

基于 FP-LD 中模式竞争机理的全光波长变换研究

郭精忠¹ 于晋龙¹ 王文睿¹ 吴波¹ 韩丙辰² 王菊¹ 刘毅¹ 杨恩泽¹

(¹天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; ²山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘要 低成本、低功耗和可集成是目前波长变换技术所追求的目标。提出一种基于法布里-珀罗型激光二极管 (FP-LD) 中模式竞争机理的全光波长变换方案。通过在 FP-LD 不同模式中注入恒值探测光和信号光产生双模式竞争, 从而实现波长变换。对波长变换产生的原理进行了分析, 并对波长变换后信号的信噪比、消光比以及啁啾特性进行了实验研究。进行了 10 Gb/s 非归零 (NRZ) 信号在不同波长上的波长变换及其 20 km 传输实验。误码率测试数据结果表明波长变换后的功率代价小于 1 dB, 各个波长信号传输 20 km 后的功率代价均小于 1 dB。

关键词 光通信; 全光波长变换; 法布里-珀罗型激光二极管 (FP-LD); 模式竞争

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1006004

Research on All-Optical Wavelength Conversion Based on FP-LD Mode Competition

Guo Jingzhong¹ Yu Jinlong¹ Wang Wenrui¹ Wu Bo¹ Han Bingchen²
Wang Ju¹ Liu Yi¹ Yang Enze¹

(¹ School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract The goal of wavelength conversion technology is low cost, low-power dissipation and integratability. An all-optical wavelength conversion scheme based on Fabry-Pérot laser diode (FP-LD) mode competition is proposed. The wavelength conversion employing dual-mode competition of the FP-LD is realized by injecting probe light and signal light into different modes of the FP-LD. The principle of wavelength conversion is analyzed. The signal-to-noise ratio (SNR), extinction ration (ER) and chirp characteristics of the signal after wavelength conversion are studied experimentally. The wavelength conversion and transmission experiments of 10 Gb/s non-return-to zero (NRZ) signals at different wavelengths are conducted. The results of bit error rate test show that the power penalty after wavelength conversion is less than 1 dB, and the power penalties of different wavelengths after 20 km transmission are all less than 1 dB.

Key words optical communication; all-optical wavelength conversion; Fabry-Pérot laser diode (FP-LD); mode competition

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.4264

1 引 言

在目前基于波分复用系统 (WDM) 的高速光通信网络中, 波长变换不仅可以用来对不同 WDM 通道的信号进行波长路由, 实现波长再利用, 还可以有效解决相同 WDM 波长的数据阻塞, 缓解波长数目的限制^[1]。目前波长变换基本分为光电光 (OEO) 和全光波长变换 (AOWC) 两类。光电光方式目前已经商业化, 具有成熟可靠、变换后信号质量高 (必要时可以再生信号) 的优点。但是该方式包括了光

电探测器、电放大器、电光调制器和激光器等器件, 导致系统复杂、效率低、功耗较大、成本较高。而全光波长变换由于没有光电转换的过程, 理论上可以避免这些缺点, 所以成为目前研究的热点。

目前报道的全光波长变换主要是通过非线性光纤 [高非线性光纤 (HNLF)^[2] 或色散位移光纤 (DSF)] 以及非线性晶体^[3] (如 PPLN 等) 或者半导体增益介质中的光学非线性效应来实现。在非线性光纤中主要是利用其四波混频 (FWM)^[4] 或者交叉

收稿日期: 2011-04-18; **收到修改稿日期**: 2011-05-24

基金项目: 国家 973 计划 (2010CB327603) 和国家自然科学基金重点项目 (60736035) 资助课题。

作者简介: 郭精忠 (1984—), 男, 博士研究生, 主要从事高速光通信和光子微波等方面的研究。

E-mail: xiaobao@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

相位调制(XPM)^[5]等特性,例如 Galili 等^[4]利用保偏的 HNLF 中 FWM 效应实现了 640 Gb/s 的全光波长变换。基于半导体增益介质的方案主要采用半导体光放大器(SOA),利用其 FWM^[6~8]、交叉增益调制(XGM)和 XPM^[9]效应。Contestabile 等^[10,11]利用 SOA 中的 FWM 和 XGM 效应分别完成了 80 Gb/s 的组播实验和 160 Gb/s 的波长变换。

在上述采用非线性效应的方案中,大部分要求有较大的信号光或抽运光功率,这样一般的线路信号还必须有一个光放大的过程。另一个值得注意的问题是很多波长变换方案变换后的信号啁啾量过大、难以用于传输。这是由于无论是光纤还是半导体材料,各种非线性的效应都是伴生的。这意味着 XPM 效应始终无法完全避免,使得变换后的信号具有非线性啁啾。

如果采用合适的机理,既能实现波长变换,同时又能避免 XPM 的产生,那么无疑会形成一种理想的方案。基于此认识,本文提出一种利用法布里-珀罗型激光二极管(FP-LD)中的模式竞争实现全光波长变换的方案。由于在波长变换过程中激光器的载流子浓度基本保持不变,所以基本避免了产生 XPM

效应,变换后的信号啁啾很小。本方案所需的主要有源器件是光通信中大量使用的成熟器件,其工艺成熟,生产成本低,同时所需注入功率低(小于-4 dBm),FP-LD 的驱动电流也在 40 mA 的水平,相比其他全光波长变换和光电光方案来说,整个系统的功耗非常低。本方案采用的关键器件均为 III-V 族半导体材料,理论上可以由一个材料基片制备出来,有非常大的集成化潜力。本文还进行了 10 Gb/s 的全光波长变换实验并进行了 20 km 的传输实验。

2 工作原理

基于注入 FP-LD 的波长变换原理如图 1 所示。当偏置电流增加到阈值以上时,FP-LD 发生激射,其光谱为多纵模结构,如图 1(a)所示,由于外部光注入 FP-LD 会使其有源区的自由载流子浓度下降,折射率增加,从而 FP-LD 纵模会出现波长红移现象^[12,13]。基于此,波长为 λ_0 的恒定强度的光需要注入到 FP-LD 某个模式的长波长一侧,保证注入后的光波长与 FP-LD 红移后纵模波长对准,从而实现注入锁定,FP-LD 此时工作在单模起振模式下,如图 1(b)所示。

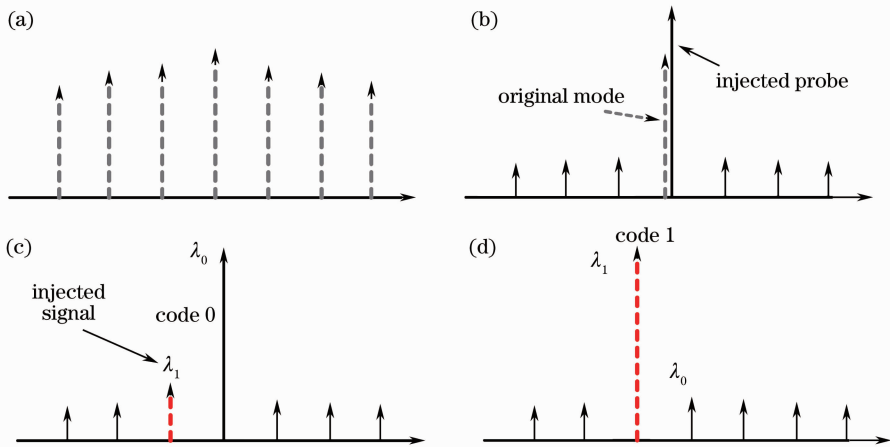


图 1 波长变换原理。(a)自由振荡 FP-LD 光谱;(b)注入可调激光器恒定强度的光并实现注入锁定后单模起振;

(c)注入信号光为 0 码时的光谱;(d)注入信号光为 1 码时原恒定强度的光被抑制

Fig. 1 Principle of wavelength conversion, (a) Free-running spectrum of the FP-LD; (b) single mode operation by DC-optical injection from a tunable laser; (c) spectrum when the signal level is "0"; (d) DC light is suppressed when the signal level is "1"

当两个不同波长(λ_0 和 λ_1)的光同时注入 FP-LD 的两个纵模时,模式之间会存在竞争^[14]。在各纵模模式增益平坦的条件下,有较高注入功率的模式会起振。当其中一路(λ_1)为强度调制信号时,注入 0 码信号不影响原另外一个恒值光(λ_0)的注入锁定效果,如图 1(c)所示。当注入信号光为 1 码时,注入功率高于恒值光(λ_0),此时信号光注入波长与恒值光注入波长

竞争,绝大部分增益被 λ_1 占据,如图 1(d)所示。在上述过程中,如使用光带通滤波器(OBPF),对 FP-LD 输出在恒值注入波长 λ_0 进行滤波,就会得到注入信号光信号的反码输出,从而实现了波长变换。

在整个变换过程中,激光器的两个模式交替起振,而每个模式的输出光功率基本由注入电流决定。在不区分波长的条件下,整个激光器的输出总光功

率基本保持恒定。这就意味着在整个过程中载流子的浓度基本维持不变,这样就抑制了 XPM 效应。

3 实验及分析

图 2 所示为基于 FP-LD 模式竞争的全光波长变换实验原理图,图中 TLD 为可调激光器,PC 为

偏振控制器,MZM 为马赫-曾德尔强度调制器,VOA 为可变光衰减器,PPG 为伪随机码发生器,ED 为误码检测模块,用于误码率测试(BERT),OSA 为光谱分析仪,OC 为光环行器,TIA 为跨阻放大器,实验采用的 FP-LD 为多量子阱结构,自由光谱区(FSR)为 170 GHz,阈值电流约为 10 mA。

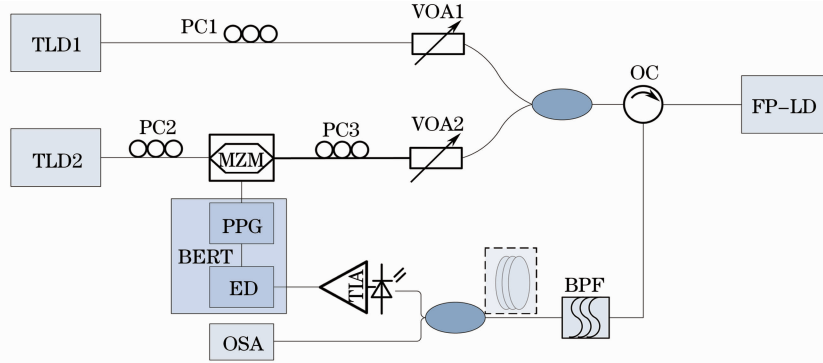


图 2 基于 FP-LD 模式竞争的波长变换实验框图

Fig. 2 Schematic of wavelength conversion based on mode competition in FP-LD

可调激光器 TLD1(安捷伦可调光源)作为恒值注入光,经过 PC1 和 VOA1 分别调整其偏振态和注入功率,并通过耦合器进入光环行器。可调激光器 TLD2(安捷伦可调光源)作为信号光源,由 PPG 产生的数字序列在马赫-曾德尔型的铌酸锂晶体电光强度调制器中调制产生光非归零(NRZ)码型信号。调制以后的光信号通过 PC3 和可调衰减器同样耦合至光环行器。PC1 和 PC3 分别用来调整注入 FP-LD 的恒值光和信号光信号的偏振态,因为注入的光信号只有横电磁波(TE)对 FP-LD 起作用,所以需要调谐注入光在 FP-LD 腔内的 TE 模式上的光场分量强度。

用于恒值注入光源的可调激光器输出波长 1553.3 nm,注入至 FP-LD 的光功率为 -4 dBm。

FP-LD 的偏置电流为 40 mA,输出光功率为 3 dBm,其自由振荡光谱如图 3(a)所示;当注入恒值光后,通过细调注入光的波长和偏振态使其处于单模振荡模式,输出光谱如图 3(b)所示,实验测得其边模抑制比为 45 dB。由图 3 可见,自由振荡时待注入纵模波长为 1553.12 nm,当恒值光信号注入后,FP-LD 模式整体红移,单模输出波长为 1553.3 nm,实验中所有光谱测试采用安立的 MP1800A 光谱仪,分辨率带宽(RBW)为 0.05 nm。

信号光波长选为 1550.58 nm,编码为 10 Gb/s 的 7 阶伪随机 NRZ 码,时域波形如图 4(c)和(d)所示,其消光比为 17 dB,信噪比为 19。调节 VOA2 和 PC3 实现信号的动态注入锁定,注入至激光器光功率为 -4.4 dBm。此时,光谱仪上观察到双纵模式,如图 4(a)

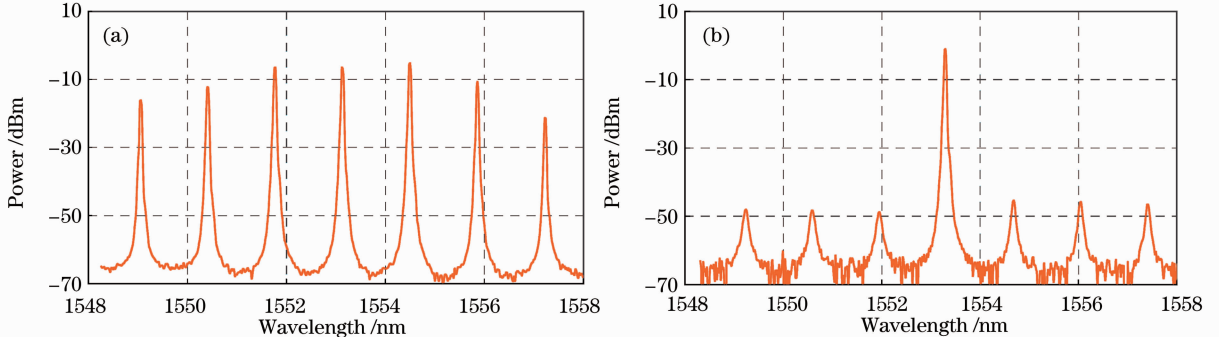


图 3 FP-LD 输出光谱。(a)偏置电流为 40 mA 时的 FP-LD 自由振荡光谱;(b)TLD1 产生的恒值光注入 FP-LD 后单模锁定状态光谱

Fig. 3 Spectrum of FP-LD output. (a) Spectrum of free-running FP-LD biased at 40 mA; (b) single mode operation after DC light injection

所示。此时通过 2 nm 的可调 OBPF 滤出探测光,其光功率为 0 dBm,滤波后的光谱信号如图 4(b)所示。

滤波以后得到的光时域波形如图 4(e)和(f)所

示。图 4(e)为眼图,测得其消光比为 9 dB,信噪比为 16.6;图 4(f)为波形,可见相对于原始输入信号,波长变换以后为反码输出,消光比降低。

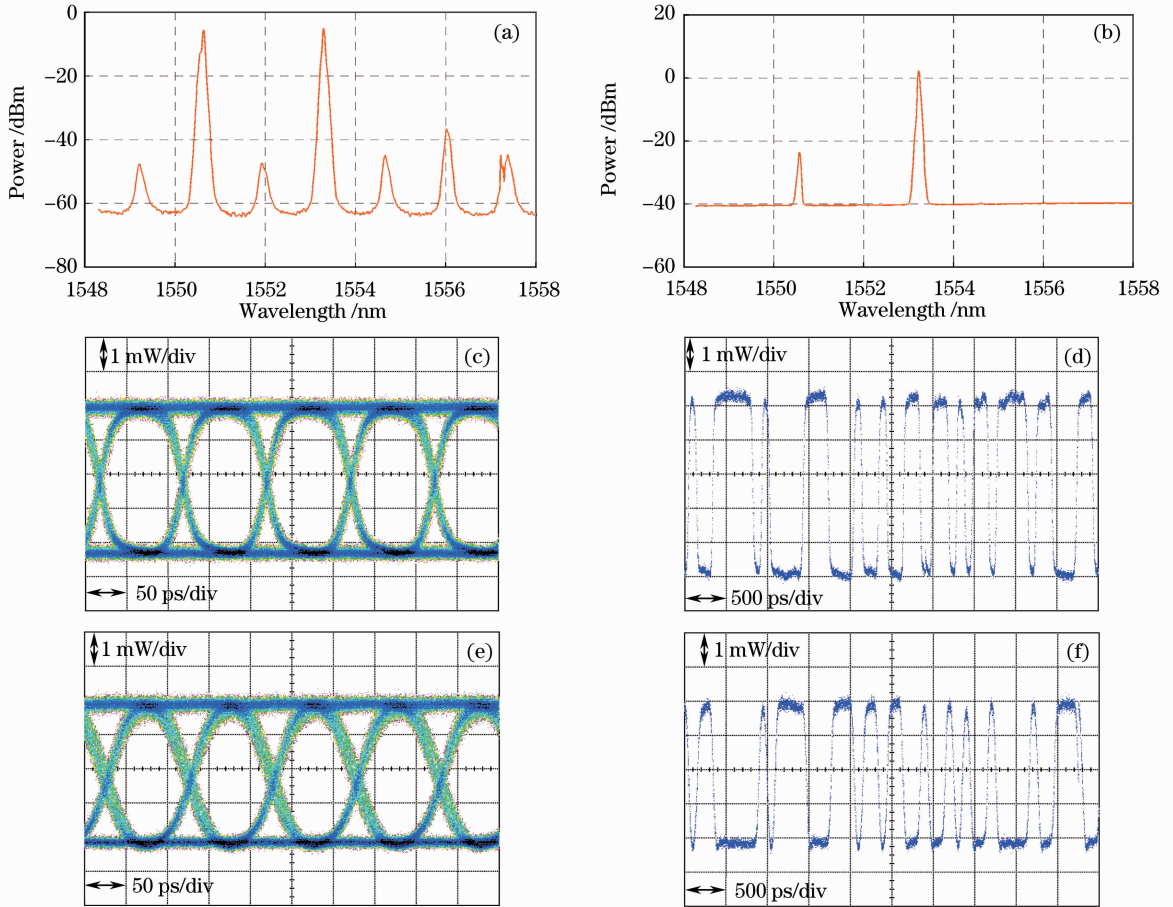


图 4 1553.26 nm 波长变换实验图。(a)双纵模激光态光谱;(b)滤出探测光谱;(c)原始信号眼图;(d)原始信号波形;(e)1553.26 nm 探测光眼图;(f)1553.26 nm 探测光波形

Fig. 4 Spectrum and waveform for wavelength conversion at 1553.26 nm. (a) Spectrum of dual-mode lasing operation of the FP-LD; (b) spectrum of probe light after optical filtering; (c) eye diagram of the original signal; (d) waveform of the original signal; (e) eye diagram of 1553.26 nm probe light; (f) waveform of 1553.26 nm probe light

为了研究在相同信号光波长条件下不同波长的恒值探测光的波长变换特性,又分别选取了 1554.60,1555.97 和 1557.36 nm 进行了实验,结果如图 5 所示。得到的信噪比和消光比分别为:1554.60 nm 时 18.0,10.7 dB,如图 5(a),(b)所示;1555.97 nm 时 18.8,10.4 dB,如图 5(c),(d)所示;1557.36 nm 时 18.4,9.3 dB,如图 5(e),(f)所示。从上述实验结果可以看出,对于不同探测光波长,信号光在波长变换后信噪比和消光比变化不大,而探测光波长相对于波长变换前的信号信噪比变化不大,消光比恶化。

为了分析变换后信号的啁啾变化情况,首先比较了波长变换前后信号光谱的变化情况,将原始信号光谱和波长变换后光谱归一化进行比较,如图 6

所示。经计算,与原始信号光谱相比,波长变换后信号 3 dB 谱宽展宽为 0.01 nm,30 dB 谱宽展宽为 0.06 nm。这表明,在光谱仪的分辨率下,转换后的信号啁啾与输入信号相比无明显恶化。

为了进一步研究波长变换后信号的啁啾特性,进行了波长变换前后信号 20 km 普通单模光纤(SMF)的传输对比实验。图 7(a)上半部所示为 FP-LD 未经过滤波器的时域输出波形,下半部所示为波长变换后信号经过 20 km 传输的眼图;图 7(b)为原始信号传输 20 km 的眼图。可见,FP-LD 输出的总光功率起伏较小($P_{amp}/P_{avg} = 90 \mu\text{W}/670 \mu\text{W}$),表明由于载流子起伏导致的啁啾不大。与图 7(b)所示眼图相比,传输后的信号质量出现了一定恶化,这是由残余啁啾导致的。

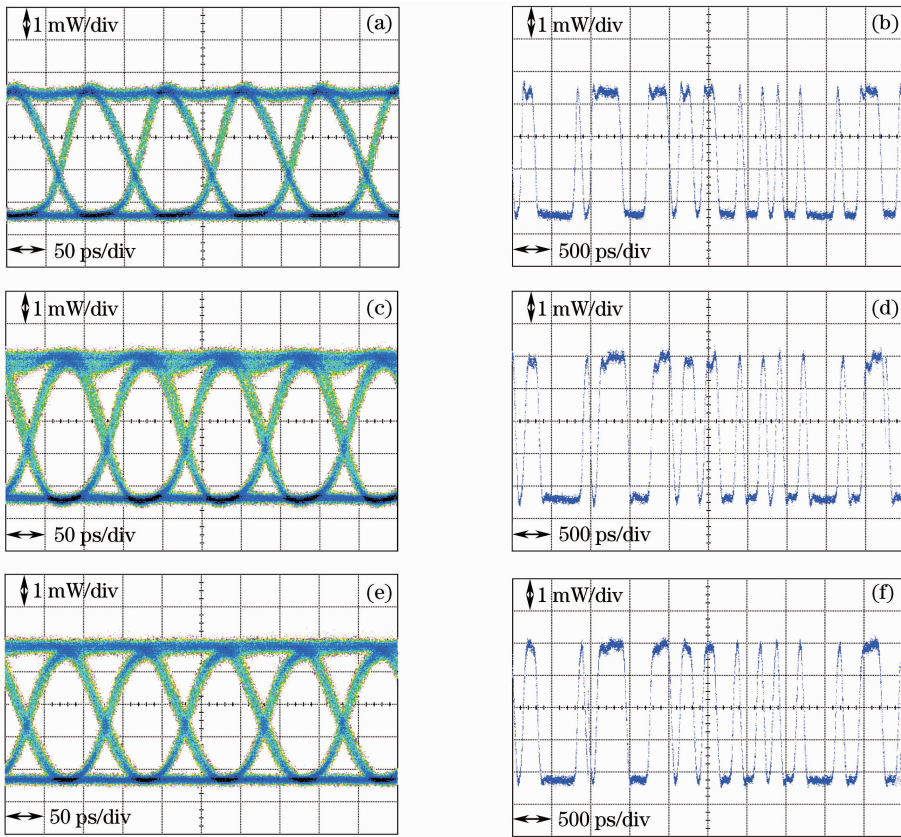


图 5 不同波长的时域信号对比。(a) 1554.60 nm 探测光的信号眼图;(b) 1554.60 nm 探测光的信号波形;(c) 1555.97 nm 探测光的信号眼图;(d) 1555.97 nm 探测光的信号波形;(e) 1557.36 nm 探测光的信号眼图;(f) 1557.36 nm 探测光的波形
Fig. 5 Waveform comparison at different wavelengths. (a) Eye diagram of probe light at 1554.60 nm; (b) waveform of 1554.60 nm probe light; (c) eye diagram of probe light at 1555.97 nm; (d) waveform of 1555.97 nm probe light; (e) eye diagram of probe light at 1557.36 nm; (f) waveform of 1557.36 nm probe light

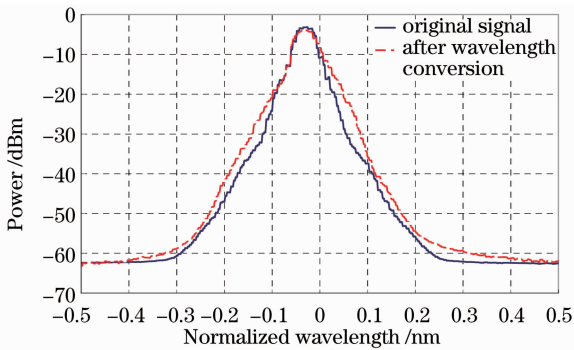


图 6 波长变换前后光谱对比图

Fig. 6 Comparison between spectra before and after wavelength conversion

为了量化评价波长变换的性能,需要对变换后的信号及传输后的信号进行误码分析。图 8 为使用 MP1800 信号质量分析仪对上述不同探测光波长进行波长变换后 FP-LD 输出信号的误码测试分析结果。由图中可以看出,波长变换后的信号相对于背靠背测试,有至多 1 dB 的功率代价,与上述分析中输出信号的消光比有所恶化相吻合。经过 20 km

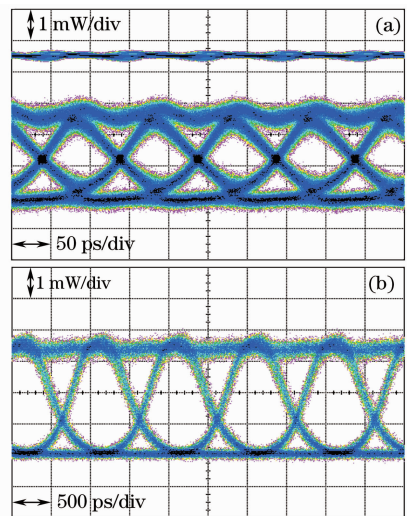


图 7 波长变换后信号 20 km 传输实验。(a) 波长变换后信号传输 20 km 眼图;(b) 原始信号传输 20 km 眼图
Fig. 7 Experimental results after 20 km transmission after wavelength conversion (a) Eye diagram after 20 km transmission of signal after wavelength conversion; (b) eye diagram after 20 km transmission of original signal

传输信号与未传输信号相比,不同波长信号均存在 1 dB 的功率代价,主要是由于变换后信号中的残余啁啾所致。相比于非线性波长变换而言,由波长变换导致的传输恶化很小,十分有利于全光波长交换/路由网络。

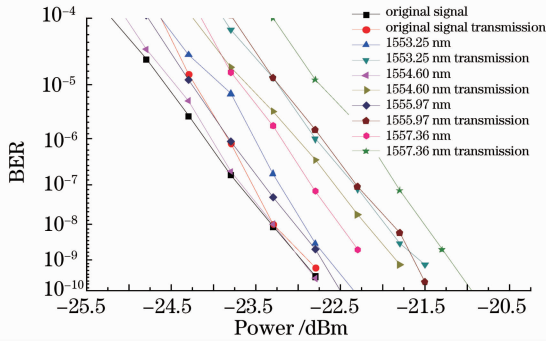


图 8 波长变换误码率测试

Fig. 8 Bit error rate (BER) test for wavelength conversion

4 结 论

提出了一种利用 FP-LD 中模式竞争的全光波长变换方案,分析了波长变换的基本原理,实验验证了 10 Gb/s NRZ 信号在不同波长上的波长变换效果并完成了 20 km 光纤传输实验。经过误码率测试得知,系统波长变换的功率代价小于 1 dB,经过 20 km 传输后的功率代价为 1 dB。结果表明该方案系统结构简单,系统功耗较低(注入信号所需功率较低,FP-LD 只需 40 mA 驱动电流),波长变换后信号啁啾较低,使得变换后传输的功率代价较低,十分利于传输。

由于 FP-LD 模式间隔以及波长位置受器件本身参数影响,所以在波长调谐性上灵活度不够。但是对于 WDM 系统来说,波长间隔以及波长位置都有相应的标准,只要针对标准来设计 FP-LD 的相关参数,就能解决波长调谐的问题。

对于系统的可集成性,目前方案中用到的 TLD 可以由分布反馈(DFB)激光器来代替,进一步的工作可以将恒值光激光器与 FP-LD 集成到同一块基片上。同时本方案中存在对注入信号偏振敏感的问题,可以考虑进一步采用偏振不敏感器件(如采用应变量子阱材料制作 FP-LD 器件)。

参 考 文 献

- 1 S. B. Yoo. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4468~4492
- 2 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
江 阳, 于晋龙, 张爱旭 等. 双抽运光纤光参变放大的全光多波长变换与码型转换[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- 3 Hu H., Nouroozi R., Ludwig R. *et al.*. Simultaneous polarization-insensitive wavelength conversion of 80-Gb/s RZ-DQPSK signal and 40-Gb/s RZ-OOK signal in a Ti:PPLN waveguide [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(8): 1092~1097
- 4 Galili M., Mulvad H. C. H., Gruner-Nielsen L. *et al.*. 640 Gbit/s optical wavelength conversion using FWM in a polarisation maintaining HNLF[C]. ECOC, 2008, Tu. 3. D. 5
- 5 Yi A. L., Yan L. S., Luo B. *et al.*. Wavelength conversion of RZ-OOK PDM signals by XPM in a highly nonlinear fiber[C]. 2010 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010. 17~18
- 6 Simoyama T., Kuwatsuka H., Little B. E. *et al.*. High-efficiency wavelength conversion using FWM in an SOA integrated DFB laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 31~33
- 7 Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2952~2956
董 泽, 曹子峥, 卢 嘉 等. 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2952~2956
- 8 Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Experimental research of simultaneously wavelength conversion with two independent signals based on a single semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 330~334
韩丙辰, 于晋龙, 张立台 等. 利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时波长变换的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 330~334
- 9 Jianji Dong, Xinliang Zhang, Jing Xu *et al.*. 40 Gb/s both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient XPM of SOA[C]. OFC/NFOEC 2007, 2007, 1~3
- 10 Contestabile G., Maruta A., Sekiguchi S. *et al.*. All-optical wavelength multicasting in a QD-SOA[J]. *Quant. Electron.*, 2011, **47**(4): 541~547
- 11 Contestabile G., Maruta A., Sekiguchi S. *et al.*. Cross-gain modulation in quantum-dot SOA at 1550 nm[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2010, **46**(12): 1696~1703
- 12 Wu Bo, Yu Jinlong, Zhang Zusong *et al.*. A local oscillator-free frequency mixing based on FP-LD injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3140~3147
吴 波, 于晋龙, 张祖松 等. 基于 FP-LD 注入的无本振光载波全光混频技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3140~3147
- 13 Labukhin D., Stolz C. A., Zakhleniuk N. A. *et al.*. Modified Fabry-Perot and rate equation methods for the nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **45**(7): 863~871
- 14 Horer J., Patzak E.. Large-signal analysis of all-optical wavelength conversion using two-mode injection-locking in semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(4): 596~608