

文章编号 1004-924X(2010)09-1965-07

非连续线性啾啾取样布拉格光栅型 多信道光纤滤波器的设计

涂兴华, 刘逢清, 徐 宁

(南京邮电大学 光电工程学院 微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210046)

摘要:介绍了一种基于取样布拉格光纤光栅获得多信道光纤滤波器的方法。通过设计一种非连续阶梯型啾啾取样的布拉格光栅结构,可以分别实现单个信道宽度为 50, 100 和 200 GHz 的光纤滤波器。光纤滤波器的每个信道的宽度几乎完全相同,具有平顶、峭沿和高透射率特点,相邻信道间隔深度超过 28 dB,平均插入损失不超过 0.1 dB, 3 dB 带宽内相位响应起伏在 5~30 ps。利用介绍的方法制作具有相应非连续线性啾啾系数全息相位掩模板,易于制作,成本低,重复性好。通过改变相应的光纤光栅参数,可以实现不同信道宽度的,性能稳定、可重复性高的光纤滤波器,在高速光通信系统以及光互连中有着非常好的应用前景。

关键词:光纤滤波器;传输矩阵法;非连续啾啾;密集波分复用;取样布拉格光栅

中图分类号: TN253; TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.1965

Design of high channel-count optical fiber filters based on sampled Bragg grating with discrete linear chirp structure

TU Xing-hua, LIU Feng-qing, XU Ning

(Microfluidics and Optics Technology Research Center, School of Opto-electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: A novel approach to obtain multi-channel comb filters with various channel bandwidths is presented based on a sampled Bragg grating. A kind of high-channel-count comb filter with channel spacings of 50 GHz, 100 GHz and 200 GHz is then fabricated respectively by design of a discrete-chirped sampled Bragg grating structure like a ladder in grating period. This kind of optical fiber filter is characterized by multiple equalized bands with flat-top steep-edge and high transmittance and its inter-channel isolation is more than 28 dB, in-band insertion loss is less than 0.1 dB and phase response is between 5~30 ps in the 3 dB bandwidth. By using proposed approach, the holographic phase mask with discrete-chirped coefficients can be easily prepared in low costs and good repetition. Furthermore, by changing the optical fiber parameters, the optical fiber filters with different channel bandwidths can be implemented in high stability and repetition, which has a good potential in the high-speed optical communication systems and optical interconnects.

收稿日期:2010-07-19;修订日期:2010-07-26.

基金项目:南京邮电大学引进人才科研启动基金资助课题(No. NY207026);江苏省高校自然科学基金资助项目(No. TZ208014)

Key words: optical fiber filter; transmission matrix method; discrete chirp; dense wavelength division multiplexing; sampled Bragg grating

1 引言

作为波分复用光通信及光传感系统中的核心器件,近年来光纤滤波器已经得到了广泛的关注。利用光纤滤波器的波长选择特性,可以进行激光模式选择来研制光纤激光器;可以通过多信道实现多波长信号波分复用;也可以进行滤波,提取有用信号等。目前,各种不同类型结构的光纤滤波器相继面世^[1-11],在宽带高速光纤通信系统中,基于常规光纤制作的各种布拉格光栅型多信道光纤滤波器应用较为广泛^[11-16]。

理想的光纤滤波器应具有插入损耗小、信道性能好以及潜在的价格优势等特点。为了满足人们对光通信带宽无止境的需求并最好地利用现有光放大器的带宽,采用更窄波长间隔的 DWDM 技术是一种有效途径。然而实现更窄波长间隔的密集型波分复用/解复用技术(如 50 GHz 信道间隔),无论对于阵列波导光栅(AWG)技术和薄膜技术都是比较困难的。

通常的多信道光纤布拉格光栅(FBG)结构在工艺技术上难以实现,例如采用电子束曝光的方法能够得到各种各样的光栅精细结构,但设备昂贵,制作成本过高。基于重构-等效啁啾技术设计光纤光栅结构^[17-19],可以采用全息相位掩模板紫外扫描曝光的方法得到多信道高性能梳状光纤滤波器,方法相对简单,工艺成熟且成本较低,滤波器性能稳定,可重复性高,但某些应用^[18]涉及的线性啁啾光栅结构对于相位掩模板的线性度要求较高,在实际工艺中也难以保证。文献^[19]报道的采用相移结构得到光纤滤波器信道性能还有待进一步提高,例如在信道顶部还有一定的起伏,有一定插入损耗等。

本文提出了一种特殊的非连续光栅周期啁啾取样布拉格光纤光栅结构。在这种结构中,每个取样内的光栅周期保持常数不变,而相邻取样之间的光栅周期满足线性关系。这样对于采用全息相位掩模板紫外扫描曝光制备的全息相位掩模板

而言,只要在较短的长度内保持均匀性而在总体长度上仅仅需要较少的啁啾改变次数,因此易于制作,成本低,重复性好。通过设计改变光栅参数,就可以分别得到相应信道宽度的平顶、信道边缘陡峭下降和插入损耗低的高性能多信道宽带光纤滤波器。

2 理论和设计

如图 1 所示,把光栅看作由若干段组成,每一段即为一个取样周期;在每个取样周期内的光栅周期保持不变,没有啁啾;各取样周期之间光栅周期不同,并满足:

$$\Lambda_i(z) = \Lambda_0 - c_d z_i$$

$$(z_i < z < z_{i+1}, i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

其中, $\Lambda_i(z)$ 表示第 i 个取样周期中的光栅周期; Λ_0 为取样布拉格光栅中心位置处的光栅周期; c_d 是非连续线性啁啾的啁啾系数,表示光栅周期沿着光栅长度变化的情况; z 是布拉格光栅径向上的坐标,且坐标原点设为取样布拉格光栅的中心处,即 $z \in [-L/2, L/2]$ (L 为取样布拉格光栅总长度); z_i 表示第 i 个取样周期开始的坐标, z_{i+1} 表示第 i 个取样周期结束的坐标,即第 $i+1$ 个取样

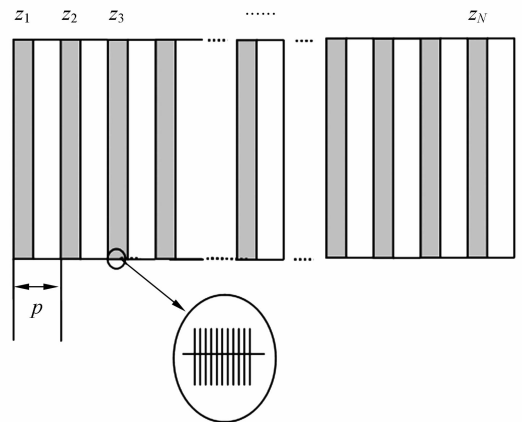


图 1 非连续线性啁啾光栅结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of grating with discrete linear chirp in grating period

周期开始的坐标;取样周期设为 $p, p = z_{i+1} - z_i$; N 是总取样周期的个数。

为了进一步保障得到的光纤滤波器优异的光谱响应,降低信道顶部的波纹起伏,本文所设计的光栅中每个取样周期中的光纤折射率调制均被切趾。切趾函数如公式(2)所示

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 [0.5 + 0.5 \cos(2\pi z/l)] \quad (2)$$

其中, $\Delta n(z)$ 表示的是每个取样周期内 z 坐标处的折射率调制量,是折射率调制常数。公式(2)中的 l 是第 i 个取样周期内的取样长度,即有光栅

$$\begin{bmatrix} E_s^+(z+\Delta z) \\ E_s^-(z+\Delta z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cosh(\gamma\Delta z) - i \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta z)) e^{-i\beta_B \Delta z} & -i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta z) e^{-i(\beta_B \Delta z + \varphi)} \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta z) e^{i(\beta_B \Delta z + \varphi)} & (\cosh(\gamma\Delta z) + i \frac{\Delta\beta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta z)) e^{i\beta_B \Delta z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_s^+(z) \\ E_s^-(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\beta_B = \pi/\Lambda_i(z)$; $\Delta\beta = n2\pi/\lambda - \pi/\Lambda_i(z)$; $\kappa = \pi/\lambda\Delta n(z)$; $\gamma^2 = \kappa^2 - (\Delta\beta)^2$; n 表示光纤有效折射率; λ 为入射光场波长; φ 表示坐标 z 处的光栅初相位。对于本文所介绍的光栅结构,设各段光栅的初相位 φ 均为 0。将各段光栅的矩阵相乘,即可得到整段光栅的传输矩阵。则整段光栅的透射率可定义为

$$T = 10 \lg [E_s^+(L)/E_s^+(0)] \quad (4)$$

其中, $E_s^+(L)$ 为光栅末端的透射场, $E_s^+(0)$ 为光栅起始端的入射场,而整段光栅的反射率可定义为

$$R = 10 \lg [E_s^-(0)/E_s^+(0)] \quad (5)$$

其中, $E_s^-(0)$ 为光栅起始端的反射场。

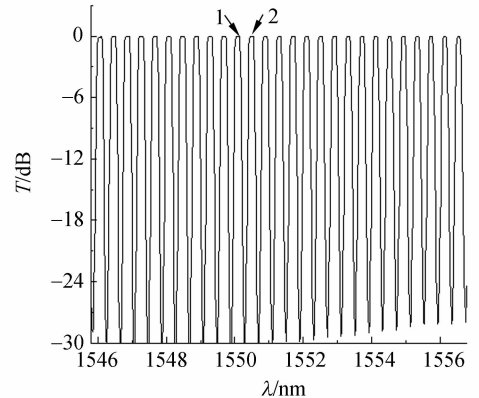
3 数值计算与分析

根据上述方法设计,可以得到具有 26 个信道且信道带宽为 50 GHz 的取样布拉格光栅光纤滤波器,其透射光谱(如图 2(a)所示)从 1 545.8 nm 到 1 556.7 nm 覆盖了 11 nm 宽度范围,相邻信道间隔离深度超过了 28 dB。其结构参数为:取样周期个数 $N=20$,取样系数 $r=0.2, c_d = 2.49 \times 10^{-4}$ nm/mm, $p=2.073$ mm, $\Lambda_0=536$ nm, $\Delta n_0=0.0015$,平均折射率 $n=1.447$ 。

图 2(b)为整个带宽范围内所有信道顶部的放大图。可以看到,该滤波器在整个带宽范围内平均透射率约 99.9%,即插入损失平均不超过

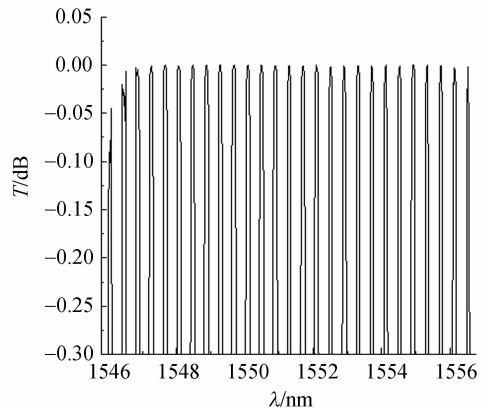
部分的长度。它可以进一步表示为 $r \cdot p$,其中 r 定义为取样系数(取样占空比),即每个取样周期内有光栅部分的长度与取样周期长度的比。

根据传输矩阵法理论^[20],将非连续线性啁啾取样布拉格光栅分成由长度 Δz 很小的一段段光栅构成时,每一小段光栅都可以等效为相应长度的均匀传输线,其两端的入射场 $E_s^+(z)$,透射场 $E_s^+(z+\Delta z)$ 以及反射场 $E_s^-(z), E_s^-(z+\Delta z)$ 满足方程:



(a) 透射光谱特性

(a) Performance of transmission spectra



(b) 透射光谱顶部放大

(b) Detail show of the top of transmission spectrum
图 2 信道宽度为 50 GHz 的 26 信道光纤滤波器的透射光谱特性

Fig. 2 Performance of transmission spectra for a 26-channel fiber filter with channel spacing of 50 GHz

0.1 dB,而文献[18]报道的滤波器信道平均透射率为 99.7%。

图 3 所示为该滤波器其中两个信道的放大图(实线)和相应的群时延响应 τ_T (虚线)。其 0.1,3 和 20 dB 信道带宽分别为 0.12,0.18 和 0.29 nm,具有平顶及带边沿陡峭的特点。在 3 dB 信道带宽内其群时延起伏变化量约为 21 ps,即信道内色散很小,比文献[18]报道的 30 ps 群时延起伏变化量更小,这有利于更高速信号传输,降低通信误码率。可证明图 2 中其余各信道也具有几乎完全相同的性能。

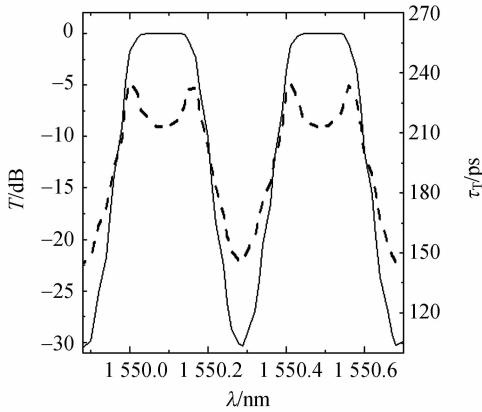


图 3 图 2(a)中标记为 1 和 2 的信道放大图(实线)及群时延响应(虚线)
Fig. 3 Enlarged transmittance (solid line) and group delay (dashed line) of two peaks (signed with 1 and 2) in Fig. 2

改变光纤光栅的相关参数,按照同样的结构可以设计得到信道宽度为 100 GHz 的 32 信道滤波器,其透射光谱响应如图 4 所示。其结构参数为: $N=40, r=0.25, c_d=4.988 \times 10^{-4}$ nm/mm, $n=1.447, \Delta_0=536$ nm, $p=1.037$ mm, $\Delta n_0=0.002$ 。其整体带宽约为 25.6 nm,相邻信道间隔深度超过了 28 dB,各信道的 3 dB 信道带宽为 0.53 nm,而文献[19]报道的相邻信道间隔深度大约为 28 dB,且为反射谱特性。

将图 4 标记为 1 和 2 的两个信道放大可得到如图 5 所示曲线(实线)。滤波器在整个带宽范围内同样具有很好的透射率,插入损失平均不超过 0.1 dB。图 5 也给出了信道的群时延响应(虚线)。各信道具有类似的群时延响应,在 3dB 信道带宽内其群时延起伏变化量约为 30 ps,尤其在信道中心位置附近群时延曲线近似为水平线,即

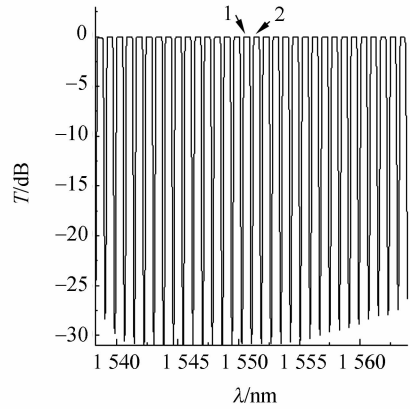


图 4 信道宽度为 100 GHz 的 32 信道光纤滤波器的透射光谱特性
Fig. 4 Performance of transmission spectra for a 32-channel fiber filter with channel spacing of 100 GHz

信道内色散很小。可以看到该滤波器的信道具有平顶良好,群时延起伏小及带边沿陡峭的特性,适用于 DWDM 系统。

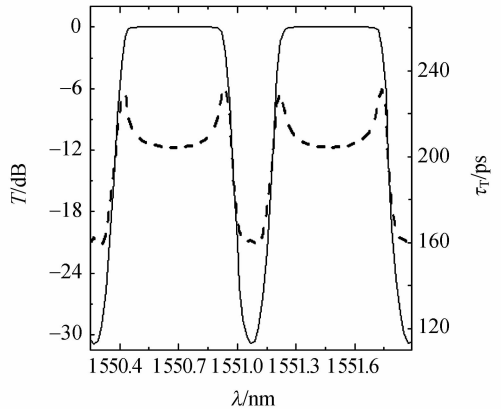


图 5 图 4 中标记为 1 和 2 的信道放大图(实线)及其群时延响应(虚线)
Fig. 5 Enlarged transmittance (solid line) and group delay (dashed line) of two peaks (signed with 1 and 2) in Fig. 4

同样的,通过类似的方法设计光栅参数也可以实现更大信道宽度的滤波器。图 6 所示为基于非连续性调啾取样布拉格光栅结构得到的具有 26 个信道且单个信道宽度约 200 GHz 的多信道光纤滤波器传输特性曲线。相应的结构参数为: $c_d=2.04 \times 10^{-3}$ nm/mm, $N=40, r=0.4, n=1.447, \Delta_0=536$ nm, $p=0.5104$ mm, $\Delta n_0=0.005$ 。其整体带宽约为 41 nm(C 波段)。如图 7

所示,该滤波器的信道具有高透射率、平顶和带边沿陡峭等特性。相邻信道间隔离深度约 30 dB,各信道 3 dB 信道带宽为 0.75 nm。3 dB 信道带宽内群时延起伏变化量仅为 6 ps 左右。

$\times 10^{-3}$ nm/mm, $N = 40, r = 0.5, n = 1.447, \Lambda_0 = 536$ nm, $P = 0.5104$ mm, $\Delta n_0 = 0.004$ 。

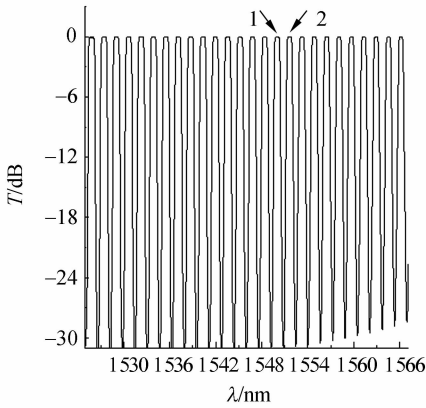


图 6 信道宽度为 200 GHz 的 26 信道光纤滤波器的透射光谱特性

Fig. 6 Performance of transmission spectra for a 26-channel fiber filter with channel spacing of 200 GHz

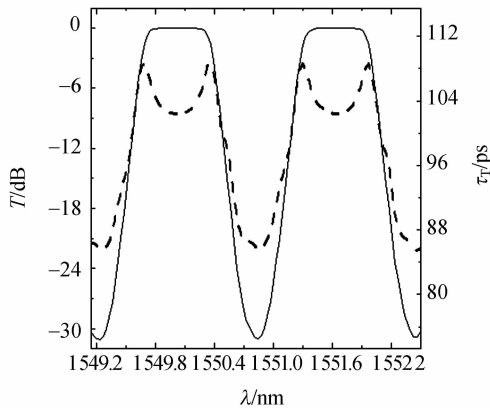


图 7 图 6 中标记为 1 和 2 的信道放大图(实线)及群时延响应(虚线)

Fig. 7 Enlarged transmittance (solid line) and group delay (dashed line) of two peaks (signed with 1 and 2) in Fig. 6

采用本文设计的光栅结构,不仅能得到优异的光栅透射特性,在合适的光栅参数下,同样能得到良好的多信道反射特性。图 6 所示的光栅实例中只需调整 r 参量及 Δn_0 参量即可得到如图 8 所示的具有 24 信道、信道宽度约 200 GHz 的光纤滤波器反射光谱特性。其结构参数为: $c_d = 2.04$

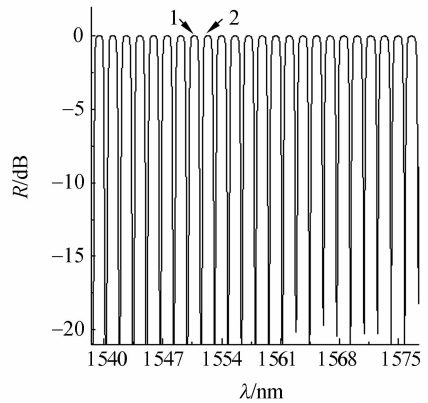


图 8 信道宽度为 200 GHz 的 24 信道光纤滤波器的反射光谱特性

Fig. 8 Performance of reflection spectra for a 24-channel fiber filter with channel spacing of 200 GHz

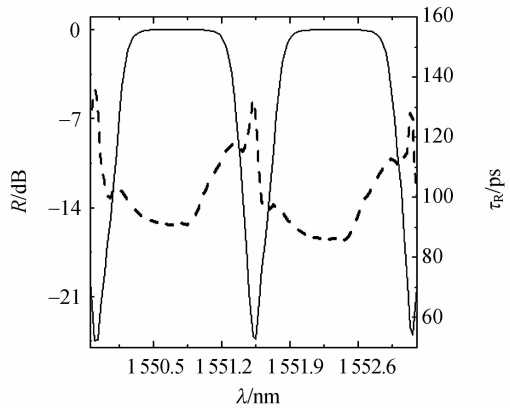


图 9 图 8 中标记为 1 和 2 的信道放大图(实线)及群时延响应(虚线)

Fig. 9 Enlarged reflectance (solid line) and group delay (dashed line) of two peaks (signed with 1 and 2) in Fig. 8

如图 9 所示,滤波器在整个带宽范围内具有很高的反射率,各信道具有类似的群时延响应 τ_g (虚线)。在 3 dB 信道带宽内其群时延起伏变化量约为 27 ps。滤波器的信道具有平顶良好,色散小及带边沿陡峭的特性。

4 结 论

考虑理想的光学梳状滤波器要求通带平坦、

信道串扰小、色散小、插损小且与偏振无关等,本文提出了一种特殊的非连续光栅周期啁啾的取样布拉格光纤光栅结构,呈阶梯型。在这种结构中,每个取样内的光栅周期保持常数不变,而相邻取样之间的光栅周期满足线性关系。采用全息相位掩模板紫外扫描曝光的方法制作上述的光栅结构,对于全息相位掩模板而言,只要在较短的长度内保持均匀性而在总体长度上也仅需要很少的啁啾改变次数。相对于制作文献[17-19]中所介绍的

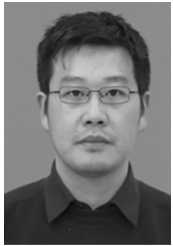
的光栅结构而采用的对应相位掩模板,本文所设计的光栅结构所使用的全息相位掩模板在实际工艺中易于制作,可大大降低成本,且重复性好。通过改变相应光纤光栅参数,可以分别实现单个信道宽度为 50,100 和 200 GHz,具有平顶、峭沿、高透射率以及色散小等传输特性的高性能多信道宽带光纤滤波器。利用本文介绍的方法,得到的光纤滤波器性能稳定、可重复性高,在高速光通信系统及光互连中有非常好的应用前景。

参考文献:

- [1] SUN X W. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(17): 2484-2486.
- [2] CHAN F Y M, YASUMOTO K. Design of wavelength tunable long-period grating couplers based on asymmetric nonlinear dual-core fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(23): 3376-3378.
- [3] WANG Q, FARRELL G, YAN W. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(5): 512-519.
- [4] GU X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(7): 509-510.
- [5] SAKATA H, SUZUKI S, ITO H, *et al.*. Long-period fiber-grating-based bandpass filter using self-aligned absorptive core mode blocker [J]. *Optical Fiber Technol.*, 2008, 14(2): 93-96.
- [6] JIN L, WANG ZH, FANG Q, *et al.*. Bragg grating resonances in all-solid bandgap fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(18): 2717-2719.
- [7] LIU B W, HU M L, FANG X H, *et al.*. Tunable bandpass filter with solid-core photonic bandgap fiber and Bragg fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(8): 581-583.
- [8] NOORDEGRAAF D, SCOLARI L, EGSGAAD J, *et al.*. Avoided-crossing-based liquid-crystal photonic-bandgap notch filter [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(9): 986-988.
- [9] 何万迅, 施文康, 叶爱伦. 长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2): 104-108.
HE W X, SHI W K, YE A L. Long period fiber grating and its new applications in communication and sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 104-108. (in Chinese)
- [10] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作 [J]. *光学精密机械*, 2005, 13(6): 633-636.
SANG X ZH, YU CH X, WANG K R, *et al.*. Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 633-636. (in Chinese)
- [11] 鲁怀伟, 章宝歌, 李敏芝, 等. 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 145-150.
LU H W, ZHANG B G, LI M ZH, *et al.*. All-fiber flat-top interleaver based on double single mode couplers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 14(2): 145-150. (in Chinese)
- [12] OUELLETTE F, KRUG P A, STEPHENS T, *et al.*. Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fiber Bragg gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1995, 31(11): 899-901.
- [13] LI S Y, NGO N Q, TJIN S C, *et al.*. Thermally tunable narrow-band-pass filter based on a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(1): 29-31.
- [14] LOH W H, ZHOU F Q, PAN J J, *et al.*. Novel designs for sampled grating based multiplexers-demultiplexers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(21): 1457-1459.

- [15] LI H P, LI M, SHENG Y L, *et al.*. Advances in the design and fabrication of high channelcount fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007,25(9):2739-2750.
- [16] LI M, LI H P, PAINCHAUD Y. Multi-channel notch filter based on a phase-shifted phase-only-sampled fiber Bragg grating[J]. *Opt. Express*, 2008,16(23):19388-19394.
- [17] CHEN X F, LUO Y, FAN CH CH, *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.
- [18] CHEN X F, FAN CH CH, LUO Y, *et al.*. Novel flat multichannel filter based on stronglychirped sampled fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000,12(11):1501-1503.
- [19] DAI Y T, CHEN X F, XU X, *et al.*. High channel-count comb filter based on chirpedsampled fiber Bragg grating and phase shift[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005,17(5):1040-1042.
- [20] LAURIDSEN V C, SONDERGAARD T, VARMING P, *et al.*. Design of distributed feedback fiber lasers IET Conference Publications[C]. *The 11th international conference on integrated optics and optical fibre communications and the 23rd European conference on optical communications. London, ROYAUME-UNI: Monographie*, 1997:39-42.

作者简介:



涂兴华(1976—),男,安徽阜南人,博士,讲师,2005年于中科院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事微流控光学、光纤通信及光互连技术的研究。E-mail: tuxh@njupt.edu.cn



徐宁(1960—),女,江苏南京人,副教授,1994年于加拿大拉瓦儿大学获光学硕士学位,主要从事光波导理论与光纤通信的研究。E-mail: xuning@njupt.edu.cn



刘逢清(1975—),男,江西宁都人,博士,副教授,2003年于上海交通大学获得博士学位,主要从事光纤通信及其接入技术的研究。E-mail: liufq@njupt.edu.cn