

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0066-04

利用微结构光纤对皮秒脉冲进行波长转换

张霞 李佳健 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 对微结构光纤中基于四波混频(FWM)效应的全光波长变换进行了实验研究。利用长度为 80 m 的色散平坦高非线性微结构光纤实现了对重复频率为 10 GHz, 宽度为 1.6 ps 的脉冲序列的波长变换, 波长上转换和波长下转换均能在实验观中观察到。另外, 对于脉冲光和连续光的光功率对转换效率的影响也进行了实验研究, 当功率相对比较高时, 无论是波长上转换还是波长下转换, 转换效率都比较高, 并且随着输入微结构光纤的光功率的降低, 转换效率相应减小; 波长下转换受到脉冲光功率的影响比较明显。

关键词 光纤光学; 微结构光纤; 四波混频; 波长转换

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0066

Analysis of Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Based on Four-Wave Mixing in Microstructure Fibers

Zhang Xia Li Jiajian Huang Yongqing Ren Xiaomin

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract All optical wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) is experimentally demonstrated in 80-m dispersion-flattened high nonlinear microstructure fibers (MF). The pulsed signal with 10 GHz repetition rate and 1.6 ps pulse width is used as pump wave. In the experiments, both down- and up-conversion are obtained in this type of wavelength converter. Moreover, the relationship between conversion efficiency and the power of CW and pulsed wave is also experimentally analyzed. Both of the wavelength up-conversion and down-conversion is efficient and this efficiency decreases as the input power falls. The power of optical pulse's impact on the down-conversion is obvious. In summary, we believe the high nonlinear dispersion-flattened microstructural fiber will play an important roll in all optical wavelength conversion.

Key words fiber optics; microstructure fiber; four-wave mixing; wavelength conversion

1 引言

全光波长变换被认为是下一代高速密集波分复用(DWDM)系统的关键技术^[1]。实现全光波长变换主要包括基于自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)效应、交叉增益调制(XGM)和交叉吸收调制(XAM)的波长变换技术^[2~6]。其中, 基于 FWM 效应的波长变换技术因其对信号的比特率和格式透明而备受关注^[7]。FWM 效应可以在半导体光放大器(SOA)和光纤中产生, 通常来讲光纤基波长变换可实现极高的转换速度^[8]。传统的色散位移光纤的非线性系数相对较小^[9], 增加光纤长度可弥补此不足, 但同时会带来器

件稳定性变差以及控制难度增加等问题; 另外, 为了满足相位匹配条件, 抽运光中心波长必须处于光纤的零色散点附近, 这也就限制了光网络的灵活性。

近年来, 微结构光纤(MF)的研究和发展受到了人们的广泛关注^[10]。微结构光纤, 又称为光子晶体光纤(PCF), 其包层由在二维方向上排列的具有波长量级的微孔组成。由于微结构光纤能通过合理设计获得各种色散曲线和非线性系数, 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。高非线性、色散平坦微结构光纤非常适合作为全光波长变换的非线性介质^[11~13], 一方面, 高的非线性系数可大大缩短所使用光纤的长度; 另一方面, 在很宽

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z447)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0736)资助课题。

作者简介: 张霞(1973-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信和光纤光栅等方面的研究。E-mail: xzhang@bupt.edu.cn

的波长范围内微结构光纤的小色散值使得在此范围内准相位匹配条件很容易得到满足^[14,15]。

本文利用 80 m 长、色散平坦高非线性微结构光纤作为非线性介质,对重复频率为 10 GHz,宽度为 1.6 ps 的脉冲序列实现了基于四波混频原理的全光波长变换。此外,还实验研究了脉冲光和连续光的光功率对波长转换效率的影响。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。锁模激光器输出无啁啾的双曲正割皮秒脉冲序列,脉冲宽度为 1.6 ps,重复频率为 10 GHz。与以往文献报道不同的是,皮秒脉冲源充当抽运光,其中心波长 λ_p 在 1530 ~

1570 nm 范围内可调。可调谐光源输出的连续光中心波长 λ_c 在 1520 ~ 1570 nm 范围内连续可调。抽运光和连续光分别经饱和输出功率为 30 dBm 的掺铒光纤放大器放大后,耦合输入微结构光纤。实验中采用的微结构光纤为 80 m 长的高非线性、色散平坦型微结构光纤 (Crystal-fibre A/S),具体特性参数为:在 1550 nm 处非线性参数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$;在 1.55 μm 附近 100 nm 波长范围内,色散值介于 $-0.5 \sim -1.5 \text{ ps} \cdot /(\text{km} \cdot \text{nm})$ 之间,如图 2 所示。由于微结构光纤与普通单模光纤连接以及光传输带来的总损耗约为 4 dB。光谱分析仪 (OSA) 用来监测波长变换后的输出光谱,其最高光谱分辨率为 0.01 nm。

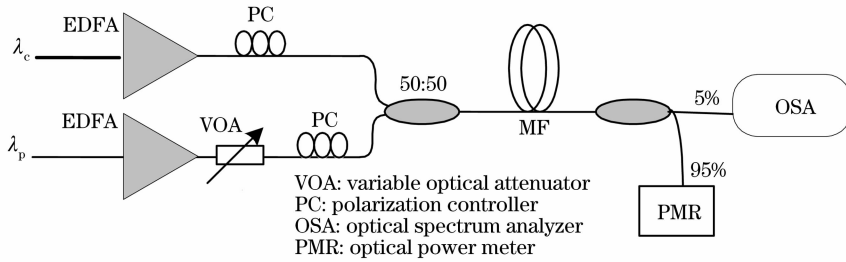


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

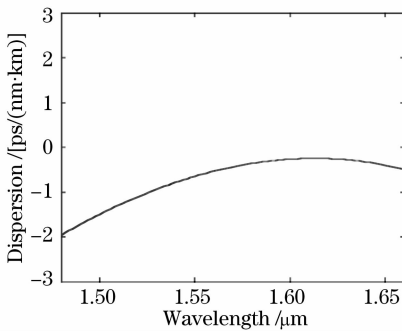


图 2 实验所用微结构光纤的色散曲线

Fig. 2 Dispersion profile of the MF

利用两个偏振控制器控制抽运脉冲光和连续光的偏振态,以达到最高的波长转换效率。采用 Sagnac 干涉法测量得到微结构光纤的差分群时延为 4 ps,相应的双折射为 10^{-5} 量级。

3 实验结果和讨论

图 3 是基于四波混频效应的全光波长变换输出光谱。抽运信号光和连续光的波长 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ 和 $\lambda_c = 1560 \text{ nm}$ 。考虑到波长变换装置的损耗,输入到微结构光纤中的脉冲光和连续光的平均功率分别为 13 dBm 和 10 dBm。从图 3 可以看出,经过四波混

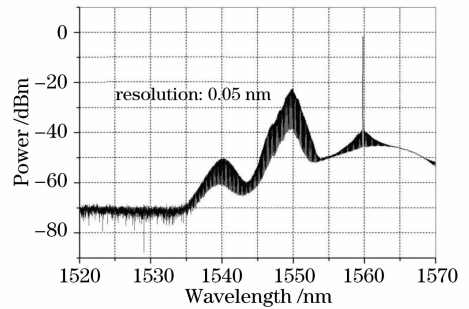


图 3 基于四波混频的波长变换输出光谱

Fig. 3 Measured output spectrum from the FWM based wavelength converter

频转换后的闲频信号光出现在 1540 nm 处;当光谱仪的分辨率设定为 0.05 nm 时,闲频光的光信噪比约为 12 dB。因为变换后信号波长小于原信号波长,所以称此时的变换为波长下转换。在连续光位置上(1560 nm)出现了展宽的边带效应,这是因为连续光和脉冲序列同时在微结构光纤中传输时发生了交叉相位调制作用。

对于波长下转换情形,闲频信号波长与转换效率的关系如图 4 所示。连续光 $\lambda_c = 1560 \text{ nm}$,当抽运脉冲信号波长从 1543 ~ 1557.04 nm 变化时,闲频信号波长范围为 1525.8 ~ 1554.2 nm。输入到微

结构光纤的脉冲序列和连续光的功率分别为 19 dBm, 10 dBm。从图 4 可以清楚地看到, 最大转换效率为 -21 dB, 且在 16 nm 范围内 (1538~1554 nm) 转换效率波动小于 1.23 dB。当抽运光和连续光的波长间隔变小时, 由于脉冲光较宽的光谱与连续光谱交叠而发生干涉, 进而影响波长转换效果, 所以设置最大的抽运脉冲光的波长为 1557 nm。

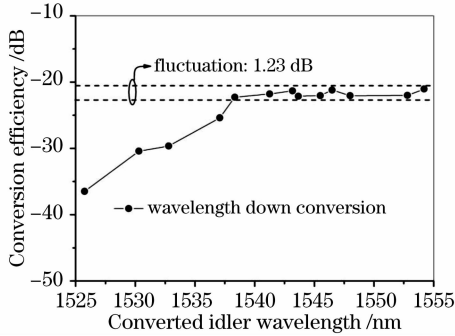


图 4 转换信号波长与转换效率的关系图

Fig. 4 Conversion efficiency versus converted idler wavelength

当连续光中心波长调谐至较短波长处时, 波长上变换的四波混频即会发生, 典型的测量光谱如图 5 所示。输入脉冲信号在 1564.5 nm 时, 非常明显的四波混频波长变换信号在 1574.5 nm 处被观测到。从图中同时可以看到二级四波混频波。输入微结构光纤的脉冲信号和连续光的功率分别是 13 dBm, 16 dBm。值得注意的是, 尽管此种利用微结构光纤的波长变换装置可以观察到波长上变换, 但波长上转换时的转换效率比波长下变换时的转换效率低 2 dB 左右, 这是由于放大器的自发辐射噪声在长波长处更大的缘故。

本文还对脉冲光和连续光的光功率对转换效率的影响进行了实验研究, 图 6, 图 7 分别对应波长下转换和上转换时光功率与转换效率的关系。对于波长下转换, 连续光和脉冲光的波长分别为 1560 nm 和

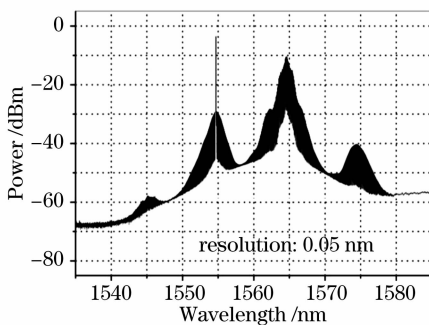


图 5 波长上变换的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of wavelength up-conversion

1550 nm; 对于波长上转换, 连续光和脉冲光的波长分别为 1555 nm 和 1564 nm。在不同的连续光功率情形下, 让脉冲光的光功率从 15 dBm 向下依次衰减, 图中横坐标即为衰减数值。从图中可以看出, 当功率相对比较小时, 无论是波长上转换还是波长下转换, 转换效率都比较高, 并且随着输入微结构光纤的光功率的降低, 转换效率相应减小; 波长下转换受到脉冲光功率的影响比较明显, 也就是图 6 中的曲线斜率相对比较陡峭, 并且连续波功率越小, 这种影响越大。

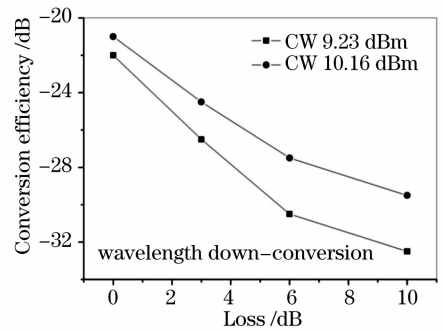


图 6 波长下变换时, 连续光和脉冲光的功率与转换效率的关系

Fig. 6 Conversion efficiency versus the power of the CW and the pulsed wave for wavelength down-conversion

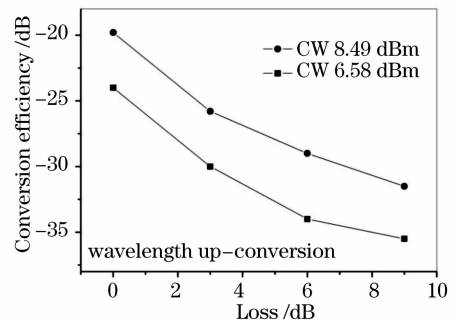


图 7 波长上变换时, 连续光和脉冲光的功率与转换效率的关系

Fig. 7 Conversion efficiency versus the power of the CW and the pulsed wave for wavelength up-conversion

4 结 论

利用长度为 80 m 的高非线性色散平坦微结构光纤, 实验研究了重复频率 10 GHz 以及脉冲宽度为 1.6 ps 的皮秒脉冲序列的可调谐波长转换。实验中采用的微结构光纤在 100 nm 范围内的具有非常小的正常色散值, 因此, 四波混频过程中的准相位匹配条件能够自动满足, 并且波长上变换和波长下变换在此类波长变换器中都能够被观察到。另外, 通过

增加连续波的路数,还可以获得单信道向多信道的全光波长变换。所以,我们相信高非线性色散平坦微结构光纤在全光波长变换中将会起到重要作用。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**: 955~966
- 2 P. V. Mamyshev. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect [C]. Proc. 24th ECOC, 1998. 457~476
- 3 C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. E. Stubkjaer *et al.*. All-optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gb/s using semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(5): 1168~1180
- 4 K. K. Chow, C. Shu. All-optical wavelength conversion with multicasting at 6×10 Gbit/s using electro absorption modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(19): 1395~1397
- 5 T. Sakamoto, K. K. Y. Wong, K. Uesaka *et al.*. Tunable wavelength converter using cross-gain modulation in fiber optical parametric amplifier [C]. Proc. Optical Fiber Communications (OFC), Anaheim, CA, 2002. 127~129
- 6 L. Rau, W. Wang, S. Camatel *et al.*. All-optical 160-Gb/s phase reconstructing wavelength conversion using cross-phase modulation (XPM) in dispersion-shifted fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2520~2522
- 7 G. A. Nowak, Y. H. Kao, T. J. Xia *et al.*. Low power high-efficiency wavelength conversion based on modulational instability in high-nonlinearity fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**: 936~938
- 8 J. Ma, J. J. Yu, C. X. Yu *et al.*. Wavelength conversion based on four-wave mixing in high-nonlinearity dispersion shifted fiber using a dual-pump configuration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2851~2858
- 9 C. Yu, Z. Pan, Y. Wang *et al.*. Polarization-insensitive all-optical wavelength conversion using dispersion-shifted fiber with a fiber Bragg grating and a Faraday rotator mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1906~1908
- 10 Wei Yanfang, Zhang Xia, Xu Yongzhao *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(3): 414~418
卫艳芬,张 霞,徐永钊等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414~418
- 11 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**: 358~362
- 12 J. H. Lee *et al.*. Four-wave mixing based 10-Gb/s tunable wavelength conversion using a holey fiber with a high SBS threshold [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 440~442
- 13 P. A. Andersen, T. Tokle, Y. Geng *et al.*. Wavelength conversion of a 40Gb/s RZ-DPSK signal using four-wave mixing in a dispersion-flattened highly nonlinear photonics crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1908~1910
- 14 Xia Zhang, Xiaomin Ren, Zinan Wang *et al.*. Four-wave mixing based 10-Gb/s tunable wavelength conversion in dispersion-flattened microstructure fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 386~388
- 15 Wang Zinan, Xu Yongzhao, Zhang Xia *et al.*. Wavelength conversion based on cross-phase modulation in microstructure fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 414~417
王子南,徐永钊,张 霞等. 基于微结构光纤中交叉相位调制效应的波长转换[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 414~417