

文章编号: 0258-7025(2005)02-0212-04

基于多孔光纤的参量波长变换

桑新柱, 余重秀, 张琦, 王旭

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要 通过改变多孔光纤中的芯区面积、空气孔的直径和分布, 可以灵活地设计其导波特性。利用耦合波方程分析了参量波长变换的基本原理, 讨论了信号波长固定情况下相位失配和抽运波长之间的关系。对基于多孔光纤的参量波长变换的转换效率进行了数值模拟, 并和实验测量的数据进行了比较, 结果表明它们的结果相一致。采用 15 m 长的多孔光纤可以获得约 10 nm 的 3 dB 调谐带宽, 最大转换效率约为 -16 dB, 并且采用较低色散斜率值的多孔光纤可以进一步增大调谐范围。因此, 利用多孔光纤可以实现紧凑的波长变换器。

关键词 光通信; 多孔光纤; 四波混频; 波长变换; 转换效率

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Parametric Wavelength Conversion Based on a Holey Fiber

SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, ZHANG Qi, WANG Xu

(School of Electronics Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The guidance properties of the holey fiber are determined by the solid-silica core region and the size and pattern of air holes. The fundamental principle of parametric wavelength conversion is presented by the coupled-wave equations. The relation between phase mismatch and pump wavelength with a fixed signal wavelength is analyzed. Conversion efficiency of a holey fiber based parametric wavelength conversion is calculated by the numerical simulation and compared with the measured result, which indicates that numerical calculation is coincident with the experimental measurement. A maximum conversion efficiency of about -16 dB and a 3-dB tuning bandwidth of ~10 nm are achieved for a 15 m holey fiber, and the tuning range can be improved with lower dispersion slope. So a compact wavelength converter can be realized by utilizing a highly nonlinear holey fiber.

Key words optical communication; holey fiber; four-wave mixing; wavelength conversion; conversion efficiency

1 引言

全光波长变换是全光网中的一项关键技术。利用波长变换可以实现网络中的虚拟波长通道 (Virtual Wavelength Channel)、提高波长的重用率、减少网络中所需波长的数量、提高网络的灵活性和可扩展性, 可以用有限的波长资源满足多节点的需求, 降低网络的阻塞率。目前实现全光波长变换的方案主要有基于光调制原理^[1~3]和基于光混频原理的波长变换方法^[4,5]。由于利用高非线性光纤中四波混频(FWM)原理的参量波长变换具有对信号

速率、调制格式透明并可以同时多个波长进行变换等突出优点, 在众多方案中脱颖而出, 并在高速波分复用(WDM)网络中显示出良好的应用前景。

2 理论分析

为了使四波混频波长变换获得较大转换增益, 采用传统的单模光纤一般需要数千米, 即使采用高非线性色散位移光纤也需要数百米。但由于光纤本身特性和光纤制作中所引入的不均匀性, 给这项技术带来了一些问题, 主要是: 1) 零色散波长沿单模

收稿日期: 2003-08-20; 收到修改稿日期: 2003-10-24

基金项目: 国家 973 计划(编号: 2003CB314906)和国家自然科学基金(编号: 60132040)资助项目。

作者简介: 桑新柱(1977—), 男, 山东菏泽人, 北京邮电大学电子工程学院博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。

E-mail: xinzhu_sang@sina.com

光纤长度方向的变化使得在光纤局部难以满足相位匹配条件,难以有效地实现四波混频^[6];2)由于光纤双折射引起的偏振态失配造成四波混频效率的劣化;3)混频光的强度依赖于相位失配量 $\Delta\beta L$ ($\Delta\beta$ 为不同传播常数引起的相位失配, L 为光纤长度),为了有效地产生四波混频,必须使它小于 2π ^[7];4)受激布里渊散射(SBS)效应引起抽运功率的损耗^[8]。前三个问题可以采用短的高非线性光纤解决,但由于常规单模光纤和色散位移光纤的非线性不是太高,其长度不可能太短。第四个问题可以通过对抽运光进行频率或相位调制进行解决,但增加了系统的复杂性。光纤参量波长转换需要高非线性、低色散的短光纤。利用硅和空气之间折射率的较大差异制作的多孔光纤可以通过改变界面空气孔的直径和分布灵活地设计光线的参数^[9,10],小芯区的多孔光纤的非线性是常规光纤的 10~100 倍^[11],并可以通过改变光纤包层直径获得高受激布里渊散射阈值^[12],因此能够满足光纤参量波长转换的需要。近来国外对采用多孔光纤的波长变换进行了实验研究^[13]。本文在对固定信号波长改变抽运波长条件下的相位匹配情况进行分析的基础上,采用 15 m 长的一种多孔光纤进行参量波长转换数值模拟,并将仿真和实验结果进行比较。

一抽运光 λ_p (角频率为 ω_p) 与一信号光 λ_s (角频率为 ω_s) 同时耦合进入光纤,在光纤内产生混频光 λ_f ($\omega_f = 2\omega_p - \omega_s$),在此过程中,抽运光的能量逐渐转移到信号光和混频光。在抽运未衰减的近似条件下,信号光的光场幅度 A_s 和混频光的光场幅度 A_f 遵循以下耦合波方程^[14]

$$\frac{dA_s}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_s + i\gamma P(z)\{2A_s + A_f^* \exp\{-i[2\phi(z) + \Delta\beta z]\}\}, \quad (1)$$

$$\frac{dA_f}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_f + i\gamma P(z)\{2A_f + A_s^* \exp\{-i[2\phi(z) + \Delta\beta z]\}\}, \quad (2)$$

式中 α 为光纤损耗系数, γ 为非线性系数, $\Delta\beta$ 为色散引起的相位失配, $P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$ 为抽运功率, $\phi(z) = \int_0^z \gamma P(z') dz' = \gamma P_0 [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$ 为克尔效应引起的非线性相位失配。

若要获得较高的四波混频效率,需要满足相位匹配条件。在四波混频过程中,若忽略高阶色散参量^[9],在 $\omega_i - \omega_j \approx c/[2\pi\lambda_0^2(\lambda_i - \lambda_j)]$ ($i, j = s, p, 0$) 情况下,相位失配 $\Delta\beta$ 可以表示为

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_f) - 2\beta(\omega_p) =$$

$$-\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)(\lambda_p - \lambda_s)^2, \quad (3)$$

式中 λ_0 为零色散波长, $dD/d\lambda$ 为 λ_0 处的色散斜率, c 为真空中的光速。从以上方程可以分析出,在信号波长固定,色散斜率为正时,在 $\lambda_p < \lambda_0$ 区域的总相位失配 ($2\phi(z) + \Delta\beta z$) 随抽运波长的减小而增加;在 $\lambda_p > \lambda_0$ 区域的 $\Delta\beta$ 产生的相位失配在一定范围内补偿了克尔效应引起的非线性相位失配,随着抽运波长的增加总相位失配减小,直到 $2\phi(z) + \Delta\beta z = 0$, 然后随着抽运波长的增加相位失配量增大。在色散斜率为负的情况下,相位失配随抽运波长的变化与上述情况相反。方程(1)和(2)可以确定四波混频用于波长变换时转换效率和相位失配的关系,进而可以得出在以上情况下转换效率随抽运波长变化的关系。

3 数值模拟与实验

利用 15 m 多孔光纤进行参量波长变换的实验装置如图 1 所示,为提高受激布里渊散射阈值,其中的光纤是按文献[12]的方法制作的^[13]。实验测量和估算了多孔光纤的参数,芯径为 1.2 μm ,外径为 150 μm ,非线性系数 γ 约为 $70 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,损耗系数为 190 dB/km,受激布里渊散射阈值高于 130 mW,波长为 1550 nm 处的色散约为 $-30 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散斜率约为 $-0.6 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,它的平均零色散波长处于 1550 nm 附近。实验中采用外腔可调谐激光器(Tunable ECL)作为信号和抽运光源,它们的工作波长为 1530~1580 nm,实验过程中将信号光的波长固定在 1550 nm 不变,改变抽运光的波长。两光束经耦合器耦合并由放大器放大,然后经透镜耦合进入 15 m 长的多孔光纤。其中掺铒光纤放大器 EDFA1, EDFA2 和 Er/Yb 放大器的增益分别为 21 dB, 21 dB 和 18 dB。偏转控制器(PC),起偏器和 $\lambda/2$ 波片用于保证进入多孔光纤的两光束偏振方向。进入多孔光纤的抽运功率和信号功率均为约 16 dBm。在多孔光纤后,采用两级可调谐切趾光纤布拉格光栅(FBG)滤波器抑制输入信号光和抽运光,选择出四波混频转换光,可以获得 40 dB 的混频光和抽运光的消光比。抽运波长位于 1547 nm 时在多孔光纤后检测到的四波混频输出谱如图 2 所示,可以看出尽管只采用了 15 m 长的光纤,在 1544 nm 处可清楚地看到四波混频波长转换的信号,并可看到二阶和三阶四波混频光的信号。

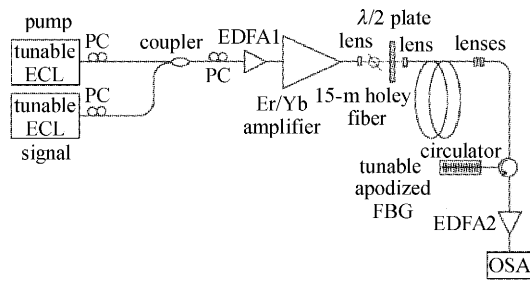
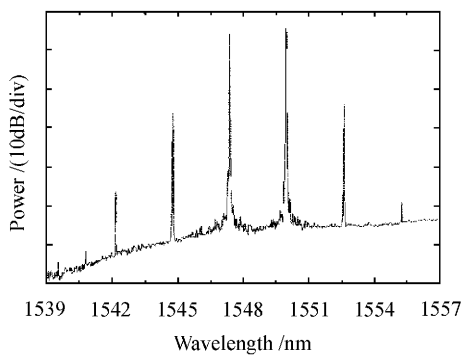


图1 参量波长变换的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for parametric wavelength conversion

图2 抽运波长位于 1547 nm 处的 FWM 输出谱
Fig. 2 Output FWM spectrum at 1547 nm pump wavelength for the holey fiber

转换效率是参量波长转换需要考虑的主要性能指标,由方程(1)和(2)确定,但是用解析方法很难精确求解,仿真计算中采用有限差分法进行分析。在计算过程中步长的选择是影响计算精度和计算时间的主要因素。为了保证计算的精度,应该根据相位失配量的大小进行步长选择,并且尽可能小。仿真计算采用实验中的数据对多孔光纤的参数设定,抽运功率和信号功率均为 40 mW。改变抽运波长来考察转换效率对基于多孔光纤的参量波长变换进行了数值模拟,计算得到的转换效率如图 3 中的实线所示。从图 3 可以看出理论计算的结果和实验测量结果基本一致,3 dB 带宽范围(10 nm)内的最大转换效率约为 -16 dB。

由方程(3)可知,色散斜率 $dD/d\lambda$ 与相位失配 $\Delta\beta$ 成正比,因此它是影响参量波长变换转换效率带宽的主要因素之一。在模拟计算中,将色散斜率值降低到 $-0.25 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,其他参数保持不变,所得的结果如图 4 所示。从图中可以看出,转换效率的 3 dB 带宽约为 19 nm,比前一仿真和实验中的带宽大大增加。

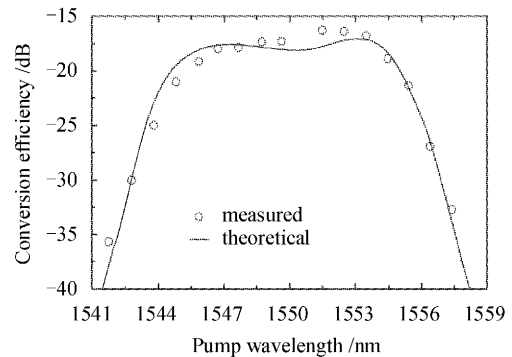
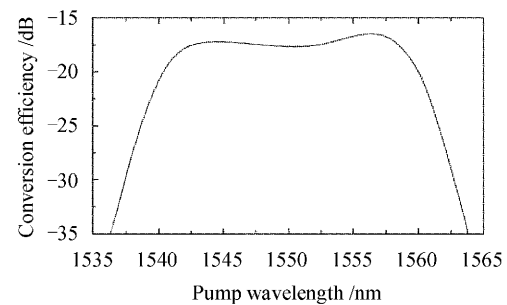


图3 转换效率与抽运波长之间的关系

Fig. 3 Conversion efficiency against pump wavelength

图4 色散斜率为 $-0.25 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 时转换效率与抽运波长之间的关系Fig. 4 Conversion efficiency against pump wavelength with dispersion slope of $-0.25 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

4 结论

对固定信号波长改变抽运波长条件下实现参量波长转换的情况进行了分析。模拟分析和实验研究表明,采用 15 m 长的多孔光纤可以实现参量波长转换,在约 10 nm 的 3 dB 带宽范围内的最大转换效率约为 -16 dB,并可以通过减小色散斜率值进一步增大转换范围。虽然其转换效率等性能比采用高非线性色散位移光纤有所降低^[6],但可以大大减小器件的长度、降低功率要求并且不需要抑制受激布里渊散射的措施。随着多孔光纤制作技术的不断成熟,可以通过改进相关参数进一步提高参量波长转换的性能,因此采用多孔光纤的参量波长转换有望在全光网中发挥重要作用。

参考文献

- 1 T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, 14(6):942~954
- 2 A. Tzanakaki, M. J. O'Mahony, A. Yu *et al.*. Penalty-free wavelength conversion using cross-gain modulation in semiconductor laser amplifiers with no output filter [J].

- Electron. Lett.*, 1997, **33**(18):1554~1556
- 3 J. P. R. Lacey, G. J. Pendock, R. S. Tucker. All-optical 1300-nm to 1550-nm wavelength conversion using cross-phase modulation in a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(7):885~887
 - 4 J. P. R. Lacey, M. A. Summerfield, S. J. Madden. Tunability of polarization-insensitive wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(12):2419~2427
 - 5 K. Inoue, H. Toba. Wavelength conversion experiment using fiber four-wave mixing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1):69~72
 - 6 O. Aso, Shin-Ich Arai, T. Yagi *et al.*. Broadband four-wave mixing generation in short optical fibres [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8):709~711
 - 7 K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki *et al.*. CW three-wave mixing in single-mode optical fibers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(10):5098~5106
 - 8 J. Hansryd, F. Dross, M. Westlund *et al.*. Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(11):1691~1697
 - 9 Ni Yi, Peng Jiangde, Ke Yajie *et al.*. Single-mode photonic crystal fiber with a large core [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):901~903
倪屹, 彭江得, 柯亚杰 等. 大芯区的单模光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):901~903
 - 10 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*. The mode characteristics of the photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):324~329
王智, 任国斌, 娄淑琴 等. 光子晶体光纤模式特征的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):324~329
 - 11 J. Hansryd, P. A. Andrekson, J. Li *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3):506~520
 - 12 J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi *et al.*. Investigation of Brillouin effects in small-core holey optical fiber: Lasing and scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8):927~929
 - 13 J. H. Lee, W. Belardi, K. Furusawa *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
 - 14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed. New York: Academic, 1995