

基于光子晶体光纤的全光再生理论和实验研究

徐永钊¹, 张霞², 黄永清², 任晓敏²

(1. 东莞理工学院电子工程系, 广东 东莞 523808; 2. 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要:提出了利用高非线性光子晶体光纤(PCF)的自相位调制效应(SPM), 实现对高重复率皮秒脉冲全光再生的方案, 理论分析了再生器的传输特性和滤波器参量对再生特性的影响。此外, 利用一段80m的非线性光子晶体光纤进行了全光再生实验, 通过调节入射光纤的功率和可调谐滤波器的参量实现了对高传输速率脉冲的全光再生, 实验结果与理论分析结果一致。

关键词:光通信; 光子晶体光纤; 全光再生; 自相位调制

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Theoretical and Experimental Investigation of All-optical Regeneration Based on Photonic Crystal Fiber

XU Yong-zhao¹, ZHANG Xia², HUANG Yong-qing², REN Xiao-min²

(1. Department of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China;

2. Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: All-optical regeneration of high repetition picosecond pulse based on self-phase modulation (SPM) in a highly nonlinear photonic crystal fiber (PCF) is proposed. Transmission characteristics of the regenerator and filter parameters on regenerator performance are investigated. Furthermore, all-optical regeneration using an 80-m-long nonlinear photonic crystal fiber is demonstrated experimentally. By adjusting the input power into the fiber and the parameters of the tunable filter, optical regeneration for high bit rate signals is achieved. The experiment results agree well with the theoretical results.

Key words: optical communications; photonic crystal fiber; all-optical regeneration; self-phase modulation

1 引言

当传输速率接近40Gbit/s时,当前的电子信号处理的速度已接近极限,全光信号处理,包括全光再生在对于未来高比特率的通信系统是十分重要的^[1-2]。在未来的高速(>100Gbit/s)、长距离光纤传输系统,由于色散和传输光纤非线性等因素将会对传输信号造成严重的损伤,因此使用在线全光信号再生器是增加传输距离的有效方法。在线全光再生技术将很可能在未来大规模光网络中发挥重要作用。

1998年, Mamyshev提出了一种基于光纤自相位调制效应(SPM)的全光再生技术^[3]。该再生器仅使用一段光纤和一个带宽滤波器,由于结构简单,所以很有吸引力,而且该技术是基于光纤的Kerr效应,不受响应时间的限制,具有对比特率的透明性(超过几百Gbit/s的速率)。这种再生器自从其提

出以来,其在理论和实验上受到人们极大的关注^[4-5]。目前,利用各种新型光纤、光电子器件进行全光再生是光纤通信中的一个研究热点。光子晶体光纤(PCF)又称为微结构光纤(MF),由于在色散和非线性的设计方面十分灵活^[6-7],因此它在光通信领域有广泛的应用^[8-10],并为光再生光纤提供了一个重要的选择。本文采用具有高非线性系数、小正常色散的光子晶体光纤作为光再生光纤,开展了高重复率皮秒脉冲的全光再生的研究,得到了有意义的研究结果。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2003CB314906); 教育部科学技术研究重大项目基金(No. 104046)资助。

作者简介: 徐永钊(1972-),男,博士,主要从事光纤通信技术及非线性光纤光学方面的研究。E-mail: xuyongzhao@gmail.com

收稿日期: 2008-07-07; **修订日期:** 2008-08-03

2 基于 SPM 效应的全光再生的原理

基于 SPM 效应的全光再生原理如图 1 所示。传输后受损伤的归零(RZ)光脉冲信号通过光放大后输入到光再生光纤,由于 SPM 效应脉冲的频谱得到展宽,由于频谱的展宽效应与光脉冲的强度相关,因此强度较高的光信号获得的频谱展宽较宽,而强度低的噪声获得的频谱展宽较小。在光再生光纤的输出端,将可调谐滤波器的中心波长偏移入射脉冲的中心波长一定距离,并选取合适的滤波带宽,使得噪声的频谱不能到达滤波窗,而仅让光信号的频谱可以从滤波窗口中透射,从而达到抑制噪声和信号再生的目的。

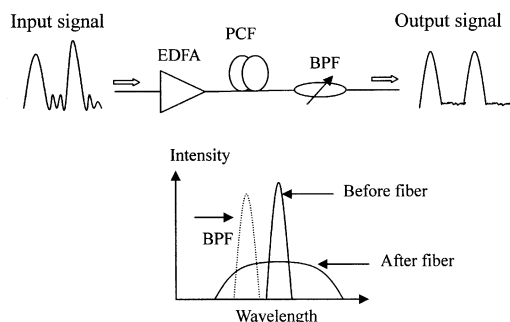


图1 基于自相位调制效应的全光再生原理图

BPF: band-pass filter 带通滤波器

光再生光纤的非线性系数和色散选择对再生器的传输特性有很重要的影响。非线性系数大,能增强 SPM 效应,降低输入功率,减少光再生光纤的长度。同时光纤也需要具有一定的色散。如果没有色散,光在光纤中传输时只有非线性效应起作用,则展宽的光谱将出现很大的振荡幅度,通过滤波后,再生器的功率传输函数表现为振荡的结构。一定量正常色散可以减小光谱的振荡,并可以获得较佳的功率传输函数。要获得最佳的传输函数曲线,光再生光纤的长度需符合以下的要求^[4]:

$$L_{\text{OPT}} \cong 2.4 \times \frac{L_D}{N} \quad (1)$$

式(1)的适用范围是 $10 < N < 25$ 。其中, $N = (L_D / L_{\text{NL}})^{1/2}$ 为孤子阶数; $L_D = T_0^2 / \beta_2$ 为色散长度; $L_{\text{NL}} = (\gamma P_0)^{-1}$ 为非线性长度; T_0 是在光强度峰值 $1/e$ 处得脉冲半宽度; β_2 为群速度色散参量; P_0 为输入光子晶体光纤的峰值功率; γ 为光子晶体光纤的非线性系数。对于给定的输入脉冲,可以根据式(1)选取适当的光纤参量。例如,若脉冲的宽度 $T_{\text{FWHM}} = 6\text{ps}$ (对于高斯脉冲 $T_{\text{FWHM}} \approx 1.665 T_0$), PCF 的非线性系数 $\gamma = 11\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 色散参量 $D = -2\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1}\text{km}^{-1}$, 可以得到 $L_D = 5.09\text{km}$, 根据式(1),最佳的光纤长度范围为 $(0.49 \sim 1.22)\text{km}$ 。基于上述的脉冲和光纤参量,并选取 PCF 的长度 $L_{\text{OPT}} = 0.6\text{km}$,进行了基于 PCF 中 SPM 效应的全光再生的仿真。

3 研究结果与分析

设初始信号为高斯脉冲,宽度 $T_{\text{FWHM}} = 6\text{ps}$,中心

波长为 1550nm ,速率为 40Gbit/s ,可调谐滤波器为高斯型滤波器。如图 2(a)所示为初始脉冲信号的波形,如图 2(b)所示为经过传输后失真信号的波形。由图可见,信号的质量发生了明显的劣化。将失真信号的峰值功率经过 EDFA 放大到 6.5W 后输入到光子晶体光纤,通过光纤后脉冲的频谱获得了很大的展宽,如图 3(a)所示。为了便于比较,图 3(a)同时给出了输入 PCF 前脉冲的光谱图。调节滤波器的中心波长偏离初始信号的中心波长 1.5nm ,选取滤波器带宽为 0.59nm (73.5GHz),对展宽的光谱进行滤波。滤波后的再生信号如图 3(b)所示,再生信号完全消除了幅度抖动,噪声受到显著的抑制,脉冲宽度为 6.01ps ,达到了很好的再生效果。

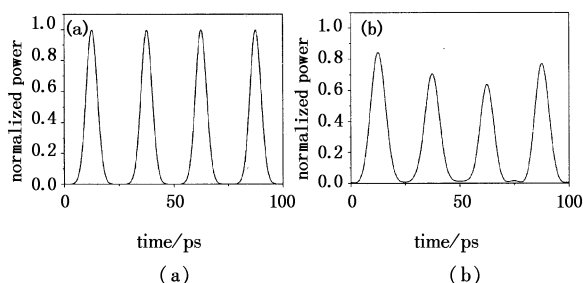


图2 初始信号的波形图(a)和失真信号的波形图(b)

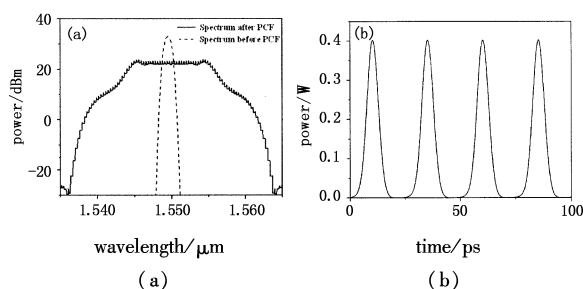


图3 经过光纤后展宽的频谱(a)与经过滤波器后的再生信号波形图(b)

3.1 再生器的传输特性

保持再生器参量不变,仅改变输入 PCF 的脉冲峰值功率,研究了该光再生器的传输性能。再生器的具体参量如表 1 所示。图 4 为随入射功率的增加,通过 PCF 后脉冲的光谱展宽及其进入滤波器的情形。可以注意到光谱展宽的过程伴随着许多小峰,这正是 SPM 展宽频谱的特征。随着入射功率的增加,谱峰的强度逐渐减小,光谱变平坦。当入纤功率较小时,光谱展宽较小,再生效果较差。当输入峰值功率的增加一定程度,就能获得较好的再生效果。

表1 再生器的参量

| 光子晶体光纤参量 | | 滤波器参量 | |
|----------|---|---------|-----------------|
| 光纤长度 | 0.6km | 中心波长偏移量 | 1.5nm |
| 非线性系数 | $11\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ | 滤波器带宽 | 0.59nm(73.5GHz) |
| 光纤色散 | $-2\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ | | |

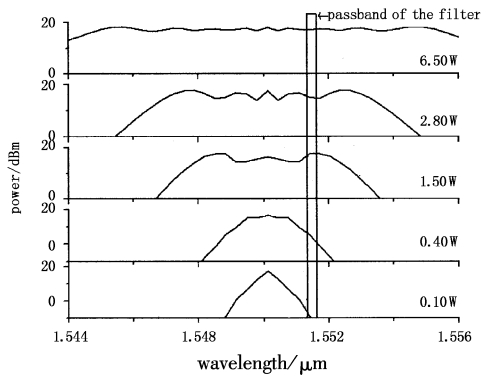


图4 输入峰值功率逐渐增加时,光谱的展宽及其进入滤波器的情形
 在不同输入功率的情况下,测量了透射信号的功率,得到了再生器的功率传输函数曲线,如图5所示。由图可见,当输入信号功率较小时,再生信号功率很小。随输入功率的增加,再生信号的功率迅速增加,并获得近似阶跃状的传输函数曲线。但曲线具有一定的振荡结构,这是由于展宽的光谱具有振荡结构造成的。

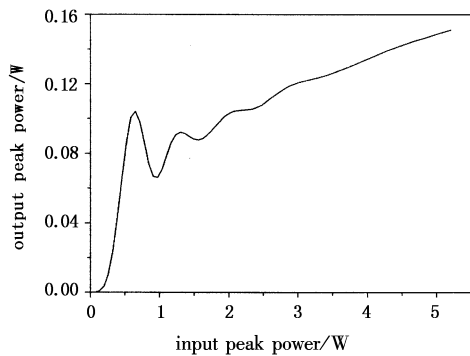


图5 光再生器的传输函数曲线

3.2 滤波器参量对再生器性能的影响

滤波器的带宽和滤波中心波长对于再生的效果有重要的影响。对于高斯型滤波器,传输函数可表示为 $H(\omega) = \exp[-(\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega^2]$, 通过改变滤波器的中心频率 ω_0 和带宽 $\Delta\omega$ 可以优化再生的性能。再生脉冲的频谱宽度由 $\delta\omega$ 决定,对于变换极限脉冲,再生信号的脉冲宽度由滤波器的带宽决定。如对于任意宽度的非啁啾高斯脉冲,频谱宽度 $\Delta\nu$ 和脉冲宽度 Δt 的乘积应满足。因此对宽度为 6ps 的高斯脉冲,滤波器的带宽应为 73.5GHz (0.59nm)。为了实现良好的光再生效果,需同时选择好滤波器的中心频率 ω_0 (与中心波长对应)。仿真结果表明,当滤波器中心波长偏离信号中心波长较小时,再生信号的质量较差。随着滤波器波长偏移量的增加,再生效果变好。但偏移量超过一定程度时,由于光谱的强度不断下降,再生脉冲的强度也随之下降。合理选择滤波器的带宽和滤波中心波长,再生器可以对不同脉冲宽度的输入信号进行再生。

4 实验结果与分析

实验使用一段 80 米的非线性 PCF 作为光再生光纤。该光纤由丹麦 Crystal Fiber 公式提供,其非线性系数为 $11\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。光纤具有小正常色散,在 1550nm 波长处色散值为 $-0.58 \cdot \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。在 1500 ~ 1650nm 波长范围内,色散量的变化小于 $1.5(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$ 。图 6(a)、图 6(b)分别为 PCF 的端面图和色散曲线。

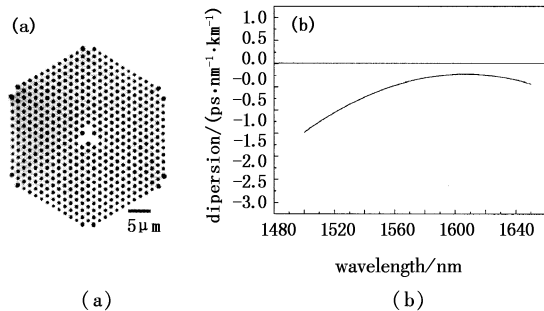


图6 高非线性光子晶体光纤的截面图(a)和色散曲线(b)

实验装置如图 7 所示。主动锁模半导体激光器产生宽度约 1.6ps (FWHM), 中心波长为 1550nm, 速率为 10Gbit/s 的光脉冲,平均功率为 -7dBm。光脉冲输入到一段单模光纤,并加入了噪声,传输脉冲受到了损伤。受损伤的脉冲经过 EDFA 放大后,入射到 PCF,输出光经过衰减和可调谐滤波器滤波后,分别输入光示波器和光谱分析仪进行观测。通过调节输入 PCF 的功率和可调谐滤波器的参量,以实现全光再生。如图 8(a) 所示为激光器输出的中心波长在 1550nm 的初始脉冲,如图 8(b) 所示为经过传

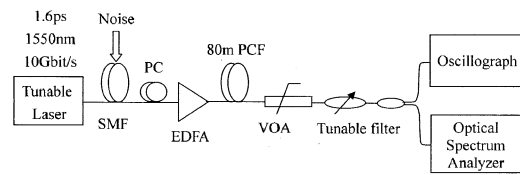


图7 实验装置图

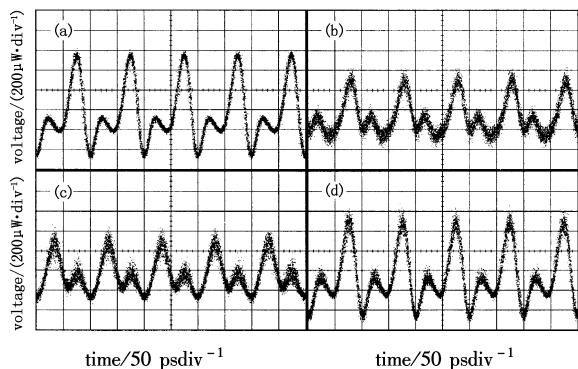


图8 脉冲的波形

(a) 激光器输出的初始脉冲;(b) 传输后受损伤的脉冲;
 (c) 在 1550nm 波长处滤波得到的脉冲;(d) 在 1557nm 波长处滤波得到的脉冲

输后受损伤的脉冲。将受损伤的脉冲经 EDFA 放大到 0.41W (平均功率) 后输入到 PCF。脉冲经过 PCF 后频谱被展宽, 调节可调谐滤波器, 分别在不同波长处对展宽的光谱进行滤波。如图 8(c)、图 8(d) 分别为在 1550nm 和 1557nm 波长处滤波得到的脉冲。由图可见, 在 1550nm 波长处滤波, 获得的是仍然是失真的脉冲, 而在 1557nm 波长处则获得了再生脉冲。

保持其他参量不变, 仅改变脉冲输入 PCF 的平均功率, 研究了该光再生器的传输性能。如图 9 所示为不同输入功率的情况下, 光谱的展宽及其进入滤波器的通带的情形。图 10 为测量得到再生器的传输函数曲线。由图可见, 当输入 PCF 的信号功率较小时, 透射功率几乎为零。当入射功率增加到一定程度后, 透射脉冲的功率随入射功率迅速增加, 并获得如阶跃状的函数曲线。但传输函数曲线的振荡结构较显著, 主要原因是光纤长度没有选取最佳长度。合理选择入射脉冲的峰值功率, 用较小的入射功率, 即可实现较好的再生效果。实验结果与理论分析吻合。

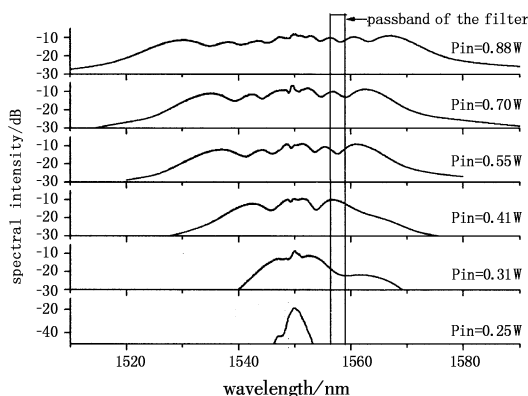


图9 输入 PCF 的平均功率逐渐增加时
光谱的展宽及其进入滤波器的情形

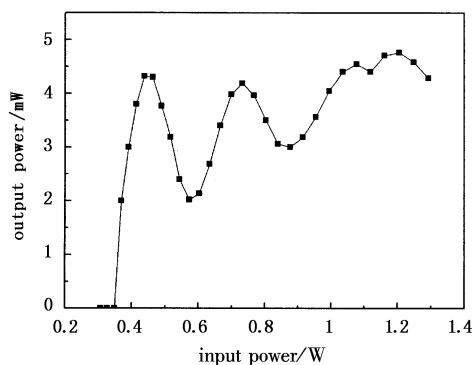


图10 光再生器的传输函数

5 总结

本文对基于 PCF 中 SPM 效应的全光再生方案进行了理论和实验研究, 分析了输入光纤峰值功率

和滤波器参量对再生特性的影响, 研究结果表明, 由于 PCF 具有高非线性, 采用较短的光纤长度就可以实现较好的光再生效果。入射脉冲的功率和滤波器参量对光再生有重要的影响。为了实现光再生, 入射到光再生光纤的功率必需满足一定的要求, 同时需要选择好滤波器的参量。合理选择入射脉冲的功率, 用较小的入射功率, 即可实现较好的再生效果。该再生器结构简单、紧凑, 对光信号具有传输透明性, 能实现对高速率光脉冲信号的再生。但该再生器也有缺点, 即再生脉冲的中心波长发生了改变。利用两级再生的方法, 可以把第一次再生脉冲的中心波长再变换为原来初始的中心波长。

参考文献:

- [1] O Leclerc, B Lavigne, E Balmefrezol, et al. Optical regeneration at 40 Gb/s and beyond [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, 21(11): 2779 - 2790.
- [2] Z Huang, A Gray, I Khrushchev, et al. 10 - Gb/s transmission over 100 mm of standard fiber using 2R regeneration in an optical loop mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(11): 2526 - 2528.
- [3] P V Mamyshev. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect [C]// ECOC'98., 1998, 1: 475 - 476.
- [4] T H Her, G Raybon, C Headley. Optimization of pulse regeneration at 40 Gb/s based on spectral filtering of self-phase modulation in fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 200 - 202.
- [5] F Parmigiani, S Asimakidis, N Sugimoto, et al. 2R regenerator based on a 2 - m - long highly nonlinear bismuth oxide fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(12): 5038 - 5044.
- [6] 汪徐德, 罗爱平, 邓丽琼, 等. 变孔径色散补偿光子晶体光纤的数值研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 37(4): 355 - 358.
- [7] 苑金辉, 侯蓝田, 魏东宾, 等. 平坦色散高非线性光子晶体光纤的研究与制备 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(3): 270 - 274.
- [8] 何理, 杨伯君, 张晓光, 等. 光子晶体光纤特性及光通信中的应用 [J]. *量子光学学报*, 2006, 12(4): 225 - 230.
- [9] Xia Zhang, Ren Xiaomin, Wang Zinan, et al. Four-wave mixing based 10Gbit/s tunable wavelength conversion in dispersion-flattened microstructure fibers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(7): 386 - 388.
- [10] 胡颀, 王健. 低折射率芯色散补偿光子晶体光纤的设计 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(4): 367 - 370.