

文章编号: 0258-7025(2010)11-2896-05

相移光栅及取样光栅的双峰滤波特性

田力 张爱玲

(天津理工大学电子信息工程学院天津市薄膜电子与通信器件重点实验室,
计算机与通信工程学院教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384)

摘要 设计了具有双峰滤波特性的相移光栅及取样光栅,利用传输矩阵方法对其滤波特性进行了研究。结果表明,多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅均可获得双峰滤波特性,并且 π 相移取样光栅比多 π 相移光栅具有更好的双峰滤波特性,其反射频谱的旁峰幅度比多 π 相移光栅低得多。调整 π 相移取样光栅的占空比(取样长度与取样周期的比值)位于0.66~0.8范围内时,得到了更好的双峰滤波特性,特别是占空比为0.75时其旁峰反射率整体上处于最低值。

关键词 光纤光学;相移光栅;取样光栅;双峰滤波;占空比

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2896

Dual Wavelength Filtering Properties of Phase-Shifted Fiber Bragg Grating and Sampled Fiber Bragg Grating

Tian Li Zhang Ailing

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, School of Electronic Information Engineering, Ministry of Education Communication Device and Technology Engineering Research Center, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract Phase-shifted fiber Bragg grating and sampled fiber Bragg grating with dual wavelength filtering properties are designed and their properties with transmission matrix method are studied. As a result, both multi- π phase-shifted grating and π phase-shifted sampled grating have dual wavelength reflective profile. Moreover, the side lobe of reflective profile of π phase-shifted sampled grating is lower than that of multi- π phase-shifted grating. By adjusting the duty cycle of π phase-shifted sampled grating in the range of 0.66~0.8, better dual wavelength filtering profile is obtained, especially the side lobe reflective index is lowest when the duty cycle is 0.75.

Key words fiber optics; phase-shifted grating; sampled grating; dual wavelength filtering; duty cycle

1 引言

相移光栅和取样光栅在光通信领域有着广泛的应用。相移光栅在反射峰中打开非常窄透射窗口的特性使其具有较高的波长选择性,对其反射特性已开展了很多研究^[1,2],并且在窄线宽单频光纤激光器^[3]、光波解复用系统^[4]等研究中均具有重要的应用价值,取样光栅由于其具有的多通道分立反射峰使其在梳状滤波器^[5,6]、多波长激光器^[7]及光波分复用^[8~10]方面具有重要应用。多相移光栅是在一段

光纤光栅中插入多个相移而形成的,当相移量由一定长度的光纤等效时多相移光栅就变化为具有一定占空比的取样光栅。当占空比(取样长度与取样周期的比值)趋近于1时,即取样长度与取样周期近似相等,此时取样光栅可被视为多相移光栅。可见,多相移光栅与取样光栅在某种程度上是等效的。近几年双波长光纤激光器成为很多研究人员的主要研究方向,目前已有许多不同的设计方法来获取双波长激光,例如利用不等相移在分布反馈(DFB)光纤激

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(60808004),天津市科技计划面上资助项目(08JCYBJC14500)和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-07-0611)资助课题。

作者简介: 田力(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: sj_tl@hotmail.com

导师简介: 张爱玲(1973—),女,教授,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: alzhang99@hotmail.com

光器中获得双波长激光^[11]；在光纤激光器中使用光纤布拉格(Bragg)光栅作为分布反馈式腔镜实现双波长激光激励^[12]；还有使用光纤 Bragg 光栅对构成法布里-珀罗(F-P)腔形成两超窄透射带而最终得到双波长单纵模激光^[13]等。由于光纤光栅设计灵活多样,所以利用光纤光栅不仅可以大大减小激光器的结构复杂程度,而且还可以实现多种不同的滤波效果,因而也成为光领域研究的热点,利用多 π 相移光栅实现双峰滤波特性的研究^[14]已有报道,但是其旁瓣反射率较高,大致为 0.5;针对多 π 相移光栅旁峰反射率较高的缺点,有研究者提出了两种取样光栅的结构^[15,16],均可得到旁峰幅值较低的双峰滤波特性,而且已将两种结构的光栅应用在双波长光纤激光器中并得到了稳定双波长激光输出^[17,18]。通过比较发现占空比为 0.66 的 π 相移取样光栅结构使 ± 2 级旁峰被调制为零从而有效抑制了旁峰幅值,但其 ± 3 级旁峰反射率仍然高于 0.2^[19]。要利用取样光栅作为双波长单纵模光纤激光器的反射腔镜来获得双波长激光,用于高重复频率超短脉冲序列的产生。取样光栅的双反射峰间隔要求在 0.2~4 nm 范围内,多波长激励与边模抑制比要求越低越好。

本文设计了多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅,通过使用 T. Erdogan 提出的传输矩阵方法来对多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅双峰滤波特性进行模拟。对比两者模拟结果发现两者的反射谱中均具有双主峰,多 π 相移光栅的旁峰反射率较高,而 π 相移取样光栅的旁峰反射率较低。通过对 π 相移取样光栅的模拟对比发现:调整取样光栅的占空比参数,使其占空比在 0.66~0.8 范围之内,取样光栅具有优良的双峰滤波特性,特别是在占空比为 0.75 时其反射旁峰幅值最低。可见 π 相移取样光栅具有优良的双峰滤波特性,在双波长光纤激光器及双波长滤波中有着良好的应用前景。

2 理论分析

研究相移光栅的理论模型有 G. P. Agrawal 等^[20]提出的理论模型和 T. Erdogan^[21]提出的理论模型等。其中 G. P. Agrawal 理论模型适用于均匀相移光栅,而 T. Erdogan 的理论模型适用于各种相移光栅^[22]。在这里的模拟研究中只考虑了均匀相移光栅,两种理论模型均适用,在此采用 T. Erdogan 的理论模型作为理论基础。

假设光纤光栅是均匀曝光的,由光纤光栅的光致折射率变化而导致的折射率分布为

$$\Delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\Delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + s \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为有效折射率; s 为折射率调制的条纹可见度; Λ 为光栅栅格的周期; $\varphi(z)$ 为光栅周期的啁啾或相移; $\overline{\Delta n_{\text{eff}}}$ 为平均的折射率变化。

根据 T. Erdogan 的理论模型,将光纤光栅分成若干小段,用矩阵 F_i 表示第 i 段均匀光栅的传输矩阵,用矩阵 P_i 表示第 i 段相移部分的传输矩阵。光波在光纤光栅入射端的光场振幅为 A_0 和 B_0 ,在出射端的光场振幅为 A_L 和 B_L ,则光场振幅的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = F_M \cdot P_{M-1} \cdot F_{M-1} \cdots P_i \cdot F_i \cdots F_2 \cdot P_1 \cdot F_1 \begin{bmatrix} A_L \\ B_L \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中的 F_i 为

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(rz) - i \frac{c}{r} \sinh(rz) & -i \frac{k}{r} \sinh(rz) \\ i \frac{k}{r} \sinh(rz) & \cosh(rz) + i \frac{c}{r} \sinh(rz) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

在不考虑啁啾的情况下,(3)式中 $k = \frac{\pi}{\Lambda} s \overline{\Delta n_{\text{eff}}}$,

$$c = \delta + \xi, \delta = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right), \xi = \frac{2\pi \overline{\Delta n_{\text{eff}}}}{\lambda}, r =$$

$$\sqrt{k^2 - c^2}, \lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \lambda \text{ 为光纤光栅反射波长。} (2)$$

式中 P_i 表示为

$$P_i = \begin{bmatrix} \exp(-i\phi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi/2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 ϕ 为相移量,对于相移光栅来说 ϕ 为引入的绝对相移量;对于取样光栅来说 ϕ 为

$$\phi = 4\pi n_{\text{eff}} z / \lambda, \quad (5)$$

式中 z 为取样光栅之间的间隔长度。若引入的相移为 π ,那么对于相移光栅 $\phi = \pi$;对于取样光栅而言

$$\phi = (2n+1)\pi, \text{ 对应 } z = (2n+1) \frac{\Lambda}{2}, n = 0, 1, 2 \cdots。$$

3 相移光栅及取样光栅的双峰滤波

具有双峰滤波特性的光纤光栅在双波长激光器中有着广泛的应用。通过模拟发现,相移光栅及取样光栅要获得双峰滤波特性,其相移量通常取 π 相移。研究了多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅的反射谱及透射谱,发现均可得到双峰滤波特性,通过对比多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅的滤波特性,并优化 π 相移取样光栅的结构得到了旁峰幅值更低的双

峰滤波特性。

3.1 多 π 相移光栅

将一段光纤光栅等分为 N 段, 在每个断点处引入一个 π 相移而形成多 π 相移光栅, 相邻两个 π 相移之间的光栅段长度为 L , 结构见图 1, 所设计的多 π 相移光栅参数为: 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$; 平均折射率变化 $\overline{\Delta n_{\text{eff}}} = 0.0001$; 光栅周期 $\Lambda = 530.47 \text{ nm}$;

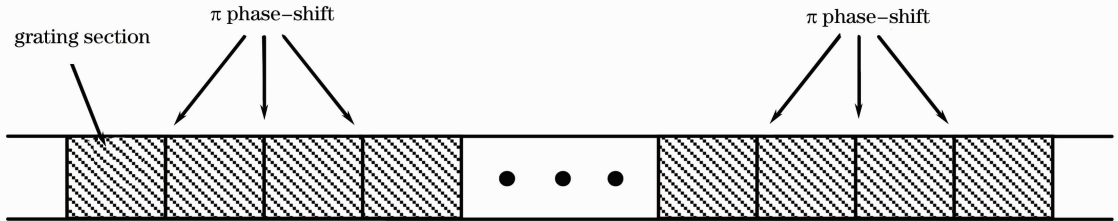


图 1 多 π 相移光栅的结构图

Fig. 1 Diagram of multi- π phase shifted fiber grating structure

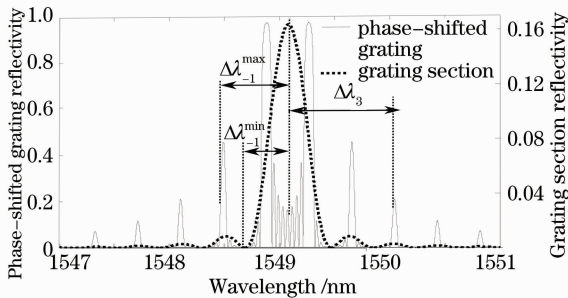


图 2 多 π 相移光栅的反射谱

Fig. 2 Reflective spectra of multi- π phase shift grating with π phase shift

3.2 π 相移取样光栅

π 相移取样光栅由 N 个取样周期构成结构如图 3 所示。在一个取样周期中、未刻写光栅部分的等效相移 ϕ 为 π 相移[在模拟仿真中针对 π 相移为 $(1 + \Delta t)\pi$,

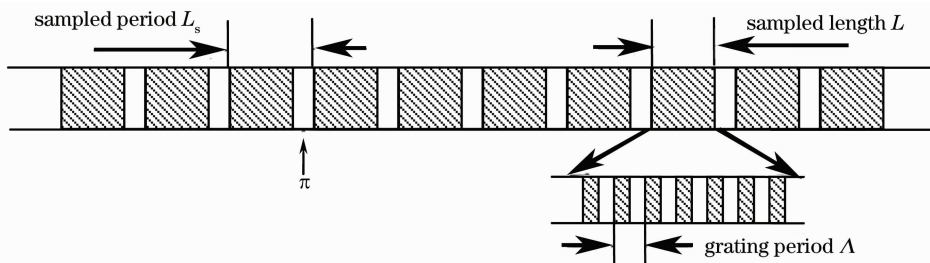


图 3 取样光栅结构示意图

Fig. 3 Diagram of sampled grating structure

3.3 对比及分析

从结构上看, 多 π 相移光栅的光栅段和 π 相移取样光栅的取样长度相同, 由于取样光栅的占空比不为 1, 所以相移光栅的周期要比取样光栅的周期短; 从引入 π 相移看, 多 π 相移光栅引入 π 为绝对相移量, π 相

折射率调制深度 $s = 1$; 光栅段长度 $L = 2121.88 \mu\text{m}$; 光纤光栅被分割段数 $N = 9$, 根据 (2) 式计算其反射谱, 见图 2 中实线, 图 2 中虚线为光栅段的反射谱。从图 2 中可以看出, 两个主峰的反射率可达到 0.9732, 两主峰波长间隔为 0.3824 nm, 但两主峰左右的两个旁峰的反射率高达 0.457。

其中 Δt 为微变调整量^[15]。其取样长度(光栅段)与等效多 π 相移光栅的光栅段的长度相同, 均为 L 。由于其取样长度与取样周期的比值, 即占空比, 其取值不为 1, 因而整个 π 相移取样光栅比多 π 相移光栅的总长度要长。通过模拟发现, 调整 π 相移取样光栅的占空比至 0.75, 其旁峰得到更好的压制, 从而得到旁峰反射率较低的双峰滤波效果, 见图 4 中实线。具体参数为: 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$; 平均折射率变化 $\overline{\Delta n_{\text{eff}}} = 0.0001$; 光栅周期 $\Lambda = 530.47 \text{ nm}$; 折射率调制深度 $s = 1$; 占空比为 $p = 0.75$; 取样周期为 $L_s = L / p = 2829.17 \mu\text{m}$; 取样周期数为 $N = 9$ 。从图 4 可以看出, 两主峰反射率仍较高, 均可达到 0.9912, 旁峰反射率被压制到小于 0.17, 两主峰波长间距 0.2904 nm。在图 5 中给出了 0.75 占空比 π 相移取样光栅的色散特性, 时延频谱见图 5 中虚线。

移取样光栅中 π 相移为未刻写光栅部分等效 π 相移; 从图 2, 4 反射光谱中看, 多 π 相移光栅和 π 相移取样光栅均可获得双峰滤波特性, 但 π 相移取样光栅反射光谱具有更低反射率的旁峰, 得到了较好的双峰滤波特性。

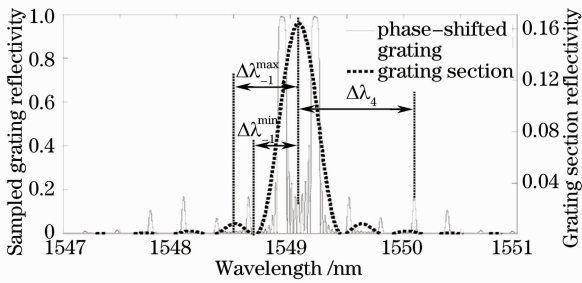


图 4 占空比为 0.75 的 π 相移取样光栅反射谱
Fig. 4 Reflective spectra of π phase shift sampled grating with duty cycle $p=0.75$

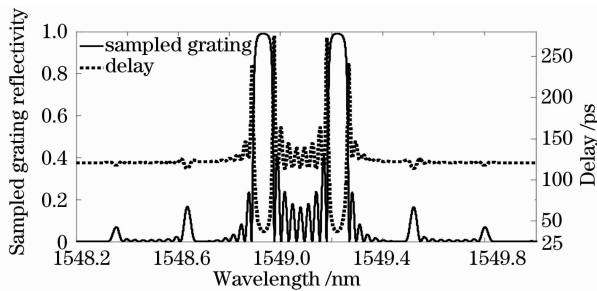


图 5 占空比为 0.75 的 π 相移取样光栅反射谱与延时谱
Fig. 5 Reflective and delay spectra of π phase shift sampled grating with duty cycle $p=0.75$

相移光栅及取样光栅反射光谱的包络均由被 π 相移所隔开的光栅段的光谱所决定,其光谱的零点位置及旁峰极大值位置与中心波长的间距分别为

$$\Delta\lambda_n^{\min} = \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{eff}}L}n, n = \dots \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_m^{\max} = \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{eff}}L} \left(m \pm \frac{1}{2} \right), \quad m = \dots \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (7)$$

式中 L 为光栅段的长度; n 和 m 分别表示零点和极大值的级数, m 取正值时(7)式中取 $m-1/2$; 反之, 则取 $m+1/2$ 。多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅光谱的反射峰位置与中心波长的间距为

$$\Delta\lambda_q = \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{eff}}L/p} \left(q \pm \frac{1}{2} \right), \quad q = \dots \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (8)$$

式中 L 为相移光栅的光栅段长度或取样光栅的取样长度; q 表示反射峰的级数, q 取正值时(8)式中取 $q-1/2$; 反之, 则取 $q+1/2$; p 为占空比, 对于多 π 相移光栅 $p=1$;

在讨论的结构中, (6)~(8)式中的 L 为同一长度。在多 π 相移光栅中 $p=1$, 其各个反射峰均位于光栅段的反射谱极大位置, 因而多 π 相移光栅的旁峰反射率较高, 如图 2 所示。而在 π 相移取样光栅中由于占空比 $p \neq 1$, 其各个反射峰会偏离光栅段的反射极大位置,

因此多 π 取样光栅的旁峰反射率相对较低一些, 如图 4 所示。由图 2, 4 对比可见, π 相移取样光栅比多 π 相移光栅具有更低旁峰幅值的双峰滤波特性。

在(8)式中当 π 相移取样光栅的 ± 2 级反射峰中心波长位于光栅段光谱的一级零点时, 其 ± 2 级反射峰幅值为零, 此时 π 相移取样光栅占空比 p 为 0.66; 当 π 相移取样光栅的 ± 3 级反射峰中心波长位于光栅段光谱的二级零点时, 其 ± 3 级反射峰幅值为零, 此时 π 相移取样光栅占空比 p 为 0.8。占空比分别为 0.8, 0.66 的取样光栅的反射谱及光栅段的反射光谱分别如图 6 虚线、实线及粗线所示。从反射光谱中可以看出, 当取样光栅的占空比为 0.8 时, ± 3 级反射峰为零, 但其 ± 2 级反射峰较高, 如图 6 中虚线所示。当取样光栅的占空比为 0.66 时, ± 2 级反射峰为零, 但其 ± 3 级反射峰较高, 如图 6 中实线所示。取样光栅的占空比为 0.8 和 0.66 时, 未被压制为零的取样光栅的旁峰距离光栅段的旁峰极大值较近而处于较高反射率水平, 所以占空比为 0.8 和 0.66 的取样光栅其反射旁峰幅度整体上没有达到最优。

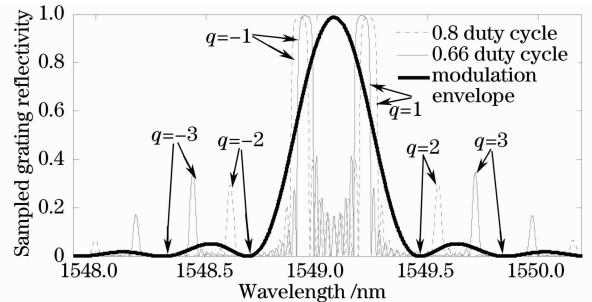


图 6 占空比为 0.8 和 0.66 的 π 相移取样光栅的反射谱
Fig. 6 Reflective spectra of π phase shift sampled grating with duty cycle of 0.8 and 0.66

在 0.66~0.8 之间调整 π 相移取样光栅占空比, 使其 ± 2 和 ± 3 级旁峰尽可能向与光栅段一级旁峰相邻的两个零点靠近, 使它们的幅值降到最低。在模拟计算中针对不同占空比的 π 相移取样光栅的

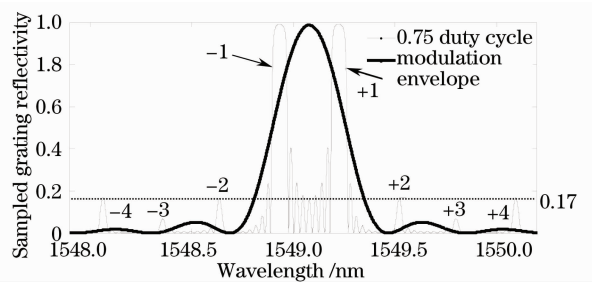


图 7 占空比为 0.75 的 π 相移取样光栅的反射谱
Fig. 7 Reflective spectra of π phase shift sampled grating with duty cycle of 0.75

反射光谱进行比较,发现当 π 相移取样光栅占空比为 0.75 时其反射光谱中不仅 ± 2 和 ± 3 级旁峰幅值均处于较低值,而且所有旁峰反射率在给定参数下不高于 0.17,其反射光谱见图 7。

4 结 论

通过对 π 相移取样光栅与多 π 相移光栅及具有不同占空比 π 相移取样光栅的模拟研究,发现多 π 相移光栅及 π 相移取样光栅均具有双峰滤波特性,并且 π 相移取样光栅比多 π 相移光栅具有更好的双峰滤波特性,其反射频谱的旁峰幅度相比多 π 相移光栅低得多。滤波器的旁峰不能完全滤除噪声而影响主峰信道的信号质量,占空比为 0.66~0.8 的 π 相移取样光栅具有较低幅值的旁峰。尤其是占空比为 0.75 时得到了双波长间隔为 0.29 nm 反射旁峰幅度整体最优的双峰频谱,旁峰反射率低于 0.17。

该种取样光栅滤波特性不仅受到光栅本身参数影响,而且取样光栅的结构参数也会对滤波特性有影响,比如双峰间隔由取样周期决定;滤波带宽由取样长度、取样周期及取样周期数决定;主峰与旁峰幅值的比值由取样周期及占空比共同决定,因而其滤波特性均可通过控制设计参量而加以调整,所以其设计较为灵活,因而使其在光通信的双峰滤波器件中有广阔的应用潜力。

参 考 文 献

- Chen Jianjun, Xia Guangqiong, Tian Jianfeng *et al.*. An approach to improve switch performance of $\lambda/4$ phase-shifted grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1250~1254
陈建军, 夏光琼, 田剑锋 等. 一种提高 $\lambda/4$ 相移光纤光栅开关性能的方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1250~1254
- Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1675~1680
鲁韶华, 许 鸥, 冯素春 等. 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1675~1680
- M. J. Guy, J. R. Taylor, R. Kashyap. Single-frequency erbium fibre ring laser with intracavity phase-shifted fibre Bragg grating narrowband filter [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31** (22): 1924~1925
- Bi Weihong, Wu Guoqing. Theoretical analysis of Bragg wave length demodulation based on phase-shift fiber grating [J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(2): 140~143
毕卫红, 吴国庆. 基于相移光纤光栅的布拉格波长解调原理的分析[J]. 应用光学, 2006, **27**(2): 140~143
- C. H. Wang, J. Azana, L. R. Chen. Efficient technique for increasing the channel density in multiwavelength sampled fiber Bragg grating filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1867~1869
- Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All-fiber interleaved filter using Mach-Zehnder-based sampled fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 243~246

- 蔡海文, 黄 锐, 翟荣辉 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. 中国激光, 2003, **30**(3): 243~246
- J. L. Yang, S. C. Tjin, N. Q. Ngo. Multiwavelength tunable fiber ring laser based on sampled chirp fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1026~1028
- Chen Peng, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Double band en/decoder based on super structured fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1124~1128
陈 鹏, 王 荣, 蒲 涛 等. 基于超结构光纤光栅双边带编/解码器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1124~1128
- Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 77~81
陈小刚, 黄德修, 元秀华 等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 77~81
- Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gbit/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment based on equivalent phase shift super structured fiber Bragg grating 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 Gbit/s 60 km 光码分多址传输实验[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 418~421
- J. Sun, Y. Dai, Y. Zhang *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on unequalized phase shifts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18** (23): 2493~2495
- S. Pradhan, G. E. Town, K. J. Grant. Dual-wavelength DBR fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18** (16): 1741~1743
- D. Chen, H. Fu, W. Liu *et al.*. Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fibre laser based on fibre Bragg grating pair and its application in microwave signal generation[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(7): 459~461
- Wang Yan, Ye Zhiqing. Reflective spectral character of a multiple quarter-wave phase-shifts UV-written fiber Bragg grating and its applications [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(7): 679~681
王 燕, 叶志清. 多个 $\lambda/4$ 相移紫外写入光栅的反射谱特性及应用[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(7): 679~681
- X. M. Liu, Y. K. Gong, L. R. Wang, *et al.*. Identical dual-wavelength fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2706~2710
- X. M. Liu. Tunable ultranarrow dual-channel filter based on sampled FBGs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26** (13): 1885~1890
- X. M. Liu. A dual-wavelength sampled fiber Bragg grating and its application in L-band dual-wavelength erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18** (20): 2114~2116
- X. M. Liu. A novel dual-wavelength DFB fiber laser based on symmetrical FBG structure[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 632~634
- X. M. Liu, A. X. Lin, G. Y. Sun *et al.*. Comparisons of two dual-bandpass sampled fiber Bragg gratings [C]. *OECC/ACOFT08*, 2008, 1-2
- G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6** (8): 839~841
- T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15** (8): 1277~1294
- Yu Huaqing, Jiang Xiangdong. Comparison study on phase-shifted fiber grating's analysis method [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(5): 352~353
余华清, 姜向东. 相移光纤光栅分析方法的比较研究[J]. 激光与红外, 2005, **35**(5): 352~355