

文章编号: 0253-2239(2005)11-1549-5

# 波导侧壁起伏对聚酰亚胺波导光学梳状滤波器串扰特性的影响及其改善方法\*

高仁喜<sup>1</sup> 陈抱雪<sup>1</sup> 陈 林<sup>1</sup> 袁一方<sup>1</sup> 矶 守<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学光电学院, 上海 200093  
<sup>2</sup> 日本东京农工大学工学部应用化学系, 日本 184-8588)

**摘要:** 提出了一种结构模型来分析由工艺引起的波导侧壁起伏对于聚合物波导光学梳状滤波器的滤波特性的影响。含氟聚酰亚胺高分子聚合物制备多级马赫-曾德尔串联型光学梳状滤波器件的工作参量为中心波长 1550 nm, 波长间隔为 0.8 nm, 40 通道的波长交错分离。模拟计算表明, 对由高分子聚合物材料制备的多级马赫-曾德尔串联型光学梳状滤波器件, 其主要影响是增大了信道之间的串扰, 中心波长 1550 nm 处的信道串扰由理想情况下的 -40 dB 降为 -12 dB, 极大地影响了器件的性能。在此基础上, 提出一种改善光学梳状滤波器串扰性能的新结构, 该结构由多级马赫-曾德尔耦合器和微环共振滤波器串接构成, 40 个通道的串扰改善为 -30 dB 以下。

**关键词:** 光学梳状滤波器; 聚合物光波导; 微环共振滤波器; 串扰

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Crosstalk Caused by Fabrication Errors about Polyimide Waveguide Interleaver and its Improvement

Gao Renxi<sup>1</sup> Chen Baoxue<sup>1</sup> Chen Lin<sup>1</sup> Yuan Yifang<sup>1</sup> Mamoru Iso<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093  
<sup>2</sup> Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan)

**Abstract:** A simple model to analyse the influence of the random change of waveguide width caused by fabrication error on the spectral character of fluorinated polyimide Mach-Zehnder (M-Z) waveguide interleaver is presented in this paper. The working parameters of fluorinated polyimide Mach-Zehnder waveguide interleaver are the central wavelength of 1550 nm, wavelength interval of 0.8 nm, and 40 channels. The simulation calculation indicates that the main influence is the increase of the crosstalk among channels, the crosstalk of the central wavelength of 1550 nm is decreased from -40 dB to -12 dB. Based on this result, we propose a new structure to improve the crosstalk performance of the device by cascaded micro-ring resonator filters, and then the crosstalk of 40 channels was decreased to less than -30 dB.

**Key words:** optics interleaver; polyimide waveguides; micro-ring resonator filter; crosstalk

## 1 引 言

光学梳状滤波器件 (Interleaver) 由于能更灵活地使光通信网络升级扩容, 同时可缓解对阵我波导光栅 (AWG) 器件性能的要求, 一直受到很大的关注<sup>[1~7]</sup>。其中波导型光学梳状滤波器适于集成、可

批量生产, 是研究的热点<sup>[8,9]</sup>。多级马赫-曾德尔 (M-Z) 串联型光学梳状滤波器已有不少报道<sup>[10,11]</sup>, 其性能与耦合区的耦合比、相位差控制等因素有密切关系。与此关联的误差分析和改善工作已有报道<sup>[12,13]</sup>。采用高分子聚合物制备波导型光学梳状

\* 国家自然科学基金(60177017)资助课题。

作者简介: 高仁喜(1977~), 男, 山东临沂人, 上海理工大学光电学院博士研究生, 主要从事集成光学和光波导器件方面的研究。E-mail: gao\_renxi@sohu.com

收稿日期: 2004-12-24; 收到修改稿日期: 2005-05-23

滤波器还有折射率各向异性的问题,通过调节材料的配比可以解决<sup>[14]</sup>。采用干法蚀刻制作的高分子波导还存在着波导侧壁不光滑的问题,这种侧壁起伏对梳状滤波器中的定向耦合结构带来了随机的干扰,结果导致梳状滤波隔离度劣化。为此,我们参照实验数据,以  $0.1 \mu\text{m}$  为基本变动量,采用计算机随机生成的方法模拟了分布耦合区波导侧壁的起伏,分析了侧壁误差对器件特性的影响。在此基础上,提出了一个新的改进结构,通过串接波导微环共振滤波器<sup>[15]</sup>,改善了滤波特性,40 通道的光谱串扰达到了  $-30 \text{ dB}$  左右。

## 2 波导侧壁起伏对光学梳状滤波器器件特性劣化的分析

实际工艺中,波导回路采用反应离子蚀刻制备,波导侧壁很难达到理想光滑状态,图 1 给出了反应离子蚀刻后波导侧壁的扫描电镜照片,实验结果总是伴有侧壁的随机起伏,典型值为  $0.1 \mu\text{m}$  左右<sup>[16]</sup>。这类侧壁起伏对器件特性的影响主要有两个方面,一个是激励辐射模导致散射增大,试制的样品在通信段波长上的传输损耗约为  $0.3 \text{ dB/cm}$ <sup>[17]</sup>。另一个是引起导模传播常量的起伏,特别是在定向耦合器的分布耦合区域,这种起伏导致耦合系数发生局域变动,结果使器件的梳状滤波隔离度劣化。另外,数值仿真显示波导侧壁起伏对光学梳状滤波器的带宽影响不明显。从器件的特性要求来看, $0.3 \text{ dB/cm}$  的传输损耗不构成使用上的障碍,隔离度劣化是必须解决的重要技术问题。目前针对由波导侧壁随机起伏引起的定向耦合器耦合系数起伏变动的问题,除了提高制备技术水平以外,提出其它具有普适性的解决方案是困难的。针对特定的器件采用特定的补偿手段来改善不失为

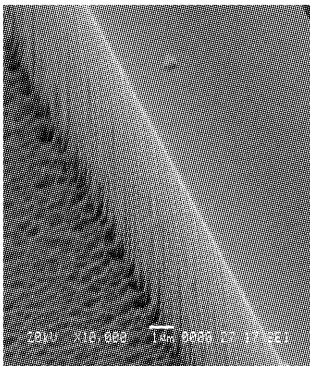


图 1 反应离子蚀刻后波导侧壁的扫描电镜照片  
Fig. 1 SEM photograph of waveguide sidewall after reactive ions etching

一种比较现实的方法。

多级马赫-曾德尔型波导光学梳状滤波器的结构如图 2 所示,它由四个方向耦合器和三个相位延迟部分构成, $L_1, L_2, L_3, L_4$  为四个方向耦合器的长度, $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$  为相位调整区两波导臂的长度差。

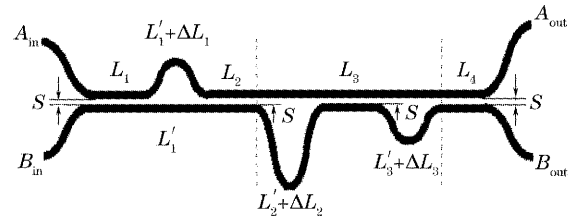


图 2 多级马赫-曾德尔串联型光学梳状滤波器结构  
Fig. 2 Structure of multiple Mach-Zehnder cascaded waveguide interleaver

设波导 1 和波导 2 的输入光振幅分别为  $A_{in}$  和  $B_{in}$ , 输出光振幅  $A_{out}$  和  $B_{out}$  由下式给出:

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{c4} \mathbf{T}_3 \mathbf{T}_{c3} \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_{c2} \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_{c1} \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,相位传递矩阵可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_1 \cdot \Delta L_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{T}_{2,3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_2 \cdot \Delta L_{2,3}) \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

定向耦合器传递矩阵为

$$\mathbf{T}_{ci} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -j \sin \phi_i \\ -j \sin \phi_i & \cos \phi_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别是波导 1 和波导 2 导模的传播常量,  $\phi_i = \chi_i L_i (i=1, 2, 3, 4)$ ,  $\chi_i$  是第  $i$  个定向耦合器的耦合系数,是波导结构参量和波长的函数。器件输出功率的交叉耦合比  $\eta_c$  和平行耦合比  $\eta_r$  分别为

$$\begin{cases} \eta_c = |A_{out}|^2 / (|A_{out}|^2 + |B_{out}|^2), \\ \eta_r = 1 - \eta_c, \end{cases} \quad (4) \quad (5)$$

显然,器件的光谱特性由  $\mathbf{T}_{ci}$  和  $\mathbf{T}_i$  决定。图 3 给出了理想情况下氟化聚酰亚胺高分子波导 40 通道光学梳状滤波器的设计结果,中心波长为  $1550 \text{ nm}$ , 波长间隔为  $0.8 \text{ nm}$ ,  $1 \text{ dB}$  带宽为  $0.5 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ dB}$  带宽为  $0.8 \text{ nm}$ , 光谱串扰为  $-40 \text{ dB}$  以下。器件的参量是:  $L_1 = 1.78 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 0.34 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 0.47 \text{ mm}$ ,  $L_4 = 1.96 \text{ mm}$ ,  $\Delta L_1 = 0.68 \mu\text{m}$ ,  $\Delta L_2 = 975.72 \mu\text{m}$ ,  $\Delta L_3 = 0.68 \mu\text{m}$ 。

采用反应离子蚀刻技术制备的波导,其侧壁并不是理想光滑的,粗糙侧壁的尺寸起伏典型值  $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 。对  $\mathbf{T}_i$  的影响表现为相位延迟的变动,通常采用外部补偿措施来修正,例如已报道了热光效

应补偿等方法<sup>[18,19]</sup>。对  $T_{C_i}$  的影响表现为定向耦合器耦合系数的漂移,外部补偿非常困难,目前还没有见到有关报道。如图 1 的扫描电镜照片所示,波导侧壁粗糙起伏的形状虽然在特征上有明显的趋势,但局部是无规则的,难以给出精确的数学描述。出于解析上的方便,这里剔除了精细结构的非规则形状,采用了近似的表述,如图 4 所示。

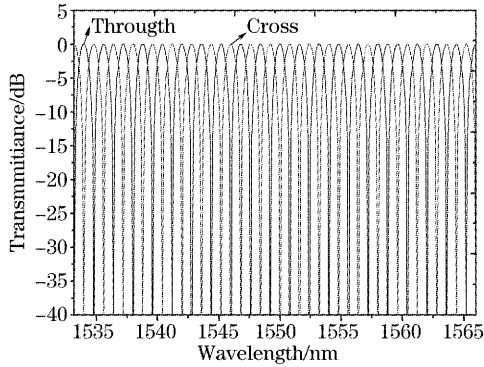


图 3 理想情况下的输出光谱

Fig. 3 Transmission spectra of the interleaver under the ideal conditions

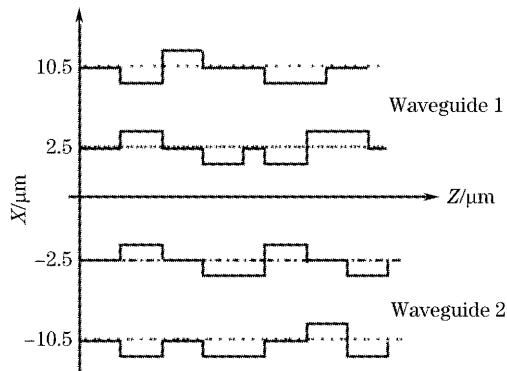


图 4 方向耦合区波导结构的模型

Fig. 4 Model graph of waveguides in the regions of directional coupler

沿波导传输方向以  $\leq 0.1 \mu\text{m}$  的尺度随机生成侧壁起伏的间隔,在波导宽度方向,以  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  随机生成侧壁起伏的幅度。通常定向耦合器的耦合长度是 mm 数量级,远远大于设定的变动尺寸,以  $\leq 0.1 \mu\text{m}$  为单位的随机起伏遍及整个 mm 量级的耦合区长度,其影响程度可以反映一般问题。由于侧壁起伏,定向耦合器的一对本地偶奇模的传播常量  $\beta_e$  和  $\beta_o$  是传输方向  $Z$  坐标的函数,因此耦合系数

$$\chi = (\beta_e - \beta_o)/2, \quad (6)$$

是  $Z$  的函数。于是有

$$\phi_i = \int_0^{L_i} \chi dz, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

考虑了上述侧壁粗糙因素的器件特性的模拟结果见图 5,计算中涉及的  $\beta_e(z)$  和  $\beta_o(z)$  采用 BPM-3D-Solver 仿真软件在相应的  $z$  坐标上算出,图 5 显示波长通道的串扰显著增加,中心波长处的串扰劣化至  $-12 \text{ dB}$  左右。

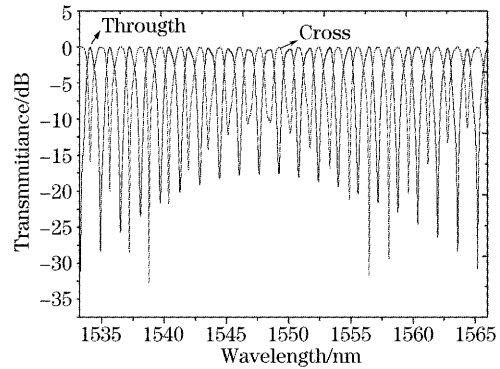


图 5 波导侧壁起伏情况下器件的输出光谱

Fig. 5 Transmission spectra of the interleaver under the condition of the random change of waveguide width

### 3 改进的光学梳状滤波器及原理

为了改善波导侧壁粗糙对器件特性的影响,我们提出一种新的光学梳状滤波器结构,如图 6 所示,该结构在原光学梳状滤波器的两个输出端各串联一个波导微环共振滤波器。微环共振滤波器被设计成具有较高的干涉级,共振锐度  $F$  很大,显示精细的共振线宽。因此适合于在某个波段中以一定的周期、有选择地滤掉一系列串扰波长,从而改善器件特性。

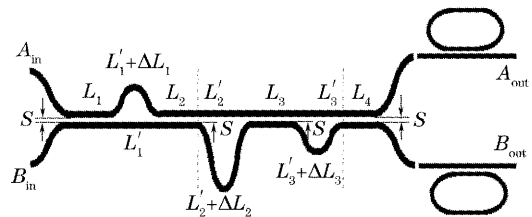


图 6 改进的光学梳状滤波器的结构

Fig. 6 Structure of the improved interleaver

微环共振滤波器的基本结构如图 7(a)所示,由直波导和闭合波导环路构成,单模波导的折射率分布截面如图 7(b)所示,为减小弯曲损耗,根据氟化聚酰亚胺的折射率可调范围,采用  $n_1 = 1.5665$ ,  $n_2 = 1.5197$ ,  $n_0 = 1$  (波长 = 1550 nm) 的强限制型波导结构。环路波导的环半径为  $100 \mu\text{m}$ ,  $90^\circ$  弯曲损耗为  $0.4 \text{ dB}$ 。在耦合区,波导采用图 7(c)所示结构,采用这种结构主要出于两点考虑,一是这种结构

可有效降低波导的限光能力,明显提高耦合效率,例如设结构参量为  $w=3\ \mu\text{m}$ ,  $H=3\ \mu\text{m}$ ,  $S=1.5\ \mu\text{m}$ , 当  $h$  取值为  $3\ \mu\text{m}$  时, BPM 仿真表明, 两波导显示强限制特性, 彼此之间的耦合被切断, 当  $h$  取值为  $1.5$

$\mu\text{m}$  时, 产生明显的交叉耦合。利用这个特性, 在耦合区取  $h=1.5\ \mu\text{m}$ , 其它区域  $h=3\ \mu\text{m}$ 。这种结构的优点是耦合长度可以得到精确控制。工艺上可采用两次套刻完成。

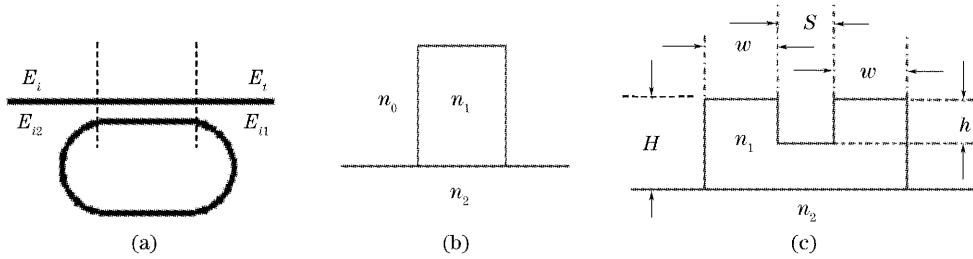


图 7 (a) 单环滤波器的结构图, (b) 构成微环滤波器的单根波导结构图, (c) 单环滤波器耦合区的波导结构示意图  
Fig. 7 (a) Prototypical optical filter comprising waveguides side-coupled to micro-ring resonator, (b) the structure of single channel waveguide, (c) the structure of waveguide in the coupled region of micro-ring filter

图 7 所示共振滤波器的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} E_t \\ E_{r1} \end{bmatrix} = (1-r)^{1/2} \begin{bmatrix} \cos \phi & -j \sin \phi \\ -j \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ E_{r2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$E_{r2} = E_{r1} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L - j\beta L\right), \quad (9)$$

式中  $E_i$  为微环共振滤波器中直波导的输入光振幅,  $E_t$  为微环共振滤波器中直波导的输出光振幅,  $E_{r1}$ 、 $E_{r2}$  分别为闭合微环波导在耦合区的输出和输入光振幅,  $r$  为耦合损耗系数,  $\alpha$  为微环波导的传输损耗系数,  $\beta$  为圆环波导的传播常量,  $L_0$  是分布耦合区的长度,  $L$  为微环的周长。  $r$  和  $\alpha$  由 BPM 仿真计算,  $\beta$  由 BPM-3D-Solver 算出。  $\phi$  是一个与分布耦合区域的耦合系数  $\chi$  有关的参量,  $\chi$  可套用(6)式计算, 这里同样需考虑耦合区域侧壁起伏的影响, 与微环共振滤波器中定向耦合器对应的一对本地偶奇模的传播常量  $\beta_e$  和  $\beta_o$  是传输方向  $Z$  坐标的函数, 因此(6)式给出的耦合系数是  $Z$  的函数,  $\beta_e(z)$  和  $\beta_o(z)$  采用 BPM-3D-Solver 仿真软件在相应的  $z$  坐标上算出, 随机起伏的数学处理与前述的相同。于是有

$$\phi = \int_0^{L_0} \chi dz, \quad (10)$$

联立求解(8)式和(9)式, 得到微环共振滤波器的输出功率比  $\eta_{\text{Mic}}$ :

$$\eta_{\text{Mic}} = |E_t|^2 / |E_i|^2 = (1-r) \left[ 1 - \frac{(1-a^2)(1-b^2)}{(1-ab)^2 + 4ab \sin^2(\beta L/2)} \right], \quad (11)$$

式中

$$a = \sqrt{1 - r} \exp(-\alpha L/2), \quad b = \cos \phi, \quad (12)$$

吸收峰的共振条件满足  $\beta L = 2m\pi$  ( $m$  为整数), 适当调节耦合区长度, 使临界耦合条件  $a = b$  成立, 此时

共振锐度最大, 滤波效果最佳。显然, 为了改善前级滤波器的波长串扰, 设计关键是使微环共振滤波器的自由光谱区与对应输出通道的遏制波长的周期匹配。这里, 对 A 通道造成串扰的光波的中心波长为  $1550.8\ \text{nm}$ , 周期为  $1.6\ \text{nm}$ , 对应将串接 A 通道的微环共振滤波器设计为中心波长为  $1550.8\ \text{nm}$ , 自由光谱区为  $1.6\ \text{nm}$ ; 同理对 B 通道, 将串接的微环共振滤波器设计为中心波长为  $1550\ \text{nm}$ , 自由光谱区为  $1.6\ \text{nm}$ 。通过滤除各通道中的串扰光, 达到改善器件特性的目的。为此, A 通道和 B 通道的微环共振滤波器被设计成不同的闭合微环周长, 同时要注意滤波周期在使用波长范围内的漂移, 具体数据在下节讨论。

### 4 数值结果

图 6 所示光学梳状滤波器结构是由多级马赫-曾德尔方向耦合器和两个相应的微环共振滤波器串接构成, 波导采用含氟聚酰亚胺材料的参量。多级马

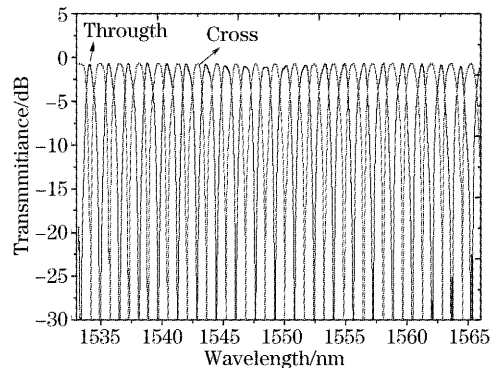


图 8 改进的滤波器器件的输出光谱  
Fig. 8 Transmission spectral of improved interleaver

赫-曾德尔方向耦合器的参量如上所述。微环共振滤波器参量分别为:A通道的微环共振滤波器的闭合微环周长为 $940.2\ \mu\text{m}$ ,耦合区长度为 $153.1\ \mu\text{m}$ ,弯曲波导部分的半径为 $100\ \mu\text{m}$ ;B通道微环共振滤波器的闭合微环周长为 $940.5\ \mu\text{m}$ 耦合区长度为 $153.3\ \mu\text{m}$ ,弯曲波导部分的半径为 $100\ \mu\text{m}$ 。在使用波段 $1534\sim 1566\ \text{nm}$ 内,A通道微环共振滤波器的中心滤波波长为 $1550.8\ \text{nm}$ ,滤波间隔为 $1.592\sim 1.607\ \text{nm}$ ,与理想间隔 $1.6\ \text{nm}$ 的偏差在 $0.008\sim 0.007\ \text{nm}$ ;B通道滤波器的中心滤波波长为 $1550\ \text{nm}$ ,滤波间隔为 $1.592\sim 1.606\ \text{nm}$ ,与 $1.6\ \text{nm}$ 的偏差在 $0.008\sim 0.006\ \text{nm}$ 。数值模拟考虑了耦合区波导侧壁起伏的影响。输出光谱的数值结果示于图8,光谱串扰得到明显的改善,各通道串扰减小到 $-30\ \text{dB}$ 左右。为器件设计和制造提供了有用的分析结果和方案。

## 5 结 论

针对光波导制备过程中,由反应离子蚀刻带来的波导芯侧壁的随机变化问题,提出了一个采用随机生成的模拟结构用以分析波导侧壁随机变化引起的光谱串扰特性的劣化。理论解析表明,对中心波长为 $1550\ \text{nm}$ 的40通道聚合物光学梳状滤波器,串扰变动达 $25\ \text{dB}$ 左右。为此提出了一种解决方案,通过串接两个相应的聚合物波导微环共振滤波器,串扰可改善为 $-30\ \text{dB}$ 。这些工作对制备聚合物光波导光学梳状滤波器有积极的意义。

## 参 考 文 献

- 1 M. Oguma, K. Jinguji, T. Kitoh *et al.*. Flat-passband interleaver filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(9): 1299~1300
- 2 M. Oguma, T. Kitoh, K. Jinguji *et al.*. Passband-width broadening design for WDM filter with lattice-form interleaver filter and arrayed-waveguide gratings [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 328~330
- 3 S. Cao, J. Chen, J. N. Damask *et al.*. Interleaver technology: comparisons and applications requirements[J]. *J. lightwave. Technol.*, 2004, **22**(1): 281~289
- 4 Chao-Hsing Hsieh, RuiBo Wang, Zhiqing JamesWen *et al.*. Flat-top interleavers using two Gires-Tournois etalons as phase-depressive mirrors in a Michelson interferometer [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 242~244
- 5 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optics Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428 (in Chinese)
- 张 娟,刘立人,周 煜 等. 一种新型光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1424~1428
- 6 Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin *et al.*. Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometric interleaver using fiber loop[J]. *Acta Optics Sinica*, 2002, **22**(6): 702~705 (in Chinese)
- 周 广,赵春柳,黄勇林 等. 光纤环对非平衡马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器性能的改善[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 702~705
- 7 Shao YongHong, Jiang YaoLiang, Zhen Quan *et al.*. Design of interleaver using Fabry-Perot interferometer [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 74~76 (in Chinese)
- 邵永红,姜耀亮,郑 权 等. 法布里-珀罗型光学梳状滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 74~76
- 8 Yuan P. Li. Fourier transform-based optical waveguide filters and WDMs[C]. *OFC '96 Technical Digest*, 1996. 91~98
- 9 M. Kawachi, K. Jinguji. Planar lightwave circuit for optical signal processing[C]. *OFC '94 Technical Digest*, 1994. 281~282
- 10 Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Transmission characteristics of interleaver based on Mach-Zehnder interferometer with optical all pass filter inserted[J]. *Acta Optics Sinica*, 2003, **23**(5): 575~580 (in Chinese)
- 孟义朝,黄肇明,王陆唐. 马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 575~580
- 11 Radan Slavik, Sophie LaRochelle. All-fiber periodic filters for DWDM using a cascade of FIR and IIR lattice filters[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 497~499
- 12 C. Dragon. Crosstalk caused by fabrication errors in a generalized Mach-Zehnder interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1326~1327
- 13 Xia Junlei, Gao Dingshan, An Junming *et al.*. Tolerance analyses of the Mach-Zehnder interferometric demultiplexer [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(6): 645~648 (in Chinese)
- 夏君磊,浩定山,安俊明 等. 马赫-曾德尔干涉型波分复用器的容差分析[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(6): 645~648
- 14 Baoxue Chen, Hongbo Jia, Jianzhong Zhou *et al.*. Optimized design of fluorinated polyimide based interleaver [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(20): 4202~4207
- 15 G. T. Palocz, Y. Huang, A. Yariv. Free-standing all-polymer microring resonator optical filter[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(23): 1211~1212
- 16 Takashi Goh, Senichi Suzuki, Akio Sugita. Estimation of waveguide phase error in silica-based waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(11): 2107~2113
- 17 Chen Baoxue, Peng Yinhe, Lai Longbin *et al.*. Optical waveguide  $1\times 8$  splitter fabricated from fluorinated polyimides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34** (in Chinese)
- 陈抱雪,彭银和,赖龙斌 等. 氟化聚酰亚胺 $1\times 8$ 光波导分支耦合器研制[J]. *光子学报*, 2005, **34**
- 18 Hiroaki Yamada, Kazumasa Takada, Seiko Mitachi. Crosstalk reduction in a 10-GHz spacing arrayed-waveguide grating by phase-error compensation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 364~371
- 19 James M. Battiato, Jerome Porque, David Stegall *et al.*. Method to balance and stabilize interferometric waveguide devices [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 419~421