

文章编号: 0253-2239(2007)09-1570-5

抑制信道间干涉的 40 Gb/s 光码分复用系统

陈小刚^{1,2} 黄德修² 元秀华²

(¹ 三峡大学理学院, 宜昌 443002
² 武汉光电国家实验室(筹), 武汉 430074)

摘要: 成功演示了码片速率高达 280 Gchip/s 的全光编解码, 编解码光栅是采用“等效相移”方法制作而成的超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)。考虑和分析了信道间干涉, 实验验证了 40 Gb/s×2 的光码分复用(OCDM)信号复用。引入非线性光学环境(NOLM)来抑制信道间干涉, 利用非线性光学环境的非线性开关特性将解码输出脉冲的宽度由 7.7 ps 压缩至 3.8 ps, 并同时有效的减小了干扰噪声, 进而提高系统性能。理论计算和实验结果表明了采用超结构光纤布拉格光栅和非线性光学环境实现高效编解码的可行性。高速的全光编解码可以应用于点到点的光码分复用系统以及光标签交换网络。

关键词: 光通信; 光码分复用; 全光编解码; 超结构光纤布拉格光栅; 非线性光学环境

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Suppression of Interchannel Interference Noise in 40 Gb/s Optical Code Division Multiplexing System

Chen Xiaogang^{1,2} Huang Dexiu² Yuan Xiuhua²

(¹ College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074)

Abstract: The 280 G-chip/s encoding and decoding rate is experimentally demonstrated. The encoder and decoder consisting of superstructured fiber Bragg gratings (SSFBGs) are fabricated using “equivalent phase shift” method. Interchannel interference noise is also considered and evaluated, and the 40 Gb/s×2 channel signal multiplexing is illustrated. In addition, a nonlinear optical loop mirror (NOLM) within the receiver is introduced to improve the system performance under two-channel operation, which reflects low-intensity signals, and transmits the high-intensity signal. The NOLM can act as a nonlinear processing element capable of reducing both the pedestal and the width of the associated code recognition pulse, and the original 7.7 ps decoded pulse is compressed to 3.8 ps. The agreement between experimental and calculated results is excellent, and the feasibility of all optical high-rate encoding and decoding using SSFBG and NOLM is verified. High speed all optical encoding and decoding can be used in point to point optical code division multiplexing (OCDM) system and optical packet-switched networks.

Key words: optical communication; optical code division multiplexing; all optical encoding and decoding; superstructured fiber Bragg grating (SSFBG); nonlinear optical loop mirror

1 引 言

相对于波分复用(WDM), 时分复用(TDM)等复用技术, 光码分复用具有随机接入、异步传输和保密性强、组网灵活、协议简单和可高速光处理等特

点^[1]。高速点到点光码分复用或光码分复用/波分复用传输系统还可以实现较高的频谱效率。

实现光码分复用通信的关键是直接对光信号进行编解码以及有效消除信道间的干扰。另外, 高速

作者简介: 陈小刚(1976—), 男, 湖北江夏人, 博士研究生, 主要从事高速光通信及光码分多址等方面的研究。

E-mail: cxg826@yahoo.com.cn

导师简介: 黄德修(1937—), 男, 湖南宁乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信与传感以及光电子器件方面的研究。

E-mail: wnl02@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2007-03-27

全光编解码还可以应用于光突发和分组交换网络中地址码的产生和识别^[2]。近年来,由于超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)能够实现性能良好的编解码过程,以及其潜在的低价格,结构紧凑而倍受青睐^[3~8]。在光码复用系统中,相邻复用信道间的干涉会降低系统的性能^[9],而且速率越高,这种干涉的影响会越明显。如何对高速率信号进行整形和再生,消除复用信道间的干扰是光码复用系统的关键技术。可以由非线性光学环境(NOLM)构造超快全光开关,利用其强度滤波特性实现光信号整形和消除干扰噪声^[10]。

本文采用 7 码片的超结构光纤布拉格光栅作为光编/解码器演示了码片速率高达 280 Gchip/s 的全光编解码,并在接收端引入了非线性光学环境,成功实现了良好的 40 Gb/s×2 的光码复用信号复用实验。

2 光码复用编/解码器设计

四相相移的超结构光纤布拉格光栅编解码器分别用 Q_1, Q_2 和 Q_1^*, Q_2^* 表示,下标 1,2 表示某一特定的码,而 * 表示相应的空间反转的匹配滤波器。图 1(a)给出了编码光栅 $Q_1(\pi/2, \pi/2, 0, 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 的空间相移超结构。这里选用的地址码为移动通信中用到的四相 A 序列码族,相对于常用的双极性光编码,四相光编码具有更好的自相关和互相关特性^[11]。该超结构光纤布拉格光栅是弱的布拉格光栅(典型反射率小于 20%),具有均匀的折射率调制振幅,但在相邻的空间码片(子光栅)的边界处存在离散的四相相移 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 。每个编解码器光栅包含 7 个码片(子光栅)总长 2.59 mm,单个码片

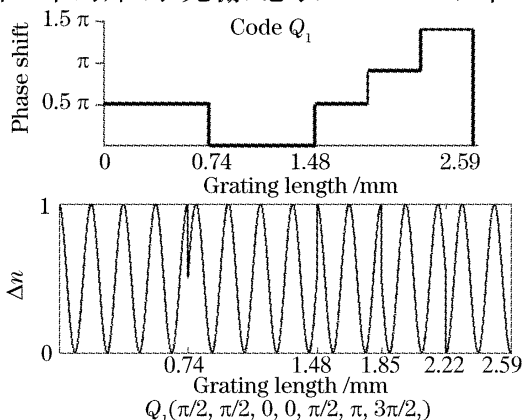


图 1 地址码 Q_1 图示及相应的超结构光纤光栅折射率调制

Fig. 1 Schematic of signature codes and corresponding refractive index modulation profiles along SSFBG Q_1

(子光栅)长度为 0.37 mm,这分别对应于整个码的周期为 25.1 ps,单个码片的周期为 3.6 ps。

该四相相移超结构光纤光栅是采用“等效相移”方法制作而成的,通过简单的改变取样布拉格光栅(SBG)的取样周期就可以得到期望的相移。利用该方法只需要普通的相位模板以及控制过程中达到亚毫米精度即可。图 2 给出了编码光栅 Q_1 的实验所得反射谱,峰值反射率约为 18.7%,中心波长约 1553.9 nm。并和理论模拟的反射谱进行了比较,两者间良好的一致性说明了使用“等效相移”方法制作编解码光栅的精确性。

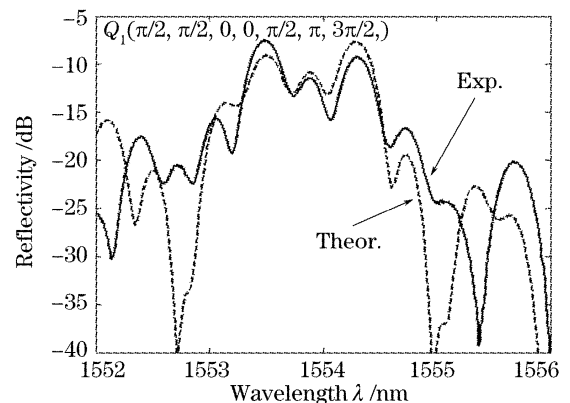
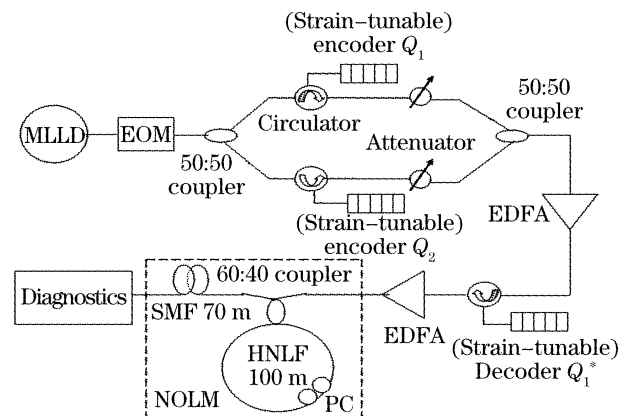


图 2 编码光栅 Q_1 的反射谱

Fig. 2 Reflectivity of encoder grating Q_1

3 实验原理及装置

实验装置如图 3 所示,包括一个 40 GHz 的波长可调主动锁模激光器、铌酸锂调制器、2 个超结构光纤布拉格光栅编码器和 1 个光栅解码器及非线性光学环境子系统。锁模激光器(MLLD)产生 40 GHz, 1.3 ps 的脉冲序列(中心波长为 1553.72 nm)。该脉



MLLD: Mode-locked laser diode PC: Polarization controller
EOM: electrooptical modulator SMF: Single-mode fiber
EDFA: Erbium-doped fiber amplifier HNLF: High-nonlinearity fiber
NOLM: Nonlinear optical loop mirror

图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

冲流经调制器后由 3dB 耦合器分离成两路信号,分别通过环形器被编码器光栅 Q_1, Q_2 反射后形成编码信号,采用可调衰减器使这两路编码信号功率均衡后用 3 dB 耦合器合路,传输后再经掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行信号放大,然后通过环形器进入解码器光栅 Q_1^* 或 Q_2^* 后得到光解码输出信号。

解码器 Q_1^* 或 Q_2^* 的输出光解码信号可直接用高速通信分析仪 PD/Scope(带宽约 65 GHz)和自相关仪(分辨率小于 100 fs)来加以观测和分析,也可经过非线性光学环镜子系统(图 3 虚线框所示)后再进行实验测量。非线性光学环镜由 100 m 高非线性光纤(HNLF)[在 1550 nm 波段非线性系数约为 $21 / (\text{W}/\text{km})$, 群速度色散 β_2 约为 $14 (\text{ps}^2/\text{km})$, 损耗系数 α_{dB} 为 $0.58 (\text{dB}/\text{km})$]和 60:40 耦合器构成,另外非线性光学环镜中包含偏振控制器来控制偏振态。70m 标准单模光纤[群速度色散 β_2 约为 $-20 (\text{ps}^2/\text{km})$]用来补偿高非线性光纤引起的色散。注意非线性光学环镜前的掺铒光纤放大器为大功率放大器,可以将解码输出信号的平均功率放大至我们所需要的 0.42 W。该非线性光学环镜子系统用来对解码器 Q_1^* 的解码输出脉冲进行脉冲整形。温度的变化会引起光栅的波长漂移,随着编解码光栅间的波长偏移量增加,编解码器的相关性能会下降进而影响系统的稳定性。因此实验中用到的超结构光纤布拉格光栅是应力可调的,这样可以使编码光栅和解码光栅的工作波长达到一致。实验中用到带有光模块的通信分析仪(PD/Scope)为 Tektronix CSA8000B,自相关仪为 APE Auto Correlator。需要说明的是由于目前使用的探测器和示波器的带宽有限(响应时间约 15 ps),无法测出信号脉冲的时域宽度(ps 量级)。

4 数值分析及实验结果

非线性光学环镜根据光纤的萨尼亚克环行干涉原理制成,如图 3 虚线框所示。非线性光学环镜最初是由 N. J. Doran^[10]于 1988 年提出,根据光学克尔(Kerr)效应,光纤环内两路反向传播的光束绕环一周后产生不同的相移。两束光波的相位差 $\Delta\phi = (1-2x)\gamma P_0 L$ 与输入光功率 P_0 、耦合器耦合比 x 、光纤的非线性系数 γ 以及长度 L 有关,当 $\Delta\phi = \pi$ 时自相位调制引起的非线性相移就会使输入信号透射。非线性光学环镜的透射率和 P_0 有关,具有非线性开关功能:反射低强度信号而透射高强度信号。这样经过非线性光学环镜后,解码输出信号高强度

的自相关峰可以透射,而低强度的自相关旁瓣和互相关峰被滤掉。

假定编解码光栅 Q_2, Q_2^* 完全匹配能实现理想的全光编解码,利用它们编解码后的输出脉冲在非线性光学环镜子系统中的传输可用非线性薛定谔方程^[12]来模拟:

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}U + i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial T^2} = i\gamma|U|^2U, \quad (1)$$

式中 T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度($T = t - z/v_g$)。 $\beta_2 (\text{ps}^2/\text{km})$ 是二阶色散系数。 $\alpha (\text{km}^{-1})$ 是光纤损耗系数,它与用分贝表示的损耗系数 $\alpha_{\text{dB}} (\text{dB}/\text{km})$ 的关系为: $\alpha_{\text{dB}} = 4.343\alpha$ 。 $\gamma = (n_2\omega_0)/(cU_{\text{eff}})$ 是高非线性光纤的非线性系数,与非线性折射率 n_2 、光纤有效芯径面积 U_{eff} 以及信号频率 ω_0 有关。参量 $\alpha_{\text{dB}}, \beta_2$ 及 γ 取实验值,利用分步傅里叶方法可对(1)式进行数值求解。

图 4 给出了理论计算结果,可以看到由于非线性光学环镜的强度滤波特性,解码输出脉冲的噪声基座得到很大的抑制。另外由高非线性光纤和单模光纤组成的非线性光学环镜子系统还能够压缩输出脉冲,这样的脉冲可以再次进行全光编解码,从而能够应用于分组交换网络。

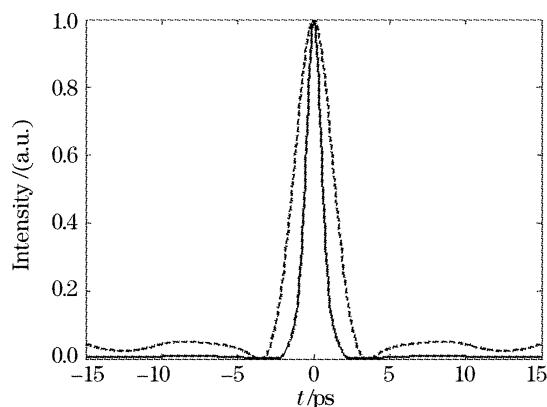


图 4 计算结果: $Q_2:Q_2^*$ 编解码输出脉冲(虚线),再经过非线性光学环镜子系统后的输出脉冲(实线)

Fig. 4 Calculated decoded pulse under matching case ($Q_2:Q_2^*$) directly after the decoder (dashed line), after the NOLM (solid line)

同时也用自相关仪对单信道 $Q_2:Q_2^*$ 编解码后的输出脉冲的强度自相关函数进行了测量,图 5(a)和图 5(b)分别给出了没有经过非线性光学环镜以及经过非线性光学环镜的测量结果,可以看到实验测量和理论计算之间具有良好的一致性。经过非线性光学环镜子系统后,解码输出脉冲强度自相关函数的时域宽度由 4.3 ps 压缩至 2.1 ps 并且噪声基座也得到了抑制。实验结果验证了非线性光学环镜

子系统具有减小解码输出脉冲宽度和干扰噪声的功能。

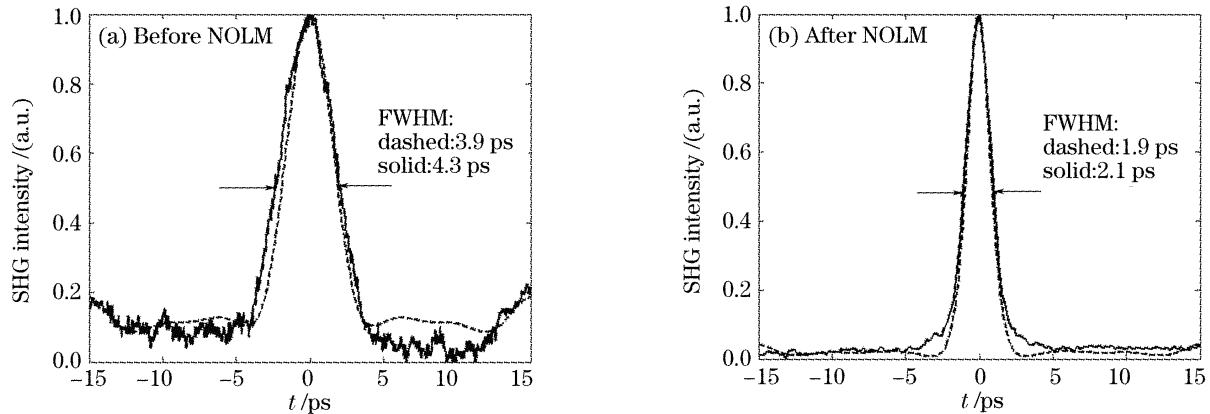


图 5 单信道解码信号的强度自相关迹(实线为测量结果,虚线为模拟结果)

Fig. 5 Intensity autocorrelation traces of the decoded signal under single-channel ($Q_2:Q_2^*$) (solid line: measured, dashed line: simulated)

图 6(a)~图 6(d) 给出了编解码前后脉冲的波形轨迹,由高速探测器和数字取样光示波器(带宽约为 65 GHz)测量所得。和锁模激光器的输出脉冲序列[图 6(a)]相比,从图 6(b),图 6(c)可以看到随着

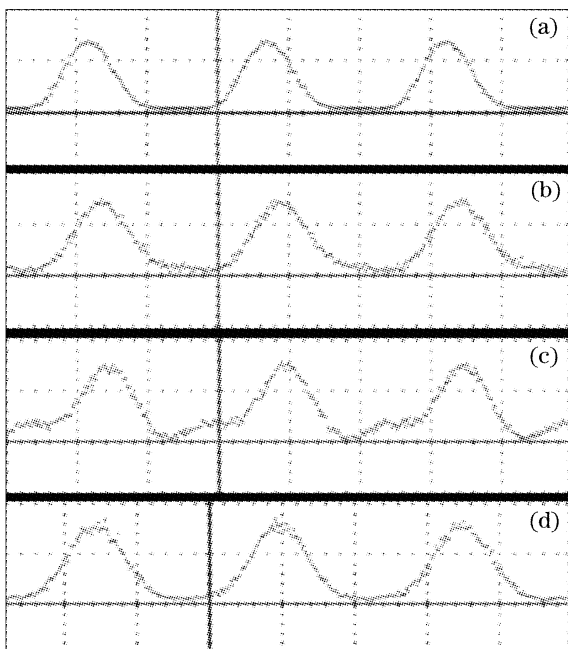


图 6 信号的示波器轨迹。(a) 1.3 ps 输入脉冲序列, (b) 单信道解码输出脉冲序列($Q_1:Q_1^*$), (c) 2 信道时解码输出脉冲序列($Q_1+Q_2:Q_1^*$), (d) 经过非线性光学环境后的解码输出脉冲序列($Q_1+Q_2:Q_1^*$) (探测带宽: ~ 65 GHz, 10 ps/div)

Fig. 6 Oscilloscope traces of (a) input 1.3 ps pulse stream, (b) decoded pulse (single-channel matching case: $Q_1:Q_1^*$), (c) decode pulses under (2-channel case: $Q_1+Q_2:Q_1^*$), (d) decode pulses ($Q_1+Q_2:Q_1^*$) after the NOLM. (detection bandwidth: ~ 65 GHz, 10 ps/div)

码分复用系统中的信道数增加,解码器输出的脉冲信号波形出现了恶化。图 6(a)中激光器输出脉冲的波形轨迹对称并且无基座噪声。图 6(b)给出了编码器与解码器匹配时($Q_1:Q_1^*$)解码输出脉冲的信号波形,一个清楚的超短脉冲序列重新形成,此时波形轨迹不再完全对称并且有基座噪声。两个信道 Q_1, Q_2 同时接入时解码输出信号见图 6(c),比较图 6(b)和图 6(c)可以看到,由于信道间干涉的影响,波形轨迹出现明显畸变同时基座噪声增大。该干涉主要源于两个伪随机码的时域重叠。图 6(d)给出了两信道复用解码输出信号经过非线性光学环境后的脉冲信号波形,由于非线性光学环境的脉冲整形和消除基座噪声的功能,波形轨迹重新对称且基座噪声得到很大抑制。图 6(d)说明在信道间干涉的影响下,利用非线性光学环境可以实现良好的解码。

两个信道 Q_1, Q_2 同时接入时测得的 $Q_1+Q_2:Q_1^*$ 编解码输出脉冲的强度自相关曲线如图 7 所示,其半高全宽为 7.7 ps。和单信道操作相比,2 路码分复用信号同时传输时解码输出信号出现了一定程度的恶化,脉冲宽度展宽并且相关曲线旁瓣增大。图 7 同时给出了 Q_1, Q_2 同时接入时解码输出信号经过非线性光学环境的自相关曲线,在非线性光学环境的作用下脉冲宽度压缩至 3.8 ps,自相关曲线的旁瓣也得到了很好的抑制。图 6 和图 7 的实验结果验证了利用 7 码片超结构光纤布拉格光栅进行编解码的有效性,说明 40 Gb/s 的高速全光编解码是可以成功实现的,并且利用非线性光学环境可抑制干扰噪声进而提高系统性能。

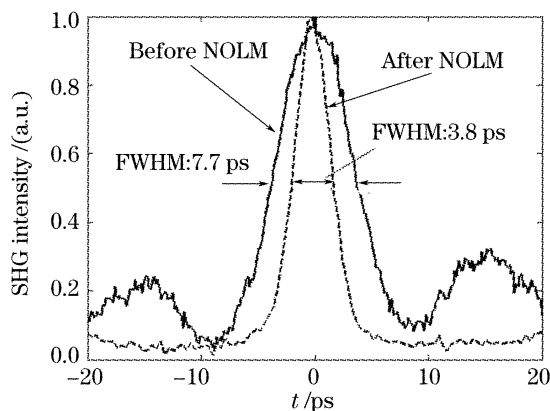


图 7 实验测得的 2 信道($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$)解码信号的强度自相关迹

Fig. 7 Measured intensity autocorrelation traces of the decoded signals under 2-channel ($Q_1 + Q_2 : Q_1^*$) operation

5 结 论

实验演示了基于 7 chip 四相相移超结构光纤布拉格光栅光编解码器和非线性光学环境的 40 Gb/s \times 2 的光码分复用系统。由于相邻信道间干涉的影响,解码器输出信号出现了恶化,自相关曲线宽度展宽为 7.7 ps,利用非线性光学环境的脉冲整形功能将其压缩至 3.8 ps,同时极大的消除了自相关旁瓣。数值分析和实验结果说明由较短长度的高非线性光纤(且具有较高的群速度色散值 14 ps²/km)及普通的标准单模光纤构成的非线性光学环镜子系统能够对 40 Gb/s 的高速编解码信号进行整形和再生,消除复用信道间的干扰,进而提高系统性能。

致谢 感谢清华大学电子工程系宽带光网络中心的陈向飞和戴一堂等帮助制作光纤光栅。

参 考 文 献

- 1 K. Kitayama, N. Wada, H. Sotobayashi. Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation[J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2000, **18**(12):1834~1844
- 2 K. Kitayama, M. Murata. Versatile optical code-based MPLS for circuit, burst and packet switchings [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2003, **21**(11): 2753~2764
- 3 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. A comparative study of the performance of seven- and 63-chip optical code-division multiple-access encoders and decoders based on superstructured fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1352~1365
- 4 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 221~224 (in Chinese)
- 燕 萌,姚敏玉,张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址编解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 221~224
- 5 M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole *et al.*. Recent advances in long dispersion compensating fiber Bragg gratings[R]. London, U. K: IEE, 1999
- 6 Chen Xiaogang, Yuan Xiuhua, Huang Dexiu. Quaternary phase encoding and decoding of ultrashort pulses at 40 Gb/s[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 29~33 (in Chinese)
- 陈小刚,元秀华,黄德修. 40 Gb/s 超短光脉冲序列的四相编解码实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 29~33
- 7 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. 2 \times 40 Gb/s OCDM using superstructure fiber Bragg gratings en/decoder[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 69~71
- 8 Y. Dai, X. Chen, D. Jiang *et al.*. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2284~2286
- 9 J. F. Huang, C. Q. Yang. Reductions of multiple-access interference in fiber-grating-based optical CDMA network[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, **50**(10): 1680~1687
- 10 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~58
- 11 S. Boztas, R. Hammons, P. V. Kumar. 4-phase sequences with near-optimum correlation properties [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1992, **38**(3): 1101~1113
- 12 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic, 1995. 43~55