

文章编号: 0258-7025(2008)12-1888-06

# 用分段采样啁啾光栅实现谱相位编码

朱英勋<sup>1,2</sup> 王荣<sup>1</sup> 丁晓光<sup>2</sup> 蒲涛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; <sup>2</sup> 沈阳军区军训器材研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要** 设计并实现了基于采样光纤光栅的光码分多址(OCDMA)谱相位编解码器。根据等效啁啾原理,采用分段采样啁啾的方法将宽谱光源的不同频率分量在时域上分离并重新组合,并将地址码信息用等效相移的方式引入到不同的频率分量上实现谱相位编码。采用该方法制作的编解码器具有制作简单、工艺要求低的特点,便于系统应用。对该编解码器的性能进行了计算机仿真并与实测数据进行了对比,结果显示该编解码器具有较好的性能。

**关键词** 光通信;光码分多址;光纤光栅;谱相位编解码

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1888

## Using a Step-Sampling-Chirped Grating to Realize Spectral-Phase En/Decoding

Zhu Yingxun<sup>1,2</sup> Wang Rong<sup>1</sup> Ding Xiaoguang<sup>2</sup> Pu Tao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China )  
(<sup>2</sup> Researching Institute of Military Training Equipment, Shenyang Military Command, Shenyang, Liaoning 110035, China )

**Abstract** A fiber grating based spectral-phase optical code-division-multiple-access (OCDMA) en/decoder was designed and realized. According to equivalent chirp theory, different frequency components of a broad band optical source can be separated and recombined by using step-sampling-chirped method, and phase shifts which carry address code can be introduced into these frequency components by an equivalent method. En-decoders fabricated by this method have some merits such as simple fabrication, low precision requirement. Therefore this method is suitable for system application. Comparison between computer simulation and measured data shows that the en/decoder has good performance.

**Key words** optical communication; optical code-division-multiple-access; optical fiber grating; spectral-phase en/decoder

## 1 引言

光码分多址(OCDMA)系统按照所使用的光源类型可划分为相干<sup>[1,2]</sup>和非相干系统<sup>[3]</sup>。谱相位编码(SPECTS)OCDMA系统是相干OCDMA系统的一种,其编解码过程需要频谱分离、相位编码和频率重组三个步骤。传统的谱相位编解码器通常是由一对体光栅、傅里叶透镜和一个光空间相位掩模板构成<sup>[4]</sup>,缺点是体积庞大并且光路不易调整。近年来,随着光集成技术的不断进步,人们又提出了基于平

面光波回路(PLC)工艺的谱相位编解码器<sup>[5,6]</sup>,这种编解码器将一对阵列波导光栅(AWG)和相位掩模板集成在同一基片上,AWG作为傅里叶元件对光源进行频谱分离与重组,实现谱相位编解码集成化。然而基于PLC的谱相位编解码器由于制作工艺要求高并且价格昂贵,目前也仅仅停留在实验室阶段。1999年A. Grunnet-Jepsen等<sup>[7]</sup>提出将光纤光栅用于谱相位编码,这种光纤光栅结构的谱相位编解码器将相位编码和频率重组集成到一根光栅中,省去

收稿日期:2007-12-21;收到修改稿日期:2008-04-23

基金项目:国家自然科学基金(60502003)资助项目。

作者简介:朱英勋(1978—),男,山东人,博士研究生,主要从事集成光码分多址编/解码技术、光网络方面的研究。

E-mail:ying\_xun319@163.com

导师简介:王荣(1962—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学、光网络方面的研究。

E-mail:wr\_163@163.com

了中间环节,结构简单,造价低廉,易于应用。文献[8]给出了这种编解码器的具体结构并讨论了编码器的性能。然而这种基于光纤光栅的谱相位编码器还存在三个问题:1) 在制作过程中需要具备多个不同周期相位掩模板,随着码片数的增多,所需掩模板的数目也不断增加,既增加了制作的复杂性又增加了制作成本;2) 在引入相移的过程中需要具备纳米级工艺的制作设备,对精度的要求极高;3) 各子光栅间引入的相移具有随机误差,因此,编解码器的一致性不能得到保证,恶化编解码器的性能。

本文根据等效啁啾原理<sup>[9,10]</sup>,设计并研制了一种基于分段采样啁啾光栅(SSCFBG)的谱相位编码

器,该编解码器的优势在于制作过程仅需一块均匀的相位掩模板,可将光栅周期的啁啾转化为采样周期的啁啾,从而降低了制作的复杂性,采用等效相移技术<sup>[11]</sup>大大降低了制作难度并减小了由直接相移造成的误差。

## 2 编/解码器原理

### 2.1 分段采样啁啾与分段啁啾的等效

等效啁啾的原理是具有任何响应的光栅都可通过对采样光栅的周期进行调整,在采样光栅的非0级信道上实现。分段采样啁啾光栅的折射率调制函数为

$$\Delta n(z) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} A(z - kL) S_k(z - kL) \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda}\right) + c. c, \quad (1)$$

式中  $S_k(z)$  是采样周期为  $P_k$  的采样函数,  $A(z)$  为切趾函数,  $\Lambda$  为光栅周期,  $L$  为光栅长度,  $N$  为分段数目。将  $S_k(z)$  进行傅里叶级数展开

$$S_k(z) = \sum_m F_{mk} \exp\left(j \frac{2m\pi z}{P_k}\right), \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式中得到

$$\begin{aligned} \Delta n(z) &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_m A(z - kL) F_{mk} \exp\left[j 2\pi(z - kL) \left(\frac{1}{P_k/m} + \frac{1}{\Lambda}\right) + j \frac{2\pi kL}{\Lambda}\right] + c. c \approx \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_m A(z - kL) F_{mk} \exp\left[j \frac{2\pi(z - kL)}{\Lambda - m\Lambda^2/P_k} + j \frac{2\pi kL}{\Lambda}\right] + c. c = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_m A(z - kL) F_{mk} \exp\left[j \frac{2\pi(z - kL)}{\Lambda_{mk}} + j\varphi_k\right] + c. c, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $F_{mk}$  为傅里叶系数,  $\Lambda_{mk} = \Lambda - m\Lambda^2/P_k$ ,  $\varphi_k = \frac{2\pi kL}{\Lambda}$ 。如果令  $m = \pm 1$ , 则(3)式变为

$$\Delta n(z) = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta n_k(z) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} A(z - kL) F_{1k} \exp\left[j \frac{2\pi(z - kL)}{\Lambda_{1k}} + j\varphi_k\right] + c. c, \quad (4)$$

(4)式表明,分段采样啁啾光栅的 $\pm 1$ 级信道具有与分段啁啾光栅相似的响应,因此两者具有等效的功能。

### 2.2 相移的引入

谱相位编码的第二个步骤是将不同频率分量赋予不同的相位。文献[8]采用的方法是直接相移法,其原理是在相邻的两个子光栅中开辟一段非光栅区,使光载波相位发生相移。这种方式的缺点是非光栅区的长度不易控制,并且每一段非光栅区的制作误差都可能影响到后续码片。

解决的办法是采用 SSCFBG 和等效相移(EPS)方法<sup>[11]</sup>。这种新的谱相位编码器的原理如图1所示。用于频谱分割的第一根光栅 Q1 采用了 2.1 节所述的 SSCFBG,这种结构的光栅已被证明与分段啁啾光栅等效。用于频谱相位编码与频率重组的光栅结构如图1中 Q2 所示。Q2 各子光栅的排列顺序与 Q1 相反,并且在各个子采样光栅中心位置  $z_k$  处将采样周期增加  $\Delta P_k$ ,从而使各子光栅的折射率调制变为

$$\Delta n_k(z) = \begin{cases} \frac{1}{2} A(z - kL) F_{1k} \exp\left[j \frac{2\pi(z - kL)}{\Lambda_{1k}} + j\varphi_k\right] + c. c & z < z_k \\ \frac{1}{2} A(z - kL) F_{1k} \exp\left[j \frac{2\pi(z - kL)}{\Lambda_{1k}} + j \frac{2\pi\Delta P_k}{P_k} + j\varphi_k\right] + c. c & z > z_k \end{cases}, \quad (5)$$

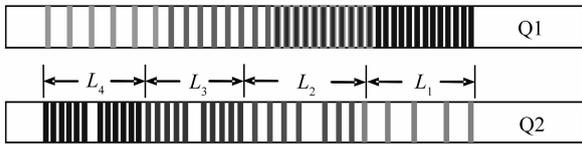


图 1 采用 SSCFBG 和 EPS 方法进行谱相位编码的原理

Fig. 1 Principle of spectral phase encoding using SSCFBG and EPS method

当  $\Delta P_k = P_k/2$  时可得到第  $k$  个子光栅的 +1 级信道产生了  $\pi$  相移, 因此可以用这种等效相移的方法将地址码信息引入到各个子光栅中而没有误差累积效应。

### 3 仿真与实验

#### 3.1 仿真分析

利用 SSCFBG 进行谱相位编解码的系统结构如图 2 所示。编码器由光栅 Q1, Q2 组成, Q1 为具

有 7 个子光栅的 SSCFBG, 每个子光栅长度为 8 mm, 采样周期从  $200 \mu\text{m}$  按  $8 \mu\text{m}$  的增幅依次递增。相位掩模板周期为  $533.3 \text{ nm}$ , 对应光栅周期为  $1550 \text{ nm}$ 。Q2 由排列顺序与 Q1 相反并具有等效相移的 7 个子光栅构成, 地址码采用 7 位 Gold 序列: 1 1 1 0 0 1 0。解码器 Q3, Q4 分别由 Q1, Q2 反向放置得到, Q3 的功能是将编码信号再进行频率分离, Q4 的功能则是将各频率分量相移去掉并重新组合。Q1 与 Q2 的 +1 级信道反射谱和群时延谱如图 3 (a), (b) 所示。

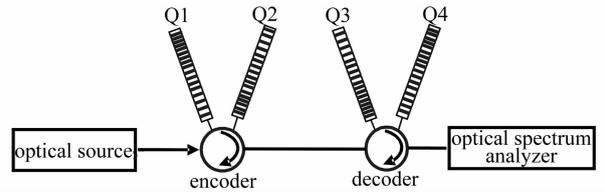


图 2 谱相位编解码系统结构

Fig. 2 Structure of spectral phase en/decoding system

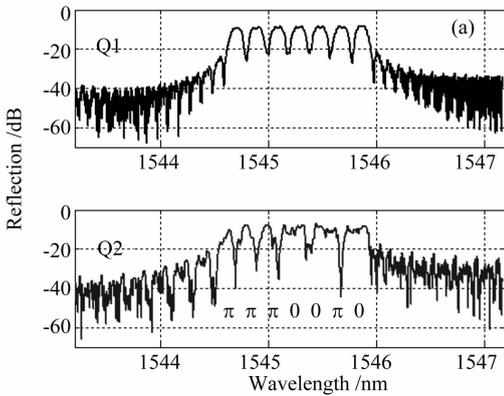


图 3 Q1 与 Q2 的反射谱(a)和群时延谱(b)(仿真)

Fig. 3 Reflection spectrum (a) and group delay spectrum (b) of Q1 and Q2 (simulated)

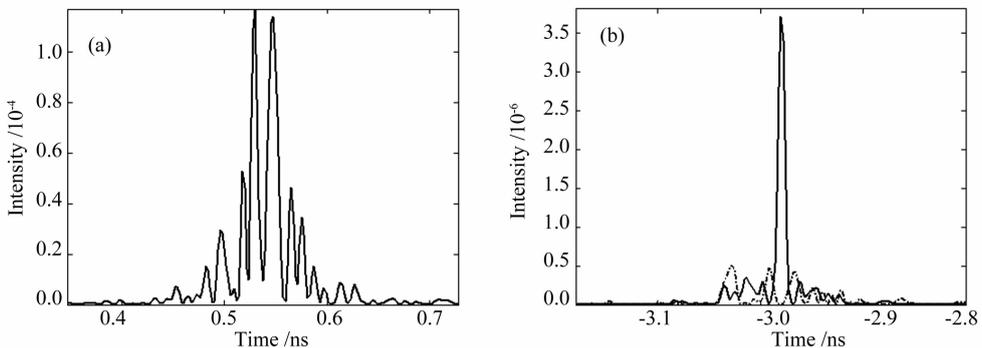


图 4 编解码信号(仿真)。(a) 编码信号;(b) 解码信号(点线为互相关信号)

Fig. 4 En/decoding signal (simulated). (a) encoded signal; (b) decoded signal (dot line is the cross-correlation signal)

图 3(a)中 Q2 的反射谱由于等效相移的引入在各个子光栅反射峰中央形成了凹陷, 图 3(b)为 Q1 和 Q2 的群时延谱, 采样周期由  $200 \sim 256 \mu\text{m}$  的变

化以及光栅  $5.6 \text{ cm}$  的总长度形成了从  $1544.6 \sim 1545.9 \text{ nm}$  之间的  $560 \text{ ps}$  群时延差。用一个半峰全宽(FWHM)为  $2 \text{ ps}$  的高斯脉冲作为入射光脉冲, 得

到编码信号和解码信号如图 4 所示。编码信号是几个不同频率分量的脉冲相叠加,因此产生了差拍,形成振荡形式,而编码波形的包络则与图 3(a)中每个反射峰的宽度有关,0.2 nm 的反射峰宽度对应于半峰全宽为 80 ps 的编码信号。图 4(b)为相应的解码信号,其中实线为自相关信号,点线为互相关信号。图中可见自相关信号的峰值旁瓣比约为 10:1,而自互相关信号的峰值比为 7:1。

上述结果是在光栅的折射率调制幅度为  $10^{-4}$ , 子光栅长度为 8 mm 的条件下得到的。通过研究,发现编码器的性能不但与折射率调制幅度  $\Delta n_{\text{eff}}$  有关,而且与子光栅的采样周期增量  $\Delta P$  有关。图 5(a), (b)分别显示了自相关信号峰旁瓣比和自互相关峰值比随  $\Delta P$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  的变化关系。可以看到,当  $\Delta n_{\text{eff}}$  一定时, $\Delta P$  具有最佳取值。 $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $5 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$  和  $2 \times 10^{-4}$  时,最佳  $\Delta P$  值分别为  $8.5 \mu\text{m}$ ,  $8.5 \mu\text{m}$  和  $8.75 \mu\text{m}$ , 对应的自相关峰旁瓣比 (P/W) 值为 11, 10.3 和 9.1。(b) 中的最佳  $\Delta P$  分别为  $8 \mu\text{m}$ ,  $8.25 \mu\text{m}$  和  $9.75 \mu\text{m}$ , 相应的自互相关峰比 (P/C) 值为 7.7, 7.6 和 6.2。产生这种趋势的原因为:当  $\Delta P$  下降时,图 3(b) 编码器反射谱各反射峰相互重叠,反射谱边带对相邻反射峰的影响相当严重,此时傅里叶变换

关系不再适用,重新组合后的各个频率分量并未完全被相位调制,因此导致了编码器性能的劣化。而当  $\Delta P$  超过最佳值并继续增加时,各个频率分量分离得过多,使编码脉冲出现频率丢失,从而导致编码器性能的下降。当  $\Delta P$  固定时,P/W 和 P/C 随折射率调制幅度的下降而增加。这是由于光栅折射率调制幅度越小,光栅响应与折射率调制包络的傅里叶变换关系就越明显,因此编解码效果越好。然而折射率调制幅度的下降带来了编解码器更大的插入损耗,因此在实际设计中应折衷考虑插入损耗与性能的关系。

### 3.2 实验验证

为了验证上述编解码器的性能,设计并制作了一对谱相位编解码器。编解码器的制作参数如下:码片数为 7,码片长度为 0.72 mm,光栅布拉格波长 1547.8 nm,初始采样周期  $243 \mu\text{m}$ ,采样周期差  $\Delta P$  为  $9.5 \mu\text{m}$ 。编解码器的制作采用相位掩模法,制作设备包括波长为 244 nm 的氩离子倍频激光器,周期为 1070 nm 的均匀相位掩模板以及双向可重复精度为  $0.1 \mu\text{m}$  的长程位移台。制作好的编解码器通过 LUNA 公司的光矢量分析仪(OVA)进行测量,得到编码器 Q1, Q2 的反射谱和群时延谱如图 6, 7。

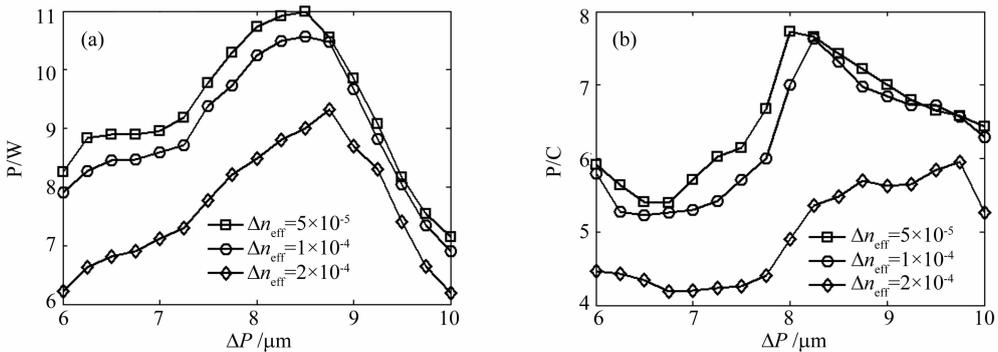


图 5 自相关信号性能随  $\Delta P$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  的变化关系。(a) P/W; (b) P/C

Fig. 5 Performance of the auto- and cross-correlation signal varied with  $\Delta P$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$ . (a) P/W; (b) P/C

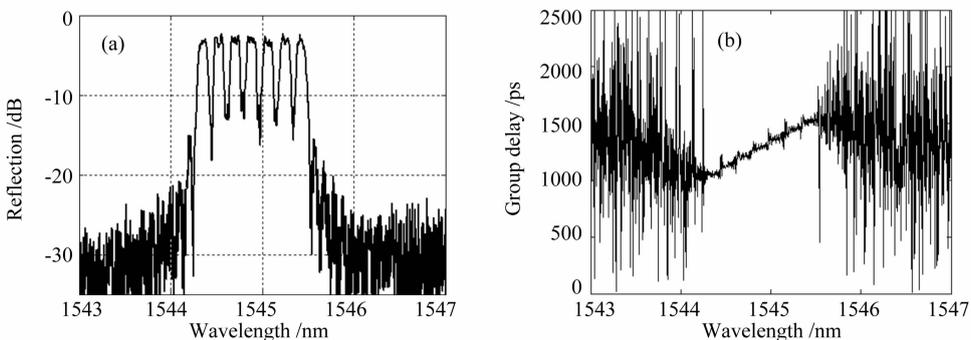


图 6 实测 Q1 的反射谱(a)和群时延谱(b)

Fig. 6 Measured reflection spectrum (a) and group delay spectrum (b) of Q1

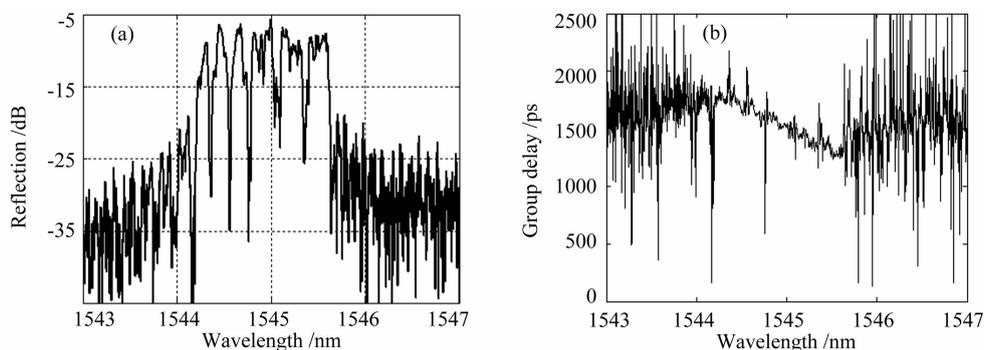


图 7 实测 Q2 的反射谱(a)和群时延谱(b)

Fig. 7 Measured reflection spectrum (a) and group delay spectrum (b) of Q2

由图 6(a)可见,  $9.5 \mu\text{m}$  的采样周期差形成了从  $1545.34 \sim 1545.44 \text{ nm}$  的 7 个反射峰, 由公式  $\lambda_B^2/2/n_{\text{eff}}/P_k$  可知各反射峰中心波长分别为  $1545.34 \text{ nm}$ ,  $1544.52 \text{ nm}$ ,  $1544.71 \text{ nm}$ ,  $1544.89 \text{ nm}$ ,  $1545.07 \text{ nm}$ ,  $1545.26 \text{ nm}$  和  $1545.44 \text{ nm}$ 。编码器总长度为  $5.04 \text{ cm}$ , 形成图 6(b)群时延谱中  $1544.3 \sim 1545.5 \text{ nm}$  的  $490 \text{ ps}$  群时延差。利用计算机产生的高斯脉冲作为入射光脉冲, 结合 OVA 测得的数据进行模拟编解码实验, 得到编码器编解码信号如图 8, 9 所示。编码器每个反射峰半峰全宽为  $0.15 \text{ nm}$ , 相应的编码信号的半峰全宽为  $100 \text{ ps}$ 。解码信号的

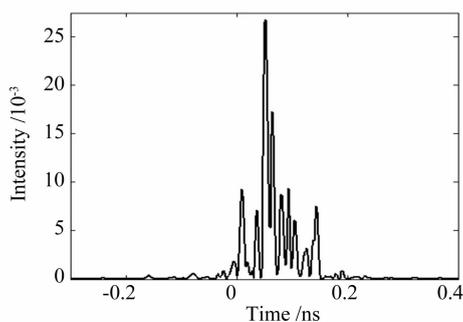


图 8 编码信号

Fig. 8 Encoded signal

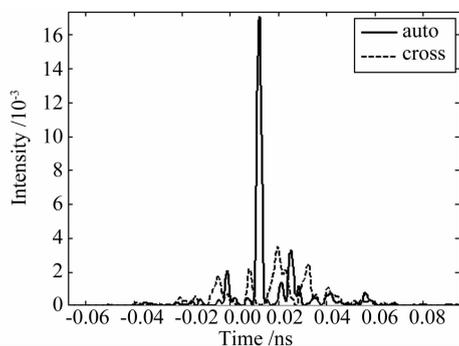


图 9 解码信号(实线为自相关信号, 点线为互相关信号)

Fig. 9 Decoded signal (real line demonstrates auto-correlation signal and dotted line cross-correlation signal)

$P/W$  值为 5,  $P/C$  值为 4.8, 与图 4 对应的仿真结果略有差别, 这可归因于编解码器在制作和测量过程中的各种误差所导致的反射谱失配。但对于 7 位长的编码序列来说, 图 9 的结果足以反映出谱相位编解码器的性能。

## 4 结 论

设计并实现了一种基于分段啁啾光栅的谱相位编解码器, 该编解码器采用等效啁啾和等效相移技术简化了编解码器制作工序, 降低了对制作设备精度的要求, 解决了传统谱相位编解码器相位误差累积的问题。对该编解码器的性能进行了仿真分析, 结果显示, 适当地调整子光栅采样周期增量和折射率调制幅度可产生最佳的编解码性能。实际制作一组编解码器, 用计算机模拟的方法进行了编解码实验, 得到的结果与仿真较为一致。还需说明的是, 由于谱相位编解码器产生的自相关信号在时域上具有较宽的主峰, 因此更适用于窄带接收。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 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. 相位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
- 3 Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Li Enbang *et al.*. The study of time/frequency encoding optical code division multi-access communication with Bragg gratings arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 961~964  
付晓梅, 于晋龙, 李恩邦 等. 利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 961~964
- 4 J. A. Salehi, A. Weiner, J. Heritage. Coherent ultrashort light pulse CDMA communication systems [J]. *J. Lightwave*

- Technol.*, 1990, **8**(3):478~491
- 5 J. Cao, R. G. Broeke, N. Fontaine *et al.*. Error-free spectral encoding and decoding operation of InP O-CDMA encoder [C]. *OFC2006*, 2006, OWL2
  - 6 V. J. Hernandez, W. Cong, R. P. Scott. 320 Gb/s capacity (32 users  $\times$  10 Gb/s) SPECTS O-CDMA local area network testbed [C]. *OFC2006*, 2006, PDP45
  - 7 A. Grunnet-Jepsen, A. E. Johnson, E. S. Maniloff *et al.*. Fibre Bragg grating based spectral encoder/decoder for lightwave CDMA [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13):1095~1097
  - 8 Chen Jinhua, Fang Xiaohui, Yu Xiaoqing *et al.*. Exploration of code division multiple access (OCDMA) spectral encoder/decoder based on fiber grating [J]. *Acta Communication Sinica*, 2005, **26**(3):51~57  
陈金华, 方晓惠, 俞小青 等. 基于光纤布拉格步进啁啾光栅的 OCDMA 频域编/解码器的探索[J]. *通信学报*, 2005, **26**(3):51~57
  - 9 Xiangfei Chen, Yi Luo, Chongcheng Fan *et al.*. Analytical expression of sampled Bragg gratings with chirp in the sampling period and its application in dispersion management design in a WDM system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8):1013~1015
  - 10 Jia Feng, Xiangfei Chen, Chongcheng Fan *et al.*. A novel method to achieve various equivalent chirp profiles in sampled Bragg gratings using uniform-period phase masks [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**:71~75
  - 11 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Dianjie 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
- 陈金华, 方晓惠, 俞小青 等. 基于光纤布拉格步进啁啾光栅的

## 《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

**具体要求:**综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

**引言,**要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

**正文,**是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

**结论,**是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

**参考文献,**是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

**投稿方式:**网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:zhjg@mail.shcnc.ac.cn

咨询电话:021-69918427