

文章编号: 0258-7025(2008)03-0414-04

基于微结构光纤中交叉相位调制效应的波长变换

王子南 徐永钊 张 霞 黄永清 任晓敏

(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 利用光波在一段 80 m 长的微结构光纤(MSF)中的交叉相位调制效应实现了对 10 GHz 时钟信号的全光波长变换, 变换带宽超过 30 nm。该实验所使用的微结构光纤非线性系数约为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 其在 1530~1570 nm 波长范围内具有小的正常色散和平坦的色散曲线。实验结果表明, 利用这种微结构光纤可以实现结构紧凑的宽带波长变换器。

关键词 光通信; 微结构光纤; 波长变换; 交叉相位调制

中图分类号 TN 253; TN 929. 11 **文献标识码** A

Wavelength Conversion Based on Cross-Phase Modulation in Microstructure Fibers

Wang Zinan Xu Yongzhao Zhang Xia Huang Yongqing Ren Xiaomin

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

Abstract All optical wavelength conversion of the 10-GHz clock signal is demonstrated based on cross-phase modulation of optical pulses in an 80 m long microstructure fiber (MSF), and the conversion bandwidth is over 30 nm. The experimental microstructure fiber with a nonlinear coefficient of $\sim 11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ has small normal dispersion and flat dispersion curve from 1530 nm to 1570 nm. The experimental results show that a compact wavelength converter can be realized by utilizing this microstructure fiber.

Key words optical communication; microstructure fiber; wavelength conversion; cross-phase modulation

1 引 言

全光波长变换是指不经过光电转换, 直接将加载在输入初始波长上的信号转移到新的波长上的变换方式。它能增加波长的利用效率, 克服波分复用(WDM)光网络交换节点处因波长竞争所造成的网络阻塞问题, 还可实现波长路由和虚拟波长通道功能, 提高光网络控制与管理的灵活性, 因此开发实用的全光波长转换技术已经引起了广泛的关注^[1]。典型的波长变换技术包括光纤中的四波混频^[2]、交叉相位调制^[3]等等, 目前利用微结构光纤(MSF)实现各种方式的波长变换成为研究热点之一^[4,5]。

微结构光纤的包层由在二维方向上排列的具有波长量级的空气孔组成^[6]。通过改变微结构光纤空气孔的大小、排列及形状等结构参量, 可以实现许多传统光纤所没有的特性^[7~12], 为克服传统光纤发展中的一些技术障碍提供了可能的解决途径。由于微结构光纤在色散和非线性系数两方面都具有很大的设计自由度, 因此它在各种基于光纤的功能器件中具有很大的应用前景^[13,14]。

目前在基于交叉相位调制产生新的频谱边带的原理, 利用纯石英微结构光纤进行波长变换的实验中, 对于 10 GHz 脉冲的转换带宽达到了 15 nm^[15]。本文报道了利用一段 80 m 的色散平坦高非线性微

收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-09-20

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314906)和教育部科学技术研究重大项目(104046)资助课题。

作者简介: 王子南(1981—), 男, 江苏人, 博士研究生, 主要从事光纤通信技术、非线性光纤光学方面的研究。

E-mail: wangzinan@gmail.com

导师简介: 任晓敏(1958—), 男, 山西人, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信、通信光电子学、半导体光电子学方面的研究。

E-mail: xmren@bupt.edu.cn

结构光纤,在1550 nm波段对速率为10 GHz的皮秒时钟脉冲进行波长变换的实验,在实验中获得了超过30 nm的波长转换带宽。

2 实验装置及实验原理

实验装置如图 1 所示。其中包括两台980 nm 双抽运掺铒光纤放大器(EDFA),80 m长的微结构光纤,可调谐光带通滤波器(OTF),皮秒脉冲激光器,可调谐连续激光器(CW Laser),两个偏振控制器(PC),功分比均为 50:50 的 2×1 耦合器(OC2)和 2×2 耦合器(OC1)各一个。光带通滤波器在 1530~1570 nm波长范围内可连续调谐,其3 dB带宽为0.95 nm;皮秒脉冲激光器直接输出的激光脉冲宽度约为2 ps,脉冲重复频率为10 GHz。

可调谐连续激光器产生的连续光波经过掺铒光纤放大器放大后,经由 2×2 耦合器的 1 端口进入光纤环境。在理想情况下,如果没有外加脉冲,由于这两束功率相等的光绕环一周后的相移增量相同,两束光发生干涉后将全部返回端口 1^[16]。由于在实际的环路中存在双折射和模耦合等现象,无法维持两臂的精确平衡,因此还是有部分的光从耦合器端口 2 透射出来,实验中测量得到的隔离度为18.5 dB。

公司提供,横截面如图 2 所示,其实测色散曲线已在产品说明中给出,如图 3 所示。根据色散曲线可以计算出控制光的色散长度 L_D

$$L_D = \frac{2\pi c T^2}{|D|\lambda^2}, \tag{1}$$

式中 c 为真空中的光速, T 为控制脉冲的宽度, D 为光纤色散值, λ 为控制光的波长。根据图 3 给出的色散曲线及(1)式可知控制光在 1530~1570 nm之间时,色散长度大于3.2 km,而实验中采用的微结构光纤长度仅为80 m,因此色散对控制光的影响较弱^[18]。

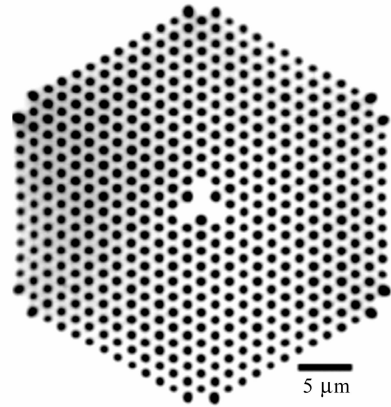


图 2 微结构光纤横截面的显微图

Fig. 2 Micrograph of the cross section of the MSF

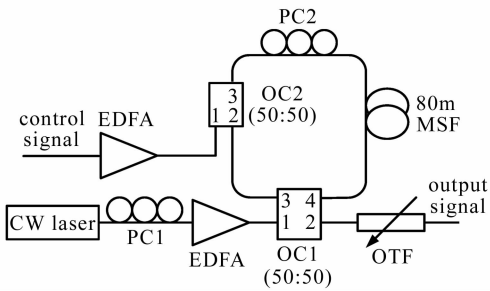


图 1 基于微结构光纤的波长变换实验光路图

Fig. 1 Experimental setup of wavelength conversion based on MSF

皮秒脉冲激光器产生的脉冲光作为控制光,经过掺铒光纤放大器放大后由 2×1 耦合器的端口 1 进入。控制光由 2×1 耦合器的端口 3 沿顺时针方向进入环路后,分别与两束连续光发生不同程度的交叉相位调制,引起两者的非线性相移差。由于控制光与对反向传播的连续光之间的交叉相位作用效果很小,因此只需考虑脉冲光与同向传播的连续光发生交叉相位调制产生的相移即可。此时,控制光的色散、控制光与同向传播的脉冲光之间的走离量 (T_w) 大小成为影响交叉相位效果的关键因素^[17]。实验中所采用的微结构光纤由 Crystal Fiber A/S

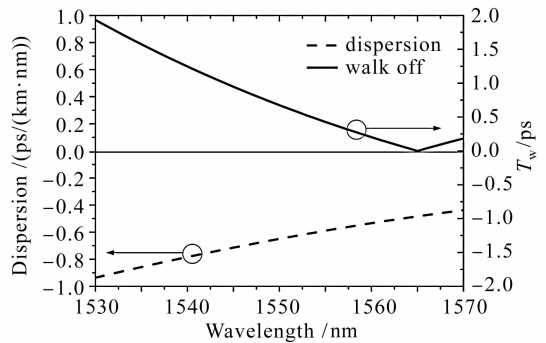


图 3 微结构光纤的色散曲线以及由此计算出的控制光与连续光之间的走离量

Fig. 3 Dispersion curve of the MSF and the calculated walkoff between the control signal and the CW light

实验中采用的控制光的峰值功率约为37 dBm,远高于连续光20 dBm的功率,两束光发生交叉相位调制之后,连续光中心波长两侧产生了周期性的频谱边带(见图 4(a)中左侧的谱峰)。同时,由于顺时针传播的连续光与脉冲光发生交叉相位调制的部分与逆时针的连续光之间的干涉平衡条件被打破,因此这部分光波将从 2×2 耦合器的端口 4 透射出来,同时,由于光纤环境内双折射的存在,使得端口 4 呈

现出周期性的透射峰^[19,20],通过微调偏振控制器使得连续光的波长恰好落在透射谱的一个谷底,将对连续光起到一定的抑制作用,然后用光带通滤波器对准连续光中心波长附近的一个边带从而有效抑制控制光和连续光,在光带通滤波器的输出端将得到波长变换后的脉冲光^[3,15,19,20]。

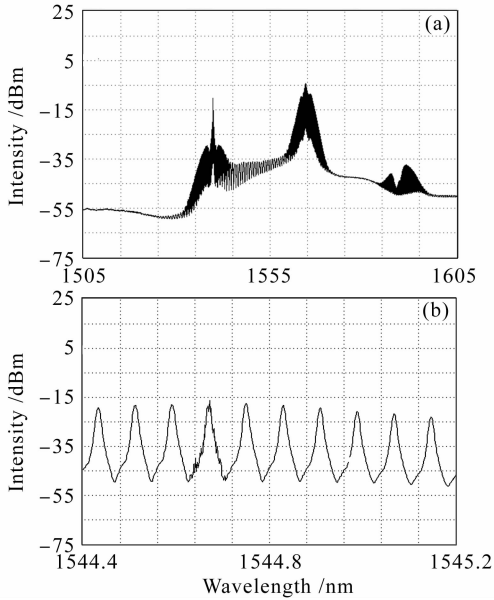


图 4 光纤环镜的输出光谱。(a) 1545 nm 的连续光与 1565 nm 的控制光发生交叉相位调制后的输出光谱;(b) 输出光谱在 1545 nm 附近的精细光谱结构
Fig. 4 Output spectra of the loop mirror. (a) spectrum with cross-phase modulation between the CW light and the control light; (b) detailed spectrum of the converted signal near 1545 nm

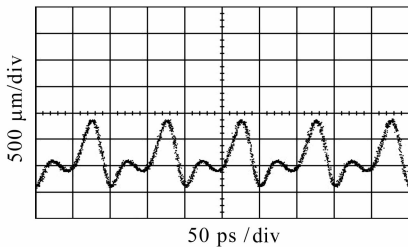


图 5 激光器直接输出的 1565 nm 光脉冲波形
Fig. 5 Initial pulse output of the laser at 1565 nm

3 实验结果与分析

在本实验中,采用了重复频率为 10 GHz,宽度 2 ps 的 1565 nm 脉冲作控制光(图 5),进入环路的控制光平均功率约为 20 dBm。连续波的波长分别设为 1555 nm, 1550 nm, 1545 nm, 1535 nm, 平均功率也约为 20 dBm。

控制光与连续光发生交叉相位调制使之产生新

的频率分量,因此连续光中心波长两侧新产生的频谱边带就携带了脉冲时钟信号的信息(图 4),从光带通滤波器输出的脉冲形状如图 6 所示,可以看到 1555 nm 波长附近的脉冲质量最高,1535 nm 波长附近的脉冲质量最差,这主要是受到控制脉冲与连续光之间走离效应的影响。图 3 还显示了由于控制脉冲与连续光群速度失配而产生走离的情况,走离的程度用参量 T_w 表示

$$T_w = |L_{MSF}[\beta_1(\lambda_{Control}) - \beta_1(\lambda_{CW})]|, \quad (2)$$

式中 L_{MSF} 为微结构光纤的长度, $\beta_1(\lambda_{Control})$ 代表控制光的一阶传输常数, $\beta_1(\lambda_{CW})$ 代表连续光的一阶传输常数。当控制光波长固定在 1565 nm, 而连续光在 1530~1570 nm 之间连续变化时,可以通过(2)式计算得到图 3 中的走离量 T_w 曲线。从图 3 中可以看出,控制光与连续光之间的走离量随着波长间隔的增大而逐渐增加,因此交叉相位调制的效果随着波长间隔的增大而逐渐减弱。但从图 3 也可以看到,在 1530~1570 nm 波长范围内两束光之间的走离量一直保持在一个很低的数值(<1 ps),因此在这个

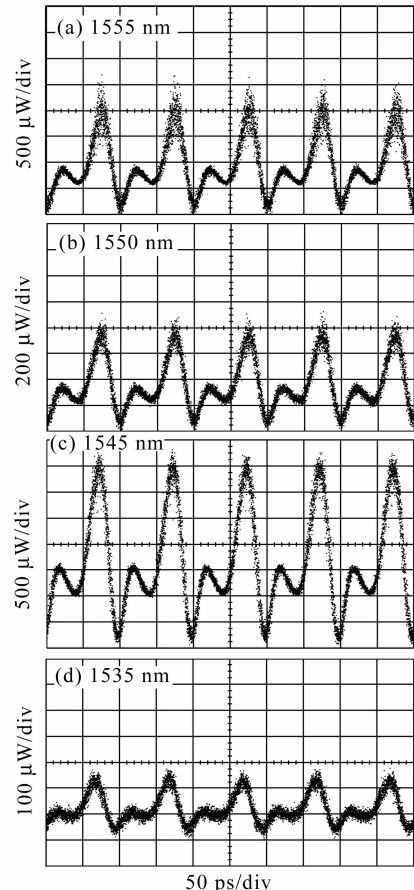


图 6 采用不同连续光波长进行转换后输出的脉冲波形
Fig. 6 Pulse waveforms after wavelength conversion with different CW

波长范围内控制光与连续光之间的交叉相位调制效应都是显著的^[20]。

连续光设为 1550 nm 时的脉冲质量要差于 1545 nm 处的转换脉冲。这是因为当连续光波长为 1550 nm 时,与 1565 nm 的控制光之间的相位匹配条件得到很好的满足,发生了非常显著的四波混频效应(图 7),消耗了两者能量,使得交叉相位调制的作用减弱。但与此同时,这种四波混频也提供了一种实现波长变换的方式。

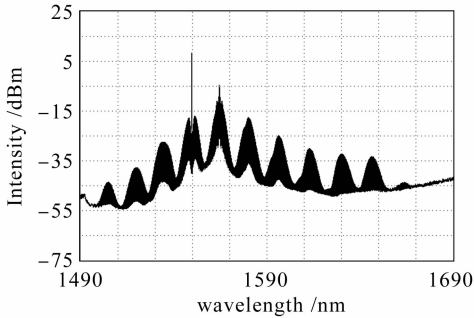


图 7 1550 nm 的连续光与 1565 nm 的控制光发生交叉相位调制及四波混频后的输出光谱

Fig. 7 Spectrum with cross-phase modulation and four-wave mixing between the 1550 nm CW light and the 1565 nm control light

4 结 论

利用微结构光纤对 10 GHz 的皮秒时钟脉冲实现了超过 30 nm 的波长变换。实验结果表明,这种具有高非线性系数、小的正常色散和平坦色散曲线的微结构光纤适用于宽带的波长变换,通过优化设计光纤结构参量,将进一步优化波长变换的效果。此外,这种微结构光纤不但可以利用交叉相位调制效应,还可以利用四波混频效应实现波长变换。

致谢 感谢 Georgia Institute of Technology 的余建军博士对本实验给予的指导。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):955~966
- 2 T. Tanemura, C. S. Goh, K. Kikuchi *et al.*. Highly efficient arbitrary wavelength conversion within entire C-band based on nondegenerate fiber four-wave mixing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):551~553
- 3 J. J. Yu, P. Jeppesen. 80-Gb/s wavelength conversion based on cross-phase modulation in high-nonlinearity dispersion-shifted fiber and optical filtering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):833~835

- 4 C. H. Kwok, S. H. Lee, K. K. Chow *et al.*. Widely tunable wavelength conversion with extinction ratio enhancement using PCF-based NOLM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12):2655~2657
- 5 P. A. Andersen, T. Tokle, Y. Geng *et al.*. Wavelength conversion of a 40-Gb/s RZ-DPSK signal using four-wave mixing in a dispersion-flattened highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9):1908~1910
- 6 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 7 T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knight *et al.*. Dispersion compensation using single material fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6):674~676
- 8 A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret *et al.*. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):790~792
- 9 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):807~809
- 10 Wang Zinan, Ren Xiaomin, Zhang Xia *et al.*. A novel design for broadband dispersion compensation microstructure fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11):625~627
- 11 Wu Jinqing, Xue Wenrui, Zhou Guosheng. Dispersion property analysis of square-lattice varying microstructured optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):174~178
- 武劲青, 薛文瑞, 周国生. 方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):174~178
- 12 N. G. R. Broderick, T. M. Monro, P. J. Bennett *et al.*. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20):1395~1397
- 13 B. Zsigri, C. Peucheret, M. D. Nielsen *et al.*. Demonstration of broadcast, transmission, and wavelength conversion functionalities using photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21):2290~2292
- 14 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on all-optical switch based on photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1650~1653
- 杨广强, 张霞, 任晓敏 等. 基于光子晶体光纤的全光开关实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1650~1653
- 15 J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi *et al.*. A tunable WDM wavelength converter based on cross-phase modulation effects in normal dispersion holey fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3):437~439
- 16 M. Jinno, T. Matsumoto. Nonlinear Sagnac interferometer switch and its applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):875~882
- 17 M. Jinno. All optical signal regularizing/regeneration using a nonlinear fiber Sagnac interferometer switch with signal-clock walk-off [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9):1648~1659
- 18 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed.. Elsevier, 2001. 12, 65
- 19 B. E. Olsson, P. Ohlen, L. Rau *et al.*. A simple and robust 40-Gb/s wavelength converter using fiber cross-phase modulation and optical filtering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(17):846~848
- 20 P. Ohlen, B. E. Olsson, D. J. Blumenthal *et al.*. Wavelength dependence and power requirements of a wavelength converter based on XPM in a dispersion-shifted optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):522~524