

利用高阶光孤子压缩效应获得 4.8 ps 超短 半导体激光脉冲

许宝西 高以智 钟 山 娄采云 姚敏玉

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 对有损光纤中高阶光孤子压缩进行了理论分析, 利用 F-P 光谱窗和高阶光孤子效应使增益开关 DFB 激光器输出光脉冲脉宽由 44.2 ps 压缩至 4.8 ps, 实验结果与理论结果相一致。

关键词 超短光脉冲, 脉冲压缩, 光纤非线性, 半导体激光器

1 引 言

超短脉冲半导体激光器以其体积小、可高重复率工作等优点而受到人们的重视, 尤其在高速率光孤子通信系统中更可发挥其独特的优点。

利用半导体激光器产生超短光脉冲的方法主要有: 锁模法和增益开关法。锁模法产生的光脉冲脉宽较窄, 但由于需要外腔, 结构复杂, 稳定性差, 并且光脉冲重复频率不可调。增益开关产生的光脉冲宽度一般在几十 ps, 但其方法简单, 重复频率可调, 为得到更短的光脉冲, 需要利用光脉冲压缩技术。

增益开关法产生的光脉冲含有红移频率啁啾, 利用正常色散元件(如正常色散光纤、G-T 干涉仪)消啁啾可在时域内压缩光脉冲, 得到近变换极限光脉冲。另外, 用 F-P 光谱窗在频域内压缩光脉冲频谱时, 在时域中也得到一定压缩, 同样可得到近变换极限光脉冲^[1]。利用高阶光孤子压缩技术可使近变换极限光脉冲的脉宽得到进一步压缩。

在对高阶光孤子脉冲压缩效应进行的理论分析中, 一般都没有考虑光纤损耗的影响, 文献[2]虽考虑了光纤损耗的影响, 但仅对较高阶数(4 阶以上)的情况进行了理论分析。对以半导体激光器为光孤子源的情况, 虽然可借助于光纤放大器提高光脉冲的功率, 但由于光脉冲是高重复率的, 光脉冲的峰值功率通常并不很高, 即光孤子阶数不可能很高, 因此, 必须考虑较低阶数情况(2~4 阶)光纤损耗的影响。

本文对有损光纤中较低阶数光孤子脉冲压缩进行了理论分析, 得到了在有损光纤中光脉冲压缩的最佳光纤长度和最窄光脉宽与光孤子阶数的关系曲线。实验上, 利用增益开关分布反馈(DFB)激光器, 并通过 F-P 光谱窗和高阶光孤子压缩技术得到了脉宽 4.8 ps, 重复频率 2.5 GHz 的高重复率超短光脉冲, 实验结果与理论结果基本一致。

2 光孤子效应压缩光脉宽原理

由于光纤中存在色散效应,光脉冲在光纤中传输时脉宽将展宽。在光纤的正常色散区,群色散参量 $\beta_2 = d(1/V_g)/d\omega > 0$ (V_g 为群速),色散参量 $D = d(1/V_g)/d\lambda < 0$,光脉冲的高频分量比低频分量传输速度慢,展宽后的光脉冲前沿频率低,后沿频率高。在光纤的反常色散区, $\beta_2 < 0$, $D > 0$,光脉冲的高频分量传输速度快,展宽后的光脉冲前沿频率高,后沿频率低。

如果考虑到光纤的非线性效应,光脉冲的传输特性将有显著变化。考虑非线性效应 (Kerr 效应) 时,光纤的折射率 $n(\omega, I)$ 与光强 I 之间有关系式

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2 I \quad (1)$$

$n_0(\omega)$ 为不考虑非线性效应时光纤的折射率, n_2 为光纤非线性系数,对石英光纤, $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。光脉冲在光纤中传输时,脉冲不同部位光强不同,对应折射率也就不同,在传输过程中将产生不同相移,这种现象称为自相位调制 (SPM)。SPM 造成脉冲光谱展宽。对于钟形光脉冲,SPM 效应使光脉冲不同瞬间具有不同的频率,前沿频率降低,后沿频率升高。在光纤的反常色散区,光脉冲前沿传输速度慢,后沿传输速度快,因此光脉冲得到压缩。

当光纤中的非线性压缩效应和色散展宽效应相平衡时,光脉冲在传输过程中将保持波形不变,形成一阶光孤子传输,这正是光孤子通信的基础。一阶光孤子传输所需峰值功率为

$$P_1 = 0.776 \frac{\lambda^3 A_{\text{eff}} D}{\pi^2 c n_2 \Delta t^2} \quad (2)$$

式中 λ 为光波长, A_{eff} 为光纤模场面积, c 为光速, Δt 为光脉冲宽度 (FWHM)。如果光脉冲很强,非线性效应超过色散效应,则形成形状周期变化的高阶孤子脉冲传输。A 阶光孤子所需光脉冲功率为

$$P_A = A^2 P_1 \quad (3)$$

脉冲变化周期称为孤子周期 Z_0 ,

$$Z_0 = 0.322 [(\pi^2 c \Delta t^2)/(\lambda^2 D)] \quad (4)$$

在一个孤子周期内高阶光孤子脉冲传输将经历脉冲压缩、分裂、恢复等过程,如果适当选取传输光纤的长度使高阶入射光脉冲经传输后正好达到脉冲的压缩点,就可达到最佳光脉冲压缩效果,获得最窄光脉冲输出。光脉冲阶数越高,在最佳脉冲压缩点得到的光脉宽越窄,最佳光纤长度也越短。文献[3]给出了最佳光纤长度和压缩后光脉冲宽度与入射光孤子阶数之间的关系曲线。上面的光孤子传输特性是在不考虑光纤损耗情况下得到的,当用于光孤子压缩时,在光孤子阶数高、所用光纤较短情况下是适用的。当光孤子阶数较低、所需光纤较长时就必须考虑光纤的损耗。

高阶光孤子在有损光纤中传输时,光纤损耗将使光孤子阶数不断降低,光脉冲波形不再具有严格的周期性变化,这样,以入射光孤子阶数计算时,光脉冲压缩的最佳光纤长度和最窄脉宽都将与无损光纤情况下得到的结果不同。光脉冲在有损光纤中传输遵循非线性薛定谔方程^[4]

$$j \frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial s^2} + |V|^2 V = -j \Gamma V \quad (5)$$

式中 V 、 s 和 ξ 分别为归一化光脉冲电场包络函数、时间坐标和位置坐标。归一化损耗系数

$$\Gamma = (2/\pi)(Z_0 a/20000)(\log e)^{-1}$$

a 为光纤的损耗系数。对(5)式进行数值模拟计算,得到的最佳压缩光纤长度和最窄光脉冲的压缩因子(输出脉宽 Δt_{min} /输入脉宽 Δt)与入射光孤子脉冲阶数关系曲线如图 1,计算中,入射

光脉冲及光纤参量为：光脉宽 $\Delta t = 18.4$ ps, 光纤色散参量 $D = 2.4$ ps/km/nm, 损耗 $\alpha = 0.33$ dB/km, 模场直径 $d = 8.45$ μm 。为了比较, 图 1 中还给出了无损情况下的关系曲线。

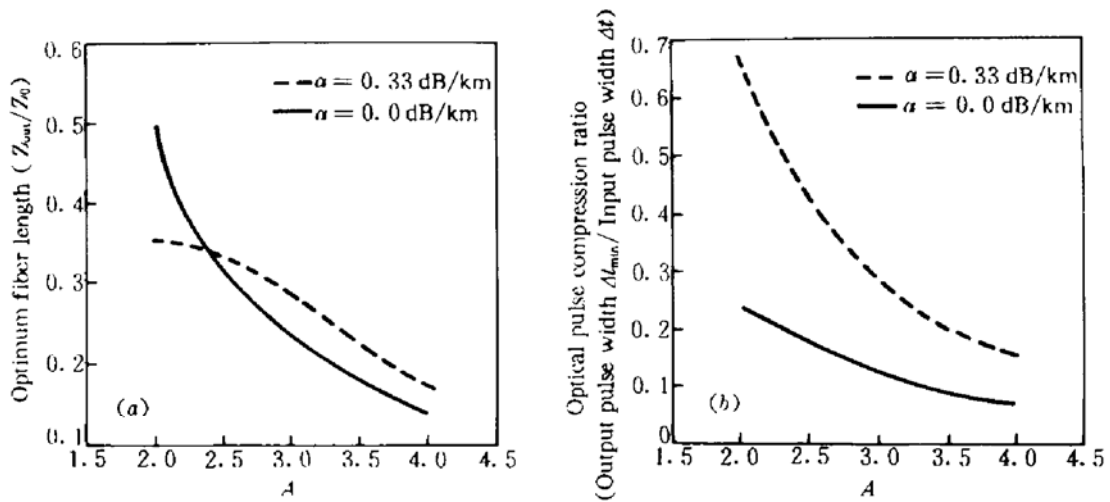


Fig. 1 Optical fiber length (a) and compress factor (b) as a function of input soliton order

当光孤子阶数较低时 ($A < 2, 3$ 阶), 由于所需光纤长度较长, 在还没有达到无损时的最佳压缩点时, 损耗的积累已使光脉冲功率降低到不足以抵消光纤色散效应的程度, 脉冲开始展宽, 因此, 光纤最佳长度比无损情况最佳长度短, 所得最窄光脉冲比无损情况时的脉冲宽。当光孤子阶数高时 ($A > 2, 3$ 阶), 由于所需光纤长度较短, 在达到无损时的最佳压缩点过程中, 损耗作用使得光孤子阶数不断降低, 而低阶数脉冲的最佳压缩光纤长度长, 因此, 高阶数光孤子的最佳压缩光纤长度比无损情况时的最佳长度长。由于光孤子阶数越低所得最窄压缩光脉冲越宽, 因此得到的最窄光脉冲比无损情况脉冲时的宽。

总之, 考虑光纤损耗后脉冲压缩情况与无损情况时的不同, 光孤子阶数低时所需光纤短, 阶数高时所需光纤长, 但无论阶数如何, 所得光脉冲宽度都比无损情况光脉冲宽。

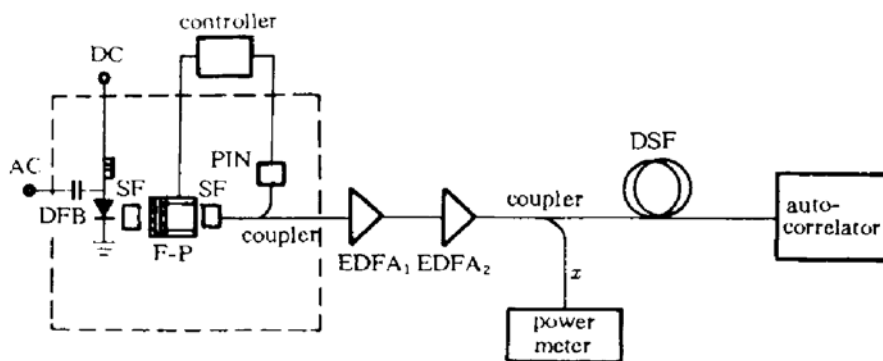


Fig. 2 Experimental setup

3 光孤子压缩实验

实验装置如图 2。重复频率 2.5 GHz 的增益开关 DFB 激光器输出光脉冲宽度为 44.2 ps, 谱宽为 1.1 nm, 光脉冲自相关曲线与光谱如图 3 所示。输出光脉冲经镜面反射率 0.9, 间隔 300 μm 的 F-P 光谱窗消啁啾后得到近变换极限光脉冲, 其宽度为 18.0 ps, 谱宽为 18 GHz, 时间带宽积为 0.324。消啁啾后光脉冲自相关曲线与光谱如图 4 所示。消啁啾后光脉冲经两个泵

浦波长分别为 980 nm 和 1480 nm 的掺铒光纤放大器(EDFA)放大后峰值功率达到 137.9 mW。放大后的光脉冲注入 21 km 色散位移光纤(DSF), 光纤色散参量 $D = 2.4 \text{ ps/km/nm}$, 平均损耗 $\alpha = 0.33 \text{ dB/km}$, 模场直径 $8.45 \mu\text{m}$ 。

由(2)~(4)式可以得出, 光孤子周期为 $Z_0 = 53.6 \text{ km}$, 一阶光孤子峰值功率 $P_1 = 12.7 \text{ mW}$, 注入光脉冲阶数为 $A = 3.29$, 从图 1 可得出最佳光纤长度为

$$Z_{\text{opt}} \approx 0.25 \times Z_0 = 13.4 \text{ km}$$

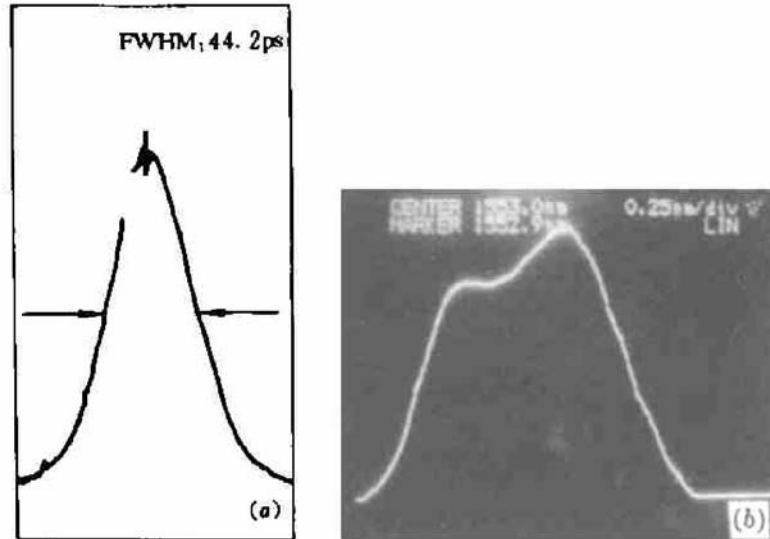


Fig. 3 Autocorrelation curve (a) and spectrum (b) of optical pulses before chirp elimination

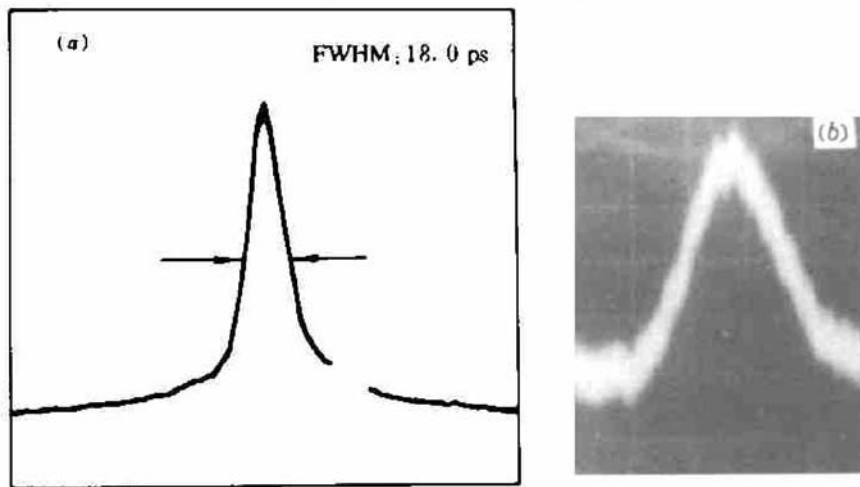


Fig. 4 Autocorrelation curve (a) and spectrum (b) of optical pulses after chirp elimination

最窄光脉宽为

$$\Delta t_{\text{min}} \approx 0.22 \Delta t_0 = 3.96 \text{ ps}$$

$A = 3.29$ 时输出光脉冲与光纤长度的关系如图 6 所示。当光纤长度为 21 km 时, 输出光脉冲应压缩至 5.7 ps, 压缩因子为 3.16。实验测得 21 km 光纤输出光脉冲自相关曲线如图 5 所示, 自相关曲线宽度为 7.5 ps, 实际脉宽为 4.8 ps。

4 结 论

利用高阶光孤子效应进行光脉冲压缩时, 若入射光功率较小, 孤子阶数较低, 因而, 所用光纤较长时, 必须考虑光纤的损耗。在考虑光纤损耗的情况下, 我们对压缩光脉冲的最佳光纤长

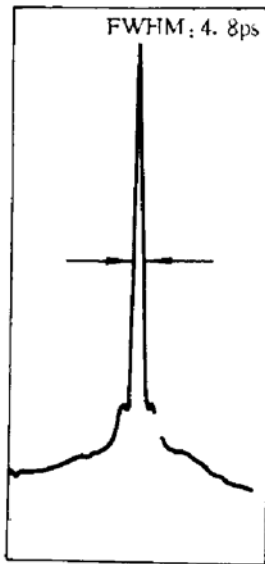


Fig. 5 Autocorrelation curves of compressed optical pulses

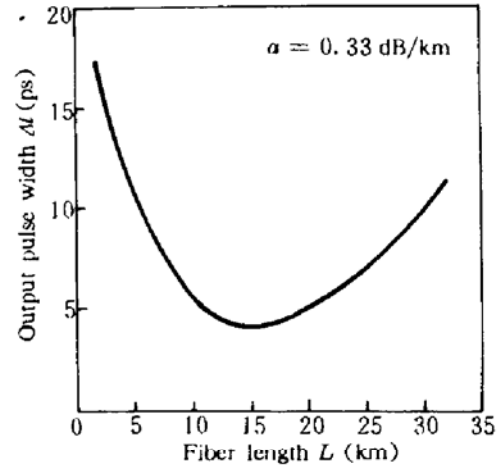


Fig. 6 Theoretical variation of output pulse width with fiber length while $A = 3.29$

度和所得最窄光脉冲宽度进行了理论计算,得到了最佳光纤长度和最窄光脉冲宽度与输入光脉冲阶数的关系曲线。实验上,利用增益开关 DFB 激光器及 F-P 光谱窗滤波技术得到了近变换极限光脉冲(脉宽从 44.2 ps 变为 18.0 ps),再利用高阶光孤子压缩技术得到了脉宽 4.8 ps,重复率为 2.5 GHz 的光脉冲。实验结果与理论计算结果基本一致。

致谢 参加本工作的还有李艳和、周炳琨教授。

参 考 文 献

- 1 Baoxi Xu *et al.*. Generation of GHz repeat rate hyperbolic secant nearly transform-limited pulses. *Chinese J. of Lasers*, 1993, **B2**(4): 307~311
- 2 曹文华 等. 光纤损耗对皮秒脉冲孤子效应压缩的影响. *光学学报*, 1993, **13**(11): 1003~1007
- 3 L. F. Mollenauer *et al.*. Extreme picosecond pulse narrowing by means of soliton effect in single-mode optical fibers. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(5): 289
- 4 M. Nakazawa *et al.*. Dynamic optical soliton communication. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1990, **QE-26**(12): 2095

Generation of 4.8 ps Ultrashort Semiconductor Laser Pulses by High-order Optical Soliton Compression Effect

Xu Baoxi Gao Yizhi Zhong Shan Lou Caiyun Yao Minyu

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract High-order optical soliton compression effects in a loss fiber were analyzed in theory. 4.8 ps-pulses at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ were obtained by using a F-P spectral window and high-order optical soliton compression from 44.2 ps-pulses which were generated from a gain-switched DFB laser. The experimental results agree well with those expected theoretically.

Key words ultrashort optical pulse, optical pulse compression, optical fiber nonlinearity, semiconductor laser