

基于 Polymer/SiO₂ 的快速低功耗可变光 衰减器的研制

曲禄成 梁磊 孙健 王希斌 王菲 张大明

(吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,
吉林省光通信用聚合物波导器件工程实验室, 吉林 长春 130012)

摘要 为了有效改善基于无机材料的可变光衰减器(VOA)功耗大以及全聚合物 VOA 响应速度慢的问题,设计并研制了一种基于有机聚合物/无机 SiO₂ 材料的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型 VOA 器件。根据脊型波导结构的单模传输条件,设计并优化了单模波导的截面尺寸,同时对器件结构进行了模拟,采用光刻和显影等工艺制备出功耗较低、响应速度快的 VOA 器件。在 1550 nm 通信波长下,器件的衰减范围为 23 dB,最大功耗仅为 14 mW,器件的上升时间为 252 μ s,下降时间为 384 μ s。实验结果表明,采用有机/无机混合波导结构,并通过对器件结构参数的优化,可以实现功耗低且响应快速的 VOA 器件。

关键词 光学器件;可变光衰减器;热光效应;聚合物;马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1216001

Design and Fabrication of Polymer/SiO₂ Hybrid Variable Optical Attenuator with Fast Response and Low Power Consumption

Qü Lucheng Liang Lei Sun Jian Wang Xibin Wang Fei Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, Jilin Provincial Engineering Laboratory on Polymer Planar Lightwave Circuits, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract A kind of polymer/SiO₂ hybrid Mach-Zehnder interferometer (MZI) variable optical attenuator (VOA) is designed and fabricated. The VOA has lower power consumption than the VOA based on inorganic materials and faster response than the polymer VOA. The cross section size of the single mode waveguide is designed and optimized according to the single mode transmission conditions of ridge waveguide, and the structure of device is also simulated. The VOA with low power consumption and fast response is obtained by using the photolithography and wet-etching fabrication processes. With 1550 nm optical communication wavelength, the dynamic attenuation range of the fabricated VOA is 23 dB and the maximum power consumption is 14 mW. The rise and fall times of the device are 252 μ s and 384 μ s. The experimental results show that the VOA has a lower power consumption and a faster response with using the organic/inorganic hybrid structure and optimizing the device structure.

Key words optical devices; variable optical attenuator; thermo-optic effect; polymer; Mach-Zehnder interferometer

OCIS codes 230.3120; 230.7390; 160.6840; 130.4815

收稿日期: 2014-05-23; 收到修改稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61177027, 61261130586)、吉林省科技发展计划(20140519006JH)

作者简介: 曲禄成(1988—),男,硕士研究生,主要从事热调谐型聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: qulucheng@foxmail.com

导师简介: 王菲(1978—),女,副教授,硕士生导师,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

随着光通信技术的快速发展,密集波分复用(DWDM)技术在光传输网络系统中将占有越来越重要的地位。可变光衰减器^[1-3](VOA)是密集波分复用技术中的重要器件之一,其主要功能是对光功率进行衰减,实现网络中多个光信号传输通道间的功率均衡及增益控制。目前光网络中应用的光衰减器主要是传统的机械位移式法拉第旋转型及微电机机械型(MEMS),这些传统机械式 VOA 的体积大、功耗大、且不利于集成。利用集成光学技术制作的波导型 VOA 具有结构紧凑、抗干扰、可靠性强、响应快、功耗低和成本低等优点,可满足未来光通信组件向着模块化和封装小型化发展的要求,具有很好的市场前景。

根据制备材料的不同,热光波导型 VOA 主要可分为三类。1) 是基于无机材料 Si/SiO₂ 的 VOA,其响应速度较快,但功耗均在百毫瓦以上^[4-5],如 2005 年中国科学院半导体研究所 Qing 等^[5]研制的 VOA 器件,其响应时间仅为 24.7 μs,但功耗达 140 mW 以上;2) 基于聚合物材料的 VOA^[6-8],其功耗较无机材料 VOA 有明显降低,但是响应速度相对较慢,如 2006 年韩国电子通信研究院 Kim 等^[8]采用 ZPU 系列聚合物制备的 VOA 器件,其功耗为 80 mW,响应时间大于 3 ms,同年复旦大学 Li 等^[7]采用溶胶凝胶法合成的复合材料制备的 VOA 器件,其功耗仅为 13 mW,但响应时间高达 4.7 ms;3) 是有机/无机复合波导型 VOA^[9-11],如 2009 年

印度 Tezpur 大学 Sahu^[9]采用无机 SiON 作芯层,聚合物作包层,制备的 VOA 器件响应时间仅为 98 μs,但功耗高达 460 mW。

为了降低 VOA 器件的功耗,同时提高器件的响应速度,本文设计并制备了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的有机无机复合波导型 VOA 器件。器件采用无机材料 Si 作衬底,以衬底表面生长的 SiO₂ 薄膜作为波导下包层材料,SU-8 紫外固化聚合物作为芯层材料,P(MMA-GMA)作为上包层材料。由于芯层 SU-8 聚合物具有较大的热光系数($-1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$),可有效降低 VOA 的功耗;选用导热系数较大的无机材料作为衬底和下包层,可以加快热量从芯层的散失,有利于提高器件的响应速度。

2 器件的设计与仿真

2.1 VOA 器件结构

MZI 型^[12] VOA 的结构如图 1(a)所示,包括输入波导、Y 分支型 3 dB 分束器和耦合器、两条干涉臂、加热电极及输出波导。信号光从输入端进入波导,经由 3 dB 分束器分成功率率和相位均相同的两束光,分别在两条干涉臂波导中传输,当其中一条臂上的电极有电流通过并产生热量时,由于热光效应^[13],该干涉臂聚合物材料的折射率会降低,从而使两个干涉臂产生相位差,再经过 3 dB 耦合器干涉后,输出光强将发生一定的衰减,从而实现输出光功率的控制。

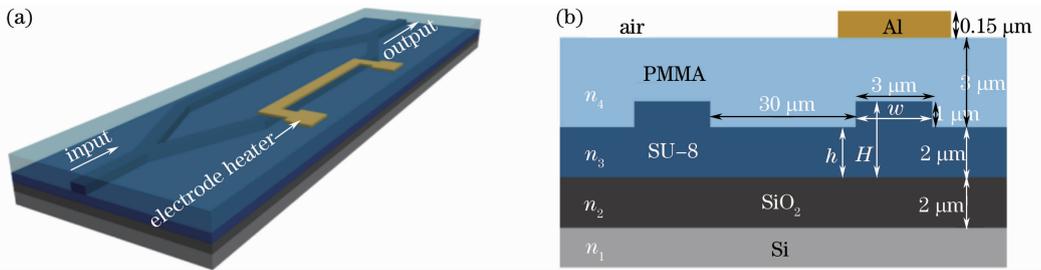


图 1 MZI 型 VOA 结构示意图。(a) 俯视图;(b) 截面图

Fig. 1 Structure of MZI-VOA. (a) Vertical view; (b) cross section view

图 1(b)为优化设计的 VOA 器件的截面图,器件被设计成脊型波导结构,以 Si 作为衬底,其折射率 $n_1 = 3.45$,导热系数为 $163 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,是良好的热沉材料;下包层采用在 Si 衬底表面生长的一层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的 SiO₂ 薄膜, SiO₂ 的导热系数为 $1.4 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,在 1550 nm 处,其折射率 $n_2 = 1.46$ 。由于采用了导热系数较大的 SiO₂ 作为下包层,可加快芯层热量的散失,进而提高器件的响应速度;波导

芯层采用紫外固化聚合物 SU-8 材料,在 1550 nm 处,其折射率 $n_3 = 1.573$,由于 SU-8 聚合物材料具有较高热光系数 $-1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,可以有效降低器件功耗;上包层采用实验室自主合成的 P(MMA-GMA)^[14],在 1550 nm 处,其折射率 $n_4 = 1.483$,导热系数为 $0.2 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$,可见其折射率与芯层 SU-8 折射率相差较大,因此上包层可以制作的较薄,这将加快热量传输进而提高器件响应速度。

2.2 器件结构的优化设计及模拟仿真

如图 1(b)所示的脊型波导结构,可以在保证单模传输的同时,增大波导端面的模场面积,从而有效减少器件与光纤的耦合损耗^[15]。定义脊型波导宽为 w 、高为 H 及平板厚度为 h ,为保证信号光的单模传输,需要满足^[16-18]：

$$\frac{h}{H} \geq 0.5, \quad (1)$$

$$\frac{w}{H} \leq 0.3 + \frac{h/H}{\sqrt{1 - (h/H)^2}}. \quad (2)$$

同时充分考虑到实验工艺条件,最终选取脊型波导芯层宽 $3.0 \mu\text{m}$,高 $3.0 \mu\text{m}$,平板厚度 $1.0 \mu\text{m}$,上包层和下包层厚度均为 $2.0 \mu\text{m}$ 。

MZI 结构中 3 dB 分束器和耦合器的分支夹角直接影响光在波导中的传输损耗,所以对分支夹角进行了模拟优化,如图 2 所示为归一化的输出光强随分支夹角变化的关系曲线,图中可以看出,随着分支夹角的增大,输出光强逐渐减弱,结合实验工艺的精度,最终将分支夹角设计为 1° ,此时具有较低的传输损耗。

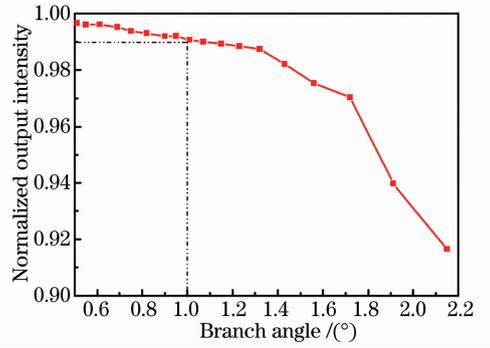


图 2 归一化的输出光强随分支夹角变化的关系曲线

Fig. 2 Curves of the normalized output intensity versus the branch angle

图 3(a)为使用 Rsoft 软件模拟的波导光场分布图,从模拟结果可以看出,光场可以很好地被限制在波导芯层中。当加热电极工作时,对波导截面的热场分布进行了模拟,如图 3(b)所示,图中显示加热电极下面的热场呈现梯度分布。在加热电极不工作和使 VOA 产生最大衰减时的两种状态对器件的传输光场进行了仿真,如图 3(c)和(d)所示。从图中可以看出设计的 MZI 型 VOA 器件能够实现很好的光衰减作用。

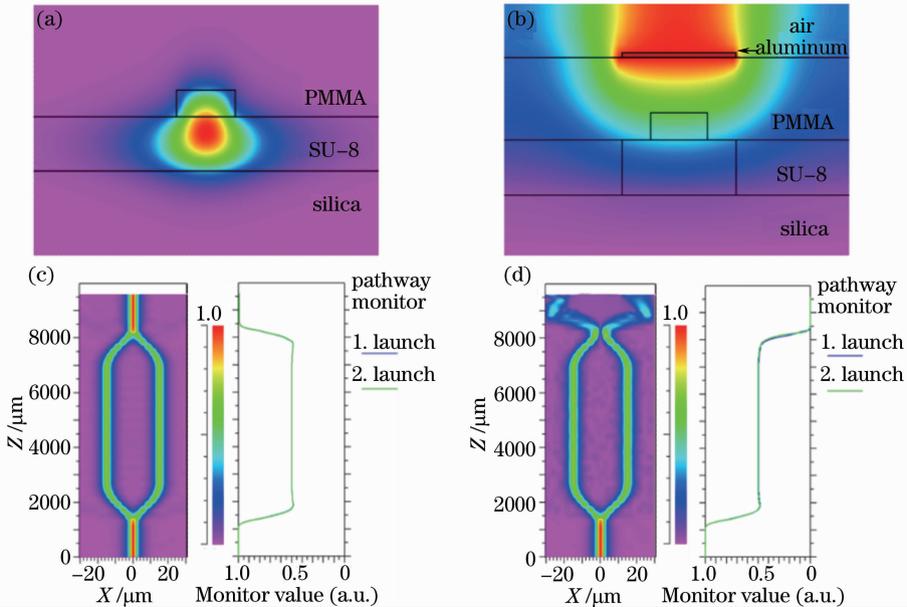


图 3 模拟结果。(a) 截面光场分布;(b) 热场分布;(c) 无衰减时光场分布;(d) 实现最大衰减时光场分布
Fig. 3 Simulation result. (a) Optical field distribution of cross section; (b) heat distribution; (c) optical field distribution without attenuation; (d) optical field distribution with maximum attenuation

使用 Rsoft 软件对归一化的输出光强随调制臂折射率的变化进行了模拟,调制臂长 4 mm ,图 4 所示为模拟结果。从图中可以看到当调制臂折射率的变化为 2.5×10^{-5} 时,VOA 就能够实现最大衰减。

3 器件的制备与测试

3.1 器件的制备

MZI 型 VOA 的制备采用传统的平面半导体工艺,图 5 所示为器件制备的工艺流程图。首先,在 Si

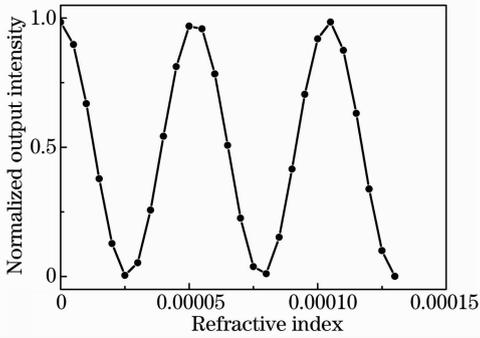


图 4 归一化的输出光强随调制臂折射率变化的关系曲线
Fig. 4 Curves of the normalized output intensity versus the refractive index of modulation arm

衬底上采用热氧化法生长厚度为 $2.0 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 薄膜并以此作为波导下包层；然后，在下包层表面旋涂 SU-8 2005 紫外固化聚合物作为芯层，经过前烘、紫外光刻、后烘、湿法刻蚀和坚膜，得到宽 $3.0 \mu\text{m}$ 、脊高 $1.0 \mu\text{m}$ 的波导；在芯层波导上旋涂 P(MMA-GMA) 聚合物，加热固化形成厚度为 $2.0 \mu\text{m}$ 的上包层，完成波导制备。图 6(a) 所示为波导端面的显微镜照片，图中显示制备的波导呈现良好的脊形结构，截面尺寸与设计值基本吻合，且界面清晰，没有互溶现象。最后在波导表面进行加热电极的制备，在上包层表面真空蒸镀一层厚度为 150 nm 的铝膜，进行光刻形成加热电极的结构形状，完成器件的制备。图 6(b) 所示为 VOA 器件实物照片，器件长度为 3.0 cm 。

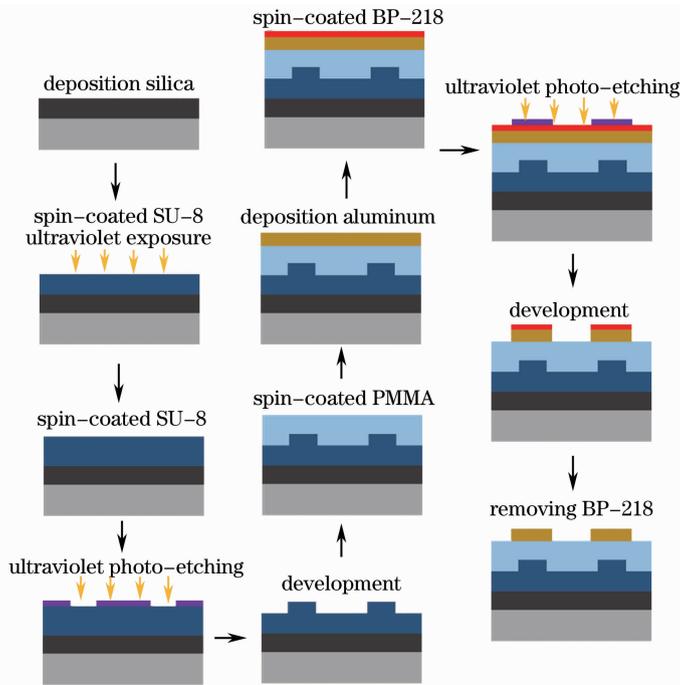


图 5 VOA 器件制备工艺流程
Fig. 5 Fabrication process of the VOA

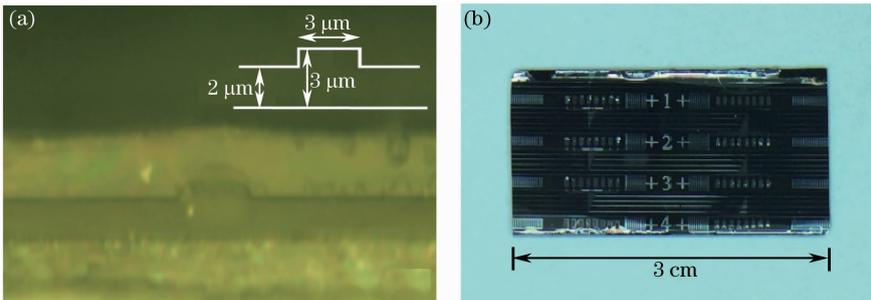


图 6 (a) 波导端面显微镜照片；(b) VOA 器件实物照片

Fig. 6 (a) Microscope image of the cross section of waveguide; (b) photograph of the VOA

3.2 器件性能测试

采用光纤-波导直接耦合测试系统对 MZI 型

VOA 器件进行测试，可调谐激光器输出 1550 nm 波长的信号光，经单模光纤(SMF)直接耦合进入输

入波导,由器件输出端输出的光信号经红外电荷耦合器件(CCD)接收,并显示在监视器上。图7为当输入信号光功率为0.1 mW时,由红外 CCD 观察到的 VOA 器件输出光斑。

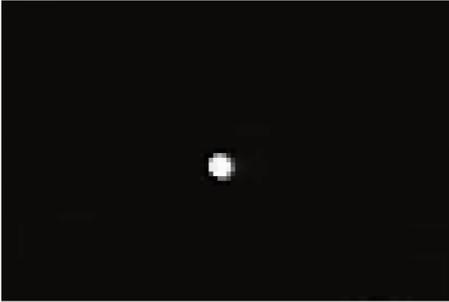


图7 VOA 器件的红外输出光斑

Fig. 7 Infrared output pattern of the VOA

将输出光信号经 SMF 耦合进光功率计,测得制备的 VOA 器件的插入损耗为 15.5 dB,图8为 VOA 器件的衰减随电极加热功率的变化,图中显示,VOA 器件在功耗为 14 mW 时,实现最大衰减为 23 dB。图9为在电极上施加带有直流偏置的频率为 200 Hz 的方波信号时 VOA 器件的响应特性曲线,由图可见,器件上升时间为 252 μ s,下降时间为 384 μ s。

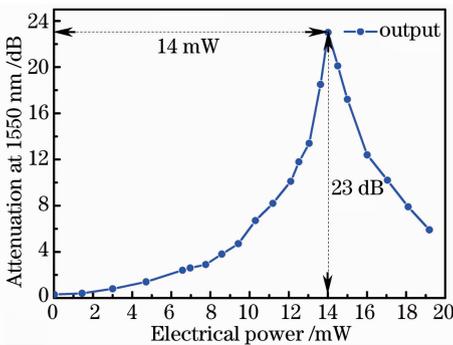


图8 VOA 器件的衰减强度随电极驱动功率的变化曲线

Fig. 8 Curves of the attenuation intensity versus the electrode power of VOA

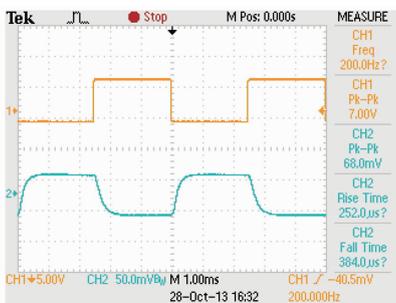


图9 VOA 器件的方波响应特性

Fig. 9 Response characteristics of the VOA

4 结 论

设计并制备了一种 MZI 结构的有机无机复合波导型 VOA 器件,选用热光系数较大的 SU-8 材料作芯层和导热系数较大的 SiO₂ 材料作下包层,对器件结构进行了优化设计,并对器件的光场和热场进行了模拟仿真,利用半导体工艺制备得到了性能较好的 VOA 器件。测试结果表明,在 1550 nm 波长下,VOA 最大衰减达到 23 dB,最大功耗仅为 14 mW。器件的响应时间为:上升时间 252 μ s,下降时间 384 μ s。较无机材料或全聚合物材料制备的 VOA 器件,在功耗和响应速度方面实现了较大的提高。

参 考 文 献

- Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 671-674.
- 殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 671-674.
- Liu Yingming, Xu Jing, Zhong Shaolong, *et al.*. Variable optical attenuator based on MEMS micromirror [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(12): 2287-2291.
- 刘英明, 徐静, 钟少龙, 等. 基于 MEMS 微镜的可调光学衰减器[J]. 光电子·激光, 2012, 23(12): 2287-2291.
- Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan, *et al.*. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(8): 1110-1114.
- 张云聪, 陈哲, 江沛凡, 等. 全光纤热光型可变光衰减器[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1110-1114.
- Yuntao L, Jinzhong Y, Yuanyuan C, *et al.*. Analysis of temperature dependence of silicon-on-insulator thermo-optic attenuator[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(2): 465-467.
- Qing F, Peng C, Hongli X, *et al.*. Low power-consumption and high response frequency thermo-optic variable optical attenuators based on silicon-on-insulator materials [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(6): 1452-1455.
- Jiang X, Li X, Zhou H, *et al.*. Compact variable optical attenuator based on multimode interference coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(11): 2361-2363.
- Li D X, Zhang Y W, Liu L Y, *et al.*. Low consumption power variable optical attenuator with sol-gel derived organic/inorganic hybrid materials [J]. Opt Express, 2006, 14(13): 6029-6034.
- Kim J T, Choi C G. Polymeric PLC-type thermo-optic optical attenuator fabricated by UV imprint technique [J]. Optics Communications, 2006, 257(1): 72-75.
- Sahu P P. Variable optical attenuator using thermo-optic two-mode interference device with fast response time [J]. Appl Opt, 2009, 48(21): 4213-4218.
- Xiao G Z, Zhang Z Y, Grover C P. A variable optical attenuator based on a straight polymer-silica hybrid channel waveguide [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2511-2513.
- Li J, Li J. Variable optical attenuator based on a bent polymer/SiON waveguide [C]. SPIE, 2007, 6781: 678158.
- Wang Wei, Sun Xiaoqiang, Wang Xibin, *et al.*. Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(4): 610-613.

王微, 孙小强, 王希斌, 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光

- 开关[J]. 光子学报, 2010, 39(4): 610—613.
- 13 Diemeer M B J. Polymeric thermo-optic space switches for optical communications[J]. Optical Materials, 1998, 9(1): 192—200.
- 14 Zhang Kun, Yue Yuanbin, Li Tong, *et al.*. Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 64—70.
张 琨, 岳远斌, 李 彤, 等. 感应耦合等离子体刻蚀在聚合物光波导制作中的应用[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 64—70.
- 15 Yan Y F, Zheng C T, Liang L, *et al.*. Response-time improvement of a 2×2 thermo-optic switch with polymer/silica hybrid waveguide[J]. Optics Communications, 2012, 285(18): 3758—3762.
- 16 Petermann K. Properties of optical rib-guides with large cross-section [J]. Archivfur Elektronik und Ubertragungstechnik, 1976, 30(3): 139—140.
- 17 Laurentis M, Irace A, Breglio G. Determination of single mode condition in dielectric rib waveguide with large cross section by finite element analysis[J]. Journal of Computational Electronics, 2007, 6(1-3): 285—287.
- 18 Moosburger R, K Petermann. 4×4 digital optical matrix switch using polymeric oversized rib waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(5): 684—686.

栏目编辑: 韩 峰