪器的精度为 0.1 ps。光谱仪的最小分辨率为 0.1 nm。实验中所用的所有光纤的损耗为 0.3 dB/km，光纤有效面积为 56 (μm)²，克尔系数为 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。对光脉冲采用法布里-珀罗腔消啁啾，消啁啾后脉冲宽度为 22.6 ps，谱宽为 0.36 nm，此时脉冲自相关曲线如图 3(a) 所示，经过拟合后脉冲形状近似高斯形脉冲，脉冲频谱特性如图 4 所示，此时时间带宽积为 1.015，按照高斯形脉冲计算此时脉冲啁啾为 -2.07，啁啾绝对值大于临界值 1.64^[8]，脉冲在光纤中传输将不能形成孤子。将此时的光脉冲经过光纤放大器放大，在色散值为 1 ps/nm/km，长度为 8 km 的光纤中传输，无论怎样加大能

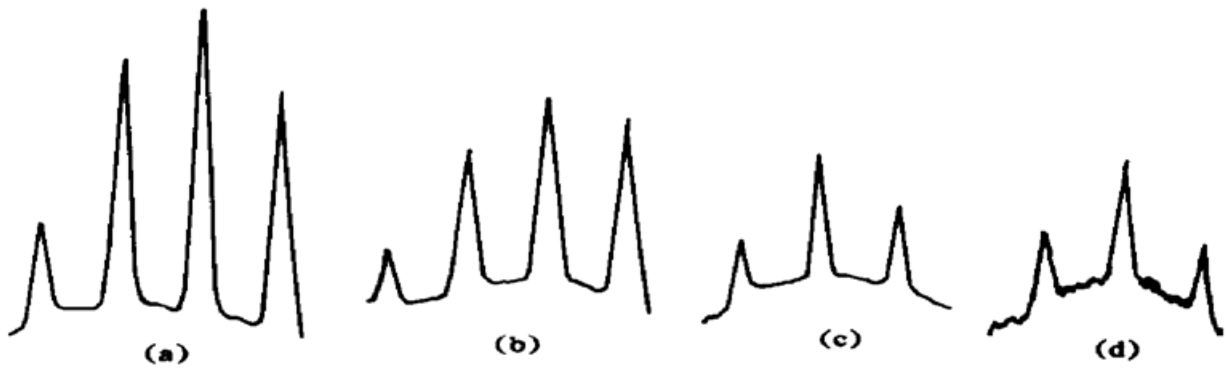


Fig. 3 (a) SHG trace of using F-P spectral window eliminating chirp. the pulse width in the time domain is 22.6 ps. (b) SHG trace after the optical pulse transmitting 8 km. the pulse width in the time domain is 24 ps. (c) SHG trace of using F-P spectral window and normal dispersion fiber eliminating chirp. the pulse width in the time domain is 16.2 ps. (d) SHG trace after the optical pulse transmitting 8 km by combining F-P spectral window and normal dispersion fiber eliminating chirp. the pulse width in the time domain is 13 ps

量也不能实现 孤子传输，图 3(b) 给出了当入纤平均功率为 8 mW 时(此时能量相当于 5.3 阶

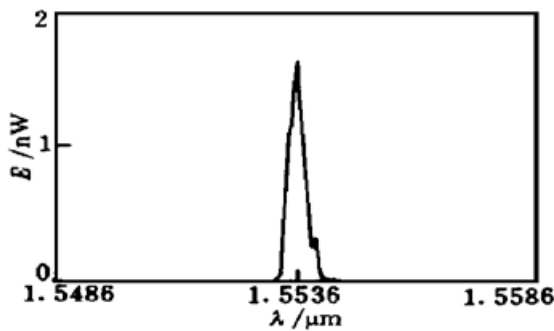


Fig. 4 The frequency diagram after F-P spectral window eliminating chirp

孤子能量，孤子周期为 202 km)，用自相关仪测量得到的自相关曲线，此时脉宽为 24 ps，脉冲被展宽。对经过法布里-珀罗腔消啁啾后的脉冲继续采用正常色散光纤消啁啾。理论计算脉宽为 22.6 ps，啁啾为 - 2.07，入纤平均功率为 0.01 mW 的光脉冲在色散参量为 - 3.9 ps/nm/km 的光纤中传输，为了得到变换极限，最佳正常色散光纤长度应该为 16 km，由于实验条件的限制，实验中采用了 4.5 km，色散参量为 - 3.9 ps/nm/km 长的正常色散光纤，经过此正常色散光纤消啁啾后测量得到的脉冲宽度为 16.2 ps，脉冲的自相关曲线如图 3(c) 所示，脉冲谱宽基本上没有改变，此时时间带宽积为 0.

72，啁啾为 - 1.3，啁啾比较大但小于变换极限值。经过数值模拟和理论分析发现，如果采用的正常色散光纤长度为 16 km，经过此正常色散光纤消啁啾后，得到的光脉冲的线性啁啾为零，脉宽为 6.8 ps。由于孤子的周期与孤子脉宽的平方成正比，当消啁啾的正常色散光纤的长度为理想长度，即为 16 km 时，此时的孤子脉冲将具有比采用 4.5 km 正常色散光纤消啁啾后进行孤子传输更短的孤子周期。将采用 4.5 km 正常色散光纤消啁啾后的光脉冲经过光纤放大器放大，在色散值为 1 ps/nm/km、长度为 8 km 的光纤中传输，图 3(d) 给出了当入纤平均功率为 8 mW(此时能量相当于 4.5 阶孤子能量，孤子周期为 104 km)，用自相关仪测量得到的自相关曲线，此时脉宽为 13 ps，脉冲宽度被压窄，实现了高阶孤子传输。注意到由于此时在光脉冲中还有较大的频率啁啾，所以有较多的一部分能量被损失。

结 论 采用法布里-珀罗腔和正常色散光纤联合消啁啾得到重复频率为 5 GHz、脉宽为 16.2 ps、啁啾参量小于孤子形成临界值的超短光脉冲。实验发现在采用这两种方式联合消啁啾时具有一定的优越性，既能消掉光脉冲的非线性啁啾，又能够压窄光脉冲。经过消啁啾后进行了孤子传输实验，得到了脉宽为 13 ps 的高阶孤子。

作者感谢武汉邮电科学研究院和清华大学提供了部分实验设备。在实验过程中得到了杨启敏同学和张晓光副教授的帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari *et al.*, Generation of highly stable 20 GHz transform-limited optical pulses from actively mode-locked Er^{3+} -doped fiber lasers with an all-polarization maintaining ring activity. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(22) : 2095~ 2096
- [2] M. Nakazawa, E. Yoshida, Y. Kimura, Generation of 98 fs optical pulses directly from an erbium-doped fiber ring laser at 1.57 μm . *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1) : 63~ 64
- [3] C. Lin, Y. Silberberg, Fine structure of frequency chirping and FM sideband generation in single-longitudinal-mode semiconductor lasers and 10 GHz direct intensity modulation. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(1) : 12~ 14
- [4] 许宝西, 娄采云, 高以智等, F-P 滤波窗在半导体光孤子源中的作用. 光学学报, 1994, **14**(10) : 1063 ~ 1067
- [5] 余建军, 张晓光, 杨伯君等, 负啁啾脉冲在正负色散光纤中传输特性研究. 光学学报, 1997, **17**(10) : 1423~ 1428
- [6] Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian, The theoretical and experimental research on using normal dispersion fiber to eliminate chirp. *Chinese J. Laser (B)*, 1997, **6**(1) : 21~ 28
- [7] G. P. Agrawal 著, 胡国绎, 黄超等译, 非线性光纤光学, 天津, 天津大学出版社, 1992 : 144~ 145

Generation of 5 GHz 16.2 ps Ultrashort Optical Pulse

Yu Jianjun^{1, 2} Yang Bojun² Guan Kejian¹

1, Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088
2, Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088

(Received 11 December 1996; revised 28 February 1997)

Abstract The elimination of chirp by combining F-P spectral window and normal dispersion fiber was theoretically and experimentally studied. The ultrashort optical pulse with chirp parameter smaller than the critical value, the repetitive rate of 5 GHz and pulse width of 16.2 ps was experimentally generated. The soliton transmission was achieved after the chirp of the optical pulse was eliminated, and the high-order soliton with pulse width of 13 ps was observed.

Key words ultrashort optical pulse, F-P spectral window, normal dispersion fiber, soliton transmission.