

# 负啁啾脉冲在正负色散光纤中 传输特性研究\*

余建军<sup>1, 2</sup> 张晓光<sup>1</sup> 杨伯君<sup>1</sup> 管克检<sup>2</sup>

1, 北京邮电大学基础科学部, 北京 100088

2, 北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088

**摘 要** 对负啁啾脉冲在正常色散光纤中传输特性进行了数值分析和实验研究, 数值分析结果与实验结果基本一致。数值分析和实验证明正常色散光纤不仅能压窄负啁啾的脉宽而且能压窄频谱, 采用正常色散光纤消啁啾后用色散位移光纤作为传输媒质成功地进行了一阶和高阶孤子传输。

**关键词** 啁啾, 光孤子传输, 正常色散光纤, 色散位移光纤。

## 1 引 言

光孤子通信作为一种新的大容量长距离通信技术已得到了一些国家的重视。目前孤子传输码率已经达到了 160 Gbit/s<sup>[1]</sup>。用作光孤子通信使用的光源一般都是增益开关分布反馈式激光器。但增益开关分布反馈式激光器具有较大的啁啾, 必须对它进行消啁啾处理。由于增益开关分布反馈式激光器产生的脉冲一般是负啁啾, 可以采用正常色散光纤对它消啁啾。文献一般只对啁啾脉冲在正常色散光纤中的时域特性进行分析, 缺乏对频域特性的分析<sup>[2, 3]</sup>, 本文作者对负啁啾脉冲在正常色散光纤中的传播时域和频域特性进行实验和数值分析, 并进行了孤子传输实验。

## 2 理论分析

啁啾产生是与增益开关分布反馈式激光器工作原理联系在一起的。半导体激光器被突然加一激励电流时, 在其输出达到与激励电流值相对应的稳态以前, 由于光子和载流子之间的相互作用, 会产生张弛振荡过程, 输出一系列幅度逐渐减小的窄脉冲。每个脉冲的宽度在几十皮秒左右, 振荡频率在  $10^9 \sim 10^{10}$  Hz 范围, 其参数与激光器内部参数和工作条件有关。

利用增益开关技术产生超短光脉冲就是使激光器产生张弛振荡的第一个脉冲后, 增益迅速减小到阈值以下, 不能产生多峰, 从而获得超短光脉冲。

\* 国家 863 高科技通信和邮电部重点科技资助项目。

收稿日期: 1996 年 4 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 18 日

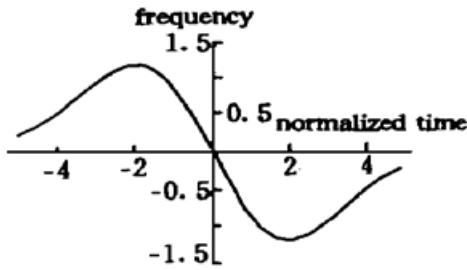


Fig. 1 The frequency character of optical pulse

当半导体激光器工作在超短光脉冲状态时,其激活层载流子浓度在产生超短光脉冲的过程中一定是急剧变化的。在光脉冲的前部,载流子浓度较高,相互作用能大;在光脉冲的后部,载流子浓度较低,作用能下降。从而使产生的光脉冲的前部振荡频率高,后部振荡频率低,出现所谓的啁啾效应。前部频率高,后部频率低的光脉冲称为负啁啾光脉冲,或红移光脉冲。半导体激光器产生的负啁啾光脉冲频率变化特性如图 1 所示。可以看出在能量集中的中部,啁啾基本上是线性的。

对于无啁啾的双曲正割形光脉冲时间带宽积  $\Delta t_0 \Delta \nu = 0.315$ ,对于有啁啾的超短光脉冲  $\Delta t \Delta \nu > 0.315$ ,在假设线性啁啾情况下,可定义啁啾参量  $C$  衡量啁啾大小, $C$  满足:

$$\Delta t \Delta \nu = \Delta t_0 \Delta \nu \sqrt{1 + c^2} \quad (1)$$

在实验中,通常是通过测量所产生的光脉冲的谱宽 ( $\Delta \nu$ ) 和脉宽 ( $\Delta t$ ),利用(1)式来确定其啁啾参量的大小。

理论分析表明<sup>[4]</sup>,为形成一阶光孤子传输,对初始入射光脉冲的啁啾有一定的要求,即  $C$  存在一啁啾参量临界值  $C_{cr} = 1.64$ ,初始入射光脉冲的啁啾参量绝对值  $C$  必须小于  $C_{cr}$ ,否则,将不能形成一阶光孤子传输。

超短光脉冲在单模光纤中满足的方程为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + k_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (2)$$

$1/k_1$  和  $k_2$  分别是脉冲的群速度和群速色散, $\gamma$  和  $\alpha$  为光纤非线性系数和损耗, $A(z, t)$  为脉冲的慢变包络振幅。

将各变量做如下变换:

$$\zeta = \frac{z}{L_D}, \quad \tau = \frac{1}{t_0} \left[ t - \int_0^z k_1(z') dz' \right], \quad u = A \sqrt{\gamma L_D} \quad (3)$$

其中  $t_0$  为脉冲初始宽度,  $L_D = \frac{t_0^2}{|k_2(0)|}$ ,则在正色散区域(2)式变为:

$$i \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u + i\Gamma u = 0 \quad (4)$$

其中  $\Gamma = \frac{\alpha}{2} L_D$ ,为归一化损耗。对于一个有负(线性)啁啾的双曲正割形初始脉冲可用下式表示:

$$U(0, t) = \text{sech} \left( \frac{t}{t_0} \right) \exp \left[ - \frac{ict^2}{2t_0^2} \right] \quad (5)$$

式中  $C$  为线性啁啾参量,  $t_0$  为初始脉宽。由于要考虑到非线性效应和色散效应,用解析方法很难得到精确的解,本文采用数值解的办法求解(4)式。

### 3 数值分析

按以下几种情况对(4)式用分步傅里叶变换方法进行数值分析。情况 1) 至情况 5) 的光脉冲初始脉宽均为 20 ps,正常色散光纤损耗均为 0.3 dB/km,初始谱宽为 0.38 nm。

1) 脉宽展宽因子、谱宽展宽因子与正常色散光纤长度的关系:

为便于与实验比较, 数值计算参数选择与实验参数相同, 色散参量为  $-4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ , 码速率为  $1 \text{ Gbit/s}$ 。本文考虑线性啁啾, 啁啾参量为  $-2.78$ 。图 2 为入纤平均功率为  $0.3 \text{ mW}$  时脉冲在正常色散光纤中传播时域演化图。图 3 为入纤平均功率为  $0.3 \text{ mW}$  时谱宽和脉宽展宽因子与正常色散光纤长度的关系。可以看到脉冲在正常色散光纤传播到  $9 \text{ km}$  时脉宽有最小值, 谱宽接近最小值, 当超过这一点时, 脉宽和谱宽又展宽, 也就是说在这一点时间带宽积接近极限值。

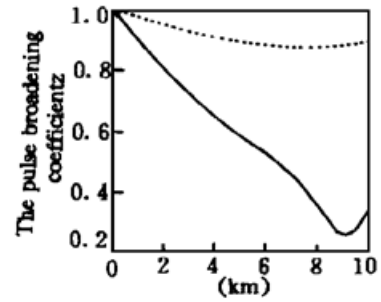
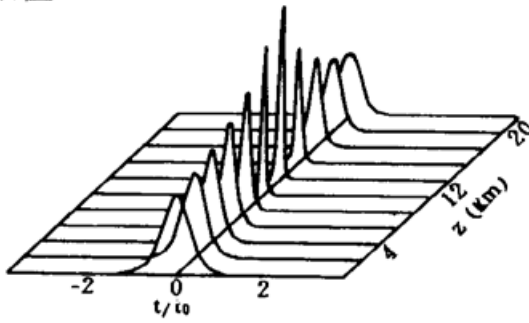


Fig. 2 The evolution of pulse transmission along normal dispersion fiber ( $c = -2.78$ ,  $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,  $L = 10 \text{ km}$ ,  $P = -6 \text{ dBm}$ )

Fig. 3 Relationship between the broadening coefficient and distance (solid curve represents pulse width in the time domain, dashed curve represents pulse width in the frequency domain) ( $c = -2.78$ ,  $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,  $L = 10 \text{ km}$ ,  $P = -6 \text{ dBm}$ )

2) 脉宽展宽因子、谱宽展宽因子与正常色散光纤色散量的关系:

从图 4 可见: 当入纤平均光功率为  $0.3 \text{ mW}$ , 初始啁啾参量为  $-2.78$ , 传输码率为  $1 \text{ Gbit/s}$  的光脉冲经过长度为  $4.5 \text{ km}$  正常色散光纤后, 色散参量越大, 负啁啾脉冲在正常色散光纤中脉宽越容易被压窄, 但对谱宽的影响不是很大。

3) 脉宽展宽因子、谱宽展宽因子与入射光功率的关系:

从图 5 可见: 初始啁啾参量为  $-2.78$ , 传输码率为  $1 \text{ Gbit/s}$  的光脉冲经过长度为  $4.5 \text{ km}$ , 色散参量为  $-4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$  正常色散光纤后, 入射光功率越强, 谱宽压得越窄, 而对脉宽变化影响不大, 因此可用适当提高入射光功率的办法来使脉冲到达变换极限。

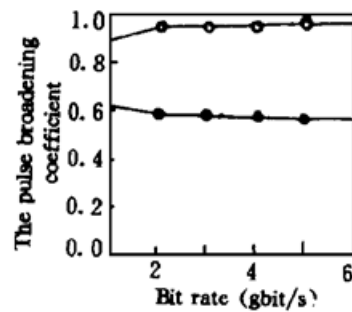
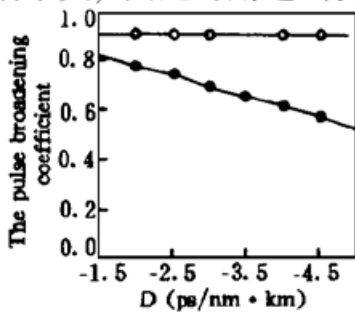


Fig. 4 Relationship between broadening coefficient and dispersion parameter (solid curve represents pulse width in the time domain, dashed curve represents pulse width in the frequency domain) ( $c = -2.78$ ,  $L = 4.5 \text{ km}$ ,  $P = -6 \text{ dBm}$ )

Fig. 5 Relationship between broadening coefficient and input optical power (solid curve represents pulse width in the time domain, dashed curve represents pulse width in the frequency domain) ( $c = -2.78$ ,  $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,  $L = 4.5 \text{ km}$ )

4) 脉宽展宽因子、谱宽展宽因子与初始啁啾的关系:

从图 6 可见: 入纤平均光功率为 0.3 mW, 比特率为 1 Gbit/s 的光脉冲经过长度为 4.5 km, 色散参量为 - 4 ps/nm · km 正常色散光纤后, 负啁啾脉冲啁啾量越大, 它在正常色散光纤中脉宽越容易被压窄, 而对其谱宽的影响不是很大, 但总趋势是越容易压窄。

5) 脉宽展宽因子、谱宽展宽因子与传输比特率的关系:

从图 7 可见: 入纤平均光功率为 0.3 mW, 初始啁啾参量为 - 2.78 的光脉冲经过长度为 4.5 km, 色散参量为 - 4 ps/nm · km 正常色散光纤后, 不同的比特率与皮秒脉冲的谱宽和脉宽的压窄关系不是很大。

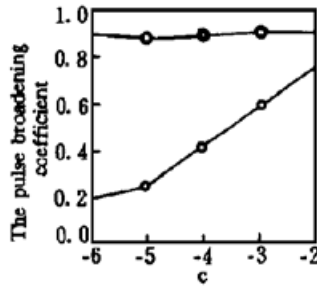


Fig. 6 Relationship between broadening coefficient and initial chirp parameter (solid curve represents pulse width in the time domain, dashed curve represents pulse width in the frequency domain) ( $D = - 4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,  $L = 4.5 \text{ km}$ ,  $P = - 6 \text{ dBm}$ )

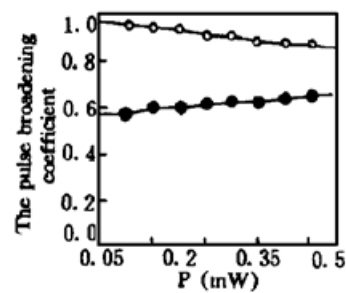


Fig. 7 Relationship between broadening coefficient and bit rate (solid curve represents pulse width in the time domain, dashed curve represents pulse width in the frequency domain) ( $c = - 2.78$ ,  $D = - 4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,  $L = 4.5 \text{ km}$ )

需要说明的是, 以上结论只在讨论范围内成立, 有些结论不具有普遍意义。由于实验条件的限制仅对情况 1) 和 3) 进行了实验研究。

### 4 实验装置

正常色散光纤消啁啾和孤子传输实验装置如图 8 所示。实验系统中所用激光器为武汉邮电科院生产的增益开关分布反馈式激光器, 阈值电流为 25 mA, 静态谱宽 0.08 nm, 动态谱宽 0.38 nm。因为调制高频电信号形状为梳状波, 所以动态谱宽比较窄。电信号重复频率为 1 GHz。所用取样示波器为 Tektronix 公司生产

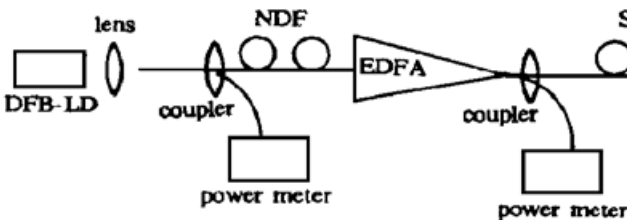


Fig. 8 The setup of optical soliton transmission

能测量最大频率为 2.5 GHz。频谱仪为惠普公司生产, 最小精细度 0.1 nm。光放大器为采用了两个 1480 nm 大功率半导体激光器作泵浦源的掺铒光纤放大器。其小信号增益大于 30 dB, 饱和输出平均光功率 9 dBm, 噪声系数小于 6 dB。强度自相关测量装置由迈克尔逊干涉仪, 倍频晶体, 滤光片, 光电倍增管和 X-Y 记录仪构成。倍频晶体为 LiIO<sub>3</sub> 晶体。作者研制的强度自相关仪精度为 ±1 ps, 能测量到的最小光脉冲平均功率为 300 μW<sup>[5]</sup>。用示波器测量脉冲重复频率, 用频谱仪测量光脉冲谱宽, 用自相关仪测量超短光脉冲脉宽。自相关仪测得

的脉宽为 20 ps(激光器的光脉冲形状为双曲正割型)。所用色散位移光纤(DSF)和正常色散光纤(NDF)均由武汉邮科院生产,正常色散光纤长度 4.5 km,中心波长为 1.556 μm 时,色散参量  $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,色散位移光纤由两段构成,均为 11.5 km,在波长为 1.556 μm 处色散参量平均为  $0.5 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ ,考虑到接头损耗,色散位移光纤和正常色散光纤损耗均为  $0.3 \text{ dB/km}$ 。所有光纤有效面积为  $56 \text{ μm}^2$ ,光纤有效折射率系数  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。所有光纤耦合器均为 1:9。

### 5 实验结果及讨论

不消啁啾时从激光器中出来的超短光脉冲用光谱仪测得的光谱如图 9 所示,谱宽为  $\Delta\lambda = 0.38 \text{ nm}$ ,用自相关仪测得的光脉冲形状如图 10(a)所示,脉宽为  $\Delta t = 20 \text{ ps}$ 。入纤平均功率为  $-6 \text{ dBm}$  的光脉冲经过长度为 4.5 km,色散参量  $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$  的正常色散光纤后,信号由光纤放大器放大,再由自相关仪检测得到的自相关曲线如图 10(b),脉宽被压窄到 11 ps,用光谱仪测得的光谱宽为 0.24 nm,亦被压窄。此时时间带宽积为 0.327,接近于变换极限 0.315。消啁啾后,当射入色散位移光纤平均光功率为 0.2 mW,经过 23 km 色散位移光纤传输后测量得到自相关曲线如图 10(c),脉宽为 11 ps,与入纤光脉冲脉宽相等,实现了一阶孤子传输。通过理论计算此时的入纤能量相当于考虑光纤损耗时 1.9 阶孤子能量水平(之所以需这样大的能量是由于存在剩余啁啾,一部分能量将会形成色散波损失掉),此时孤子周期为 95.97 km。增大光纤放大器的输出功率,当入纤平均光功率为 0.7 mW,经过 23 km 色散位移光纤传输后测量得到的自相关曲线如图 10(d),脉宽半宽度为 4.5 ps,实现了高阶孤子传输。通过理论计算此时的能量相当于考虑光纤损耗时 3.6 阶孤子能量水平,孤子周期为 95.97 km。

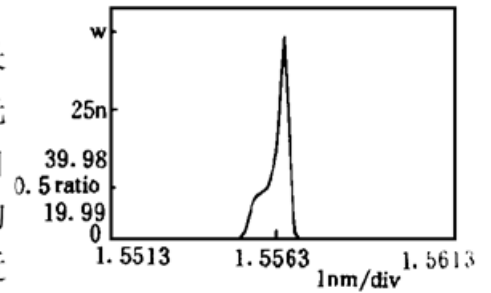


Fig. 9 Optical spectrum of initial optical pulse

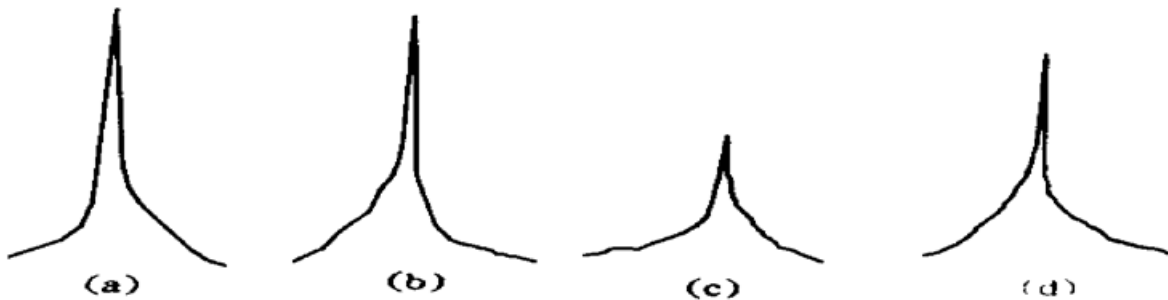


Fig. 10 (a) SHG autocorrelation trace of initial optical pulse, (b) SHG autocorrelation trace of elimination chirp pulse, (c) the fundamental soliton SHG autocorrelation trace of propagating 23 km. (d) the high-order soliton SHG autocorrelation trace of propagating 23 km

未经过 4.5 km 正常色散光纤,此时  $\Delta t \Delta \nu = 0.84$ ,由于光脉冲是双曲正割形,可以由(1)式得到啁啾参量  $C$  为  $-2.78$ 。经过 4.5 km 正常色散光纤后,  $\Delta t \Delta \nu = 0.325$ ,代入(1)式可求得  $C$  值为  $-0.25$ 。 $C$  绝对值小于 1.64,因而能够实现孤子传输。以上实验已经证明了这一点。

按照数值计算入纤平均光功率为 0.3 mW,码率为 1 Gbit/s 的光脉冲经过长度为 4.5

km, 色散值为 $-4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ , 损耗为 $0.3 \text{ dB/km}$ 的正常色散光纤后, 脉宽应为 $12.8 \text{ ps}$ , 谱宽应为 $0.30 \text{ nm}$ , 这个结果与实验结果基本一致, 但脉宽和谱宽较实验结果偏大, 这与数值计算时只考虑到线性啁啾没有考虑非线性啁啾有关。通过实验发现当改变射入正常色散光纤的功率时, 测得的谱宽将发生变化, 而且入纤功率越大, 谱宽越窄, 这与前面的数值分析一致。

**结 论** 本文分析了啁啾产生的原因, 对负啁啾在正常色散光纤中的传播特性进行了数值和实验研究, 结果基本一致。数值分析和实验表明正常色散光纤不仅能够压窄脉宽也能够压窄频谱, 而且光强越大谱宽压得越窄, 正常色散光纤色散量越大脉宽越容易压窄。消啁啾后成功的进行了一阶和高阶孤子传输实验。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yoshida *et. al.*, 160 Gbit/s soliton data transmission over 200 km. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(7) : 565~ 570
- [ 2 ] Marcel Schiess, Comparison of dispersion compensation schemes including fiber nonlinearities. *J. Opt. Commun.*, 1995, **16**(3) : 92~ 98
- [ 3 ] A. H. Gnauck, Transmission experiment using Er-doped fiber preamplifier and optical dispersion equalization. *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 1991, **PTL-3**(12) : 1147~ 1149
- [ 4 ] G. P. Agrawal 著, 胡国祥, 黄超译, 非线性光纤光学, 天津, 天津大学出版社; 1992 : 20~ 100
- [ 5 ] 余建军, 张晓光, 杨伯君, 利用二次谐波检测光孤子脉冲对晶体的考虑. *光通信研究*, 1996, **77**(1) : 14~ 18

## Characteristics of Negative Chirp Pulse Transmission along Single Mode Fiber

Yu Jianjun      Zhang Xiaoguang      Yang Bojun      Guan Kejian

(Beijing University of Communications and Posts, Beijing 100088)

(Received 26 April 1996; revised 18 October 1996)

**Abstract** The characteristics of the negative chirp pulse transmission along normal dispersion fiber was analysed by numerical method and measured experimentally. The numerical results were close to the experimental results. The results showed that the pulse width and spectral width could be compressed when the positive chirp pulse propagated along normal dispersion fiber. The fundamental and high-order optical soliton transmission were demonstrated by using normal dispersion fiber elimination chirp.

**Key words** chirp, soliton transmission, normal dispersion fiber, dispersion shifted fiber.