

有机聚合物非对称弯波导分析与优化

高原 张晓霞 廖进昆

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 以缩短有机聚合物马赫-曾德尔(M-Z)电光调制器分支波导长度为目的,针对正弦弯非对称脊形波导进行研究,利用全矢量有限差分光束传输分析方法,系统地分析了不同参数下正弦弯非对称脊形波导的传输损耗,并得出优化的结构参数:脊宽 $w=4\ \mu\text{m}$ 、分支高度 $h=11\ \mu\text{m}$ 、脊形波导弯外侧芯层平板宽度 $s=2\ \mu\text{m}$ 、弯波导长度 $L=300\ \mu\text{m}$ 。研究表明,在相同传输损耗条件下,分支波导长度可以减少 40%,该结果对有机聚合物 M-Z 调制器中光波导的设计具有一定的参考价值。

关键词 导波光学;有机聚合物;S 弯波导;非对称脊形波导;全矢量有限差分光束传输法

中图分类号 TN 252-34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0213002

Analysis and Optimization of Organic Polymer Asymmetric Bent Waveguide

Gao Yuan Zhang Xiaoxia Liao Jinkun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract In order to reduce the length of polymer branch waveguide in Mach-Zehnder(M-Z) electro-optic polymer modulator, asymmetric sine-bend ridge waveguide is researched. The transmission loss of asymmetric sine-bend ridge waveguide under different parameters is systematically studied by using the full-vector finite-difference beam propagation method (FD-BPM). The structure is optimized as ridge width $w=4\ \mu\text{m}$, branch height $h=11\ \mu\text{m}$, slab width on core layer of outboard bend $s=2\ \mu\text{m}$, and length of the bend waveguide $L=300\ \mu\text{m}$. The research results have shown that if the symmetric sine-bend ridge waveguide is replaced by asymmetric sine-bend ridge waveguide, the length of branch waveguide can reduce 40% under the same transmission-loss conditions. The results will have a certain reference value to the design of optical waveguide in polymer M-Z modulator.

Key words guided-wave optics; organic polymer; S-bend waveguide; asymmetric ridge waveguide; full-vector FD-BPM

OCIS codes 130.3120; 130.5460; 230.3120; 230.7370

1 引言

在集成光器件的设计中,如何做到减小损耗和缩小器件长度同时兼顾,实现器件的高度集成化,一直都是研究重点之一,紧凑型集成光器件由此应运而生^[1]。非线性有机聚合物在光特性方面因具有介电常数较低的突出特点,目前也成为制作紧凑型集

成光器件的热点材料之一^[2,3],而有机聚合物电光调制器作为集成光器件中重要的一员也得到快速发展^[4]。由于 Y 分支波导的设计直接影响电光调制器光波导光场的传输,因此对 Y 分支波导的研究一直吸引着众多研究者^[5]。报道显示针对聚合物脊波导采用横向位移并在缓冲层引入深刻蚀的方法制作

收稿日期: 2010-06-22; 收到修改稿日期: 2010-08-24

基金项目: 国家 863 计划(2009AA03Z413)资助课题。

作者简介: 高原(1962—),男,博士研究生,副研究员,主要从事集成光器件方面的研究。

E-mail: gaoy3582@163.com

导师简介: 张晓霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事宽带光纤传输与通信系统技术等方面的研究。

E-mail: xxzhang@uestc.edu.cn

弯波导,能够在减小弯半径(仅为几十微米)的同时降低损耗的目的,对 Y 分支的设计极具参考价值^[6]。采用将溶胶-凝胶(sol-gel)芯夹在聚合物芯层中的方法制作电光调制器,不仅取消了 Y 分支而且还将衬底的厚度减小到 $3.7\mu\text{m}$ ^[7]。

为了减小采用各种弯波导设计的 Y 分支波导长度,必须增加弯波导的弯曲程度,为此针对 SOI 圆弧弯波导采用的一种方法是在直波导和圆弧弯波导的连接处引入横向位移,减小光场的过渡损耗^[8];另一种方法则是采用非对称脊形波导制作圆弧弯波导。最近的研究显示将非对称圆弧波导应用于大折射率比的 SOI 波导可以减小辐射损耗^[9]。

在聚合物 Y 分支波导设计中,可采用圆弧型、正弦型和余弦型等弯波导来实现,但不论采用哪种类型,目前所设计的脊形波导结构均为对称脊形波导结构。而对于弯波导来说,由于弯半径越小其弯波导的损耗越大,因此,对称结构波导所要求的弯半径比较大,不能满足紧凑型集成光器件的要求。为此,本文将非对称弯波导应用于有机聚合物电光调制器的 Y 分支波导,以期在不增大损耗的前提下减小弯波导的长度,使 Y 分支的总长度缩短。并采用全矢量有限差分光束传输法对其进行仿真优化,结果显示在相同结构尺寸和损耗条件下, Y 分支长度可以缩短 40%。

2 基本原理

2.1 非对称脊形波导结构

非对称脊形波导是指脊形两边的波导芯层是不对称的,其结构如图 1 所示。图 1(a)中脊形弯波导外侧平板宽度 s 很短,一般为几微米。图 1(b)是 $s=0$ 的情况,此时脊形弯波导外侧没有平板芯层。

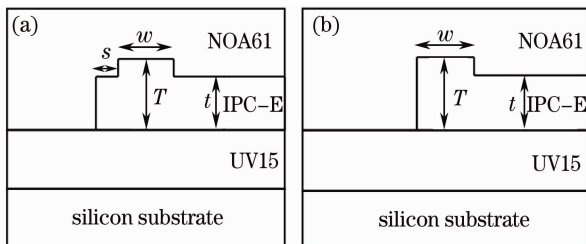


图 1 非对称脊形波导结构。(a) $s \neq 0$, (b) $s = 0$

Fig. 1 Asymmetric rib waveguide structure.

(a) $s \neq 0$, (b) $s = 0$

2.2 全矢量有限差分光束传输法

三维全矢量 FD-BPM^[10]充分考虑了光场的偏振依赖性和耦合,能够对传输距离远大于波长的情

况得出精确的仿真结果,因此,本文采用全矢量有限光束传输法对波导传输光场进行仿真。

全矢量 FD-BPM 的主要思想是:在 FD-BPM 的公式中考虑电磁场由于其矢量特性而产生的偏振依赖性,直接将二维的 FD-BPM 公式扩展到三维光波导,再将一般采用的一步运算 $z \rightarrow z + \Delta z$ 分成两步运算 $z \rightarrow z + \Delta z/2$ 和 $z + \Delta z/2 \rightarrow z + \Delta z$,两步都先后在 x 和 y 方向求解,这样就把三维结构下的差分格式方程分解为两个可用二维结构下追赶法求解的差分方程,然后再依次用追赶法求解^[11]。采用仿真参数为:计算窗口宽度 $40\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$, x 和 y 方向网格点数均为 100,初始场为准-TM 单模输入,波长 $1.55\mu\text{m}$ 。

3 非对称脊形波导光场

3.1 脊形波导单模条件

选用脊形波导的上包层材料为紫外固化环氧 NOA61($n_1 = 1.55$, $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 时,下同),下包层为紫外固化环氧 UV15($n_3 = 1.50$),芯层为生色团 IPC-E($n_2 = 1.67$), $T = 1.8\mu\text{m}$, $t = 1.5\mu\text{m}$,脊的高度 $T - t = 0.3\mu\text{m}$,脊宽 $w = 4\mu\text{m}$ 。

由于对称波导结构多模光波导的高阶模,其传输条件对应于相应的本征方程具有实解,可以得出采用上述材料和尺寸的对称脊形波导,当芯层厚度与脊宽分别满足 $t \leq 1.5\mu\text{m}$, $w \leq 5\mu\text{m}$ 时,此种聚合物光波导实现单模传输^[12]。

脊波导的单模条件主要取决于脊高和脊宽两个参数,由第一个高阶模的截止边界所决定。当脊波导的一侧引入深刻蚀时,与脊高和脊宽相关的单模/多模边界曲线将发生变化,以脊高和脊宽为参数的单模/多模边界曲线下移,即实现单模条件的脊高和脊宽选择区域向数值小的方向缩减。因此,引入深刻蚀的非对称脊形波导,其单模/多模的边界与对称脊形波导相比发生变化,为了避免高阶模的发生以满足单模条件,其横截面应相对有所减小^[6]。

针对本文所用聚合物材料的非对称脊形波导结构,采用交替方向隐式(ADI)方法使用 OptiBPM 仿真软件中的模解析器进行计算(波长为 $1.55\mu\text{m}$,采用 Neumann 边界条件,网格点数 x, y 方向均为 100),得出在 $s = 0 \sim 4\mu\text{m}$ 时均满足单模传输条件。

3.2 非对称脊形波导光场

图 2 显示了上述材料构成的脊形波导其 TM_{00} 模 E_y 分量光场在对称和非对称波导中的横向分布。

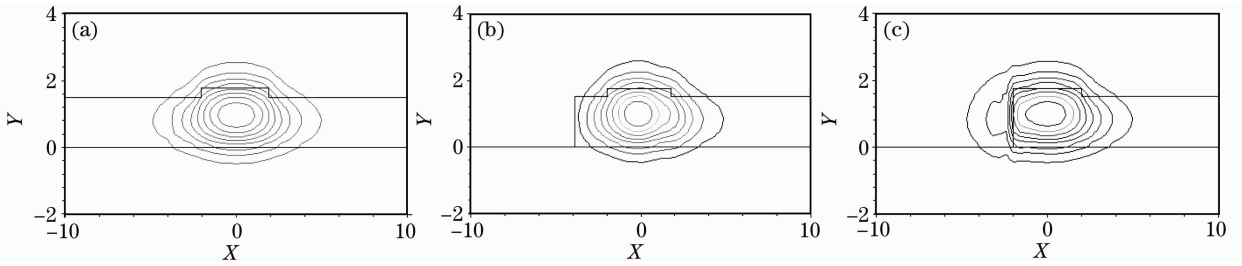


图2 脊形波导对称和非对称结构 TM_{00} 模 E_y 分量光场。
Fig.2 Optical field of symmetric and asymmetric ridge waveguide structure, E_y component, TM_{00} mode.

(a) symmetric structure, (b) asymmetric structure $s=2 \mu\text{m}$, (c) asymmetric structure $s=0$

由图2可以看出,非对称结构的脊形波导,光场显示不对称性,其光场在波导平板芯层较短一侧发生变化,由于芯层的缩短,基模的中心从脊的中心向芯层完整的一侧偏离,光场被压缩。因此,可以将其应用于弯波导,用完整平板层朝向弯内侧的非对称脊形波导代替对称脊形波导,使得光场分布向弯的内侧压缩,部分地抵消弯曲引起的中心偏移,同时还利用弯外部存在的高折射率差,限制基模的泄漏,减小弯波导在弯外侧的辐射损耗^[13]。

4 正弦弯分支波导

4.1 非对称正弦弯分支波导结构

在脊形弯波导中,弯曲部分的曲率半径越小,传输距离越短,辐射越强,越容易产生光路变换,损耗

也越大。弯波导的损耗包括由于辐射产生的辐射损耗和由于模场失配产生的过渡损耗。过渡损耗是由弯曲曲率不连续造成的,在正弦弯波导中,由于弯一直波导连接处曲率半径接近无穷大,其过渡损耗较小;而在正弦弯的中点前后,由于曲率反转引起高阶模耦合,此时过渡损耗较大。辐射损耗是由于传输时弯曲部分外侧光的相速度大于内侧光的相速度,导模场分布偏向弯曲外侧,部分光波在半径方向上存在着辐射而产生的,辐射损耗随着弯半径的减小而增大^[14]。

为了在缩短波导长度的同时,减小弯波导的损耗,将弯外侧的平板芯层减小至几微米的宽度,形成一种在平板芯层的不对称,以减少脊形波导外逸而产生的辐射损耗。本文将对非对称正弦弯 Y 分支波导的其中一个分支进行研究,其结构如图3所示。

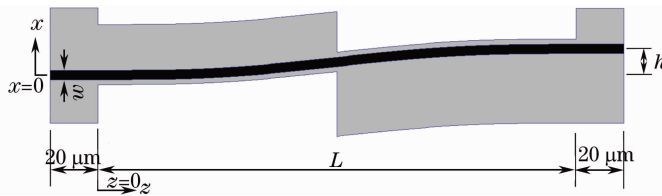


图3 非对称正弦弯波导结构

Fig.3 Asymmetric sine-bend waveguide structure

正弦弯波导的表达式为

$$x(z) = \frac{h}{L}z - \frac{h}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{L}z\right).$$

式中 x 和 z 分别为分支波导宽度和长度方向的值, L 为分支波导长度, h 为分支高度。

4.2 对称正弦弯波导光场

对于对称正弦弯 Y 分支波导,当分支高度一定时,其传输损耗将随波导长度的缩短而增加,因此在设计中往往不能将长度设计得太短。图4显示在 $h=11 \mu\text{m}$ 时,不同对称脊形波导长度 L 所对应的 TM 光场传输情况。可以看出,随着 L 的减小弯波导的损耗增加,当 $L < 400 \mu\text{m}$ 时,传输损耗急剧增加。

4.3 非对称脊形波导优化

针对上述情况,引入非对称脊形波导结构,并对结构进行优化。图5显示了分支高度 h 一定 ($h=11 \mu\text{m}$), $L \leq 550 \mu\text{m}$ 时不同 s ($\Delta s=1 \mu\text{m}$) 和不同 L 条件下的 TM 模光场输出相对功率变化曲线。

图5(a)为波导长度一定时, TM 模光场输出功率与 s 的变化曲线。从图中可以看出,当 $s > 2 \mu\text{m}$ 时,改变 s 对各种波导长度的输出功率影响不大;而当 $s < 2 \mu\text{m}$ 时,随着 s 的减小,各种长度波导的损耗均增加,程度有所差别。

图5(b)为 s 一定时, TM 模光场输出功率与 L 的变化曲线。可以看出,对称波导在 $L < 450 \mu\text{m}$ 时

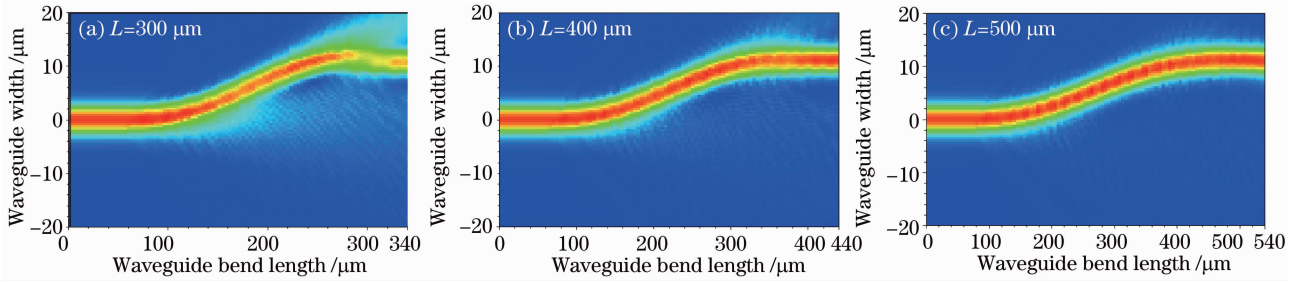


图 4 不同长度下对称正弦弯波导传输光场

Fig. 4 Transmission optical field of symmetric sine-bend waveguide in different length

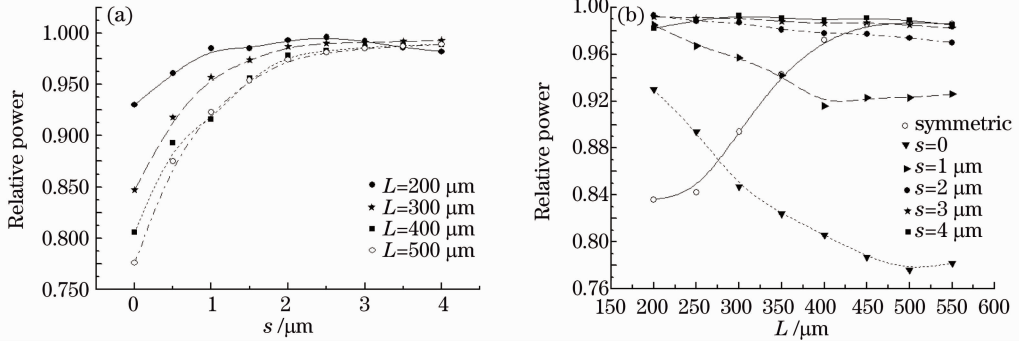


图 5 输出相对功率与(a)芯层宽度 s 和(b)弯波导长度 L 的关系

Fig. 5 Output relative power versus (a) slab width and (b) bend-waveguide length

损耗急剧增加;非对称波导当 $s > 2 \mu\text{m}$ 时,波导长度的改变对输出功率影响不大;而当 $s < 2 \mu\text{m}$ 时,输出功率随波导长度的增加而减小, s 越小损耗增加越快。

从仿真的光场传输情况可以看出,当 s 较小时,基模的形状将发生改变^[13], L 较长的波导在第一个直-弯和中间的弯-弯过渡点其过渡损耗相对 L 较短的波导有所增加,同时辐射损耗也随长度的增加而增加,此时传输损耗随长度的增加而增加。当 s 较大时, L 较长的波导上述过渡损耗减小,而 L 较短的波导在第二个弯-直过渡点的损耗增加,使得此时各种长度波导的损耗差别不大。

从图 5 的曲线中可以选择变化的临界点,即 $s = 2 \mu\text{m}$, $L = 300 \mu\text{m}$ 为优化的波导结构,此时可实现在不增加损耗的前提下缩短波导长度的目的。

由于相对输出功率仅能反应整个波导的输出情况,为此还需观察输出功率集中于波导脊形部分的程度,脊形部分输出功率越大,输出光场就越集中,反之光场则发散。图 6 显示了在不同 L 情况下 TM 模光场脊形部分输出功率与 s 的关系。可以看出,当 L 较短时, s 越大脊形部分输出功率越小,这是由后一个弯-直连接处过渡损耗引起的;随着 L 的增加,输出功率将随 s 的增加而趋于平缓,当 $L > 300 \mu\text{m}$, $s > 2 \mu\text{m}$ 后, L 和 s 的变化对脊波导部分的

输出功率影响不大。

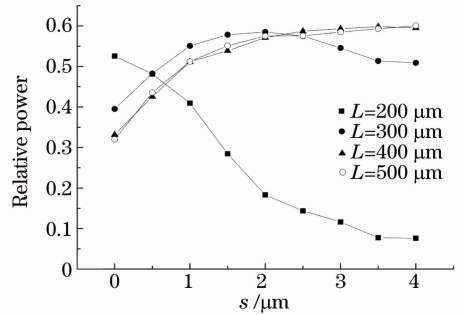


图 6 脊形部分输出功率与 s 的关系

Fig. 6 Relation between s and output power in ridge

4.4 对称脊形波导与非对称脊形波导比较

综合考虑波导长度、波导和脊形部分输出功率以及工艺制作因素,选择非对称 Y 分支波导优化结构为 $L = 300 \mu\text{m}$, $s = 2 \mu\text{m}$,此时波导相对输出功率为 0.987,其 TM 模光场传输情况如图 7(a) 所示。它与图 4(a) 显示的相同长度对称结构波导相比,传输中的损耗明显减小。由图 7 可以看出 $L = 300 \mu\text{m}$ 的非对称波导传输情况基本与 $L = 500 \mu\text{m}$ 对称波导情况一致,而波导长度则缩短了 40%。

图 8 显示了上述两种情况波导输出位置的横向 TM 模光场,可以看出它们的输出光场基本相同,说明 $L = 300 \mu\text{m}$ 的非对称 Y 分支波导完全可以取代 $L = 500 \mu\text{m}$ 的对称 Y 分支波导。

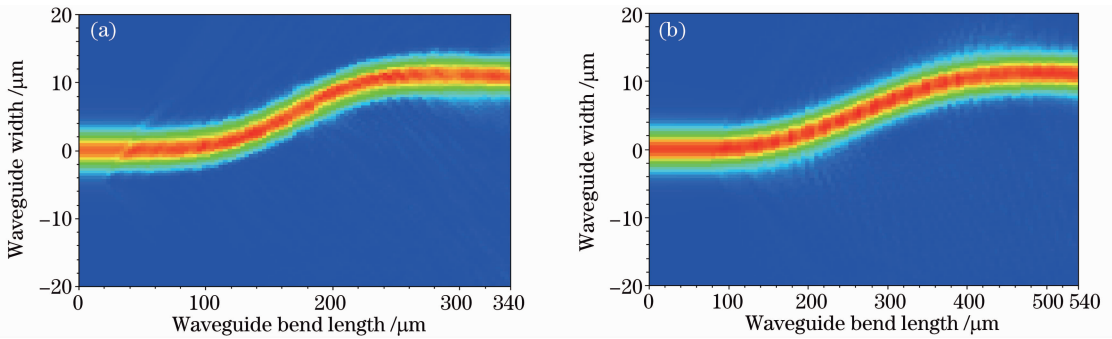


图7 两种结构 TM 传输光场比较。(a) $L=300\ \mu\text{m}$ 非对称波导, (b) $L=500\ \mu\text{m}$ 对称波导

Fig. 7 Contrast of transmission TM optical field in two structures. (a) $L=300\ \mu\text{m}$ asymmetric waveguide, (b) $L=500\ \mu\text{m}$ symmetric waveguide

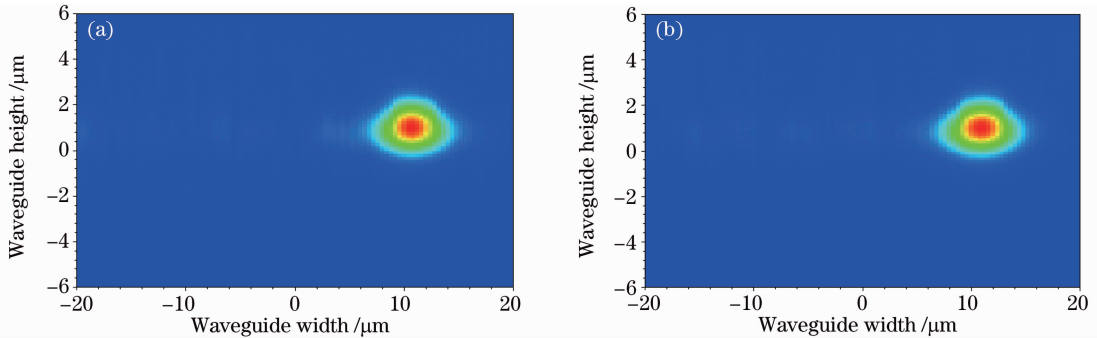


图8 两种结构不同长度横向 TM 输出光场比较。(a) $L=300\ \mu\text{m}$ 非对称波导, (b) $L=500\ \mu\text{m}$ 对称波导

Fig. 8 Contrast of transverse TM output optical field in two structures on different length.

(a) $L=300\ \mu\text{m}$ asymmetric waveguide, (b) $L=500\ \mu\text{m}$ symmetric waveguide

5 结 论

综上所述,随着紧凑集成光器件的发展,缩短分支波导的长度对减小 M-Z 电光调制器长度起到关键的作用。为此本文针对有机聚合物脊形波导,对用于 Y 分支波导的非对称正弦弯波导结构进行研究,得出波导长度、外侧平板层宽度与输出功率的变化规律,在弯波导长度小于 $550\ \mu\text{m}$ 的范围内,对其进行优化,选择性能较优又易于加工的结构参数。

研究表明,为了减小分支波导长度,可以采用非对称结构的正弦弯分支波导,只要选择合适的外侧平板宽度,就可以达到较高的输出功率。选用脊宽 $w=4\ \mu\text{m}$,脊高 $0.3\ \mu\text{m}$,分支高度 $h=11\ \mu\text{m}$ 的有机聚合物脊形光波导,仿真结果显示,当分支波导长度 ($L<550\ \mu\text{m}$) 进一步缩短时,其弯波导外侧平板层宽度 s 也应相应减小。考虑到工艺制作的因素,最终得到优化结构参数为 $L=300\ \mu\text{m}$, $s=2\ \mu\text{m}$,此时的相对输出功率为 0.987,其 TM 光场传输情况及输出光场基本与 $L=500\ \mu\text{m}$ 时的对称波导一致。因此,采用非对称结构正弦弯波导取代对称结构正弦弯波导可以缩短波导长度 40%。

参 考 文 献

- 1 Yan Lu, Xiao Zhisong, Zhang Feng *et al.*. Advances of silicon-based integrated photonic devices and applications in optical gyroscope and optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 547~553
燕路,肖志松,张峰等. 硅基光子器件研究进展及其在光陀螺与光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 547~553
- 2 Hong Jianxun, Xu Kai, Zhou Liming *et al.*. Tapers in electro-optic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2686~2691
洪建勋,徐凯,周立明等. 电光聚合物波导中的锥形结构[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2686~2691
- 3 Kong Guangming, E. Shulin, Deng Wenyuan *et al.*. Study on polymer double-ring resonant filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 134~138
孔光明,鄂书林,邓文渊等. 聚合物双环谐振滤波器的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 134~138
- 4 Liao Jinkun, Li Heping, Tang Xiongguo *et al.*. Operator expansion analysis of Mach-Zehnder waveguide in polymeric electro-optic modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1597~1602
廖进昆,李和平,唐雄贵等. 聚合物电光调制器中马赫-曾德尔波导的算子展开法分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1597~1602
- 5 Tang Xiongguo, Liao Jinkun, Li Heping *et al.*. Design and analysis for novel asymmetric Y-branch waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2077~2081
唐雄贵,廖进昆,李和平等. 新型非对称 Y 分支波导设计与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2077~2081

- 6 R. Hu, D. X. Dai, S. L. He. A small polymeric ridge waveguide with a high index contrast[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1964~1968
- 7 Y. Enami, D. Mathine, C. T. DeRose *et al.*. Transversely tapered hybrid electro-optic polymer/sol-gel Mach-Zehnder waveguide modulators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(19): 193508-1~3
- 8 R. K. Navalakhe, N. Dasgupta, B. K. Das. Design of low-loss compact 90° bend optical waveguide for photonic circuit applications in SOI platform [C]. Industrial and Information Systems, 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIS, Kharagpur, INDIA December 8-10: 1~5
- 9 R. K. Navalakhe, N. Dasgupta, B. K. Das. Fabrication and characterization of straight and compact S-bend optical waveguides on a silicon-on-insulator platform [J]. *IEEE J. Appl. Opt.*, 2009, **48**(31): G125~G130
- 10 M. S. Stern. Semivectorial polarized finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles[J]. *IEEE Proc. J. Optoelectron.*, 1988, **135**(1): 56~63
- 11 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
- 12 Liao Jinkun, Tang Xiongui, Lu Rongguo *et al.*. Variational effective index analysis of polymer rib optical waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2267~2271
廖进昆, 唐雄贵, 陆荣国 等. 聚合物脊形光波导的变分有效折射率法分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2267~2271
- 13 G. B. Cao, L. J. Dai, Y. J. Wang. Compact integrated star coupler on silicon-on-insulator[J]. *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2616~2618
- 14 K. T. Koai, P. L. Liu. Modeling of Ti-LiNbO₃ waveguide device part II-S-shaped channel waveguide bends[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7): 1016~1019