

复合调制长周期光栅耦合器的研究

董小伟 江微微 范林勇 赵瑞峰 盛晓娟

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 从麦克斯韦方程出发, 推导了长周期光栅耦合器在折射率、增益、损耗复合调制下完整的耦合理论模型。在此基础上, 详细分析了该复合调制长周期光栅耦合器直通与交叉臂间的功率耦合和多波长滤波特性。结果表明, 当增益/损耗调制与折射率调制作用相等时, 复合调制长周期光栅耦合器具有单向非互易的功率耦合特性, 而且随着多波长复用信号输入光纤和输入方向的不同, 具有不同的上下话路滤波特性。在增益调制作用下, 满足相位匹配条件的信号不仅可有效地耦合到交叉臂下话路输出, 还能得到明显的放大; 但当损耗调制时, 直通与交叉臂中的信号功率均保持各自的初值, 而且不再具备波长选择滤波能力。

关键词 光纤光栅; 长周期光栅耦合器; 复合调制; 单向; 非互易; 上下话路滤波器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0505012

Study on Complex-Modulated Long-Period-Grating-Coupler

Dong Xiaowei Jiang Weiwei Fan Linyong Zhao Ruifeng Sheng Xiaojuan

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The unified coupled-mode theory for long-period-grating-coupler is obtained by deriving directly from Maxwell's equation when all the modulation effects of refractive-index, gain and loss are considered. Then, the characteristics of power coupling and signal filtering between the straight-arm and cross-arm of complex-modulated long-period-grating-coupler are investigated thoroughly. The results demonstrate that monodirectional nonreciprocal power coupling is shown when gain/loss is equal with refractive-index modulation. In addition, the complex-modulated long-period-grating-coupler shows different add/drop filtering characteristics if the multiplexed signals are injected from different fibers or directions. For the gain modulation, the phase-matched signal is coupled into the cross-arm and is amplified simultaneously. But for the loss modulation, the signals in straight-arm and cross-arm remain their respective original input power, and can not be filtered according to their wavelengths any more.

Key words fiber grating; long-period-grating-coupler; complex-modulated; monodirectional; nonreciprocal; add/drop filter

OCIS codes 060.2340; 060.1810; 060.3735

1 引言

具有波长选择能力的信道上下话路滤波器是波分复用系统的关键器件之一, 也是降低成本、推广光纤到户光网络的突破口^[1]。通过将光栅写入光纤耦合器的耦合区形成的新型上下话路滤波器, 结合了光栅优良的波长选择能力和耦合器的多端口特性, 正引起光纤通信和光纤传感领域研究人员的广泛关注^[2]。由于布拉格光栅工作于反射模式, 由布拉格光栅构成的布拉格光栅耦合器需要对结构和参数进行精密设计, 才能有效抑制背向回波, 避免对光源造

成干扰和损伤^[3,4]。

与布拉格光栅反射本质不同, 调制周期为几百微米的长周期光栅(LPG)具有带阻式的透射滤波效果, 因此基于长周期光栅耦合器的上下话路滤波器可以完全消除背向回波干扰, 具有插入损耗低、制作简单、成本低廉的优点, 更适合未来全光网和光接入网发展的需要^[5]。

目前对长周期光栅耦合器的研究大多假设光栅为理想的周期性折射率调制, 未考虑在光栅写入区存在增益或损耗的情况^[6]。然而根据以往对光栅耦

收稿日期: 2010-10-11; 收到修改稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61007007)和中央高校基础科研业务费专项基金(2011JBM014)资助课题。

作者简介: 董小伟(1978—), 女, 副教授, 主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: way7803@163.com

合器的理论分析和研制经验发现,增益/损耗效应对长周期光栅耦合器的工作特性具有重要影响^[7]。因此,本文在折射率调制的基础上,进一步研究增益/损耗的作用机理,构建了包含折射率、增益、损耗复合调制的完整耦合理论模型,并利用推导出的通用解析解对其工作方式进行详细的分析和讨论。

2 理论分析

在失配耦合器的一个纤芯中写入周期为几百微米的长周期光栅构成长周期光栅耦合器,其通用结构如图1所示。由于长周期光栅对失配耦合器的调

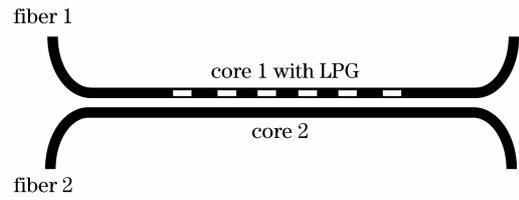


图 1 长周期光栅耦合器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of long-period-grating-coupler
制作用只能使同向传输的模式间满足相位匹配,实现有效的功率转换,而反向模式间的耦合作用可忽略,因此在弱导和弱耦合近似条件下,耦合区中的电/磁场可近似表示为单个光纤中基模场的线性叠加^[8,9]

$$E(x, y, z, t) = c_1(z) \exp(-j\beta_1 z) E_1(x, y) \exp(-j\omega t) + c_2(z) \exp(-j\beta_2 z) E_2(x, y) \exp(-j\omega t), \quad (1)$$

$$H(x, y, z, t) = c_1(z) \exp(-j\beta_1 z) H_1(x, y) \exp(-j\omega t) + c_2(z) \exp(-j\beta_2 z) H_2(x, y) \exp(-j\omega t), \quad (2)$$

式中 $c_1(z), c_2(z)$ 分别为光纤 1 和光纤 2 单独存在时各自前向模场的慢变振幅, $E_1(x, y), E_2(x, y), H_1(x, y), H_2(x, y)$ 为相应的横向电 / 磁场分布, β_1, β_2 为传输常数, ω 为光波角频率。

将(1),(2)式代入完整的麦克斯韦方程

$$\nabla \times E = -j\omega \mu H, \quad (3)$$

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon E + j\omega P, \quad (4)$$

在(3),(4)式两侧同时乘以 $E_1(x, y)$,并在无穷大横截面上进行积分,然后利用模场的正交归一化条件

$$\frac{1}{2} \oint_{\infty} E_v \times H_u^* dS = \delta_{v,u}, \quad \frac{1}{2} \oint_{\infty} E_v^* \times H_u dS = \delta_{v,u}, \quad (5)$$

式中 $\delta_{v,u}$ 为克朗耐克尔函数,即两下标相同时为 1,否则为 0。这样,前向模场的振幅变化可表示为

$$c'_u = -j\omega \oint_{\infty} P \cdot E_u^* \exp(j\beta_u z) dS, \quad (u = 1, 2) \quad (6)$$

式中 $P(x, y, z, t) = \Delta \epsilon \cdot E(x, y, z, t) = 2\epsilon_0 n \Delta n E(x, y, z, t)$ 为外部激励扰动引起的极化强度, ϵ_0 为真空中的介电常数。虽然目前大多数光栅都是以周期性折射率调制为基础,但实际上,利用外部应力或注入抽运的方式也可在长周期光栅中引入周期性的损耗或增益^[10],因此为全面研究长周期光栅耦合器的性能,在下面的分析中假设长周期光栅为复合调制,即不仅包含折射率变化引入的实调制,还包含增益 / 损耗扰动引入的虚调制,此时 Δn 可表示为^[11]

$$\Delta n = \Delta n_r \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) - j\Delta n_i \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Delta\varphi\right), \quad (7)$$

式中 $\Delta n_r, \Delta n_i$ 分别为光栅扰动的实部(折射率调制)和虚部(增益: $\Delta n_i > 0$; 损耗: $\Delta n_i < 0$), Λ 为光栅的周期常数, $\Delta\varphi$ 为实部与虚部间的相位差。

将(7)式代入(6)式,并且定义 $K_{v,u}^r$ 和 $K_{v,u}^i$

$$K_{v,u}^r = \frac{\omega}{4} \oint_{\infty} \left[2\epsilon_0 n \Delta n_r \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] \cdot E_v E_u^* dS = 2k_n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right), \quad (8)$$

$$K_{v,u}^i = \frac{\omega}{4} \oint_{\infty} \left[2\epsilon_0 n \Delta n_i \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Delta\varphi\right) \right] \cdot E_v E_u^* dS = 2k_a \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Delta\varphi\right), \quad (9)$$

式中 k_n, k_a 分别为折射率调制引起的实耦合系数和增益 / 损耗调制引起的虚耦合系数;这样,复合调制长周期光栅耦合器的耦合方程可表示为

$$\frac{dc_1}{dz} = -j \left[2k_n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) - j2k_a \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Delta\varphi\right) \right] c_2 \exp(j\Delta\beta z), \quad (10)$$

$$\frac{dc_2}{dz} = -j \left[2k_n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) - j2k_a \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \Delta\varphi\right) \right] c_1 \exp(-j\Delta\beta z). \quad (11)$$

由于迅变分量积分的平均效果为 0, 可忽略, 因此耦合方程可进一步简化为

$$\frac{dc_1}{dz} = -j \left\{ k_n - k_a \exp \left[j \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right) \right] \right\} \cdot c_2 \exp(-j2\delta z), \quad (12)$$

$$\frac{dc_2}{dz} = -j \left\{ k_n + k_a \exp \left[j \left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} \cdot c_1 \exp(j2\delta z), \quad (13)$$

式中 $\delta = \frac{\pi}{\Lambda} - \frac{\Delta\beta}{2}$ 为相位失谐因子, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 为两光纤传输常数间的失配。

对(12)式再次微分, 然后利用(13)式消去 dc_2/dz 和 c_2 项, 得到关于 c_1 的二次微分方程为

$$\frac{d^2 c_1}{dz^2} + j2\delta \cdot \frac{dc_1}{dz} + \left\{ k_n - k_a \exp \left[j \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right) \right] \right\} \cdot \left\{ k_n + k_a \exp \left[j \left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} = 0. \quad (14)$$

经过复杂的运算, 从(14)式可获得 c_1 的解析解为

$$c_1(z) = \left[\cos(\gamma z) + j \frac{\delta}{\gamma} \sin(\gamma z) \right] \exp(-j\delta z) c_1(0) - j \left\{ \frac{k_n - k_a \exp \left[j \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right) \right]}{\gamma} \sin(\gamma z) \right\} \exp(-j\delta z) c_2(0), \quad (15)$$

同理可获得 c_2 的解析解为

$$c_2(z) = -j \left\{ \frac{k_n + k_a \exp \left[j \left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \right]}{\gamma} \sin(\gamma z) \right\} \exp(j\delta z) c_1(0) + \left[\cos(\gamma z) - j \frac{\delta}{\gamma} \sin(\gamma z) \right] \exp(j\delta z) c_2(0), \quad (16)$$

式中 $c_1(0), c_2(0)$ 为初始输入条件, $\gamma = \sqrt{\delta^2 + k_n^2 - k_a^2}$ 。

3 计算和讨论

为验证理论模型和所推导出的解析解的正确性, 首先假设 $k_a = 0$, 即只存在周期性折射率调制, 此时如果多波长复用光信号从光纤 1 输入, 即 $c_1(0) = 1, c_2(0) = 0$, 根据(15), (16)式, 在作用长度为 $L = \frac{\pi}{2k_n}$ 的奇数倍处, 在长周期光栅折射率调制作用下将形成比失配耦合器更有效的功率耦合,

满足相位匹配条件的波长信号(由 $\delta(\lambda_0) = \pi/\Lambda - [\beta_1(\lambda_0) - \beta_2(\lambda_0)]/2 \approx 0$ 确定)将完全耦合到交叉臂下话路输出(见图 2), 这与目前报道的只考虑折射率调制的普通长周期光栅耦合器的结果相一致^[12]。

当光栅调制为复数, 即折射率调制与增益/损耗调制同时存在时, 需要使用(15), (16)式的完整形式。首先分析相位差 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时, 调制比 k_a/k_n 对功率耦合过程的影响。图 3 给出了在不同调制比下,

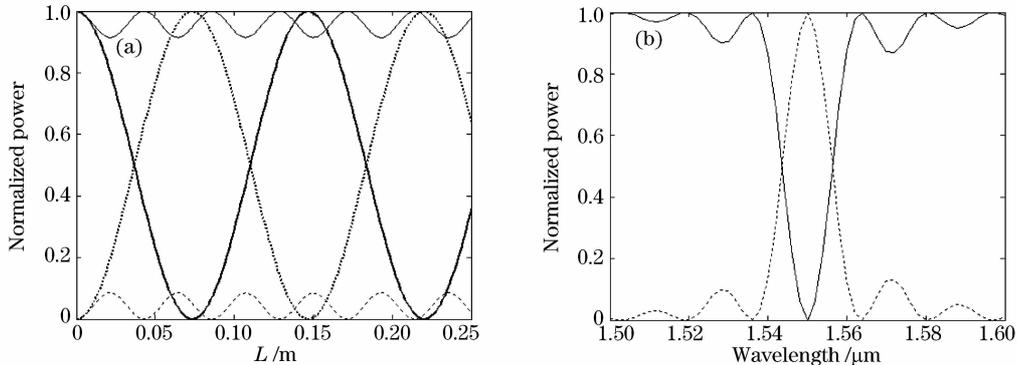


图 2 (a) 失配耦合器(细线)和长周期光栅耦合器(粗线)直通(实线)与交叉臂(点线)间的功率耦合, (b) 在最小耦合长度时, 直通和交叉臂的光谱响应

Fig. 2 (a) Power coupling between straight-arm (solid line) and cross-arm (dotted line) for mismatched-coupler (thin line) and long-period-grating-coupler (thick line), (b) spectral responses in straight-arm and cross-arm at the shortest coupling-length

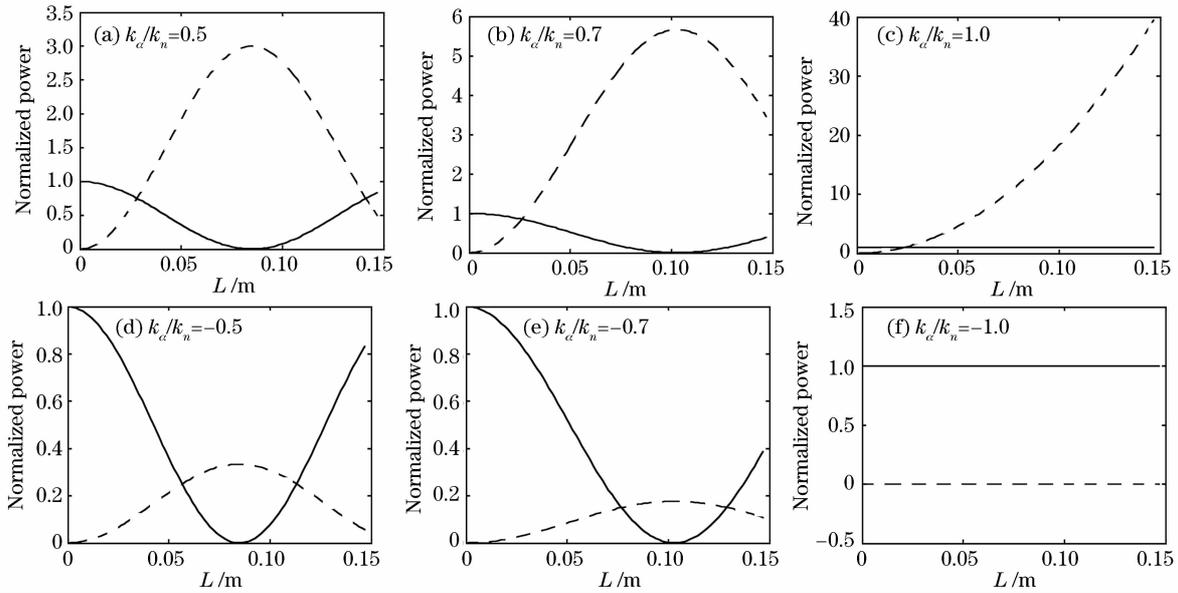


图3 不同调制比时,信号随作用长度在两光纤间的功率转换。实线:直通臂,点线:交叉臂
 Fig.3 Signal power transferring between the two fibers for different modulation ratios
 solid: straight-arm, dotted: cross-arm

相位匹配波长处的信号随作用长度在两光纤间的功率耦合。从图可见,虚部调制的正(增益)负(损耗)不会改变功率耦合的互易性,即当调制比 $|k_c/k_n|$ 一定时,信号功率在初始输入光纤降为 0 的长度(以下将其称之为耦合长度)不变;但是,随着 $|k_c/k_n|$ 幅度的增加,耦合长度不断增长,当 $k_c/k_n = \pm 1$ 时,两光纤间功率耦合的互易性被打破,表现为信号功率不再随作用长度而相互转换;当 $k_c/k_n = -1$ 时,两光纤中的信号功率均保持各自的初值;当 $k_c/k_n = 1$ 时,尽管初始输入光纤中的信号功率不变,但在增益调制的作用下,交叉臂的信号功率却随作用长度不断增加。图 4 给出了作用长度 $L = \frac{\pi}{2k_n}$ (对应于上面只考虑折射率调制的普通长周期光栅耦合器的最小耦合长度)时,直通和交叉臂输出功率随调制比的变化。

为了研究复合调制长周期光栅耦合器的滤波特性,图 5 给出了正向调制比为 $k_c/k_n = 1$ 时,直通和交叉臂的输出光谱响应。随着输入光纤和输入方向的不同,器件具有不同的滤波特性。当光纤 1 正向输入或光纤 2 反向输入时[见图 5(a)],在增益调制的作用下,满足相位匹配条件的信号不仅有效地耦合到交叉臂下话路输出,还得到了明显的放大,这与文献[13]所报道的实验结果相一致,而且直通臂的输出响应与波长无关,即器件在实现下话路滤波的同时,不会对通路信号的传输产生干扰。但是,增

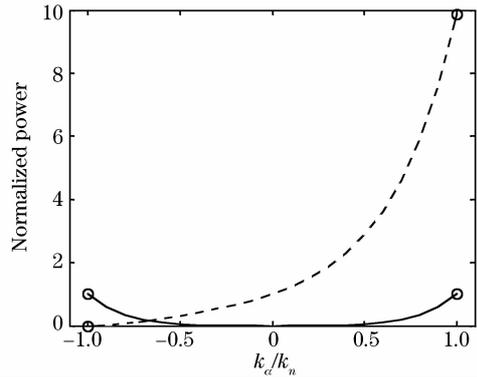


图 4 长度 $L = \frac{\pi}{2k_n}$ 时,直通(实线)和交叉臂(点线)输出功率随调制比的变化

Fig.4 Variation of output power with the modulation ratios for the device length $L = \frac{\pi}{2k_n}$

益/损耗调制具有方向依赖性,正向增益将在反方向表现为损耗效应,此时由于损耗调制与折射率调制的幅度相等,它们对耦合过程的影响相互抵消,这样当光纤 1 反向输入或光纤 2 正向输入[见图 5(b)]时,直通和交叉臂的输出均与波长无关,即器件只将信号透射但不再具备波长选择能力。

4 结 论

详细分析了长周期光栅耦合器在折射率、增益、损耗复合调制下的工作机理,提出一种新型复合调制长周期光栅耦合器。研究发现,在增益调制的作

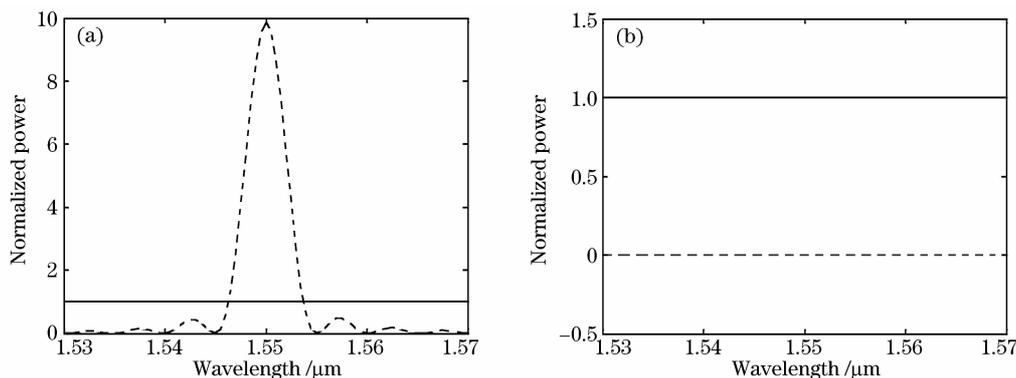


图5 正向调制比 $k_a/k_n = 1$ 时,直通(实线)和交叉臂(点线)的输出光谱响应

(a) 光纤1正向输入或光纤2反向输入,(b) 光纤1反向输入或光纤2正向输入

Fig.5 Spectral responses in straight-arm (solid) and cross-arm (dotted) when the positive-direction modulation ratio $k_a/k_n = 1$. (a) positive-direction input into fiber 1 or negative-direction input into fiber 2, (b) negative-direction input into fiber 1 or positive-direction input into fiber 2

用下,满足相位匹配条件的信号不仅可有效地耦合到交叉臂下话路输出,还能得到明显的放大;但在损耗调制作用下,直通与交叉臂中的信号功率均保持各自的初值,而且不再具备波长选择滤波能力。复合调制长周期光栅耦合器的这种单方向非互易特性对于实现信号监控、无损耦合和双向通信等将非常有利。

参 考 文 献

- Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Analysis of fiber grating filters written in fiber coupler by employing the unified coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 644~649
江微微,李 坚,赵瑞峰等. 用统一耦合模理论分析光纤光栅耦合器型滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 644~649
- Fan Linyong, Li Jian, Jiang Weiwei *et al.*. Experimental fabrication of Bragg grating-assisted mismatched coupler for add/drop filters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3):030603
范林勇,李 坚,江微微等. 光纤布拉格光栅辅助失配耦合器型上下话路滤波器的实验制作[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(3):030603
- Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Wei Yan *et al.*. Spectral characteristics of Bragg fiber grating based on fused taper fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10):2565~2569
江微微,赵瑞峰,卫 延等. 基于熔融拉锥光纤布拉格光栅的光谱特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10):2565~2569
- Yang Huayong, Jiang Nuan, Zhang Xueliang *et al.*. Study on fabrication and optical add-drop multiplexing experiments with panda fiber grating coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1430~1433
杨华勇,姜 暖,张学亮等. 熊猫型保偏光纤光栅耦合器制备工
- 艺及光分插复用实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6):1430~1433
- Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- Zheng Jingjing, Ning Tigang, Jian Shuisheng. Theoretical analysis of dual core fiber long period grating based on supermode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5):1275~1279
郑晶晶,宁提纲,简水生. 基于超模的双芯光纤长周期光栅理论分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5):1275~1279
- Dong Xiaowei, Feng Suchun, Lu Shaohua. Add-drop channel filter based on two parallel long-period grating coupler [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12):7039~7045
董小伟,冯素春,鲁韶华. 两平行长周期光栅耦合器型上下话路滤波器的研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12):7039~7045
- Honglin An, Brian Ashton, Simon Fleming. Long-period-grating-assisted optical add-drop filter based on mismatched twin-core photosensitive-cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 343~345
- Allan W. Snyder, Adrian Ankiewicz. Optical fiber couplers-optimum solution for unequal cores [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(3):463~474
- Joshua D. Schwartz, Mykola Kulishov, V. Grubsky *et al.*. Experimental demonstration of loss as a tuning mechanism in long-period gratings [C]. ECOC, 2004:We4P040
- Mykola Kulishov, Jacques M. Laniel, Nicolas Belanger *et al.*. Nonreciprocal waveguide Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2005, **12**(8):3068~3078
- She-Won Ahn, Sang-Yung Shin. Grating-assisted codirectional coupler filter using electro-optic and passive polymer waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**(4):289~293
- Mykola Kulishov, Xavier Daxhelet, Victor Grubsky *et al.*. Distinctive behavior of long-period gratings in amplifying waveguides [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005:OTuB7