

文章编号: 0253-2239(2006)09-1313-6

光脉冲在标准单模光纤中演化形成孤子的实验研究*

刘山亮¹ 郑宏军^{1,2}

(¹ 聊城大学光通信研究所, 聊城 252059
² 华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

摘要: 利用二次谐波频率分辨光学门脉冲分析仪从实验上分析研究了具有啾啾的 10 GHz 光脉冲在不同输入功率下演化形成孤子的规律和特点。实验发现: 输入脉冲在光纤中传输 3.5 个色散长度时, 其时间宽度、频率啾啾和时间带宽积都随着输入功率的增加而减小。当输入功率大于一阶孤子功率的理论值时, 光脉冲能够演化形成孤子; 脉冲在随后传输过程中其宽度基本保持不变, 波形、频率啾啾和时间带宽积仍随着传输距离的变化而变化; 输入功率越高, 形成的一阶孤子脉冲的宽度越窄。当输入功率小于一阶孤子功率的理论值时, 输出脉冲的时间宽度随着传输距离的增加而增加, 频率啾啾随着传输距离的增加而减小, 光脉冲不能演化形成孤子。

关键词: 光纤光学; 光孤子; 频率分辨光学门; 频率啾啾; 脉冲波形

中图分类号: TN929 文献标识码: A

Experimental Research on Solitons Evolution of Optical Pulses in Standard Single-Mode Fiber

Liu Shanliang¹ Zheng Hongjun^{1,2}

(¹ Institute of Optical Communication, Liaocheng University, Liaocheng 252059
² Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: The evolution of the solitons from 10 GHz optical pulses with frequency chirp is experimentally investigated in standard single-mode fiber with different lengths by use of the pulse analyzer with the second-harmonic generation frequency-resolved optical gating. It is found that the pulses can evolve into the fundamental soliton when input power is higher than its the theoretical value. The temporal width, frequency chirp and time-bandwidth product of the pulses which have propagated over 3.5 dispersion length in the fiber decrease with increase of input power. The pulses almost remain unchanged in width, but vary with the propagation distance in temporal shape, frequency chirp and time-bandwidth product in the sequent propagation. The higher input power is, the narrower temporal width of the formed soliton is. When input power is lower than the predicted value from the soliton theory, the pulses cannot evolve into the fundamental soliton, the temporal width of output pulses increases and the frequency chirp decreases with increase of propagation distance.

Key words: fiber optics; optical soliton; frequency-resolved optical gating (FROG); frequency chirp; pulse shape

1 引 言

孤子问题, 特别是由非线性薛定谔方程所描述的孤子问题出现在现代科学的各个分支中, 例如信息科学中的光纤孤子等都可以用非线性薛定谔方程描述。由于光孤子广阔、明朗的应用前景和易于实验研究等特点, 几十年来得到了广泛的研究和发

展^[1~14]。由于受到实验条件等各种因素的限制, 在以往的光纤孤子传输实验中^[5~14]只是注重输入、输出脉冲的宽度及其变化, 没有或者很少研究波形、啾啾和时间带宽积的变化。本文利用二次谐波频率分辨光学门(SHG-FROG)脉冲分析仪从实验上分析研究了光脉冲在不同输入功率下、经不同长度标准

* 山东省教育厅科技计划重点项目(J05C09)和聊城大学科研基金资助课题。

作者简介: 刘山亮(1957~), 男, 山东淄博人, 聊城大学教授, 硕士, 主要从事高速光纤通信理论和实验方面的研究。

E-mail: lsl@lctu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-14; 收到修改稿日期: 2006-02-28

单模光纤传输前后脉冲宽度、波形、啁啾和时间带宽积的变化以及脉冲演化形成孤子的规律和特点。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。锁模脉冲激光器为德国 U2T 公司的可调谐半导体锁模脉冲激光器 TMLL1550, 可调谐波长范围为 1470~1570 nm, 可调谐重复频率范围为 9.8~10.8 GHz, 平均输出功率与输出脉冲的中心波长、偏置电流有关。选用武汉光讯公司的光隔离器(隔离度大于 61 dB, 插入损耗为 0.6 dB)、法国 KPS 公司的掺铒光纤放大器(噪声指数小于 6 dB, 增益平坦度小于 1.5 dB, 小信号增益大于 40 dB, 光放大波段为 1535~1565 nm)、新西兰南方光子有限公司的二次谐波频率分辨力光学门脉冲仪 HR200。采用频率分辨光学门(FROG)测量技术, 在每一个延迟位置测量自相关光脉冲的频谱, 得到一个时延和频率的二维谱强度数据 $I_{\text{test}}(\omega_i, \tau_i)$ 、图形和脉冲自相关曲线等, 更重要的是通

过迭代运算可恢复得到测量光脉冲的电场 $E(t)$, 从而得到脉宽、谱宽、波形、相位和啁啾等各种特征信息^[15]。HR200 脉冲分析仪采用铌酸锂(LiNbO₃)晶体作为非线性介质, 时间分辨力即最小时间延迟 τ_0 为 26.66 fs; 采用 1200 g/m 的高分辨力反射光栅作为光谱仪, CCD 相邻象素的间隔为 0.023 nm, 频谱分辨力小于 0.05 nm, 其脉宽和谱宽的测量误差约为 0.3 fs 和 0.25 nm。HR200 脉冲分析仪对偏振非常敏感, 要求输入功率较高, 一般不小于 20 mW。在实验中半导体锁模激光器输出的光脉冲经光隔离器进入掺铒光纤放大器放大后输入光纤, 光纤输出脉冲经偏振控制器(PC)输入分析仪 HR200 进行测量和分析。各器件之间用光纤活动连接器或跳线连接。实验中所用两段光纤为 G.652 标准单模光纤, 其模场直径为 9.07 μm 、色散参量 $D=15.07 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 光纤损耗为 0.188 dB/km, 长度分别是 200 m、355 m 和 1000 m。

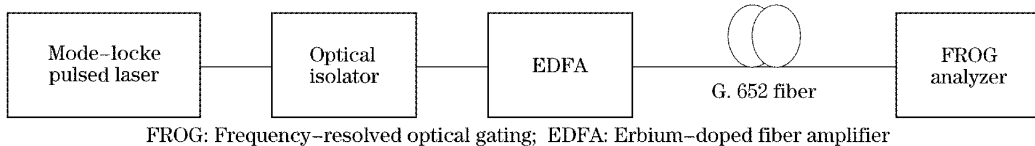


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

3 实验结果与分析

在接入光纤前, 分析测量了掺铒光纤放大器输出的光脉冲特征。图 2(a) 所示是测量得到的脉冲的时域波形曲线。图中横坐标是时间, 纵坐标是归一化的脉冲强度。图 2(a) 中虚线是高斯曲线, 点划线是双曲正割曲线, 实线是实验测量得到的脉冲波形曲线。由图 2(a) 可见, 输入脉冲前沿下降比高斯

曲线下降慢, 而后沿下降比高斯曲线下降快。测量结果表明掺铒光纤放大器输出的光脉冲的半峰全宽 T_{FWHM} 为 1.86 ps、谱宽为 2.22 nm, 时间带宽积为 0.514。图 2(b) 所示是输入光纤脉冲的啁啾曲线, 横坐标是时间 T 与半峰全宽 T_{FWHM} 的比值, 纵坐标表示脉冲频率啁啾 $\delta\omega/\omega$ 。这里 $\delta\omega = -\partial\varphi/\partial t$ 根据测量得到的脉冲相位曲线即 $\varphi-t$ 曲线给出。由

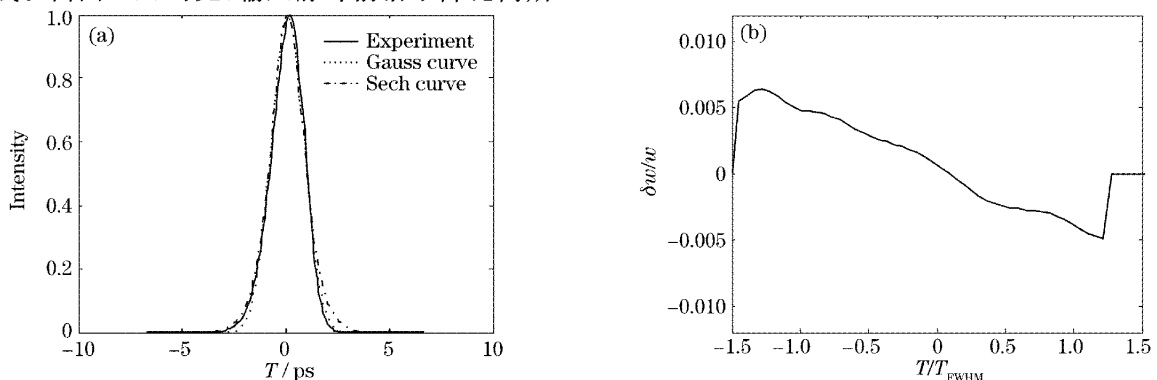


图 2 传输前测量得到的光脉冲时域波形曲线(a)和频率啁啾曲线(b)

Fig.2 Temporal shape (a) and frequency chirp curves (b) of the optical pulse before transmission

图 2(b)可见,在脉冲中心附近啁啾是线性的,脉冲前沿的啁啾比后沿的大,这与脉冲波形曲线前沿比后沿下降慢有关。

3.1 光脉冲时域宽度与输入功率的关系

在图 1 所示实验装置中,在掺铒光纤放大器和偏振控制器之间先后接入 200 m、355 m 和 1000 m 具有同样参量的 G. 652 光纤。掺铒光纤放大器输出的光脉冲经光纤传输后输入 HR200 脉冲分析仪进行测量和分析。通过调节掺铒光纤放大器抽运激光器的工作电流改变输入光纤脉冲的功率后,再进行测量和分析。图 3 所示是接入不同长度光纤时实验测量得到的输出光脉冲时域半峰全宽随输入平均功率的变化关系。从图中可以看出,对于确定的光纤长度输出脉冲的时域宽度随着输入光脉冲平均功率的增加而减小。

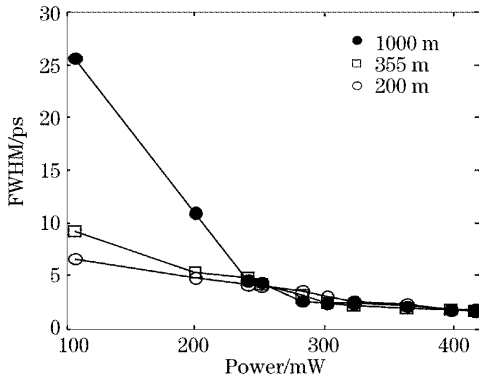


图 3 脉冲宽度随输入功率的变化

Fig. 3 Variation of pulse width with input power

当输入功率小于 240 mW (23.8 dBm) 时,在相同输入功率下输出脉冲宽度随着传输距离而增加;在相同传输距离下输入功率越低,输出脉冲宽度越宽;输入功率越低,经过不同传输距离输出脉冲的宽度相差越大。这表明当输入功率小于 240 mW 时,色散引起的脉冲展宽占主导地位。

当输入功率大于等于 240 mW 时,在相同输入

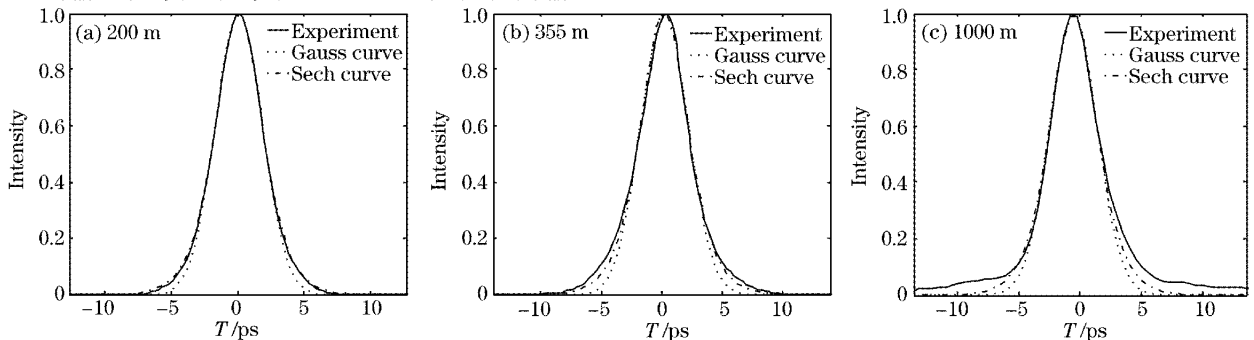


图 4 输入功率为 240 mW 时光脉冲在光纤中传输(a)200 m,(b)355 m 和(c)1000 m 后的波形曲线

Fig. 4 Temporal shape curves at input power 240 mW after transmission over (a) 200 m, (b) 355 m and (c) 1000 m

功率下经过不同传输距离后的输出脉冲宽度基本相同,色散引起的脉冲展宽和非线性引起的脉冲压缩达到基本平衡,符合一阶孤子的基本特征。这表明输入脉冲在光纤中经过 200 m 传输后已经基本演化形成孤子,在此后的传输过程中其宽度基本保持不变。虽然在相同输入功率下经过不同传输距离后的输出脉冲宽度基本相同,但是输出脉冲宽度随着输入功率的增加而缓慢减小。

3.2 光脉冲波形的演化

图 4(a)所示是输入功率为 240 mW 时输入脉冲在光纤中经过 200 m 距离后输出光脉冲的波形曲线。由图可见,实验测量得到的输出脉冲波形曲线与双曲正割曲线完全吻合。这表明输入脉冲在光纤中经过 200 m 距离后已经演化成为具有双曲正割波形的光纤孤子脉冲。孤子脉冲宽度为 4.23 ps,比输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 6.7 ps 窄,比输入脉冲宽得多。

图 4(b)、图 4(c)所示分别是输入功率为 240 mW 时输入脉冲在光纤中经过 355 m 和 1000 m 距离后的波形曲线。由图可见,实验测量得到的经过 355 m 距离后输出脉冲波形曲线仍与双曲正割曲线相吻合,脉冲半峰全宽比输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 9.22 ps 窄。经过 1000 m 距离后输出脉冲波形曲线已经偏离了双曲正割曲线,与经过 200 m 距离后的波形有明显的变化;脉冲强度在其前、后沿下降比双曲正割曲线更缓慢,脉冲半峰全宽比输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 25.6 ps 窄得多。这表明经过 200 m 距离后演化形成的光纤孤子脉冲在随后的传输过程中其宽度虽然基本保持不变,但是其波形仍然有明显的变化。

图 5(a)所示是输入功率 417 mW 时输入脉冲在光纤中经过 200 m 距离后的波形曲线。由图可见,实验测量得到的输出脉冲波形曲线与双曲正割

曲线完全吻合。这表明与输入功率 240 mW 时一样,输入脉冲经过 3.5 个色散长度后已经演化成为具有双曲正割波形的光纤孤子脉冲。孤子脉冲宽度为 1.75 ps,与输入脉冲宽度大致相同,不到输入功率 240 mW 时演化形成的孤子脉冲宽度的一半,大约是输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 6.7 ps 的四分之一。

图 5(b)所示是输入功率为 417 mW 时输入脉冲在光纤中经过 355 m 后的波形曲线。由图可见,实验测量得到的输出脉冲波形曲线与高斯曲线完全

吻合,已经由经过 200 m 距离后的双曲正割波形演化成高斯波形,输出光脉冲宽度与经过 200 m 后的宽度基本相同,是输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 9.22 ps 的五分之一。

图 5(c)所示是输入功率为 417 mW 时输入脉冲在光纤中经过 1000 m 后的波形曲线。由图可见,实验测量得到的输出脉冲波形曲线与双曲正割曲线完全吻合,与经过 200 m 后输出脉冲的波形和宽度相同,输出光脉冲宽度只是输入功率 107 mW 时输出脉冲宽度 25.6 ps 的 7%。

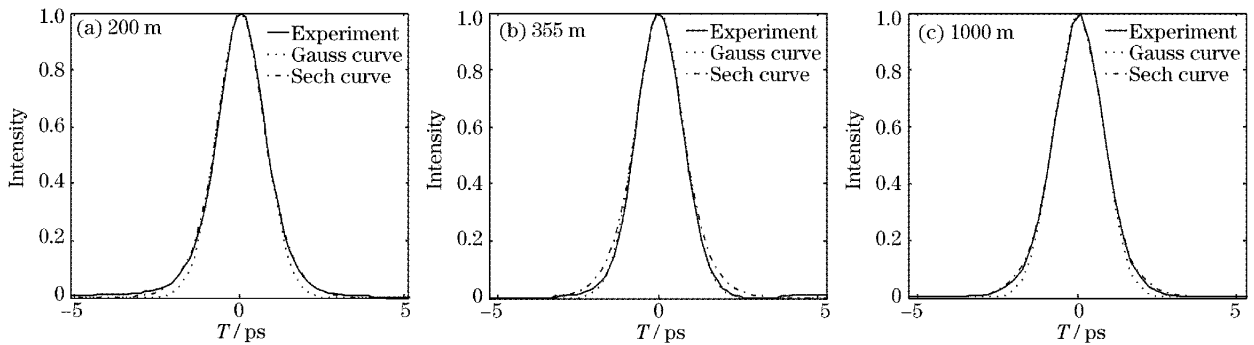


图 5 输入功率为 417 mW 时光脉冲在光纤中传输(a)200 m,(b)355 m 和(c)1000 m 后的波形曲线

Fig. 5 Temporal shape curves at input power 417 mW after transmission over (a) 200 m, (b) 355 m and (c) 1000 m

3.3 脉冲啁啾的演化

当输入功率小于 240 mW 时,输出脉冲的啁啾是负线性的,其大小随着输入功率的增加而减小,色散引起的负线性啁啾占主导地位。在相同输入功率下,输出脉冲的啁啾随着传输距离的增加而减小。图 6 所示是输入功率为 107 mW (20.3 dBm) 时输入

脉冲在光纤中传输 200 m、355 m 和 1000 m 后的啁啾曲线。由图可见,输出脉冲中心区域的啁啾曲线近似为一条斜率为负的直线,斜率的绝对值和啁啾的大小随着传输距离的增大而减小。这表明非线性的影响随着传输距离的增加而增加,但是色散的影响仍占主导地位。

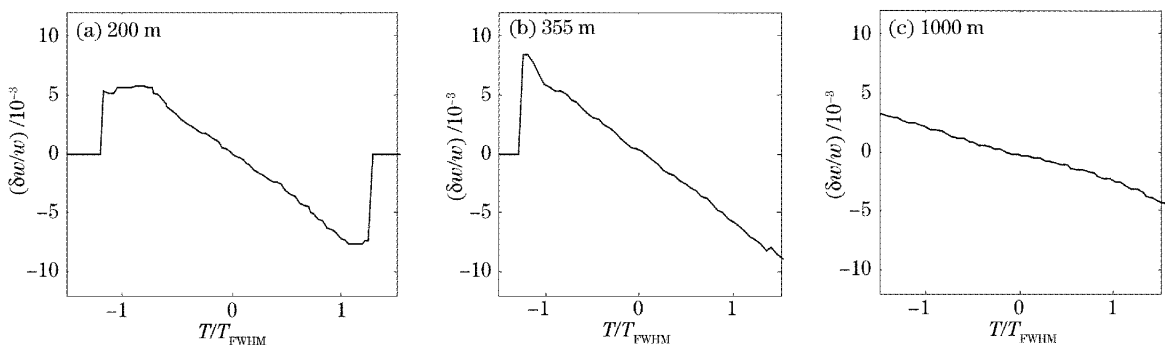


图 6 输入功率 107 mW 时光脉冲在光纤中传输(a)200 m,(b)355 m 和(c)1000 m 后的啁啾曲线

Fig. 6 Chirp curves at input power 107 mW after transmission over (a) 200 m, (b) 355 m and (c) 1000 m

图 7 为所示输入功率 240 mW 时输入脉冲在光纤中传输 200 m、355 m 和 1000 m 后的啁啾曲线。由图可见,输出脉冲啁啾的大小随着传输距离的增大而减小。

输入脉冲在光纤中传输 200 m 后在 $T = (-1 \sim 1)T_{FWHM}$ 的中心区域的啁啾曲线仍然近似为一条直

线,但是斜率的绝对值和啁啾的大小比 107 mW 时显著减小。输入脉冲在光纤中传输 355 m 后在 $T = (-1.5 \sim 0)T_{FWHM}$ 区域的啁啾曲线仍然近似为一条直线,但是斜率的绝对值和啁啾的大小比 107 mW 时显著减小;在 $T = (0 \sim 0.3)T_{FWHM}$ 区域的啁啾近似为零,在 $T > 0.3T_{FWHM}$ 区域的啁啾随着 T 增加而增加。在光纤中传输 1000 m 后在 $T = (-1.3 \sim$

1. 2) T_{FWHM} 区域的啁啾等于零。

图 8 所示输入功率为 417 mW 时输入脉冲在光纤中传输 200 m、355 m 和 1000 m 后的啁啾曲线。由图可见,输出脉冲中心附近的啁啾曲线近似为一

条斜率为负的直线,传输 355 m 后直线斜率的绝对值即啁啾的大小最大,传输 1000 m 后的次之,传输 200 m 后的最小。

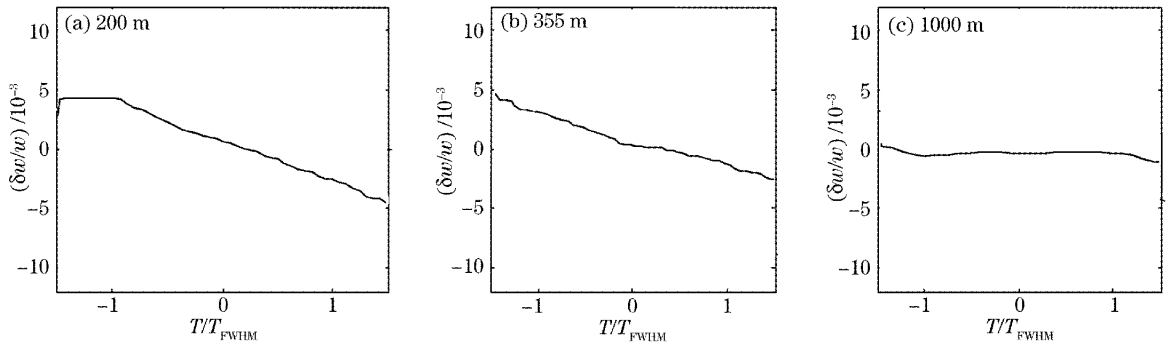


图 7 输入功率 240 mW 时光脉冲在光纤中传输 (a) 200 m、(b) 355 m 和 (c) 1000 m 后的啁啾曲线

Fig. 7 Chirp curves at input power 240 mW after transmission over (a) 200 m, (b) 355 m and (c) 1000 m

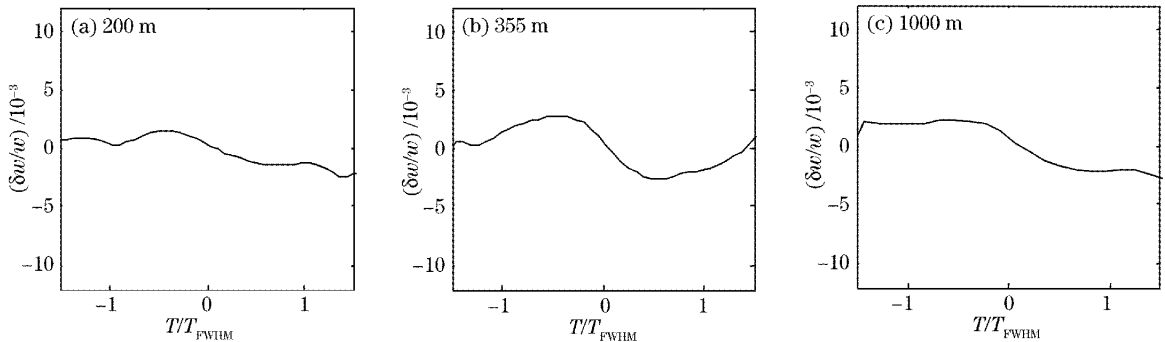


图 8 输入功率 417 mW 时光脉冲在光纤中传输 (a) 200 m、(b) 355 m 和 (c) 1000 m 后的啁啾曲线

Fig. 8 Chirp curves at input power 417 mW after transmission over (a) 200 m, (b) 355 m and (c) 1000 m

3.4 脉冲时间带宽积的演化

不仅脉冲的波形和啁啾随着传输距离和输入功率的变化而变化,而且其时间带宽积也随着传输距离和功率的变化而变化。实验发现,输入脉冲在光纤中传输 200 m 时的时间带宽积随着输入功率的增加而减小,由输入功率 107 mW 时的 1.264 减小到 417 mW 时的 0.326。在随后的传输过程中脉冲的时间带宽积随着输入功率的变化而变化,输入功率 240 mW 时经过 200 m、355 m 和 1000 m 距离后的时间带宽积分别是 0.741、0.617 和 0.312,输入功率为 417 mW 时分别是 0.326、0.417 和 0.365。

4 讨 论

根据光纤孤子理论,在输入光脉冲是无啁啾的双曲正割脉冲和没有光纤损耗的情况下,当输入功率等于基孤子峰值功率 P_0 时光脉冲的波形和宽度在传输过程中保持不变:

$$P_0 = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2}. \quad (1)$$

在以往的光纤孤子传输实验中都是以输出脉冲宽度等于输入脉冲宽度作为孤子形成的标志。根据上述孤子形成的标志,可以认为本实验中输入脉冲在光纤中经过 200 m 距离传输后已经演化形成孤子。在本实验条件下 $\beta_2 = -19.2 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 1.63 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ (取非线性克尔系数 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$)^[1],对半峰全宽为 1.86 ps 的双曲正割输入光脉冲 $T_0 = 1.06 \text{ ps}$,色散长度 $L_D = 0.058 \text{ km}$ 。根据(1)式计算得到一阶孤子峰值功率为 10.6 W,在本实验条件下与平均功率 223 mW 对应。根据孤子微扰理论^[16],有

$$U(0, T) = (1 + \epsilon) \text{sech } T, \quad |\epsilon| < 1/2 \quad (2)$$

$U(0, T)$ 为归一化一阶孤子振幅的脉冲包络电场, $\text{sech } T$ 为双曲正割函数。输入脉冲在光纤中可以演化形成一阶孤子,即 $-0.5 < \epsilon < 0.5$ (输入功率在 $(0.25 \sim 2.25) \times 223 \text{ mW}$ 之间的无啁啾双曲正割脉冲都能够演化形成一阶孤子。在本实验中,当输入功率大于孤子功率理论值 223 mW 即 $\epsilon > 0$ 时能够演化形成孤子,当输入功率小于孤子功率即 $\epsilon < 0$ 时不

能够演化形成孤子。实验结果与微扰理论的差异应该与输入脉冲的非双曲正割波形和啁啾有关。

当输入功率大于一阶孤子功率的理论值 223 mW 时输入脉冲在光纤中经过 200 m (约 3.5 倍色散长度) 传输都能够演化形成一阶孤子, 但是所形成孤子脉冲宽度随着输入功率的变化而变化, 输入功率越大, 孤子脉冲的宽度越小。当输入功率为 240 mW 时经过 200 m 光纤后所形成孤子脉冲的线性啁啾参量 C 为 -0.9 , 半峰全宽为 4.23 ps, 远大于输入脉冲宽度 1.86 ps。当输入功率等于 417 mW 时所形成孤子脉冲半峰全宽为 1.71 ps, 比输入功率 240 mW 时的窄得多, 其啁啾比输入功率 240 mW 时的小得多。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 1~538 (in Chinese)
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 1~538
- 2 Cao Wenhua, Liu Songhao. Amplification and compression of ultrashort solitons in an erbium-doped nonlinear amplifying fiber loop mirror I. Basic principles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1067~1072 (in Chinese)
曹文华, 刘颂豪. 掺铒光纤环中超短光孤子的放大与压缩 I. 基本原理[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1067~1072
- 3 Ruiyu Hao, Lu Li, Rong Caoyang *et al.*. Exact chirped multi-soliton solutions of the nonlinear Schrödinger equation with varying coefficients[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 136~139
- 4 Bin Tan, Zhiyong Li, Zhaoying Wang *et al.*. Wavelength and duration tunable soliton generation from a regeneratively mode-locked fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 604~606
- 5 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13): 1095~1098
- 6 Gao Yizhi, Yao Minyu, Xu Baoxi *et al.*. A 2.5 GHz optical soliton transmission[J]. *High Technology Letters*, 1994, (7): 4~6 (in Chinese)
高以智, 姚敏玉, 许宝西等. 2.5 GHz 光孤子传输[J]. 高技术通讯, 1994, (7): 4~6
- 7 Yang Xianglin, Mao Qinghe, Wen Yangjing *et al.*. The experiment study of 2.5 GHz optical soliton wave transmission and compression[J]. *High Technology Letters*, 1996, **10**: 26~28 (in Chinese)
杨祥林, 毛庆和, 温扬敬等. 30 km 2.5 GHz 光孤子波传输与压缩实验研究[J]. 高技术通讯, 1996, **10**: 26~28
- 8 Huang Zhaoming, Wu Fang, Jiang Zeming *et al.*. Experimental study of optical fiber soliton transmission[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(10): 935~938 (in Chinese)
黄肇明, 吴芳, 蒋泽明等. 光孤子传输的实验研究[J]. 光子学报, 1996, **25**(10): 935~938
- 9 Zhang Xiaoguang, Lin Ning, Zhang Tao *et al.*. 10 GHz, 38 km prechirped dispersion-managed soliton transmission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 813~817 (in Chinese)
张晓光, 林宁, 张涛等. 预啁啾 10 GHz, 38 km 色散管理孤子的传输实验[J]. 光子学报, 2001, **30**(7): 813~817
- 10 Xu Baoxi, Li Jinghui, Jiang Xin *et al.*. Optical soliton transmission at 2.5 GHz[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1995, **23**(11): 38~54 (in Chinese)
许宝西, 李京辉, 姜新等. 2.5 GHz 光孤子传输[J]. 电子学报, 1995, **23**(11): 38~54
- 11 Yu Jianjun, Yang Bojun, Yu Jianguo *et al.*. Soliton transmission research in experiment[J]. *Optronics • Laser*, 1996, **7**(5): 267~272 (in Chinese)
余建军, 杨伯君, 余建国等. 光孤子传输实验研究[J]. 光电子·激光, 1996, **7**(5): 267~272
- 12 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian. Generation of 5 GHz 16.2 ps ultrashort optical pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 14~17 (in Chinese)
余建军, 杨伯君, 管克俭. 5 GHz 的 16.2 ps 超短光脉冲的产生[J]. 光学学报, 1998, **18**(1): 14~17
- 13 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian. A soliton transmission system with dispersion-allocated technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(2): 153~157 (in Chinese)
余建军, 杨伯君, 管克俭. 采用色散搭配技术的孤子传输实验[J]. 中国激光, 1998, **A25**(2): 153~157
- 14 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian *et al.*. Soliton transmission based on the chain of different dispersion fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(4): 446~450 (in Chinese)
余建军, 杨伯君, 管克俭等. 基于不同色散光纤的光纤链的孤子传输研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(4): 446~450
- 15 Liu Shanliang, Zheng Hongjun. Experimental research on the characteristic measurement of the short pulses before and after propagating in dispersion-flattened fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 199~205 (in Chinese)
刘山亮, 郑宏军. 短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 199~205
- 16 Junkichi Satsuma, Nobuo Yajima. Initial value problem of one-dimensional self-modulation of nonlinear waves in dispersive media[J]. *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, 1974, **55**: 284~306