

# 直接改变光纤折射率实现任意相移光栅的方法研究

王宏博 蒲涛 卢麟 方涛 孙帼丹

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 提出了一种光照直接改变光纤布拉格光栅(FBG)直流折射率调制强度引入相移的方法。仿真和实验表明,利用该方法可以在 FBG 上产生任意相移量。对利用该方法设计的相移 FBG 和传统离散相移 FBG 的性能进行了比较,表明两者具有相近的反射谱特性。针对光码分多址应用,制作了 7 位、63 位码片的时域相位编解码器,测试结果表明其具有良好的编解码性能,从而证明了该方法可用于制作多相移光栅。该方法在 FBG 中引入相移时不需要相位掩模板、制作工艺精度低,因此在灵活性、简单性和制作成本方面有一定的优势。

**关键词** 光纤光学;光纤布拉格光栅;直流折射率调制;相移;相移光纤光栅;光码分多址

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606005

## Research on Achieving Arbitrary Phase Shifts in Fiber Bragg Grating by Changing Refractive Index of Fiber Directly

Wang Hongbo Pu Tao Lu Lin Fang Tao Sun Guodan

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** A new way of achieving phase shifts in fiber Bragg grating (FBG) by increasing direct current refractive index of the FBG is proposed. Simulation and experimental results show that arbitrary phase shifts can be achieved by the presented method. Comparison between the proposed direct-current phase-shift and traditional discrete phase-shift FBG is made, which shows a good agreement. 7- and 63-chip optical code-division multiple-access en/decoders are fabricated. The fine en/decoding performance verifies the feasibility of fabricating multi-phase shifted FBG by the proposed method. High-precision and phase mask are not required in fabrication. This method has advantages in cost-effectiveness, flexibility and simplicity compared to traditional ways.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating (FBG); direct current refractive index modulation; phase-shift; phase shifted fiber Bragg grating; optical code-division multiple-access

**OCIS codes** 060.3738; 230.1480; 220.4000; 050.5080

## 1 引言

光纤光栅的出现为高速光通信和分布式光纤传感系统的进一步发展提供了重要的全光信号处理手段。由于光纤光栅具有全光纤结构、低插入损耗、偏振不敏感和潜在的低成本等诸多的优点,使其在光纤通信和传感系统中均有广阔的应用前景。在许多工程实际应用中,例如精细光滤波器<sup>[1~3]</sup>、分布反馈式光纤激光器<sup>[4]</sup>、光码分多址编解码器<sup>[5~10]</sup>和波分复用

器<sup>[11]</sup>等,都需要在光纤光栅中引入多个相移来实现,所以对相移光纤光栅制作技术的研究有重要的意义。传统上,光纤光栅中的相移是通过在光纤光栅交流折射率调制中插入离散相移来实现的<sup>[12]</sup>。一种方法是利用特制的相移掩模板来制作,这种方法所需的相位掩模板造价高昂,且一个相位掩模板只能制作一种相移,灵活性比较欠缺。还有一种方法使用普通相位掩模板,在制造时使得光纤和掩模板之间产生一个微小

收稿日期: 2010-11-15; 收到修改稿日期: 2011-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(60502003)资助课题。

作者简介: 王宏博(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅和光码分多址编解码技术等方面的研究。

E-mail: shikuanwhb@qq.com

导师简介: 蒲涛(1974—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信和光纤传感等方面的研究。

E-mail: nj\_putao@163.com

的相对位移,从而在光栅上写出相移,这种方法要使用纳米精度的位移台来精确地控制位移量,而这种位移台成本高昂,且复杂度高<sup>[13~15]</sup>。利用直流产生相移在文献[16~19]中有报道,有两种方法,一种是采用钨丝加热光栅,使得折射率变化产生相移,但这种方法产生相移所需的直流长度较长,性质和离散相移差别较大,且系统复杂;另一种光照法<sup>[20,21]</sup>只是在无栅区的空白处产生相移,并未形成相移光栅。

针对以上几点缺陷,本文提出一种新的在光纤光栅中引入相移的方法,该方法仅通过改变某一小段光纤光栅的直流折射率,就能在光纤光栅的该处插入相移。这种方法在引入相移时只需要亚微米级的制作工艺,而且不需要昂贵的相位掩模板,如若使用幅度模板(通常成本较低),甚至不需要位移台。文中对该方法产生相移的条件进行了研究,和传统方法进行了比较,结果显示二者在反射谱形状、特性等方面非常相近。实验制作了具有不同相移量的相移光纤光栅和多相移光纤布拉格光栅(FBG)编解码器,测量结果和仿真数据非常一致,证明了该方法在实际制作中的可行性。

## 2 原 理

光在光纤中的传播会引起光相位的改变,可表示为

$$\phi_{\text{shift}} = \frac{2\pi nL}{\lambda}, \quad (1)$$

式中  $n$  为光纤纤芯的折射率,  $L$  为传输距离,  $\lambda$  为光的波长。如果在  $L$  中需要一个任意的附加相移  $\Delta\phi_{\text{shift}}$ , 只需要将折射率提高

$$\Delta n = \frac{\Delta\phi_{\text{shift}}\lambda}{2\pi L}. \quad (2)$$

光纤光栅折射率调制可表示为

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{\text{ac}}(z) \cos\left[\frac{2\pi z}{\Lambda} + \varphi(z)\right] + \Delta n_{\text{dc}}(z), \quad (3)$$

式中  $n_0$  为有效折射率,  $\Delta n_{\text{ac}}(z)$  和  $\Delta n_{\text{dc}}(z)$  分别为交流和直流折射率调制。

根据(2)式,如果在光纤光栅中直流折射率  $\Delta n_{\text{dc}}(z)$  在长度为  $L$  的距离中增加  $\lambda/(4L)$  (由于是反射,光来回传播了  $2L$ ), 意味着一个  $\pi$  相移就被引入了,如图 1 所示。

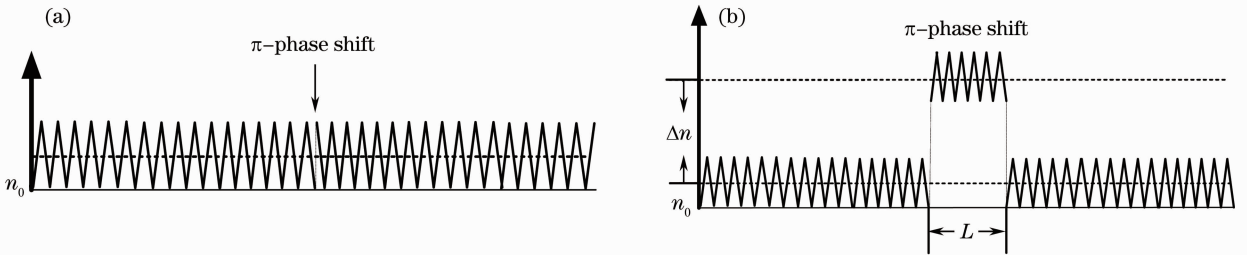


图 1 两种相移光栅原理图。(a)离散相移光栅,(b)直流相移光栅

Fig. 1 Principle of two different phase shifted FBGs. (a) discrete phase shifted FBG, (b) DC phase shifted FBG

图 2 为直流相移光纤光栅和传统离散相移光纤光栅反射谱的仿真对比,可以看出二者具有非常相

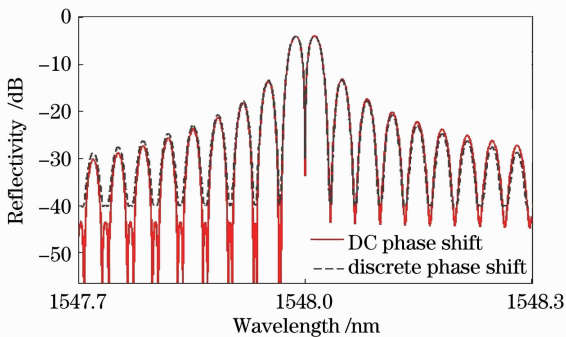


图 2 直流相移光栅反射谱(实线)和离散相移光栅反射谱(虚线)对比

Fig. 2 Comparison of DC phase-shift grating (solid line) and discrete phase shift grating (dashed line)

似的反射谱形状。仿真中,光栅长度为 5 cm,产生相移的长度为  $500 \mu\text{m}$ ,位于光栅中间位置(2.475~2.525 cm)处,直流折射率变化量为  $7.7400 \times 10^{-4}$ 。

直流相移光栅具有和传统离散相移光纤光栅相同的反射谱特性。图 3 所示的是直流相移不同的相移量造成的反射谱的变化,该规律和传统离散相移光纤光栅吻合<sup>[13]</sup>。图 4 所示的是两种相移光栅中心凹陷的反射率和相移所在位置的关系,图中的光栅长度为 5 cm,相移量为  $\pi$ ,相移点越接近中心,中间凹陷越深。可见两种相移光栅的变化规律非常相似。

根据(2)式,实现一个  $\pi$  相移所需的长度  $L$  是可变的。不同的直流长度  $L$  在整个光栅长度所占的比例会对光栅的反射谱的形状产生显著的影响,反射谱中的两个峰会变得不对称,如图 5 所示。仿

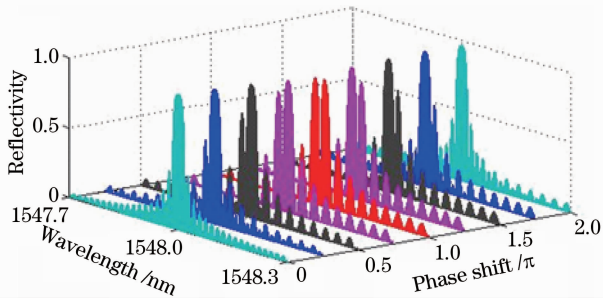


图3 不同相移量直流相移光栅的仿真反射谱

Fig. 3 Calculated reflective spectrum of FBG with different phase shifts induced by proposed DC method

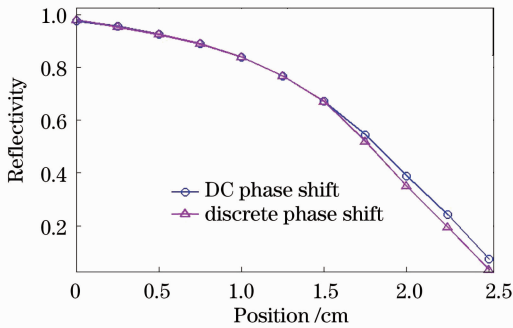


图4 中心凹陷的反射率随位置变化规律

Fig. 4 Calculated central reflectivity of FBG with DC phase shift(circle) and discrete phase shift (triangle) at different positions

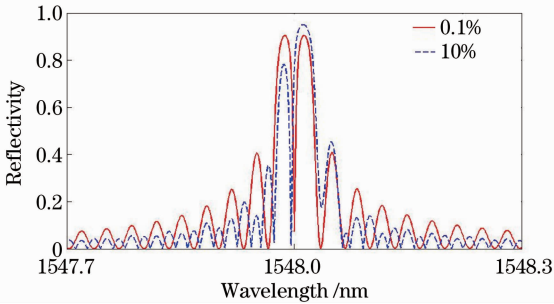


图5 直流长度比例不同的光栅仿真反射谱

Fig. 5 Calculated reflective spectra of grating with different DC-length proportions

真中,光栅长度为5 cm,产生相移的长度分别为5 mm (10%)和50 μm(0.1%),位于光栅中间位置。直流折射率变化量分别为  $7.7400 \times 10^{-5}$  和  $7.7400 \times 10^{-3}$ 。图6中,纵轴为不对称反射谱中左边较低的峰值反射率和右边较高的峰值反射率的比值,该比值反映了整个反射谱的不对称程度,横轴为直流长度在整个光栅中所占百分比。从图中可以看出,直流长度所占的比例越大,反射谱越不对称,如果该比例超过10%,反射谱会变得比较明显的不对称。这是因为直流长度越短,光完成一个附加相移所需的长度就越短,该相

移就越接近于一个离散相移,反射谱就越和离散相移光栅的接近。虽然直流长度的比例会使得反射谱的形状改变,但是其对光相位的改变量还是不变的。但是若需要得到对称的反射谱,就要尽量减小直流长度的比例。但是,直流长度不能无限缩短,其受限于制作设备的精度以及光纤光栅的最大折射率调制量。所以,在实际制作中,就要在直流长度所占比例和反射谱对称性之间有个折中的选择。

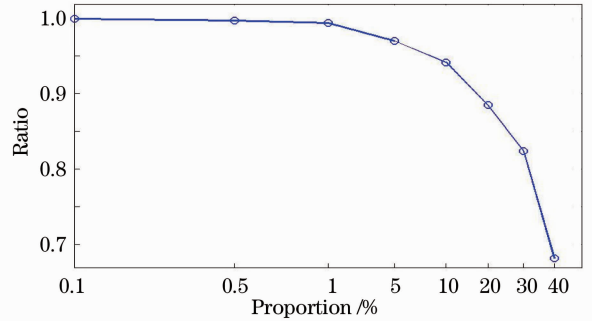


图6 直流长度比例不同的直流相移光栅非对称反射谱中,左峰与右峰峰值反射率比值变化

Fig. 6 Calculated ratios of the lower peak in the left and the higher peak in the right in the asymmetric reflective spectrum of DC phase-shifted FBG, with different DC-length proportions

### 3 实验结果

#### 3.1 单个相移制作

基于前面的理论分析,实验在光纤光栅中引入了  $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$  相移。实验使用了紫外光写入的方式,光源为相干公司的244 nm倍频氩离子激光器,位移台为Physik Instrumente的亚微米精度位移台,使用了掺锗光敏载氢光纤光栅以增加其最大折射率调制强度。制作的光纤光栅的长度为3 cm,实现相移的直流长度为500 μm。根据(2)式,实现  $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$  相移增加的直流折射率分别为  $3.8700 \times 10^{-4}, 7.7400 \times 10^{-4}, 1.161 \times 10^{-3}$  和  $1.548 \times 10^{-3}$ 。图7所示的为直流相移光栅用Luna公司光矢量分析仪所测得的反射谱和相同参数下仿真反射谱的对比,二者能较好地匹配。

#### 3.2 具有多个相移的光码分多址(OCDMA)编解码器的制作

利用直流相移的方法,可以在光纤光栅中引入多个相移来实现一些复杂的光器件。例如,在OCDMA系统中,根据码字在FBG中插入多个  $\pi$  相移可以实现光编解码<sup>[5~10]</sup>。但是传统上这种方法

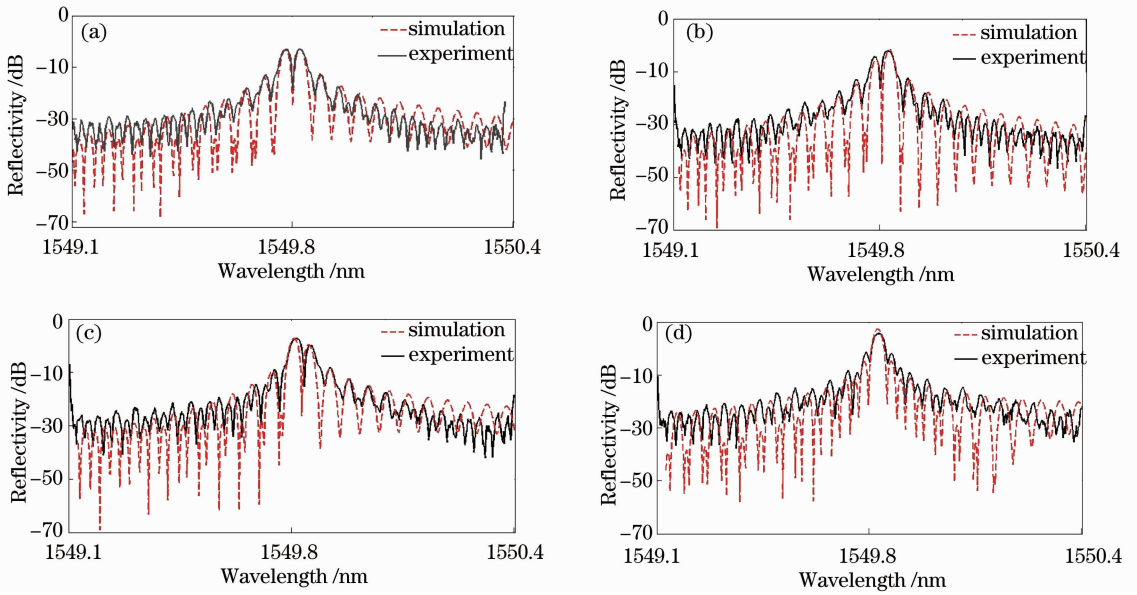


图 7 直流相移光栅的反射谱。(a)  $\pi$  相移, (b)  $0.5\pi$  相移, (c)  $1.5\pi$  相移, (d)  $2\pi$  相移

Fig. 7 Reflective spectra of DC phase shifted FBG. (a)  $\pi$ -phase shift, (b)  $0.5\pi$ -phase shift, (c)  $1.5\pi$ -phase shift, (d)  $2\pi$ -phase shift

需要昂贵复杂的纳米精度的位移台来在 FBG 中引入相移。此时利用直流相移来实现 OCDMA 编解码器, 制作难度则会低很多。图 8(a) 为码字为 1110010 的离散相移编解码器结构, 图 8(b) 为同码字的直流相移编解码器结构, 该编解码器中有三个  $\pi$  相移。按照该结构制作的编解码器谱如图 9 所示。从图中可以看出, 实验数据和仿真很一致。实验中码

片长度  $L_{\text{chip}} = 660 \mu\text{m}$ , 编解码器总长为 4.62 mm, 直流相移所需的  $\Delta n = 5.87 \times 10^{-4}$ ; 利用直流相移, 也可实现有更多相移的编解码器<sup>[6,14,15]</sup>。图 10 为 63 位编解码器的编解码谱, 码片长度  $L_{\text{chip}} = 660 \mu\text{m}$ , 编解码器总长为 41.58 mm。该 63 位编解码器解码效果如图 11 所示。该图通过光矢量分析仪(OVA)测得的数据计算得到, 幅度为归一化幅度。其中输

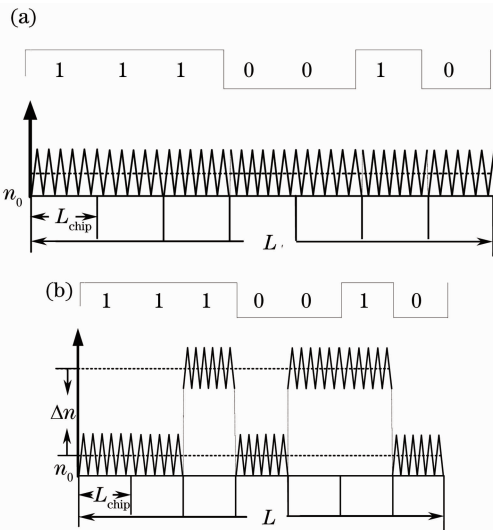


图 8 两种不同编解码器结构示意图。(a) 离散相移编解码器结构, (b) 直流相移编解码器结构

Fig. 8 Two different en/decoders. (a) structure of discrete phase-shifted en/decoder, (b) structure of corresponding DC phase shifted en/decoder

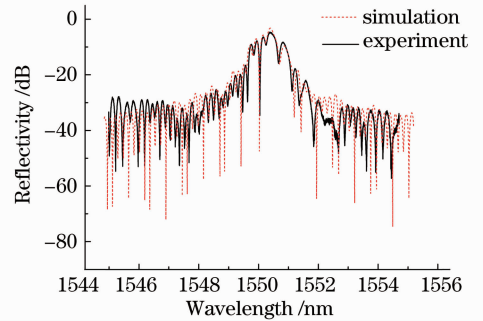


图 9 图 8(b) 所示光栅的反射谱

Fig. 9 Reflective spectra of FBG in Fig. 8(b)

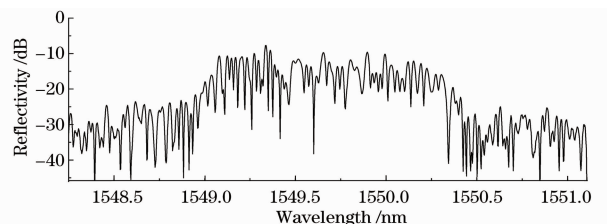


图 10 制作的 63 位编解码器的编码谱

Fig. 10 Coding spectrum of fabricated 63-chip en/decoder



入脉冲为半峰全宽为 3 ps 的高斯脉冲,该脉冲被 63 位的编码器编码之后分别用与之匹配的解码器和不匹配的解码器进行了解码,解码结果表明,该编解码器具有良好的自互相关性能。

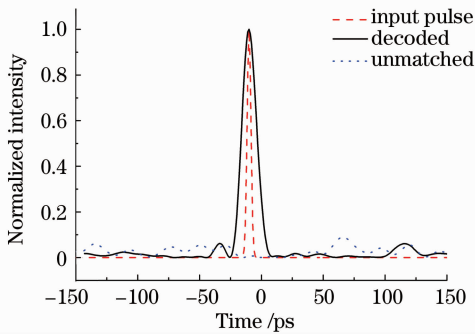


图 11 63 位编解码器的编解码结果

Fig. 11 Calculated normalized en/decoding result of the 63-chip en/decoder based on measured experiment data

## 4 结 论

提出了利用改变光纤光栅直流折射率来向其中插入相移的方法,制作了具有不同相移量的单相移光纤光栅、7 位和 63 位的 OCDMA 相位编解码器,仿真和实验结果都表明了该方法的可行性。相比于传统制作方法,直流相移方式具有以下优点:不需要复杂的相移模板、在制作过程中所需控制精度较低(亚微米级)、相移制作灵活等。这些优点在相移光纤光栅的制作和大规模生产中作用明显。

## 参 考 文 献

- 1 M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 842~844
- 2 M. Ibsen, M. K. Durkin, R. I. Laming. Chirped moire fiber gratings operating on two-wavelength channels for use as dual-channel dispersion compensators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 84~86
- 3 X. F. Chen, C. C. Fan, Y. Luo *et al.*. Novel flat multichannel filter based on strongly chirped sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1501~1503
- 4 J. T. Kringlebotn, J. L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Er: Yb-codoped fiber distributed feedback laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2101~2103
- 5 P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. Phase encoding and decoding of short pulses at 10 Gb/s using superstructured fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2): 154~156
- 6 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

- 7 Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gb/s 60 km OCDMA transmission experiment using EPS-SSFBG en/decoder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 418~421
- 卢麟, 吴伟磊, 方涛等. 基于等效相移超结构光纤光栅编解码器的 2.5 Gb/s 60 km 光码分多址传输实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 418~421
- 8 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 10~14
- 蒲涛, 王荣, 李玉权. 相干编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 10~14
- 9 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding-decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 221~224
- 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
- 10 Fang Tao, Li Yuquan, Wang Rong. Study of pulse width effecton performance of optical code-division-multiple-access en/decoder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1939~1943
- 方涛, 李玉权, 王荣. 脉宽对光码分多址编解码器性能的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1939~1943
- 11 W. H. Loh, F. Q. Zhou, J. J. Pan. Novel designs for sampled grating-based multiplexers demultiplexers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1457~1459
- 12 R. Kashyap, P. F. McKee, D. Armes. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibers using phase-shifted phase-masks [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(23): 1977~1979
- 13 Cai Lulu, Wu Fei, Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2070~2075
- 蔡璐璐, 吴飞, 王玉田. 相移光纤光栅的反射谱特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2070~2075
- 14 W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas *et al.*. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2051~2053
- 15 X. Wang, K. Matsushima, K. I. Kitayama *et al.*. Demonstration of the improvement of apodized 127-chip SSFBG incoherent time-spreading OCDMA network [C]. *Optical Fiber Communication (OFC 2004)*, Los Angeles, CA, Paper MF74
- 16 M. R. Mokhtar, M. Ibsen, P. C. Teh *et al.*. Reconfigurable multilevel phase-shift keying encoder-decoder for all-optical networks [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 431~433
- 17 Z. Zhang, C. Tian, M. A. F. Roelens *et al.*. Direct characterization of the spatial effective refractive index profile in Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2685~2687
- 18 Zhaowei Zhang, Chun Tian, Mohd R. Mokhtar *et al.*. Rapidly reconfigurable optical phase encoder-decoders based on fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(11): 1216~1218
- 19 Zhaowei Zhang, Chun Tian, Periklis Petropoulos *et al.*. Distributed-phase OCDMA encoder-decoders based on fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 574~576
- 20 Y. Nasu, S. Yamashita. Multiple-phase-shift superstructure fiber Bragg grating for DWDM systems [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(24): 1471~1472
- 21 Yusuke Nasu, Shinji Yamashita. Densification of sampled fiber Bragg gratings using multiple-phase-shift (MPS) technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1808~1817