

文章编号: 0258-7025(2009)11-2952-05

基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长变换

董 泽^{1,2} 曹子峰^{1,2} 卢 嘉^{1,2} 陈 林^{1,2*} 余建军^{1,2}

(¹ 湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082;
² 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 实验研究了基于半导体光放大器(SOA)的四波混频(FWM)效应的单抽运光正交频分复用(OFDM)信号的波长变换系统。信号光源和抽运光源分别由两个不同输出波长的可调分布反馈式激光器(DFB-LD)产生。信号光源经 2.5 Gb/s OFDM 的电信号直接调制后再和抽运光源耦合,经光放大器后在 SOA 实现波长变换。实验结果显示,耦合信号经 SOA 四波混频效应后,产生新波长的信号光将携带 OFDM 信号,且转换效率与信号光和抽运光的功率、波长以及两者的偏振夹角有关。同时也测量了转换的 OFDM 信号的功率-误码曲线和接收星座图。

关键词 光通信;全光波长变换;四波混频;半导体光放大器;正交频分复用;单抽运

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093611.2952

All-Optical Wavelength Conversion Based on Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier for OFDM Optical Signal

Dong Ze^{1,2} Cao Zizheng^{1,2} Lu Jia^{1,2} Chen Lin^{1,2*} Yu Jianjun^{1,2}

(¹ School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China
² Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices, Ministry of Education, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract We have theoretically and experimentally investigated all optical wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) in a semiconductor optical amplifier (SOA). Pump and signal lightwaves are generated from two different distributed feedback laser diodes (DFB-LDs). 2 Gbit/s orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is used to modulate directly on the signal CW lightwave. The modulated signal lightwave and pump are coupled and then amplified before they are injected into the SOA for wavelength conversion based on four wave mixing effect. Experimental result shows that the newly converted wavelength signals copy the original OFDM signals and its conversion efficiency of the converted signals are proportional to the amplitudes of the input signal and the pumps under the condition of SOA non-saturation. The polarization angle between the pump and signal lightwave affects the optical power of the converted OFDM signal. The bit error rate (BER) curves and receive constellation are also measured.

Key words optical communication; all-optical wavelength conversion; four wave mixing; semiconductor optical amplifier; orthogonal frequency division multiplexing; single-pump

收稿日期: 2008-11-17; 收到修改稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263)、湖南省自然科学基金(06JJ50108)和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 董 泽(1984—),男,博士研究生,主要从事 Radio-over-Fiber 技术方面的研究。

E-mail: 1234abcd09@163.com

导师简介: 余建军(1968—),男,教授,主要从事 Radio-over-Fiber 及全光通信网等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: liliuchen12@vip.163.com

1 引言

随着通信技术的不断发展,下一代光通信系统朝着透明、全光、大容量和宽带宽的方向发展。波分复用(WDM)系统和时分复用(OTDM)系统增加了全光通信的带宽和容量,光标记交换技术使得光通信技术变得透明和便捷。全光波长变换技术,可以增加 OTDM 和 WDM 网络的互融性,实现光标记交换技术中的波长路由和波长重利用,有效地解决了光网络中有限波长信道的限制问题,以及提高网络管理的灵活性,更重要的是提高光网络的通信容量和传输速率^[1]。

全光波长变换技术从广义上可以分为两类:1)光学技术,包括基于半导体光放大器增益饱和效应(SOA-XGM)、基于半导体光放大器的交叉相位调制效应(SOA-XPM)、基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)激光器和分布式反馈(DFB)激光器的饱和吸收效应^[2,3]以及利用分布布拉格反射激光器、注入锁定半导体激光器和非线性光学环形镜(NOLM)效应的波长变换;2)新频率产生技术:利用 SOA 或者高非线性光纤的四波混频(FWM)效应和利用声光、电光混频实现的全光波长变换^[4]。而在众多全光波长变换技术中,利用半导体器件中四波混频效应技术尤为值得关注和研究,这归咎于半导体器件简捷实用,且易于在光器件中的集成。相对于基于高非线性光纤中的 FWM 效应,基于 SOA 中 FWM 效应的波长变换技术具有响应时间短和避免非线性以及色散效应影响的优势^[5,6]。

目前正交频分复用(OFDM)成为高速宽带无线通信的优选方案,是 4 G 通信的备选方案。可编程的数字信号处理(DSP)能在 OFDM 技术的多路子载频间灵活地实现自适应调制和功率分配,有效地按需分配带宽,提高射频(RF)频谱利用率;OFDM 抗多径衰落和窄带干扰特性明显;在光通信领域,OFDM 可以在一定程度上抵抗色散和偏振模色散的影响^[7~10]。OFDM 技术结合到光纤中以解决单模光纤大容量光传输中阻碍系统发展的色散、非线性效应则是最近两年来兴起的一种新技术。将 OFDM 技术引入到光纤信道中,从而实现光正交频分复用(OOFDM)的技术具有极高的研究价值^[11~14]。

本文研究了一种基于 SOA 中单抽运 FWM 效应的全光波长变换技术。提出并采用直接调制的 2.5 Gb/s 的 OFDM 光信号作为波长变换的信号光^[11,15]。经波长变换后的新的转换光信号同样携带 2.5 Gb/s 的 OFDM 光信号。同时研究了信号光

与抽运光的偏振关系,波长关系以及功率比 3 个方面对单抽运波长变换效率的影响^[16]。本文理论研究并实验验证了采用直接调制 OFDM 信号作为信号光用来实现波长变换,新产生的波长同样是 OFDM 信号。

2 基于单抽运四波混频效应的波长变换理论原理

首先在理论上对本系统进行分析,系统原理示意图如图 1 所示。两路连续光信号分别由两个分布反馈式激光器(DFB-LD1,DFB-LD2)产生。其中一路光信号经 OFDM 信号调制后再经一个光耦合器与第二路光信号(pump 信号)耦合。假设抽运光和信号光的表达式分别为 $E_i(\omega_i, r, t) = E_i(\omega_i, r) \exp[j(k_i x - \omega_i t + \varphi_i)]$, ($i = 1, 2$)。其中 k_i , ω_i 和 φ_i 分别为光的波矢、角频率和相位。假设抽运光和信号光与 x 轴的夹角分别为 θ 和 φ 。耦合光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)进行光功率放大后再经 SOA,实现 FWM 效应。将会产生两个新的边带,它们的频率分别为 $2\omega_1 - \omega_2$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$ 。只考虑边带 $2\omega_1 - \omega_2$ 。经过 SOA 后的表达式为

$$E_c = r(\omega_1 - \omega_2) \exp[j(2\varphi_1 - \varphi_2)] \times \exp[j(2\omega_1 - \omega_2)] A_1 A_2 \cos(\theta - \varphi) \vec{A}_1, \quad (1)$$

其中 $r(\omega_1 - \omega_2)$ 为转换效率系数,与抽运光和信号光之间的频率差有关。 A_1 和 A_2 分别为经过四波混频转换后的抽运光与信号光的幅度。因此,从(1)式可以得到转换光 $2\omega_1 - \omega_2$ 的功率为

$$P_C = r^2 (\omega_1 - \omega_2) A_1^2 A_2 \cos(\theta - \varphi), \quad (2)$$

从(2)式可以看出新波长的光的转换功率与信号光和抽运光的功率分配以及两者的偏振夹角有关。当抽运光与信号光平行时,输出功率最大。抽运光与信号光之间的距离越远,转换效率越低。

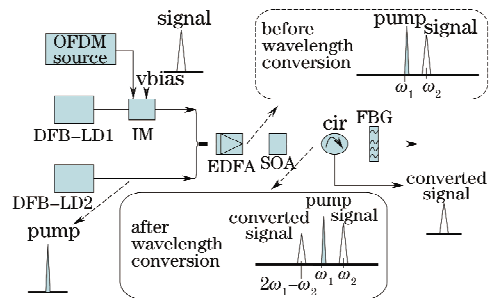


图 1 基于 SOA 中单抽运 FWM 效应的全光波长变换技术

Fig. 1 Principle of single-pump wavelength conversion based on FWM effect in SOA

3 实验装置及实验结果

系统实验装置及实验结果示意图如图 2 所示。本实验中采用 Ando 公司 6317 的光谱分析仪检测光谱,其波长范围为 600~1700 nm,最小分辨率为 0.01 nm。采用任意波形发生器(AWG)产生 2.5 Gb/s OFDM 信号,采用实时示波器进行 OFDM 信号的接收,并输出 OFDM 数据以便后续计算误码及星座图。

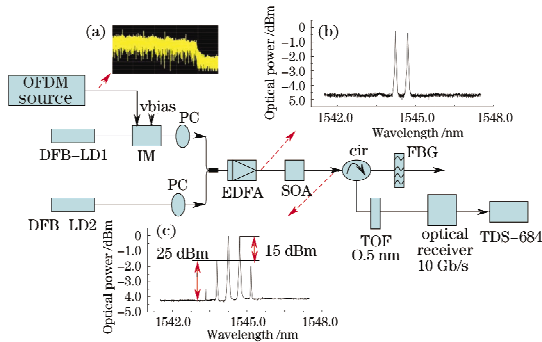


图 2 实验装置及结果示意图。(a) OFDM 信号的电谱图; (b) 进 SOA 前的光谱图; (c) 出 SOA 的光谱图
Fig. 2 Configuration of experimental setup and results for all-optical wavelength conversion based on single-pump FWM effect in SOA. (a) Electrical spectra of the OFDM signal; (b) optical spectra of the combined signals before SOA; (c) optical spectra of signal after SOA

实验首先由两个分布反馈式激光器产生波长为 1544.25 nm 和 1544.72 nm 的连续光波,分别用作抽运光信号和信号光信号。AWG 产生 2.5 Gb/s 的基于正交相移键控(QPSK)调制的 OFDM 信号,其电谱图如图 2(a) 所示。采用 AWG 产生的 OFDM 信号的过程分为两个部分,第一部分:将需要传输的伪随机码按照系统特性进行帧形成,将需要传输的数据按照特定数量打包,并根据需要将符号进行多进制符号映射(QPSK Mapper)。将数据帧映射为符号帧后,在各个符号中加入导频

(Pilot),并在高频部分插入作为保护间隔(GI)零值。将符号帧经过快速傅里叶变换(FFT)后形成多正交子载波,其波形就是基本 OFDM 波形,将这一波形的一部分复制到波形的头部作为克服信号时延的循环前缀(CP)。至此,数据信号的 OFDM 信号产生。第二部分:训练字的 OFDM 信号的产生,生成一个用于同步和信道估计的功能型 OFDM 信号。首先,根据需要形成一个训练字序列,将这个序列直接通过 FFT 形成子载波。将形成的多子载波波形(一部分中的 OFDM 波形)的一部分复制到波形的头部作为克服信号实验的循环前缀,形成训练字 OFDM 信号。在完成以上两个步骤后,将训练字 OFDM 复制在数据 OFDM 信号前形成一个完整 OFDM 信号,再经任意波形发生器生成完整的 OFDM 信号。

光路实验采用一个 3 dB 带宽大于 8 GHz,半波电压为 7.8 V,消光比大于 25 dB 的马赫-曾德尔单臂强度调制器,用于调制 1544.72 nm 的信号光信号,其中调制器的偏置电压为 2.32 V。一个 3 dB 光耦合器用于耦合调制光信号和抽运光信号。其光谱图如图 2(b) 所示。耦合光信号经 EDFA 光功率放大后进入 SOA 进行 FWM 效应实现波长变换,其光谱图如图 2(c) 所示。其中信号光、抽运光、进 SOA 光信号以及出 SOA 的转换后的光信号功率分别为:5.38 dBm,8.8 dBm,8.0 dBm,14.2 dBm。由图 2(c),转换波长为 1543.78 nm,转换信号的信噪比为 25 dB,原信号光与转换信号光的转换效率为 -15 dB。实验采用一个中心波长为 1543.78 nm,3 dB 带宽为 0.15 nm 的 FBG 和一个有效带宽为 0.5 nm 的可调谐光滤波器(TOF)滤出新产生的混频边带。经 FBG 反射的光信号的光谱图如图 3(a) 所示,经 TOF 滤出的转换波长的频谱图如图 3(b) 所示。经过波长变换后的 OFDM 进入 10 Gb/s 光接收机。经光接收机光电检测并输出的 OFDM 信号由实时示波器进行数据采集接收。

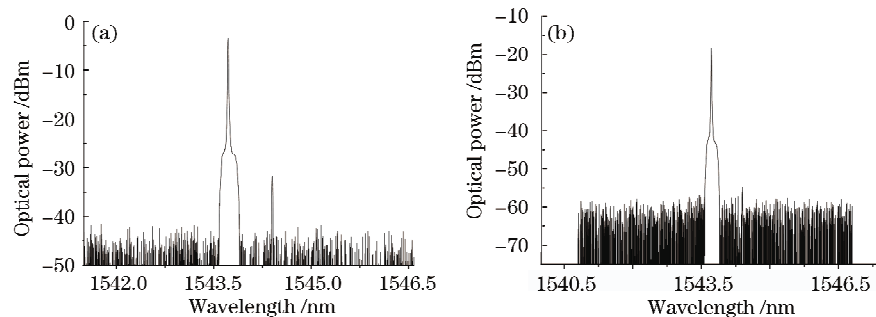


图 3 可调谐滤波器前(a)后(b)的光谱图
Fig. 3 Optical spectra before (a) and after (b) TOF

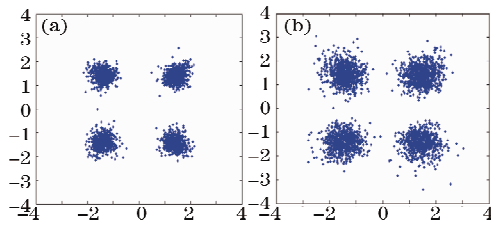


图 4 原 OFDM 信号光(a)和新产生波长的 OFDM 信号光(b) 的接收星座图

Fig. 4 Receive constellation of the original optical OFDM signal (a) and the converted optical OFDM signal (b)

原信号光和新转换波长的信号的解调星座图如图 4 所示。基于 QPSK 调制的 OFDM 信号在波长变换后仍然处于标准的 4 个区域。两者的功率-误码率曲线如图 5 所示。OFDM 传输 1×10^5 点数据的条件下,对采集的数据进行解调计算,其误码为 1×10^{-3} 时对应的接收功率为 21 dBm,其功率代价小于 0.5 dB。基于单抽运 FWM 效应的波长变换信号将会出现较原信号光频谱和相位反转的现象,在这种情况下,在实验波长变换过程中适当地调节脉冲调制(IM)的偏置电压,使得接收端波长变换后的信号相位和频谱恢复,用来测得接收数据。由解调得到的星座图可知,实验验证了采用直接调

制 OFDM 信号作为信号光用来实现波长变换,新产生的波长同样是 OFDM 信号。

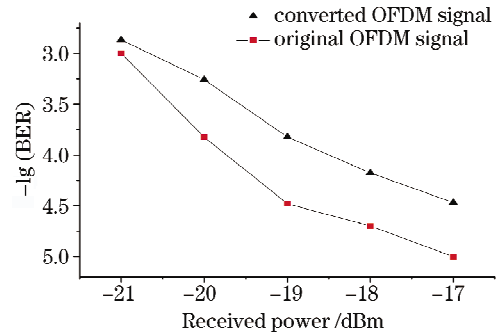


图 5 功率-误码率曲线

Fig. 5 Power-BER curves

研究了基于 SOA 中 FWM 效应的波长变换效率,本文将从信号光与抽运光的偏振关系、波长段关系以及功率比 3 个方面实验研究波长变换效率问题。信号光与抽运光不同偏振关系对应的转换效率频谱图如图 6 所示。相对于图 6(b)中的信号-抽运光的非平行偏振关系,其中图 6(a)对应了偏振关系中的最大波长转换效率,也就是说当信号光与抽运光处于平行的偏振关系时,SOA 的转换效率最大。此时变换信号的光信噪比(OSNR)大于 30 dB。

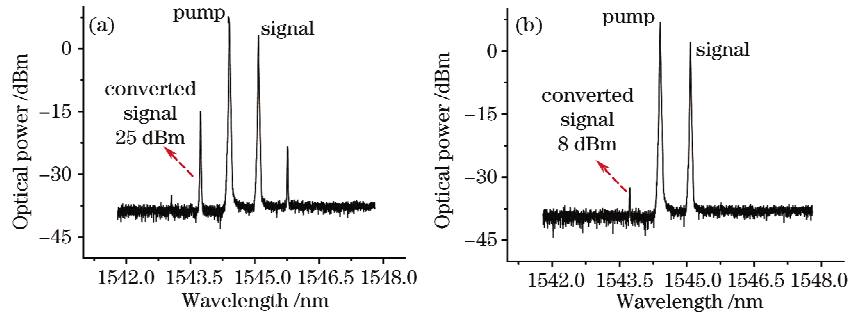


图 6 信号-抽运光处于平行偏振关系(a)和垂直偏振关系(b)的波长变换光谱图

Fig. 6 Optical spectra of the converted signal at parallel polarization (a) and orthogonal polarization (b) between the pump and signal

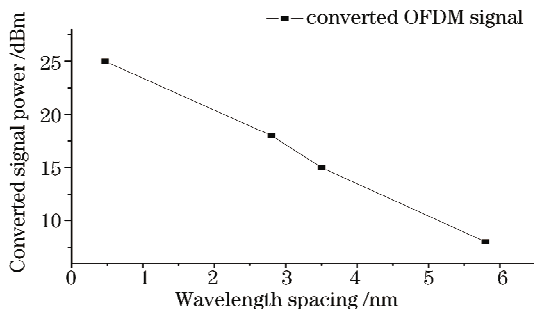


图 7 基于信号-抽运光波长关系的波长转换效率曲线图

Fig. 7 Curve of the converted signal power at different wavelength relation

信号光与抽运光不同波长间隔对应的转换效率的实验结果如图 7 所示。其中固定抽运光的波长不变(1544.25 nm),并在保证两者平行的条件下逐渐加大信号光的波长,可以得出转换效率逐渐变小,转换波长的信噪比逐渐减小。因此转换波长与信号光和抽运光的距离成反比,与 2 节的理论分析一致。

信号光与抽运光不同功率关系对应的转换效率的实验频谱图如图 8 所示。图 8(a)中信号光和抽运光的光功率分别为 8.8 dBm 和 5.38 dBm,图 8(b)中信号光和抽运光的功率均为 6.35 dBm,前者抽运光光功率较大的情况下波长转换效率要好于后者。由此证明 2 节中指出的转换效率与信号光和抽

运光的功率分配有关。两种情况下信号光和抽运光均处于平行关系。

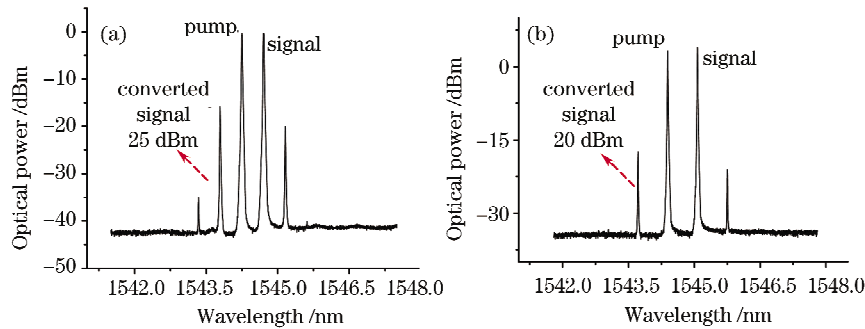


图 8 基于信号-抽运光不同功率比关系的波长转换效率光谱图

Fig. 8 Optical spectra of the converted signal at different power ratio of OFDM and pump signals

以上 3 种情况的比较均在 SOA 处于固定工作电流(0.35 mA)下测得。

4 结 论

理论并实验研究了基于半导体光放大器中四波混频效应的单抽运光正交频分复用信号的波长变换系统,经波长变换后的新的转换光信号同样携带 OFDM 光信号。2.5 Gb/s OFDM 光信号在 1×10^5 传输点数据的条件下,误码为 1×10^{-3} 时对应的接收功率为 21 dBm,此误码测量的功率代价小于 0.5 dB,转换波长的最大光信噪比可以达到大于 30 dB。同时实验研究了信号光与抽运光的偏振关系,波长关系以及功率比 3 个方面对单抽运波长变换效率的影响。实验研究表明此方案为偏振敏感系统,需要引入平行抽运或者垂直抽运信号以实现偏振不敏感波长变换,有关这方面的研究正在进行当中。

参 考 文 献

- M. Kovacevic, A. Acampora. Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks[J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1996, **14**(5): 868~880
- P. P. Iannone, P. R. Prucnal. Multinanometer wavelength conversion of 2.5 and 10 Gb/s optical channels in an injection-locked semiconductor laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 988~991
- S. Watanabe, H. Kuwatsuka, S. Takeda *et al.*. Polarization-insensitive wavelength conversion and phase conjugation using bi-directional forward four-wave mixing in a lasing DFB-LD [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(4): 316~317
- K. Inoue. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1553~1561
- P. R. L. Jonathan, A. S. Mark, 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
- C. Porzi, A. Bogoni, L. Poti *et al.*. Polarization and wavelength-independent time-division demultiplexing based on copolarized-pumps FWM in an SOA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 633~635
- W. Shieh, C. Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42** (17): 587~588
- J. Lowery, L. Du, J. Armstrong. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems [C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest*, 2006, Paper PDP39
- I. B. Djordjevic, B. Vasic. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 3767~3775
- II. Bao, W. Shieh. Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM system [J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(8): 4410~4418
- R. Schnabel, U. Hilbk, T. Hermes *et al.*. Polarization insensitive frequency conversion of a 10-channel OFDM signal using four-wave-mixing in a semiconductor laser amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 56~58
- Chen Lin, Cao Zizheng, Doug Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557
陈 林,曹子峥,董 泽等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 554~557
- Iie Jing, Liu Limin, Chen Lin *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1185~1190
何 晶,刘丽敏,陈 林等. 基于马赫-曾德尔德调制器的先进调制格式的产生 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1185~1190
- Shao Yufeng, Wen Shuangchun, Chen Lin *et al.*. Additional applications of modified duobinary return-to-zero signal in the label switching optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1201~1207
邵宇丰,文双春,陈 林等. 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1201~1207
- Chen Lin, Dong Ze, Li Ying *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation by single arm modulator [J]. *Journal on Communications*, 2007, **28**(9): 85~90
陈 林,董 泽,李 瑛等. 采用电光调制器产生光毫米波的全双工通信光纤无线通信系统 [J]. *通信学报*, 2007, **28**(9): 85~90
- J. Yu, M. Huang, D. Qian *et al.*. Centralized lightwave WDM-PON employing 16-QAM intensity modulated OFDM downstream and OOK modulated upstream signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1545~1547