

文章编号: 0253-2239(2008)06-1051-06

双抽运光纤光参变放大的全光多波长变换与码型转换

江 阳^{1,2} 于晋龙² 张爱旭² 王文睿² 胡 浩² 张立台² 杨恩泽²

(¹ 贵州大学理学院贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025
² 天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 利用强度调制的数据信号光作为一路抽运光,与另一路直流或者正弦强度调制抽运光组合可以在双抽运光纤光参变放大过程中实现全光多波长变换或者在全光多波长变换的同时实现码型转换。理论上,从信号增益的角度分析了波长转换与码型转换的原理。实验上演示了 2.5 Gb/s 的非归零(NRZ)码信号的全光多波长变换与到归零(RZ)码信号的转换。多波长转换实验表明:双抽运条件下的光参变过程可以实现多波长转换并得到正、反码的输出,还同时对信号有一定的再生作用。码型转换后信号的占空比为 30%,消光比也得到提高。

关键词 光纤通信; 光参变放大; 波长变换; 码型转换

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

All Optical Multi-Wavelength Conversion and Data Format Conversion Based on Dual-Pumped Fiber Optical Parametric Amplifier

Jiang Yang^{1,2} Yu Jinlong² Zhang Aixu² Wang Wenrui² Hu Hao²
Zhang Litai² Yang Enze²

(¹ Guizhou Provincial Key Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China
² Laboratory of Fiber Communication, School of Electronic Information Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract By the combination of data intensity modulated pump and continuous wave pump or sinusoidal intensity modulated pump, all optical multi-wavelength conversion and multi-wavelength conversion with data format conversion are presented by using a dual-pumped fiber optical parametric amplifier (FOPA). The operation principle is analyzed with respect to the gain. Experimentally, the multi-wavelength conversion and multi-wavelength conversion with data format conversion between non-return-to-zero (NRZ) and return-to-zero (RZ) are demonstrated under the bit rate of 2.5Gb/s. The experimental results indicate that the dual-pumped fiber optical parametric amplifier is able to implement multi-wavelength conversion to achieve normal and invert pattern with some degree of regeneration. The data format conversion gives the signal with duty ratio of 30% and improved extinction ratio.

Key words optical fiber communication; optical parametric amplification; wavelength conversion; data format conversion

1 引 言

全光多波长变换是高速光波分复用(WDM)系统中的一项关键技术,它可以把单路信号同时转换

到多路不同的波长通道,而不需要多个光—电—光转换步骤,可以方便地用于网络的组播或者波长路由。而针对不同的通信网络特性,也有对信号调制

收稿日期: 2007-11-01; **收到修改稿日期:** 2007-11-22

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z272)、国家自然科学基金(60572013)和贵州省国际科技合作重点项目计划(400112)资助课题。

作者简介: 江 阳(1975—),男,讲师,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: jiangyang415@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统以及全光信息处理等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

码型的不同要求。因此发展多波长变换和码型转换技术是一项有意义的工作。

近年来,报道了很多全光多波长变换方案,例如:利用半导体光放大器(SOA)中的交叉相位调制和交叉增益调制^[1~3];利用色散光纤中的交叉相位调制^[4]以及光纤参变放大器(FOPA)中的交叉增益调制等^[5]。这些方案都或多或少有不足之处。比如半导体光放大器中由于载流子的动态变化存在着码型效应和码率限制;利用交叉相位调制时对码型有要求(归零码系统);交叉增益调制产生的是“反”码并引起的消光比恶化和一定的功率代价。与这些方案相比,使用对抽运光调制的光纤参变放大器来实现全光多波长变换有其独特的优势^[6~8]。

参变过程(四波混频)具有很高的响应速率,很宽的增益谱,良好的噪声性能和生成闲频光的特质,可以实现对码率和码型透明的两倍于信号光路数的多波长变换^[9]。单抽运模式下的光纤参变放大器用于波分复用(WDM)光源实现多波长变换、以及产生光脉冲和实现非归零(NRZ)码到归零(RZ)码的转换已有研究和报道^[6,10,11]。但是应该指出,双抽运的光纤参变放大器相较于单抽运情况而言,更有优势,主要体现在:双抽运光纤参变放大器可以更方便地获得宽带更大的平坦增益谱;双抽运可以达到更高的抽运功率以获得更高的增益^[12,13];由于通常采用相位调制抽运光以抑制受激布里渊散射(SBS),这会使闲频光的光谱展宽,而在双抽运情况下,使用反相相位调制,可以避免这一情况^[14]。另外,由于两路抽运光都对增益有贡献,可以通过控制两路抽运光的功率变化实现全光逻辑和全光信号处理的功能^[15]。

为了研究在更大波长范围内实现多波长变换以及在波长变换同时获得码型转换,本文采用了非归零(NRZ)数据调制光为L波段抽运光,直流光为C波段抽运光的双抽运光纤参变放大器对多波长变换的研究。结果表明在增益带宽范围内(包括C波段和L波段),双抽运光纤参变放大器可以很好地实现全光多波长变换并且转换得到的信号在消光比和Q值上都可以获得一定程度的提高;此时在C波段的抽运光由于功率消耗,得到“反”码;另外,若对C波段的抽运光进行同频正弦强度调制,可以在进行波长变换的同时实现非归零码到归零(RZ)码的码型转换。

2 原理分析

四波混频是光纤中一类重要的非线性现象,其

过程可描述为:若光纤中有角频率为 ω_1, ω_2 (假设 $\omega_1 > \omega_2$)两路强抽运光与角频率为 ω_s 弱信号光同时注入,在非线性作用下,抽运光能量会转移到信号光,使信号光功率放大,并同时生成角频率为 ω_i 的闲频光。抽运光与信号,闲频光在频率上满足关系: $\omega_1 + \omega_2 = \omega_s + \omega_i$ 。

在高非线性光纤(HNLF)中,为了满足相位匹配条件并获得平坦增益谱,两路抽运光一般以零色散波长点为对称分列在两侧。此时,信号光,闲频光获得的增益 G_s, G_i 表示为(假设抽运光无功率消耗)^[16]:

$$\begin{cases} G_s = 1 + (1 + \kappa^2/4g^2) \sinh^2(gL), \\ G_i = (1 + \kappa^2/4g^2) \sinh^2(gL), \end{cases} \quad (1)$$

式中 L 为光纤长度, κ 为净相位失配,且有 $\kappa = \Delta k + \gamma(P_1 + P_2)$, Δk 表示波矢失配, γ 为光纤非线性系数, P_1, P_2 为抽运光功率。参变增益 g 表示为

$$g = \sqrt{(\gamma P_0 r) - (\kappa/2)^2},$$

其中的参量 r 和 P_0 定义为:

$$r = 2(P_1 P_2)^{1/2}/P_0, P_0 = P_1 + P_2.$$

若相位严格匹配($\kappa = 0$)且 $gz \gg 1$,最大增益可近似写为

$$G \approx \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_0 r L), \quad (2)$$

首先考虑当抽运光 ω_2 被非归零数据强度调制,而 ω_1 为连续光时的情况。当“1”码出现时,形成双抽运光纤参变放大器,信号光得到 G_s 的增益被放大,并同时生成闲频光。而当“0”码出现时,只有 ω_1 的抽运光且相位匹配条件不满足,信号光不能获得增益,也没有闲频光产生。这样,调制在 ω_2 抽运光上的数据就被复制在了信号光与闲频光上,实现1比2的波长变换,而信号光在增益带宽范围内可调。若在增益带宽范围内注入 N 个信号光,就可以得到 N 比 $2N$ 的多波长变换。此外,实际过程中,由于发生能量转移,抽运光能量被消耗,因此,在 ω_1 抽运光上生成与 ω_2 上信号强度变化相反的“反”码信号,调制深度由功率消耗决定。显然,与单抽运光纤参变放大器相比,双抽运结构更容易获得大抽运功率,使得信号增益更大,有利于波长转换信号消光比的提高。该过程由图1(a)所示。

另外,考虑抽运光 ω_2 被非归零数据强度调制,而 ω_1 为同频正弦强度调制时的情况。调整两路延时使两路信号同步。与前面的讨论类似,当 ω_2 出现“0”码,由于相位匹配条件不成立,信号光没有增益;当出现“1”码时,相位匹配条件满足,信号光的增益

变化由两路抽运光的即时功率决定,在信号光上形成归零脉冲输出。其整个工作机制与利用参变放大过程产生光脉冲源的原理类似,所生成的归零脉冲

占空比小于 50%,并有一定的正啁啾^[11]。需要注意的是,此时两路抽运光的平均功率比会影响参变增益 g ,进而影响增益。该过程如图 1(b)所示。

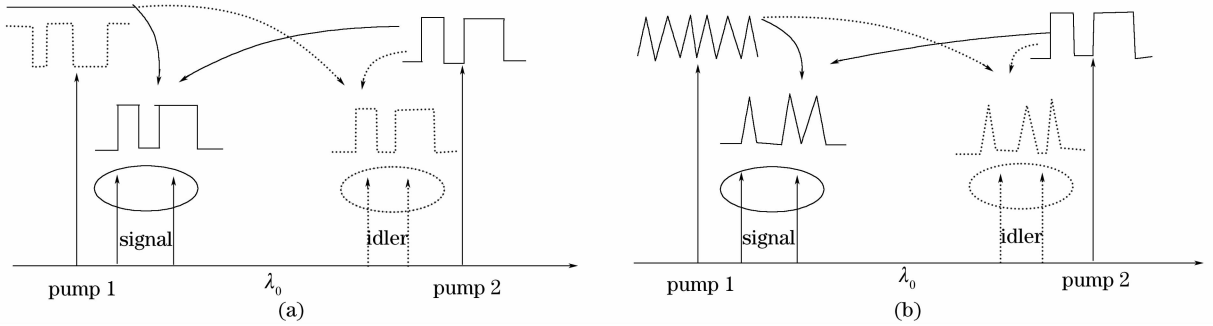


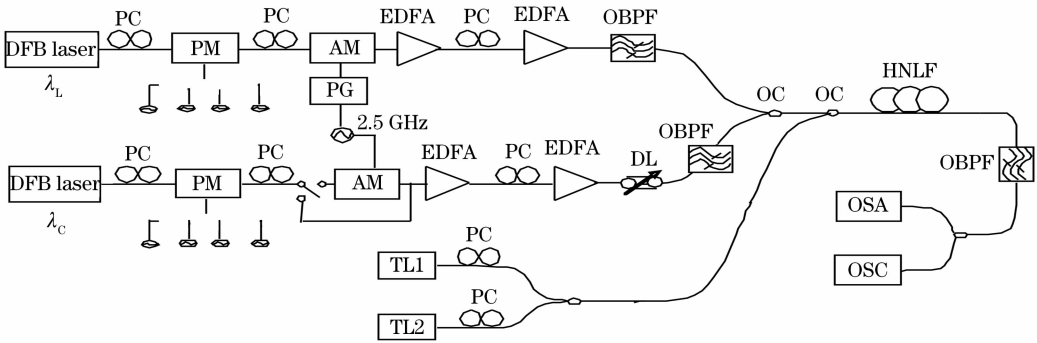
图 1 双抽运光纤参变放大器中(a)多波长变换与(b)多波长变换与码型转换示意图

Fig. 1 Illustration of (a) the multi-wavelength conversion and (b) the multi-wavelength conversion with data format conversion in a dual-pumped FOPA

3 实验结果与讨论

图 2 为实验结构图。两个分布反馈激光器分别用作 L 波段和 C 波段的抽运光,波长为 $\lambda_L=1594.7\text{ nm}$ 和 $\lambda_C=1544.7\text{ nm}$ 。频率分别为 100 MHz, 300 MHz, 900 MHz 和 2700 MHz 的四个正弦信号混合后对抽运光进行相位调制以抑制受激布里渊散射(SBS)。两个强度调制器可以把 2.5 Gb/s 伪随机非归零码信号(字长为 $2^{31}-1$)和 2.5 GHz 的正弦信号分别

调制到两路抽运光上。掺铒光纤放大器(EDFA)将抽运光放大后通过一个带宽为 2 nm 的光带通滤波器(OBPF)滤除自发辐射(ASE)噪声并与信号光耦合后注入高非线性光纤。实验中使用的高非线性光纤长为 500 m,非线性系数为 $20\text{ W}^{-1}/\text{km}$,零色散波长在 1569.7 nm。延时线(DL)用于调节两路抽运光信号的同步,系统输出端使用一个带宽为 1 nm 的光带通滤波器滤出信号光后进行分析。



PC: polarization controller; PM: phase modulator; AM: amplitude modulator; PG: pattern generator; OBPF: optical band-pass filter; DL: delay line; OC: optical coupler; TL: tunable laser; OSA: optical spectrum analyzer; OSC: oscilloscope

图 2 多波长转换与码型变换实验图

Fig. 2 Experimental setup for multi-wavelength conversion and data format conversion

实验中,C 波段与 L 波段提供的抽运功率分别为 692 mW 和 288 mW,此时可以得到带宽约为 30 nm 的平坦增益谱,所测得的小信号增益如图 3 所示。先采用一路信号光注入并在整个增益带宽内连续调节。信号功率约为 -10 dBm, L 波段抽运光调制非归零码数据($Q=13$,消光比为 9.2), C 波段抽运光为连续光。波长变换后所得到的信号 Q 值

和消光比如图 4(a)和图 4(b)所示。可以看出,转换后的信号在消光比上整体得到提高。由于增益平坦,所得到的带宽内消光比也呈现平坦性。从信号 Q 值上看,在大部分带宽范围内转换到信号光和闲频光上的信号都有一定程度的改善。信号光在 1570 nm 附近的 Q 值有所恶化,这是因为此时信号光和所产生的闲频光波长很接近,而实验中滤波器

的带宽过大,不能有效抑制另一个信号。同时,也由于波长的接近,信号光与闲频光之间有强的串扰^[6]。图 5(a)给出了当信号光波长为 1558 nm 时,光纤参变放大器输出的光谱;图 5(b)为注入高非线性光纤时调制在抽运光上信号的眼图;图 5(c)~图 5(e)分别为光纤参变放大器输出的信号光,闲频光,C 波段抽运光上得到的“反”码信号且有较大的直流量,但是测得信号 Q 值为 18,具有很好的信噪比。

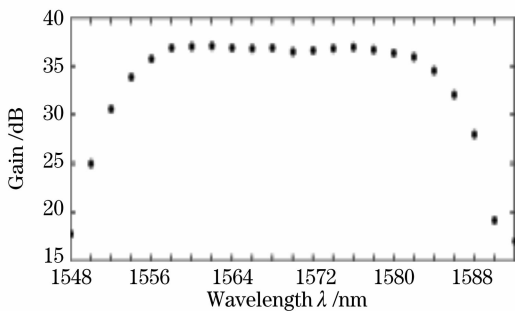


图 3 测得的小信号开关增益
Fig. 3 Measured on-off gain

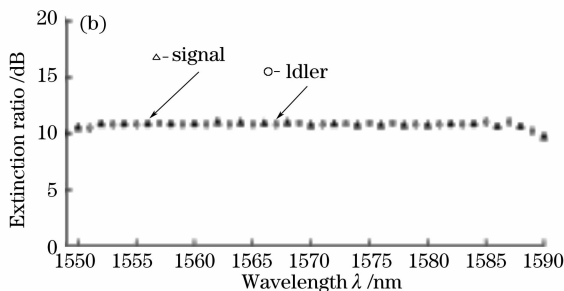
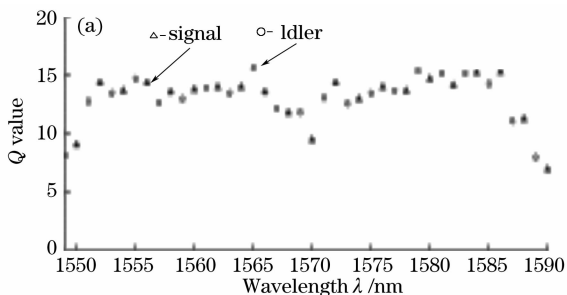


图 4 调节信号光波长从 1548 nm 到 1590 nm,所测得的波长转换后信号光与对应闲频光(a)信号 Q 值和(b)消光比
Fig. 4 Measured (a) Q values and (b) extinction ratio for inputs and corresponding idlers after wavelength conversion the input wavelength is tuned from 1548 nm to 1590 nm

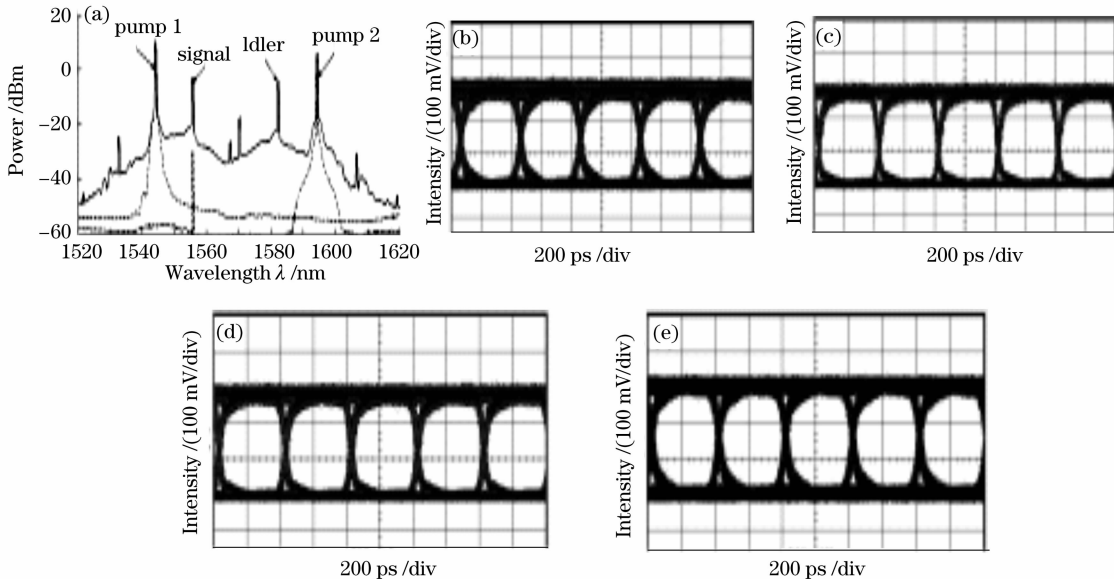


图 5 (a)双抽运光纤参变放大器的输出光谱,(b)抽运光 2 上的调制信号眼图,(c) 波长 1558 nm 信号光上所得到的信号眼图,(d) 对应闲频光上的信号眼图,(e) 抽运光 1 上“反”码信号眼图

Fig. 5 (a) Output spectrum of the dual-pumped FOPA, (b) signal eye diagram on pump2, (c) eye diagram on signal light at wavelength of 1558 nm, (d) eye diagram on corresponding idler, (e) eye diagram on pump1 with invert pattern

为了了解多个信号光注入时波长转换的性能,在保持 1558 nm 波长信号光注入的同时再注入 1556 nm 波长的信号光。这里选择两路信号光相差 2 nm 是由于实验中用于滤出信号光所使用的光带通滤波器带宽为 1 nm 的缘故。通过比较单信号光

注入与两信号光注入所得到信号的 Q 值和消光比,发现多个信号光注入对波长变换信号没有明显的影响。限于实验条件,没有演示波分复用光源注入所得多波长变换的性能,但是从两信号光注入实验与单抽运光纤参变放大器波长变换的文献报道可以相

信在双抽运工作模式下,可以实现对波分复用光源进行多波长变换^[6]。

正如前面的讨论,通过对 C 波段抽运光调制 2.5 GHz 的正弦信号,在多波长变换的同时,实现了码型转换。图 6(a)和图 6(b)给出了注入信号光波长 1558 nm 时,信号光与闲频光上转换得到的归零

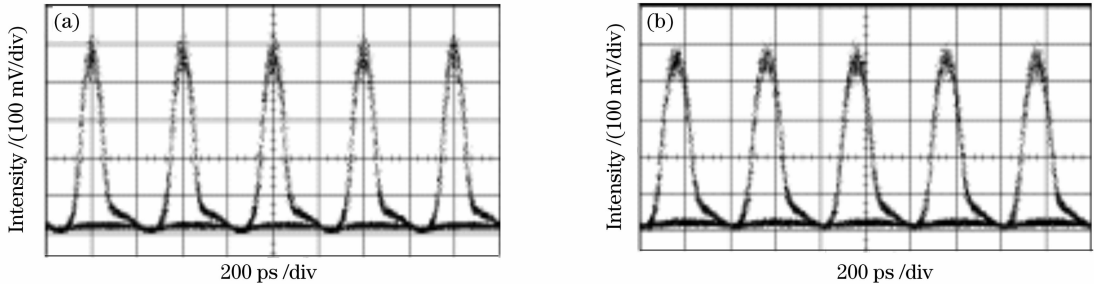


图 6 码型变换后得到的归零码信号。(a) 波长 1558 nm 信号光, (b) 对应的闲频光

Fig. 6 RZ pattern of (a) signal at wavelength of 1558 nm and (b) the corresponding idler after data format conversion

虽然实验演示中信号码率为 2.5 Gb/s,但是四波混频过程具有极高的响应速率,因此该方案完全可以满足更高码速率的要求。此外,报道的双抽运的参变放大器可以实现 115 nm 的平坦增益带宽^[17],因此可操作的波长范围可以覆盖整个 C 和 L 波段。波长变换时,也可以使用归零码信号,而此时若用窄脉冲用作另一路抽运,可以在增益带宽范围内获得更小占空比的归零脉冲。适当选取另一路抽运光的功率变化还可以实现全光逻辑功能。因此所提出的方案具有很大灵活性和应用空间。

4 结 论

分析设计了利用双抽运光纤参变放大器进行多波长变换与码型转换的方案。研究表明,采用调制抽运光与直流抽运光的组合可以在很大波长调节范围内实现多波长转换,并伴随一定程度的信号质量改善,还可以同时得到正码和“反”码。采用非归零码调制抽运光与同频正弦信号调制另一路抽运光的组合,可以在实现多波长变换的同时实现码型转换。整个系统具有码率,码型透明的特点,并且通过合理设计还可以开发出更多的高速全光信号处理功能。

致谢 感谢在瑞典 Chalmers University of Technology 的 MC2 实验室访问期间 Prof. Peter A. Andrekson 和 Dr. Henrik Sunnerud 的热心指导和在实验上提供的帮助。感谢 MC2 实验室对该实验的支持。

码信号。测得信号占空比为 30%,消光比为 14 dB。此时归零带有一定的正啁啾,可以通过具有一定负色散量的介质(例如普通单模光纤)进行压窄^[11]。闲频光上信号占空比为 35%,这个差别是由于信号光和闲频所获得的增益略有不同造成的。在双信号光注入情况下,信号质量也无明显变化。

参 考 文 献

- 1 H. S. Chung, R. Inohara, K. Nishimura *et al.*. All-optical multi-wavelength conversion of 10 Gbit/s NRZ/RZ signals based on SOA-MZI for WDM multicasting [J]. *IEE Electron. Lett.*, 2005, **41**(7): 432~433
- 2 Junyi Zhang, Jian Wu, Kun Xu *et al.*. All-optical wavelength conversion based on nonlinear polarization rotation (NPR) in SOA and AWG filtering[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 205~207
- 3 Yu Jinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 801~806
于晋龙,王耀天,张爱旭等. 40 Gb/s 信号全光 3R 再生实验[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 801~806
- 4 Lavanya Rau, Wei Wang, Stefano 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
- 5 Kenneth K. Y. Wong, Guo-Wei Lu, Kwan-Chi Lau *et al.*. All-optical wavelength conversion and multicasting by cross-gain modulation in a single-stage fiber optical parametric amplifier[C]. *OFC 2007*, OTu14
- 6 Guo-wei Lu, Kazi Sarwar Abedin, Tetsuya Miyazaki. All-optical broadband tunable wavelength multicasting using a pump-modulated wide band fiber optical parametric amplifier with high and flat gain [C]. *Proc. European Conference on optical Communication (ECOC)*, 2007, **5**: 81~82
- 7 K. K. Chow, Chester Shu, Chinlong Lin *et al.*. All-optical wavelength multicasting with extinction ratio enhancement using pump-modulated four-wave mixing in a dispersion-flattened nonlinear photonic crystal fiber [J]. *IEEE J. Sel. Top. In Quant. Electron.*, 2006, **12**(4): 838~842
- 8 N. Yan, A. Teixeira, T. Silveira *et al.*. Optical multicasting performance evaluation using multi-wavelength conversion by four-wave mixing in DSF at 10/20/40 Gb/s[C]. *International Conference on Photonics in Switching Conference*, 2006. 1~3
- 9 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. In Quant. Electron.*, 2002, **8**(3): 506~520
- 10 J. Hansryd, P. A. Andrekson. Wavelength tunable 40 GHz

- pulse source based on fiber optical parametric amplifier[J]. *IEE Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 584~585
- 11 Thomas Torounidis, Magnus Karlsson, Peter A. Andreskson. Fiber optical parametric amplifier pulse source: theory and experiments[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4067~4073
- 12 Li Qiliang, Li Yuanming, Qian Sheng. Gain of cascaded two-pump fiber-optical parametric amplifier with high order dispersion [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 760~764
李齐良, 李院民, 钱 胜. 具有高阶色散双抽运级联光纤参量放大器的增益[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 760~764
- 13 Zhao Liang, Sun Junqiang. Gain characteristics of dual-pump optical parametric amplifiers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1086~1091
赵 亮, 孙军强. 双抽运光参变放大的增益特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1086~1091
- 14 Kenneth K. Y. Wong, Michel E. Marhic, Leonid G. Kazovsky. Phase-conjugate pump dithering for high-quality idler generation in a fiber optical parametric amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 33~35
- 15 Q. Lin, R. Jiang, C. F Marki *et al.*. 40-Gb/s optical switching and wavelength multicasting in a two-pump parametric device[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2376~2378
- 16 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.* transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 247~259
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 247~259
- 17 J. M. Chavez Boggio, J. D. Marconi, S. R. Bickham *et al.*. Spectrally flat and broadband double-pumped fiber optical parametric amplifiers[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(9): 5288~5307

《光学学报》“空间光学”专题征稿启事

随着国家对空间技术发展的不断重视,“神舟计划”、“嫦娥计划”的深入实施,国内空间技术不断发展,其中空间光学技术发挥了极其重要的作用。为集中反映“空间光学”领域国内外的最新发展,《光学学报》计划 2008 年 12 月推出“空间光学”专题栏目,特向国内外专家征集“空间光学”方面原创性的研究论文。

征稿范围包括:

- 空间观测与遥感
- 空间目标探测
- 空间信息链路技术
- 天基光电对抗
- 其他空间光学领域

截稿日期:

2008 年 10 月 5 日。

投稿方式及格式:

可直接将稿件电子版发至邮箱:gxxb@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“空间光学专题投稿”)。投稿文体不限,语种不限,其电子版请使用 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 gxxb@mail.shcnc.ac.cn 询问。