

基于光子晶体光纤的 1 μm 波段参量放大器

王小建 杨四刚 陈宏伟 陈明华 谢世钟

(清华大学电子工程系信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要 利用零色散波长在 1020 nm 附近的光子晶体光纤(PCF),对光纤光参量放大器(OPA)进行了研究。为了在较短的光纤中产生足够的参量增益,搭建了锁模掺镱光纤激光器作为抽运种子源,采用其具有高峰值功率的脉冲进行抽运。该激光器产生的短脉冲被放大后注入到 PCF 进行抽运。当抽运脉冲的中心波长接近光纤的零色散波长时,观测到了显著的参量增益。研究了不同抽运功率以及不同抽运波长下参量增益的变化,最高获得了 23 dB 的参量增益。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;光参量放大;四波混频;锁模激光器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906007

Optical Parametric Amplifier at 1 μm Based on Photonic Crystal Fiber

Wang Xiaojian Yang Sigang Chen Hongwei Chen Minghua Xie Shizhong

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on a photonic crystal fiber (PCF) with zero-dispersion wavelength of about 1020 nm, fiber optical parametric amplifier (OPA) is investigated in detail. In order to obtain sufficient parametric gain in a rather short length of fiber, a passively mode-locked ytterbium fiber laser is built up to act as the pump seed, and pulse with high peak power is utilized to pump. The amplified short pulse from the mode-locked fiber laser is launched into the PCF to pump. Once the pump central wavelength approaches the zero-dispersion wavelength, significant parametric gain can be observed. The evolutions of parametric gain spectra versus different pump powers and pump wavelengths are investigated. The maximum parametric gain reaches 23 dB from experiment.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; optical parametric amplification; four-wave mixing; mode-locked laser

OCIS codes 060.5295; 190.4970; 190.4380; 140.4050

1 引 言

特殊波段激光在许多领域都有重要应用,例如光学相干层析术(OCT)、激光雷达、空间光通信、波长变换等^[1-2]。基于光子晶体光纤(PCF)的光参量放大器(OPA)可以实现多种特殊波段上的光放大,通过引入适当的反馈,可以进一步实现多种特殊波段下的光纤参量振荡器^[3]。利用 1 μm 波段激光器抽运的参量放大器有可能实现光纤通信波段与可见

光之间的波长变换,具有广泛的前景。由于缺乏零色散波长位于 1 μm 波段的特殊光纤,1 μm 波段的参量放大器研究长期落后于 C 波段参量放大器。PCF 由于其结构比传统掺镱光纤更加复杂,具有更多的结构参数可以被定制,因此具有非常灵活的色散特性。随着 PCF 制造工艺的成熟,通过设计特殊纤芯结构可以确保其零色散波长位于 1 μm 附近^[4-5]。因此,基于 PCF 的 OPA 和振荡器成为目

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-05-07

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327606)、国家自然科学基金(611108007)

作者简介: 王小建(1989—),男,硕士研究生,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: wangxiaojianffgz@163.com

导师简介: 杨四刚(1978—),男,博士,讲师,主要从事非线性光学、激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: ysg@tsinghua.edu.cn

前研究的热点之一^[6]。2009年, Sylvestre等^[7]报道了1040~1090 nm波段基于光子晶体光纤的参量放大器,利用调Q激光器产生的450 ps脉宽连续光抽运,峰值增益达到40 dB^[7]。2010年, Lee等^[8]报道了1050~1080 nm波段的全光纤结构参量放大器,同样采用光子晶体光纤作为增益介质,利用调制后脉宽为3.4 ns、占空比为1/16的脉冲源抽运,实现了37 dB的净增益。2012年, Mussot等^[9]报道了1 μm附近20 THz带宽(约100 nm)的参量放大器,峰值增益接近40 dB。

以上研究均利用连续光或者准连续光作为抽运源。这种抽运方式的不足之处是所需要的抽运平均功率达到了瓦级,且峰值功率相对于发生显著四波混频的要求仍然偏小。如果利用皮秒脉冲激光器进行抽运,可以通过十几毫瓦的抽运平均功率,实现高达几十瓦的抽运峰值功率。这样大的峰值功率非常易于实现参量放大^[10]。本文利用自制的宽带可调谐皮秒锁模光纤激光器抽运PCF,实现了1 μm波段的单抽运OPA,最高实现了23 dB增益。所用的PCF为本实验室设计的国产PCF,具有完全自主知识产权。

2 原理分析

产生有效参量增益需要让抽运光、信号光和闲频光满足相位匹配的要求。为此,一般让抽运光工作在光纤的零色散点附近实现相位匹配^[9-10]。对于单抽运情形,要求满足有效相位失配

$$\kappa = \Delta k_M + \Delta k_w + \Delta k_{NL} = 0, \quad (1)$$

其中,材料色散导致的相位失配为 $\Delta k_M \approx \beta_2 \Delta \omega^2 + (\beta_4/12) \Delta \omega^4$, β_2, β_4 分别为光子晶体光纤的群速度色散参量和四阶色散参量;波导色散导致的相位失配 Δk_w 在单模光纤中一般为0;非线性效应导致的相位失配为 $\Delta k_{NL} = 2\gamma P_0$, γ 表示非线性系数, P_0 表示抽运功率。当抽运波长非常靠近光纤的零色散点时可以忽略 β_4 的影响。普通光纤的零色散波长大于1.3 μm,在1 μm处均为正常色散,其材料色散和非线性导致的相位失配均为正,不能实现相位匹配。而光子晶体光纤能够获得低于1.3 μm的零色散波长。实验中所用的PCF零色散波长位于1.02 μm,在1 μm附近可以实现相位匹配。

对于光参量放大器,拉曼增益的阈值抽运功率一般大于产生显著四波混频的阈值抽运功率,观测四波混频增益需要避免产生显著的拉曼增益。拉曼

增益的临界抽运功率为^[11]

$$P_0^{cr} \doteq \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (2)$$

式中 A_{eff} 为光纤的有效模场面积, L_{eff} 为光纤的有效长度, g_R 为拉曼增益系数,对于1 μm抽运波长, $g_R \approx 1 \times 10^{-13}$ 。实验中使用的PCF孔径和孔间距分别为: $d = 1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6.2 \mu\text{m}$ 。计算得到拉曼阈值约为240 W。当抽运峰值功率为几瓦时即会发生明显的参量放大,考虑到拉曼增益的影响,输入的抽运光峰值功率在几十瓦时很适合观测四波混频增益。但是拉曼增益的影响始终存在,它会导致参量增益的长波侧增益大于短波侧增益。

实验中通过测量放大自发辐射(ASE)谱来近似代替放大器增益谱,对于没有显著抽运耗尽的情形,这种近似是被普遍采用的^[12]。主要原因是参量放大器的噪声系数非常低,几乎可以接近量子噪声极限(3 dB)^[13]。另外一方面原因是所需的可调小信号源不易获得。

3 实验设计

参量放大器实验装置如图1所示。采用长飞光纤制作的50 m PCF作为参量增益介质,其电镜图如图2所示。为了在较短的光纤中产生足够的参量增益,采用脉冲抽运方案。采用被动锁模激光器产生的脉冲作为种子源,经掺镱光纤放大器(YDFA)放大后注入PCF进行抽运;再将经99:1的耦合器后1%端口的光输入到光谱分析仪(OSA)中,测量ASE谱。为防止反射光损伤抽运源,放大器前加有隔离器(ISO)。由于PCF的纤芯面积较小,直接与单模光纤熔接会因模场失配产生非常大的损耗。为此,采用一段纤芯较小的高非线性光纤作为过渡,首先通过长时间放电熔接单模光纤与高非线性光纤,二者连接处将形成锥形纤芯结构,然后通过短时放电熔接高非线性光纤与PCF,二者仅粘合在一起即可,最终可以将总熔接损耗控制在6 dB以内。参量放大对偏振敏感,而PCF具有较大的双折射,为获得尽量大的参量增益,需要在抽运输入端加偏振控制器(PC)^[14]。调节输入光偏振,当输入光为线偏振,且偏振方向和光纤主轴一致时,增益最大。若输入光为线偏振,且偏振方向与光纤主轴垂直,则增益为零。通过固定整个光路结构可以很好地保证放大器工作的稳定性。

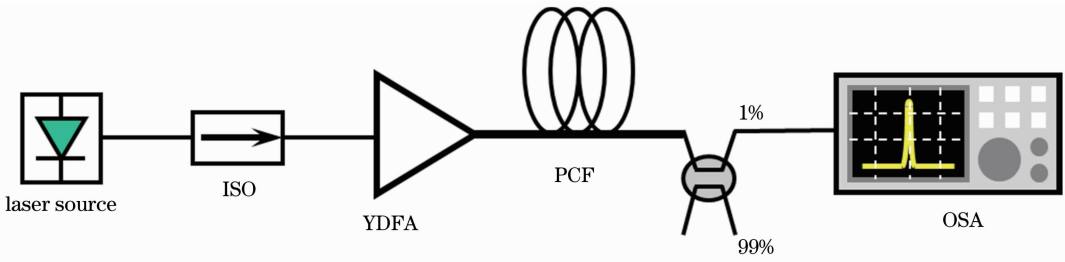


图 1 基于光子晶体光纤的参量放大原理图

Fig.1 Schematic diagram of optical parametric amplifier based on PCF

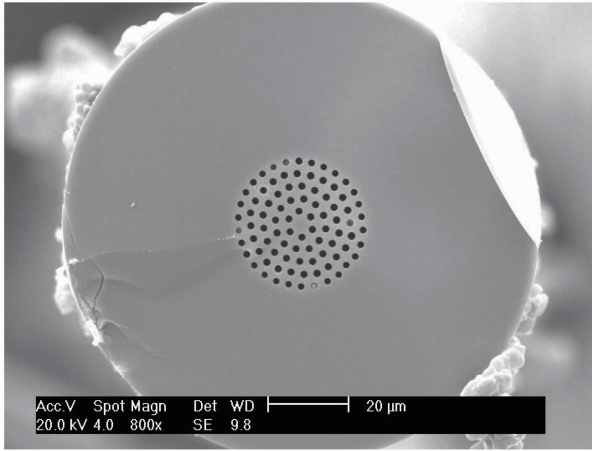


图 2 光子晶体光纤电镜图

Fig. 2 Electron micrograph of the PCF used in the experiment

PCF 折射率调制大, 结构复杂, 结构参数难以精确控制, 因此 PCF 的零色散波长在制作过程中相对于理论有一定的偏离。为了实现有效的相位匹配, 需要抽运光宽带可调谐, 从而与 PCF 的零色散波长相匹配。搭建了一个宽带可调谐锁模光纤激光器作为抽运源, 原理图如图 3 所示。976 nm 波长的抽运光经过波分复用器 (WDM) 注入环形腔。采用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为锁模器件, 采用腔内可调带通滤波器 (T-OBPF) 作为选频器件, 其 3 dB 带宽约为 3 nm, 通过改变可调带通滤波器的中心波长来调节输出的抽运波长。

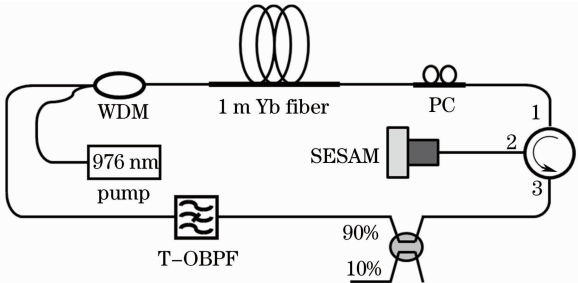


图 3 实验所用锁模激光器

Fig. 3 Mode-locked laser used in the experiment

该锁模激光器受限于腔内滤波器, 其波长调节范围为 1040 ~ 1080 nm, 而 PCF 的零色散波长在 1020 nm 附近, 因此抽运始终处于反常色散区。

4 结果分析

锁模激光器输出的抽运脉冲带宽为 2.38 nm, 时域脉宽约为 37 ps, 重复频率为 14.82 MHz, 经放大后脉冲带宽为 3.2 nm, 时域脉宽约为 19.2 ps, 峰值功率为 35 ~ 64 W。

图 4 是抽运波长为 1041 nm, 抽运功率分别为 10.1、10.5、10.9、12.6 dBm 时的 ASE 谱。需要指出, 通过多级放大可以进一步增强抽运功率 P_{pump} , 但将导致信号放大时的信噪比 (SNR) 显著降低。

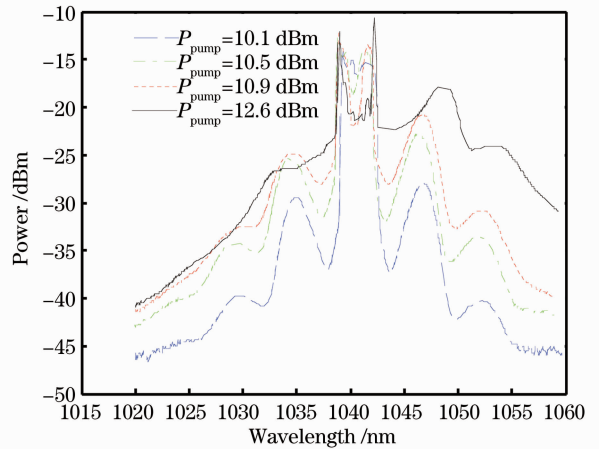


图 4 抽运波长为 1041 nm 时随抽运功率递增的 ASE 谱
Fig. 4 ASE spectra with the pump wavelength at 1041 nm under different pump powers

从图 4 中可以看出, 随着抽运功率的增大, 参量增益也在增大。峰值增益最大达到了 23 dB。由于小信号增益高于 ASE 谱的增益, 因此小信号增益最大可以超过 23 dB。同时, 随着抽运功率的增大, 增益区间逐渐远离抽运波长, 但是幅度很小。左右两侧的增益峰值不一致, 这是由于拉曼增益的影响造成的, 抽运功率增大时这一现象变得更加明显。

随着抽运功率的增大, 抽运光谱中心的部分逐

渐降低,形成凹陷。抽运功率继续增大,凹陷更加突出,最后仅在带边残留两个窄峰。对于抽运处有凹陷的增益谱,通过调节偏振,增益降低时凹陷变浅,增益增加时凹陷变深,凹陷最深会达到和两侧的增益峰接近的程度。由此推测中心凹陷是抽运光消耗导致的,受限于抽运和增益峰的能量之比。两侧的残余抽运窄峰可能是由于相位失配和调制不稳定导致的。因为实验中采用的抽运脉冲谱宽为 3.2 nm,远远大于之前实验^[7-10]所用的抽运谱宽。在全部抽运波段上实现近似相位匹配更加困难,这样的宽带抽运并不利于观察增益谱,因为增益区间中间的凹陷部分与抽运光谱重合。如果抽运带宽较窄,可以直接在 ASE 谱中去除抽运峰作为增益谱。但是宽带抽运的增益区间宽度也会相应增加。这是宽带抽运的优点之一。

图 5 是抽运功率固定为 10.9 dBm,抽运波长分别为 1041.2、1042.2、1044.2、1045.4 nm 时的 ASE 谱。

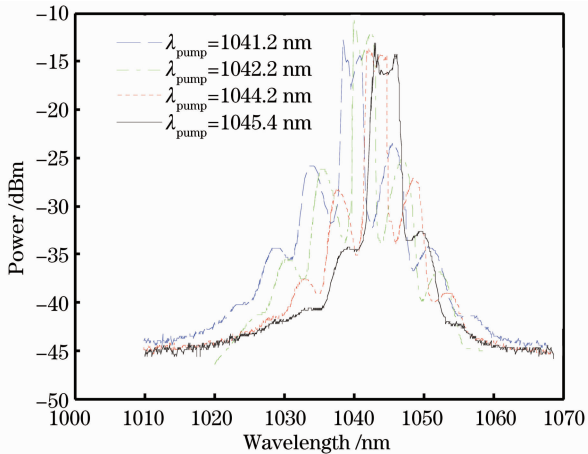


图 5 抽运功率 10.9 dBm 时随抽运波长递增的 ASE 谱
Fig. 5 ASE spectra with a pump power of 10.9 dBm at different pump wavelengths

上述实验结果表明,随着抽运波长偏离零色散波长,相同抽运功率下的参量增益会减小,增益带宽也会减小。这主要是因为抽运波长偏离零色散波长导致的相位失配 κ 已经可以和 γP_0 相比拟。要获得高参量增益需要相位失配 κ 很小,至少和 $2\gamma P_0$ 相比很小。

除抽运功率和抽运波长外,输入到 PCF 中的脉冲的偏振态也会对参量放大产生很大影响,即参量放大是偏振相关的。偏振态主要影响两个因素:1) 输入 PCF 的抽运脉冲的波形和稳定性;2) 参量放大的相位失配。前一个影响主要通过锁模激光器的腔内 PC 来控制,后一个影响主要通过输入 PCF 之

前加 PC 来控制。当抽运波长非常接近光纤零色散波长时,通过调节偏振能使参量增益达到最大值,由于该放大器为全光纤结构,因而不易精确测定偏振方向与增益之间的定量关系。

5 结 论

对基于 PCF 的 OPA 进行了实验研究。采用零色散波长为 1020 nm 附近的 PCF 作为参量增益介质;搭建了一套锁模掺镱光纤激光器作为抽运源、并对脉冲抽运光子晶体光纤 OPA 进行了系统的研究。观察并分析了抽运功率和抽运波长对参量增益的影响。抽运脉冲宽度为 19.2 ps,峰值功率为 35~64 W 时,采用 50 m PCF 作为增益介质,获得了最大 23 dB 的 ASE 谱增益。

参 考 文 献

- 1 Y Pan, E Lankenou, J Welzel, *et al.*. Optical coherence-gated imaging of biological tissues [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1996, 2(4): 1029-1034.
- 2 D M Winker, R H Couch, M P McCormick. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 164-180.
- 3 Y J Deng, Q Lin, F Lu, *et al.*. Broadly tunable femtosecond parametric oscillator using a photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 2005, 30(10): 1234-1236.
- 4 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(1): 57-66.
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展 [J]. 中国激光, 2006, 33(1): 57-66.
- 5 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 539-542.
吴铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(3): 539-542.
- 6 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.
- 7 T Sylvestre, A Kudlinski, A Mussot, *et al.*. Parametric amplification and wavelength conversion in the 1040~1090 nm band by use of a photonic crystal fiber [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(11): 111104.
- 8 M W Lee, T Sylvestre, M Delqué, *et al.*. Demonstration of an all-fiber broadband optical parametric amplifier at 1 μm [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(15): 2173-2178.
- 9 A Mussot, A Kudlinski, R Habert, *et al.*. 20 THz bandwidth continuous-wave fiber optical parametric amplifier operating at 1 μm using a dispersion-stabilized photonic crystal fiber [J]. Opt Express, 2012, 20(27): 28906-28911.
- 10 D Bigourd, L Lago, A Mussot, *et al.*. High-gain fiber, optical-parametric, chirped-pulse amplification of femtosecond pulses at 1 μm [J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3480-3482.
- 11 P Govind Agrawal. Nonlinear Fiber Optics (Third Edition) [M]. New York: Academic Press, 2001.
- 12 M E Marhic, K K Y Wong, L G Kazovsky. Wide-band tuning of

- the gain spectra of one-pump fiber optical parametric amplifiers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2004, 10(5): 1133–1141.
- 13 K K Wong, K Shimizu, M E Marhic, *et al.*. Continuous-wave fiber optical parametric wavelength converter with +40-dB conversion efficiency and a 3.8-dB noise figure [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(9): 692–694.
- 14 Y Zheng, L Zhang, Y Y Yao, *et al.*. Characteristics of nanostructured photonic crystal fibers with high birefringence [J]. *Classical Area of Phenomenology*, 2010, 59(2): 1101–1107.

栏目编辑：王晓球