

# 基于光子晶体光纤的全光波长变换研究\*

张岚, 杨伯君, 王秋国, 何理

(北京邮电大学 理学院, 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 选用具有高非线性系数和非常灵活色散特性的光子晶体光纤(PCF)作为波长变换的媒质, 对基于光子晶体光纤四波混频效应的波长变换进行了理论分析, 设计实验系统, 并进行了实验. 实现了中心波长在 1 550 nm 附近、基于 PCF 四波混频效应的全光波长变换, 最大转换效率 -22 dB, 转换带宽 28 nm.

**关键词:** 光纤通信; 波长变换; 四波混频; 光子晶体光纤

**中图分类号:** O437.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)11-2203-3

## 0 引言

近年来, 随着光纤通信高新技术的不断涌现, 光纤通信技术向着更高速率、更大容量的通信系统发展. 而作为全光网络主流发展方向的密集波分复用(DWDM)系统, 其关键器件之一的全光波长变换(AOWC)的研究受到普遍的关注.

基于光纤四波混频(FWM)的全光波长变换器不仅可以实现全光波分复用分组网络中的波长路由功能, 而且其变换输出光为输入光信号的共轭光, 还可以有效地进行传输系统的色散补偿等. 此外, FWM 还是唯一可以对调制方式、码速率完全透明的波长变换, 并且变换速度大于 100 Gb/s. 因而, 基于 FWM 的全光波长变换引起了人们的广泛兴趣<sup>[1]</sup>.

本文选择光子晶体光纤作为波长变换的媒介, 它具有许多其他光纤所不具备的独特优势: 可以制作很小的纤芯面积<sup>[2]</sup>, 以得到很高的非线性<sup>[3]</sup>; 可灵活地设计色散和色散斜率<sup>[4]</sup>, 提供宽带色散补偿<sup>[5]</sup>等等. 在理论上更适用于作为参量过程的媒质. 对基于光子晶体光纤 FWM 效应的波长变换进行理论分析, 给出实验方案及结果, 并进行讨论.

## 1 利用光纤四波混频效应进行波长变换

利用 FWM 进行波长变换, 想要达到的重要的指标是较高的转换效率和较宽的转换带宽. 为了达到这一目的, 需要满足下列条件<sup>[6]</sup>:

- 1) 抽运光波长位于光纤的零色散区;
- 2) 沿光纤的轴线方向, 色散的起伏变化必须非常小;
- 3) 信号光和抽运光的偏振态必须一致.

### 1.1 波长转换带宽

为了能够有效地通过简并四波混频来进行波长变换, 所用的光纤长度  $L$  必须满足下面的条件<sup>[7]</sup>

$$L \leq L_c \equiv \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{c}{4\pi^2 f_p |D(f_p)|} \frac{1}{\Delta f^2} \propto \frac{1}{\Delta f^2} \quad (1)$$

式中,  $\Delta f$  表示抽运光和转换后的信号光(即闲频光)之间的频率间隔,  $L_c$  表示相干长度. 从式(1)可以看出, 要想提高波长转换的带宽, 需增大  $\Delta f$  的值, 这样光纤的长度  $L$  就受到限制. 减小光纤的长度可以减小色散沿光纤分布不均匀的影响<sup>[8]</sup>, 同时也在一定程度上也可以改善信号光和抽运光偏振失配的问题. 但是, 光纤长度的缩短会导致信号光与泵浦光非线性相互作用的长度不够. 为解决这一矛盾, 本文选用了近年来受到广泛关注的光子晶体光纤, 随着制作工艺的不断进步, 其已经可以达到很大的非线性和较小的色散斜率.

### 1.2 波长转换效率

波长转换效率定义为经转换后输出的闲频光功率与输入信号光功率的比值. 用  $P_i$  表示闲频光的输出功率, 用  $P_s$  表示输入信号的光功率, 则转换效率可以表示为:

$$\text{转换效率}[\text{dB}] = 10 \cdot \log(P_i/P_s) \quad (2)$$

文献[9]给出了转换效率的表达式

$$\frac{P_i}{P_s} \approx \frac{4}{27} \left[ \frac{c^2 \cdot n_2 \cdot P_p}{\lambda_s^5 A_{\text{eff}} \cdot \Delta f^3 \cdot (dD/d\lambda)} \right]^2 \quad (3)$$

从这个表达式可以看出, 波长转换效率与抽运光功率的平方成比例. 所以可以通过提高抽运光功率来提高波长转换效率.

\*国家自然科学基金(60578043)和北京市教委共建项目(XK100130637)资助

Tel: 010-62281490 Email: zhanglan1102@gmail.com

收稿日期: 2007-08-14

## 2 实验与结果

### 2.1 实验设计

图 1 为实验装置图,图中 PM 为相位调制器;HP-EDFA 为高功率掺铒光纤放大器;PC 为偏振控制器;PCF 为光子晶体光纤;OSA 为光谱仪.信号光为连续波光源,波长在 1 527~1 568nm 范围内连续可调;抽运光波长为 1 555.3 nm,输出光功率为 14.04 dBm.

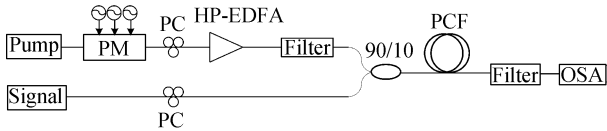
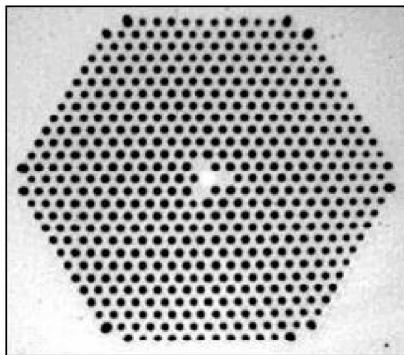


图 1 实验装置图

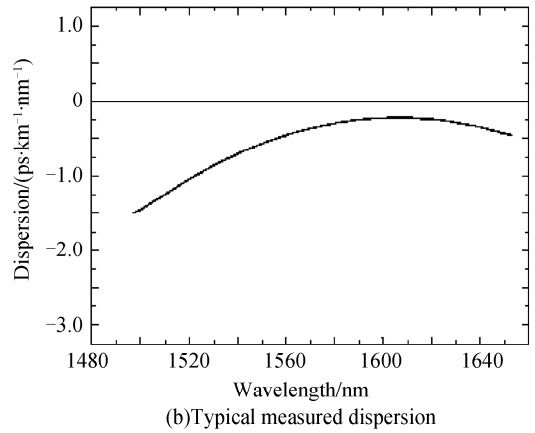
Fig. 1 The experimental setup

由式(3)可以看出,通过提高抽运光的功率可以有效地提高波长转换效率.但是当注入光纤中的光功率增大后,光纤中会产生受激布里渊散射(SBS).当前向传输的光功率超过 SBS 的阈值时,光功率会因 SBS 后向散射而损耗,从而降低波长转换效率.基于上述原因,本文在实验系统中加入相位调制器对抽运光的相位进行调制,达到扩频的目的,进而提高 SBS 的阈值,这样就可以允许将抽运光放大到较高的功率.相位调制器输出光,经高功率 EDFA 放大,最大可达到 29 dBm.放大后的抽运光经窄带可调 F-P 腔滤波器滤除放大的自发辐射(ASE)噪声,就可以与信号光通过耦合器一同输入到光子晶体光纤中.抽运光与信号光进入耦合器之前,还必须通过偏振控制器(PC),其作用是调节抽运光和信号光的偏振态,以得到最大的 FWM 光输出,提高波长变换的转换效率.

实验中所用的光纤为 40 m 光子晶体光纤,损耗为 9 dB/km,非线性系数  $\gamma=11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ .图 2 为该光纤的色散曲线,可以看出在 1 550 nm 附近,其色散斜率较小,约为  $0.04 \text{ ps/nm}^2 \text{ km}$ .此段光纤无零色散点,在  $\lambda=1 600 \text{ nm}$  处色散最小.



(a)Fiber structure



(b)Typical measured dispersion

图 2 实验中使用光子晶体光纤的结构图与色散曲线

Fig. 2 The fiber structure and typical measured dispersion

### 2.2 实验结果

图 3 为光谱仪上看到的波长变换的输出光谱图.此时,抽运光波长为 1 555.3 nm,信号光波长为 1 552.1 nm,抽运光功率经 HP-EDFA 放大到 25 dBm.调整偏振控制器,改变信号光和泵浦光的偏振态并使其趋于一致,波长变换的转换效率将达到最大值.图 3 显示,本实验中的最大转换效率为 -22 dB.

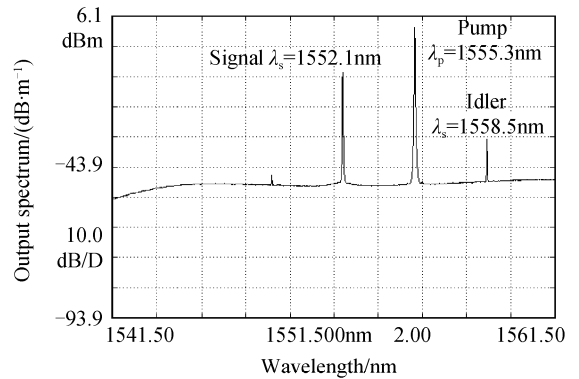


图 3 波长变换的输出光谱图(移除光子晶体光纤后的滤波器)

Fig. 3 Optical spectrum measured at the output (Filter after PCF removed)

固定偏振控制器,使其保持在转换效率最大处.此时,改变信号光波长,观察转换效率的变化,可以看到其在一定波长范围内取得最大值 -22 dB.取不同的信号光波长,记录下相应的数据并进行计算,可以得到信号光波长与转换效率的关系曲线如图 4.可以看出,最大转换效率为 -22 dB,3 dB 转换带宽为 28 nm,波长范围为 1 538 nm~1 566 nm.

由图 2 可知,抽运光波长处,色散斜率为  $0.04 \text{ ps/nm}^2 \text{ km}$ ,当光纤长度为 40 m 时,将实验数据代入式(1)可以计算出波长转换带宽为 31 nm,与实验结论基本符合.如果进一步减小光纤抽运光波长处的色散斜率、或使抽运光波长与光纤零色散波长更加接近,将得到更大的转换带宽.

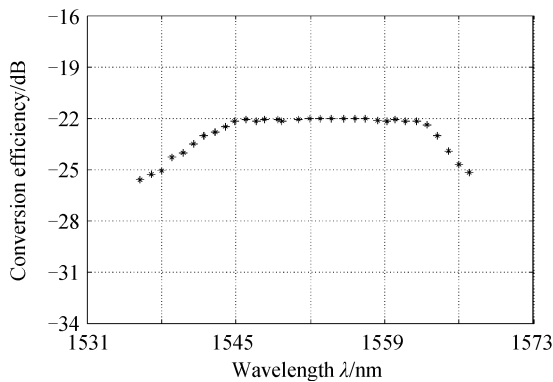


图4 实验中波长变换的转换效率

Fig. 4 Normalized conversion efficiency versus the signal wavelength

### 3 结论

本文实现了中心波长在 1 550 nm 附近、基于光子晶体光纤四波混频效应的全光波长变换,最大转换效率为 -22 dB,转换带宽为 28 nm. 实现了基于光子晶体光纤四波混频的波长变换,为今后的实验与研究提供了十分有价值的参考.

#### 参考文献

- [1] XIONG Xiao-jun. The study of all-optical wavelength conversion technology [D]. Shanghai: Shanghai University, 2004:61-61.  
熊小君. 全光波长变换(AOWC)技术的研究[D]. 上海:上海大学,2004:61.
- [2] GUO Shu-qin, LIU Yin-ping, ZHU Guang-xin. Photonic crystal Fiber with snowflake shape crystal core[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2007, **36**(7):1207-1210.
- [3] HAINBERGER R, WATANABE S. Impact of the wavelength dependence of the mode field on the nonlinearity coefficient of PCFs[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(1):70-72.
- [4] JIA Jun-ming, CHEN Ming-yang, XIANG Yang, et al. Study of equivalent core radius of photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2005, **34**(1):102-105.  
贾俊明,陈明阳,向阳等. 光子晶体光纤的纤芯等效半径分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1):102-105.
- [5] SHEN L P, HUANG W P, CHEN G X, et al. Design and optimization of photonic crystal fibers for broadband dispersion compensation[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(4):540-542.
- [6] XIANG Peng, WANG Rong. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing [J]. *Photon Technology*, 2004, **3**(2):100-103.  
项鹏,王荣. 基于四波混频的全光波长转换技术[J]. *光子技术*, 2004, **3**(2):100-103.
- [7] ASO O, TADAKUMA M, NAMIKI S. Four-wave mixing in optical fibers and its applications [J]. *Furukawa Review*, 2000, **1**(19):63-68.
- [8] YU Yong-qin, RUAN Shuang-chen, DU Chen-lin et al. Spectral broadening in the 1.3 μm region using a 1.8 m-long photonic crystal fiber by femtosecond pulses from an optical parametric amplifier[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2005, **34**(4):481-484.
- [9] TORII K, YAMASHITA S. Efficiency improvement of optical fiber wavelength converter without spectral spread using synchronous phase/frequency modulations [J]. *Lightwave Technology*, 2003, **21**(4):1039-1045.

## All-Optical Wavelength Conversion Based on Photonic Crystal Fiber

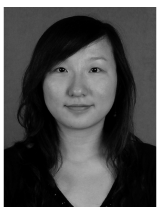
ZHANG Lan, YANG Bo-jun, WANG Qiu-guo, HE Li

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

Received date:2007-08-14

**Abstract:** The theory of four-wave-mixing-based wavelength conversion was analyzed. Base on the theory, a wavelength conversion system was designed, in which Photonic Crystal Fiber (PCF) was used for its high nonlinearity and very flexible dispersion. Then the wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) was demonstrated experimentally in a 40-m-long dispersion-flattened highly nonlinear PCF. A conversion efficiency of about -22 dB and a bandwidth of about 28 nm were measured. The experimental result agrees well with the theoretical analysis.

**Key words:** Optical fiber communications; Wavelength conversion; Four-Wave Mixing (FWM); Photonic Crystal Fiber (PCF)



**ZHANG Lan** was born in 1982. She entered Beijing University of Posts and Telecommunications for the M. S. degree in 2005. She has been engaging in the research on the application of Photonic Crystal Fiber since 2005.