

基于非对称脊波导的多种聚合物弯波导性能分析

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 以缩短马赫-曾德尔(M-Z)电光调制器分支波导为目的,将有机聚合物非对称结构的脊波导应用于S弯波导中。采用半矢量有限差分光束传输分析法,系统地分析了不同参数下采用非对称脊波导的三种常见弯波导,即正弦弯、圆弧弯和余弦弯分支波导的 TM_{00} 光场传输损耗,并与采用对称脊波导的结构相比较。研究表明,在芯层厚度 $h=1.5\ \mu\text{m}$ 、脊高为 $0.3\ \mu\text{m}$ 、脊宽 $w=4\ \mu\text{m}$ 、分支高度 $G=11\ \mu\text{m}$ 的情况下,当脊波导短边芯层平板宽度 $s\geq 2\ \mu\text{m}$ 时,在相同传输损耗条件下,正弦弯、圆弧弯和余弦弯分支波导长度分别可减少40%、30%和25%,该结果对有机聚合物M-Z调制器中分支波导的设计具有一定的参考价值。

关键词 集成光学;导波光学;有机聚合物;非对称脊波导;弯波导;半矢量有限差分束传输法

中图分类号 TN252-34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1013001

Analysis on Performances of Several Polymer Bent Waveguide Based on Asymmetric Ridge 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 length of the branch waveguide in Mach-Zehnder (M-Z) electro-optic modulator, the organic polymer ridge waveguide with asymmetric structure is applied in S-bend waveguide. Using the semi-vector finite-difference beam propagation method (FD-BPM), the transition loss of TM_{00} optical field is systematically studied in three conventional bend waveguides, namely sine-bend, arc-bend and cosine-bend, under different parameters, which is compared with the S-bend waveguide using symmetric ridge waveguide structure. The research results show that the lengths of sine, arc and cosine branch waveguides could be reduced by 40%, 30% and 25% respectively in the same transmission loss conditions, when the structure parameters are core height $h=1.5\ \mu\text{m}$, ridge width $w=4\ \mu\text{m}$, branch height $G=11\ \mu\text{m}$ and ridge height is $0.3\ \mu\text{m}$, in the case of short core width $s\geq 2\ \mu\text{m}$. The results will have some reference value to the design of optical waveguide in M-Z modulator.

Key words integrated optics; guided-wave optics; organic polymer; asymmetric ridge waveguide; bend waveguide; semi-vector finite-difference beam propagation method

OCIS codes 130.3120; 130.5460; 230.3120; 230.7370

1 引言

在光器件集成化、小型化得到快速发展的今天,马赫-曾德尔(M-Z)电光调制器作为常用光器件之一,其集成化的研究日益深入^[1]。如何在增加波导损耗的前提下,缩短M-Z器件中影响较大的分支波导长度,成为减小整个器件长度的关键之一。研

究表明,波导材料和结构的选择是实现此目的的关键^[2],而将具有电光系数 γ_{33} 高、半波电压低、易加工等特点的非线性有机聚合物,应用于紧凑型集成光器件已经成为广泛研究的方向,同时各种脊波导结构的研究也日益增多^[3]。

在M-Z电光调制器中,Y分支波导是必不可少

收稿日期: 2012-03-31; 收到修改稿日期: 2012-05-10

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,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,主要从事集成光学理论、光通信技术与器件等方面的研究。

E-mail: xxzhang@uestc.edu.cn

的组件,而采用 S 弯波导则是最常用的方法。常见的 S 弯波导包括余弦弯、正弦弯和圆弧弯,它们的损耗特性是弯波导的主要研究内容之一。研究表明采用埋入型余弦弯和线形弯波导混合的分支波导,其有效折射率调制减小到 26.5% 时仍可实现 -34 dB 的串扰值^[4]。在小功率激光器件中,用弯波导代替直波导能把能量进一步限制到芯层中,极大地降低噪声,且余弦弯的限制能力比正弦弯要强^[5]。由此可以看出,对 S 弯波导的损耗特性开展研究很有应用价值。

本实验中将有有机聚合物应用于 M-Z 电光调制器波导,采用非对称脊波导结构设计 Y 分支波导中的弯分支。前期针对正弦型弯波导的研究表明,在不增加波导损耗的前提下,与采用对称脊波导的正弦型弯分支波导相比缩短长度 40% 左右。因此,有必要对非对称脊波导应用于余弦弯、正弦弯和圆弧弯三种弯波导的情况进行分析和比较。

本文将非对称脊波导结构应用于聚合物 M-Z 电光调制器的三种 Y 分支中的弯波导,采用半矢量有限差分光束传输法(FD-BPM)对其进行仿真分析,并将结果与采用相同结构尺寸对称脊波导的弯波导相比,这对 M-Z 调制器中光波导的设计有一定的参考价值。

2 基本原理

2.1 半矢量有限差分光束传输法

将有限差分方法应用于光束传输法中,所形成的 FD-BPM 是一种广泛用于光波导数值计算的方法。光束传输法的基本思路是:在光束传播方向取一小段步长,首先在光场的初始端给定初始光场以及波导的其他条件,然后计算出该小段下一步长的光场。再用所得到的光场作为初始条件计算出再下一步长的光场分布,依次循环得到整个波导光场的

分布。在求解每一步光场分布时,采用有限差分法可以避免求解复杂的波动方程。考虑到计算量和精度的要求,实验中采用半矢量 FD-BPM 对波导传输光场进行仿真。有限差分法的基本思想是首先由半向量波方程,采用慢变包络近似,利用菲涅耳近似 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$,用半矢量 FD-BPM 进行差分处理,可得到差分方程

$$2j\beta \frac{\partial \phi}{\partial z} = (\alpha_w \phi_{p-1,q} + \alpha_e \phi_{p+1,q} + \alpha_s \phi_{p,q}) + (\alpha_n \phi_{p,q-1} + \alpha_s \phi_{p,q+1} + \alpha_y \phi_{p,q}) + k_0^2 [n^2 - n_{\text{eff}}^2] \phi_{p,q}, \quad (1)$$

然后,再通过求解电场或磁场的特征矩阵获得场的解^[6]。(1)式中 k_0 为真空中传播常数, $\beta = n_{\text{eff}} k_0$ 为等效折射率, ϕ 为慢变包络函数, n 和 n_{eff} 分别为介质折射率和有效折射率, $\alpha_w = \alpha_e = 1/(\Delta x)^2$, $\alpha_n = \alpha_s = 1/(\Delta y)^2$, $\alpha_x = -2/(\Delta x)^2$, $\alpha_y = -2/(\Delta y)^2$, 差分格式为 $x = p\Delta x, y = q\Delta y, z = l\Delta z$ 。

为了降低计算复杂度,差分方程的求解采用交替方向隐式(ADI)方法进行。主要思路是直接将二维的 FD-BPM 公式扩展到三维光波导,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 $z + \Delta z/2 \rightarrow z + \Delta z$,并先后在 x 和 y 方向求解,得到两个可用追赶法求解的二维结构下的差分方程,最后依次用追赶法求解^[7]。

2.2 非对称脊波导结构与光场

实验中所采用的非对称脊波导是指脊波导中脊两边的芯层波导宽度是不相等的,图 1 给出了芯层厚度 $h = 1.5 \mu\text{m}$,脊高 $(H-h) = 0.3 \mu\text{m}$,脊宽 $w = 4 \mu\text{m}$ 时非对称脊波导的基本结构。其中,图 1(a)为短边芯层宽度 $s = 2 \mu\text{m}$ 时的情况;图 1(b)为 $s = 0$ 的情况,此时脊形弯波导的外侧没有平板芯层。

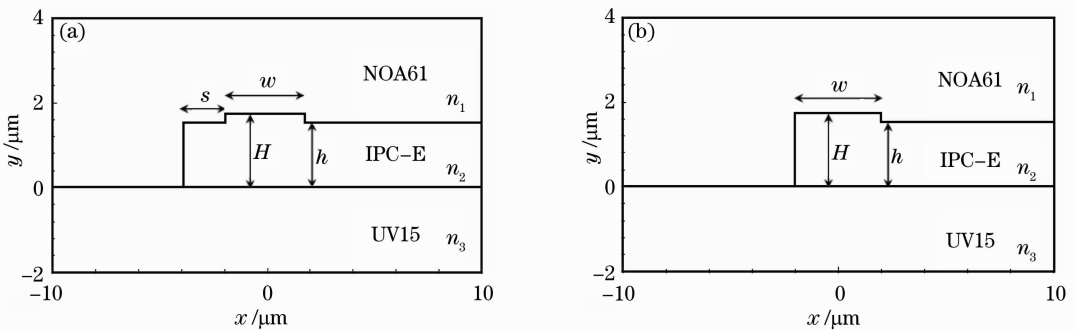


图 1 非对称脊波导结构。(a) $s = 2 \mu\text{m}$; (b) $s = 0$

Fig. 1 Asymmetric ridge waveguide structure. (a) $s = 2 \mu\text{m}$; (b) $s = 0$

本文选用脊波导的上包层材料为紫外固化光学胶 NOA61($n_1 = 1.55, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,下同),下包层为紫外固化光学胶 UV15($n_3 = 1.50$),芯层为沉积有显色团 IPC-E 的 IPC-E/polysulfone($n_2 = 1.67$),如图 1 所示。

根据(1)式,采用 ADI 方法,利用 OptiBPM 中的模解析器,可以计算出图 1 结构下 TM_{00} 模 E_y 分

量的光场分布,如图 2 所示。可以看出,芯层一侧宽度的缩短,不仅使得光场在该侧被压缩,光场更集中,基模中心向芯层完整一侧偏离,而且还使得折射率比增加,该侧辐射损耗减小。由此,可以将芯层短边一侧应用于弯波导的外侧,利用上述两个特点,使基模中心的偏移抵消弯曲引起的重心偏移,达到限制基模泄漏、减小辐射损耗的目的^[8,9]。

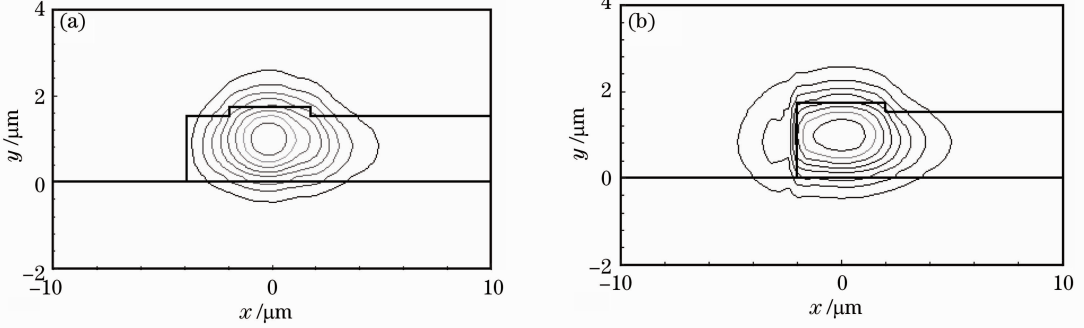


图 2 非对称脊波导 TM_{00} 模 E_y 分量光场。(a) $s = 2 \mu\text{m}$; (b) $s = 0$

Fig. 2 Optical field of asymmetric ridge waveguide with E_y component of TM_{00} mode. (a) $s = 2 \mu\text{m}$; (b) $s = 0$

2.3 单模条件

由于单模传输能够达到减小损耗的目的,因此在波导设计中首先需要考虑单模条件。前期研究显示,在芯层厚度 $h \geq 1.5 \mu\text{m}$ 的情况下,非对称脊波导结构尺寸当脊宽 $w = 4 \mu\text{m}$,脊高 $(H - h) \geq 0.2 \mu\text{m}$ 时,对不同 s 大小均能满足单模条件。当脊高 $(H - h) = 0.3 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m} \leq w \leq 9 \mu\text{m}$ 时,对不同 s 大小也能满足单模条件^[10]。

为脊宽,计算窗口宽度为 $40 \mu\text{m}$,在弯波导两端各有 $20 \mu\text{m}$ 的直波导用以过渡。仿真波长为 $1.55 \mu\text{m}$,初始场为准 TM 单模输入, x 和 y 方向网格点数均为 100。

正弦弯波导表达式为

$$x(z) = \frac{D}{L}z - \frac{D}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{L}z\right), \quad (2)$$

余弦弯波导表达式为

$$x(z) = \frac{D}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{L}z\right) \right], \quad (3)$$

式中 x 和 z 分别为分支波导宽度和长度方向的值, x 坐标的原点为计算窗口宽度方向中点, z 方向原点为弯波导的起始点。

3 弯分支波导结构

图 3 给出了分别采用对称脊波导和非对称脊波导的 Y 分支弯波导结构。在图 3 中, L 为分支波导长度, D 为分支高度(实验中 D 固定为 $11 \mu\text{m}$), w

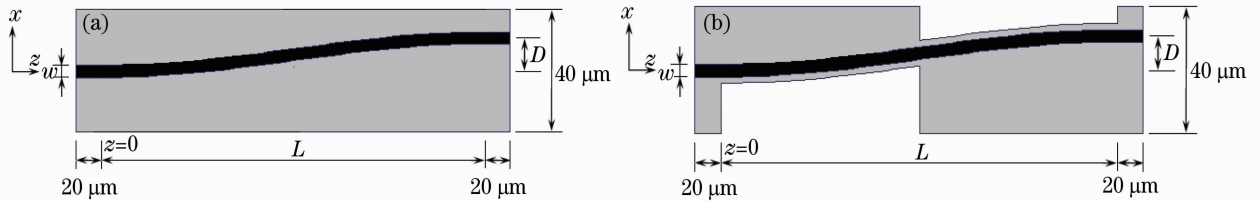


图 3 弯波导结构。(a)对称脊波导; (b)非对称脊波导

Fig. 3 Bend waveguide structure. (a) Symmetrical ridge waveguide; (b) asymmetrical ridge waveguide

4 三种弯波导性能的分析 and 比较

4.1 采用对称脊波导的弯波导

弯波导中由于存在直-弯波导之间和弯-弯波导之间的过渡损耗,以及弯波导的辐射损耗,且弯半径

越小这两种损耗越大,因此,弯波导的损耗随着弯波导长度的减小而增大。图 4 显示了脊高为 $0.3 \mu\text{m}$,脊宽 $w = 4 \mu\text{m}$ 时,三种弯波导 TM_{00} 光场相对输出功率随长度的变化情况。

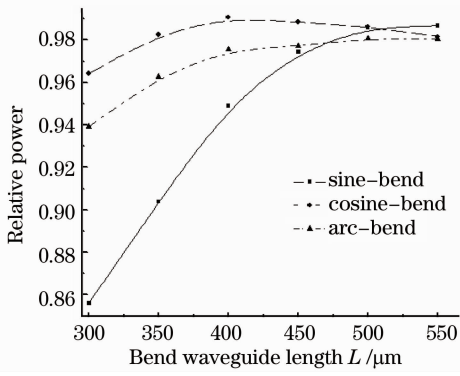


图 4 输出相对功率与弯波导长度 L 关系

Fig. 4 Output relative power versus bend waveguide length L

从图 4 中可以看出,当弯波导长度减小时,正弦弯的损耗增加最大,其次为圆弧弯,最小的为余弦

弯。由(2)式和(3)式可知,余弦弯的曲率与正弦弯相比要稍小。因此,正弦弯随着弯半径的减小,在弯-弯波导过渡和后一个弯-直波导过渡处,曲率半径反转的幅度较大,引起过渡损耗和辐射损耗都有大幅增加,从而导致损耗的急剧增加。而余弦弯在弯-弯和弯-直转换处较为平滑,连续性稍好,其结果是余弦弯在两个连接处的损耗相对都较小,因此当 L 缩短时其损耗增加幅度不大。圆弧弯的损耗则仅集中在后一个弯-直波导的连接处,因此损耗相对于正弦弯有所减弱。图 5 显示了 $L=300 \mu\text{m}$ 时,正弦弯、余弦弯和圆弧弯波导 TM_{00} 光场的场振幅图,该图表示了光场在弯波导中的传输情况。图 5 中光场强度用不同的颜色表示(彩图见电子版),由红色、黄色、绿色到蓝色的逐渐变化,表示场振幅由强逐渐变弱。

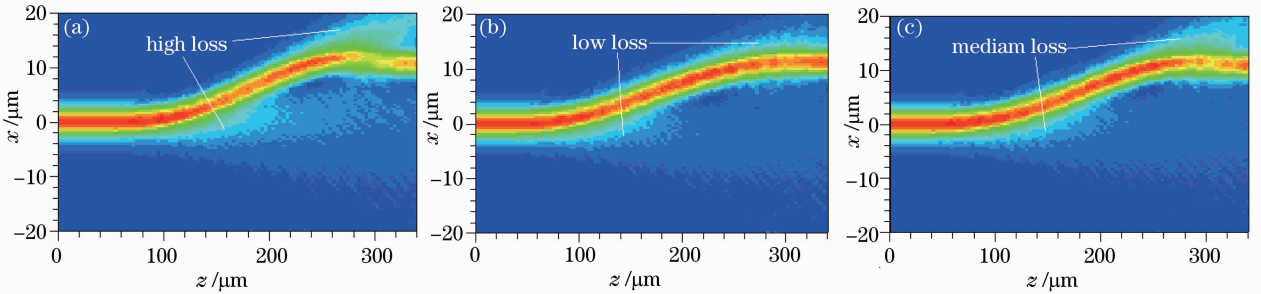


图 5 三种波导传输光场 ($L=300 \mu\text{m}$)。 (a) 正弦弯; (b) 余弦弯; (c) 圆弧弯

Fig. 5 Transmission optical fields of three bend waveguides ($L=300 \mu\text{m}$). (a) Sine-bend; (b) cosine-bend; (c) arc-bend

图 5 中波导向外扩散的绿色区域为模场向波导外辐射的光场,即辐射损耗;而波导弯-直转换处色彩的不连续则是由于过渡损耗所致。可以看出,图 5(a)中正弦弯波导向外辐射的绿色区域最多,表明其传输损耗最大,相对输出功率最低,其值为 0.89;图 5(b)余弦弯向外辐射的绿色区域最小,表明其传输损耗最小,相对输出功率最大,其值为 0.98;图 5(c)圆弧弯居中,相对输出功率为 0.94。

4.2 采用非对称脊波导的弯波导

图 6 给出了在 $L=300 \mu\text{m}$, $w=4 \mu\text{m}$, 脊高为 $0.3 \mu\text{m}$ 时,三种脊波导输出相对功率与 s 的变化曲线。当 $s < 2 \mu\text{m}$ 时,三种脊波导的输出功率都随着 s 的减小急剧下降,这是因为随着 s 的减小,波导的有效折射率也将减小,这将导致有效折射率更加接近基底折射率,引起辐射损耗的增加^[11]。同时,如果 s 太小,基模的光场形状相对于对称波导时的形状改变太多,其重叠积分也将大大地减小^[8]。因此,在设计中应选择 $s \geq 2 \mu\text{m}$ 。

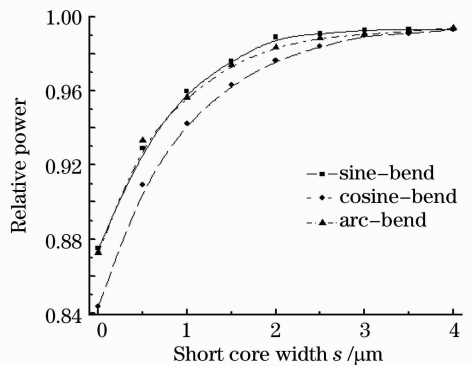


图 6 TM_{00} 光场输出相对功率与短芯层宽度 s 的关系

Fig. 6 TM_{00} optical output relative power versus short core width

非对称脊波导 ($s=2 \mu\text{m}$ 和 $s=3 \mu\text{m}$) 时, TM_{00} 模光场相对输出功率与弯波导长度的变化曲线。其中余弦弯由于在弯的中点前后和后一个弯-直波导的过渡处,曲率半径转换较小,传输性能较好,因此采用非对称脊波导后改善幅度最小。而正弦弯和圆弧弯波导由于非对称脊波导在上述两个连接处对过渡损耗和辐射损耗的抑制作用,使得传输性能有大幅度

图 7 给出了三种不同弯波导,分别采用对称和

的改善。

图 7(a) 和 (b) 为脊高 $(H-h)=0.3 \mu\text{m}$ 、 $w=4 \mu\text{m}$ 情况下, s 分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 时, 相对输出功率随弯波导长度的变化曲线。可以看出在两种情况下, 采用非对称脊波导后, 正弦弯波导可缩短长度 40% 左右, 圆弧弯波导可缩短长度 30% 左右。而对

余弦弯波导来说, 在 $s=2 \mu\text{m}$ 时基本没有大的变化; 在 $s=3 \mu\text{m}$ 时, 能缩短其长度 25% 左右。

图 8 给出了在 $h=1.5 \mu\text{m}$, $s=3 \mu\text{m}$ 的情况下, TM_{00} 模光场相对输出功率分别与脊高和脊宽的变化曲线。

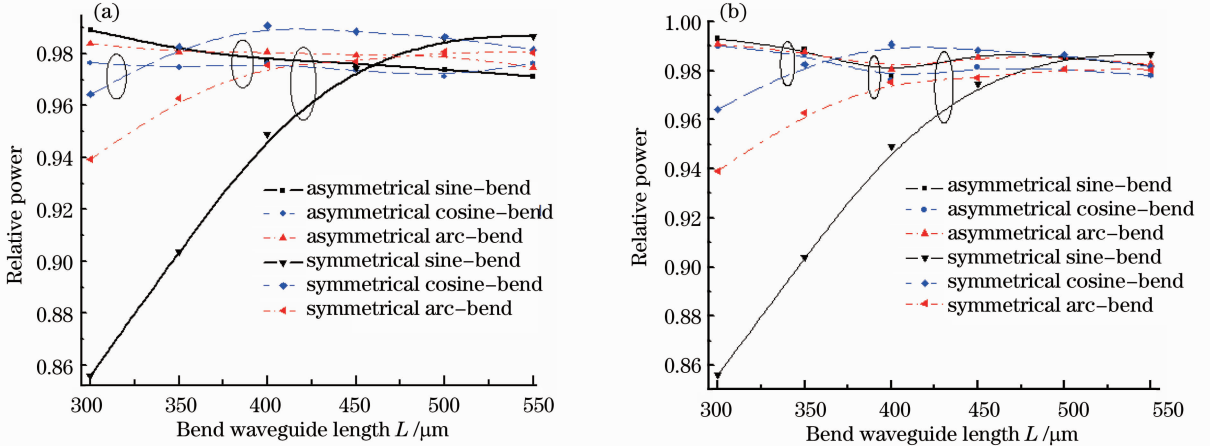


图 7 三种弯波导 TM_{00} 光场输出相对功率比较。(a) $s=2 \mu\text{m}$; (b) $s=3 \mu\text{m}$

Fig. 7 Contrast of TM_{00} optical output relative power of three bend waveguides, (a) $s=2 \mu\text{m}$; (b) $s=3 \mu\text{m}$

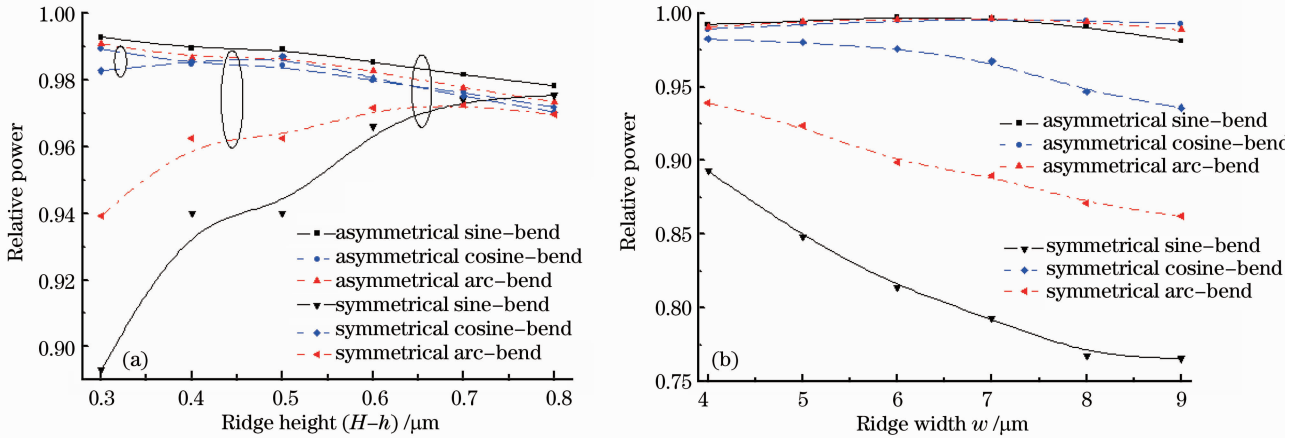


图 8 不同情况下三种弯波导比较。(a) 脊宽 $w=4 \mu\text{m}$; (b) 脊高 $(H-h)=0.3 \mu\text{m}$

Fig. 8 Contrast of three bend waveguides in different conditions. (a) Ridge width $w=4 \mu\text{m}$;

(b) ridge height $(H-h)=0.3 \mu\text{m}$

对采用对称脊波导的弯波导来说, 因为弯波导的纯弯损耗主要由底部泄漏引起, 脊高的变化对此影响不大, 同时脊高的增加能进一步增强脊对光场的限制作用, 所以此时弯波导的损耗随着脊高的增加而减小^[11]。而对采用非对称脊波导的弯波导来说, 弯波导外侧脊波导的不对称性, 其作用相当于芯层的深刻蚀, 该侧面的辐射损耗相对于采用对称脊波导的弯波导要稍大, 因此弯波导辐射损耗会随着脊高的增加略有增加, 整体相对输出功率略有降低, 如图 8(a) 所示。

当脊宽发生变化时, 虽然脊宽的增加能使光场泄漏减小, 过渡损耗减小, 但同时由于场分布相对于波导中心点的峰值偏移增加, 而使得过渡损耗增加^[12], 因此两者作用的结果最终导致脊宽的变化对三种弯波导的损耗影响不大, 如图 8(b) 所示。

图 9 给出了三种采用非对称脊波导的弯波导(彩图见电子版), 当 $L=300 \mu\text{m}$ 时的光场场振幅图。可以看出, 三种弯波导向外辐射的绿色区域都较少, 说明其传输损耗均较小, 与图 5 相比光场的传输有较大改善。此时, 三种 S 弯的相对输出功率均为 0.99。

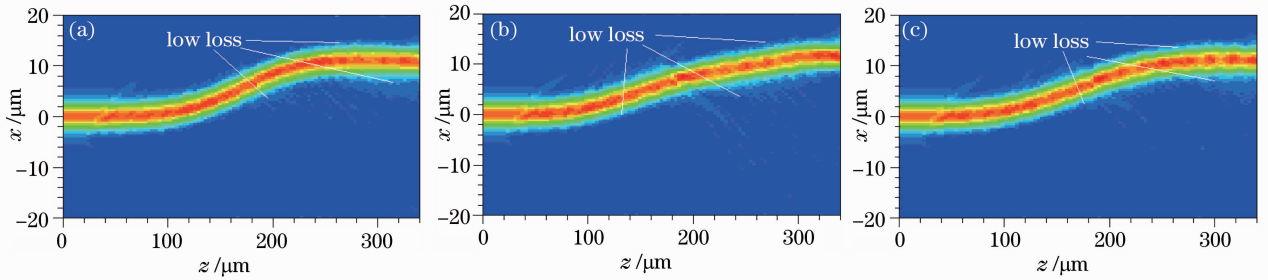


图 9 三种弯波导光场比较($L=300 \mu\text{m}$, $s=3 \mu\text{m}$)。 (a)正弦弯; (b)余弦弯; (c)圆弧弯

Fig.9 Contrast of transmission optical field of three bend waveguides ($L=300 \mu\text{m}$, $s=3 \mu\text{m}$). (a) Sine-bend; (b) cosine-bend; (c) arc-bend

5 结 论

本文将非对称脊波导应用于 M-Z 电光调制器的分支波导,根据所采用的弯波导类型不同,在相同损耗条件下对弯波导长度的缩短程度有所不同。通过采用半矢量 FD-BPM,对其 TM_{00} 光场传输情况进行研究,结果表明,当 $s \geq 2 \mu\text{m}$ 时,对正弦弯波导改善程度最大,可缩短弯波导长度 40%;圆弧弯次之,可缩短弯波导长度 30%;余弦弯最小,可缩短弯波导长度 25%。也就是说,可用 $L=300 \mu\text{m}$ 采用非对称脊波导的正弦和圆弧弯波导,分别代替 $L=500 \mu\text{m}$ 和 $L=420 \mu\text{m}$ 采用对称脊波导的正弦、圆弧弯波导。而当 $s=3 \mu\text{m}$ 时,可用长度 $L=300 \mu\text{m}$ 采用非对称脊波导的余弦弯波导,代替 $L=400 \mu\text{m}$ 的采用对称脊波导的余弦弯波导。此结果对有机聚合物 M-Z 调制器中的分支弯波导设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Yang Yanfang, Xu Kai, He Ying *et al.*. Study of thermal stability of polymer electro-optic modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1483~1486
杨艳芳, 徐 凯, 何 英等. 聚合物电光调制器的热稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1483~1486
- 2 R. Ding, C. J. Tom, W. J. Kim *et al.*. Sub-volt silicon-organic electro-optic modulator with 500 MHz bandwidth [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(8): 1112~1117

- 3 Li Changhong, Tian Huiping, Lu Hui *et al.*. Effect of waveguide basic structure on slow light in photonic crystal coupled resonator optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2108~2115
李长红, 田慧平, 鲁 辉等. 波导基本结构对光子晶体耦合腔光波导慢光特性的影响 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2108~2115
- 4 I. Yulianti, A. S. M. Supa'at, S. M. Idrus. Cosine-bend hybrid junction digital optical switch [C]. International Conference on Photonics in Switching, 2008, 1~8
- 5 V. Varsha, G. Shanbhag, V. Sharm *et al.*. Analysis of non-uniform waveguide in MZI and optimization of the power confinement in the waveguide [C]. IEEE Student Conference on Research and Development (SCORed 2009), 2009, 543~546
- 6 M. S. Stern. Semivectorial polarized finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles [J]. *IEEE Proceedings J. Optoelectronics*, 1988, **135**(1): 56~63
- 7 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
- 8 G. B. Cao, L. J. Dai, Y. J. Wang. Compact integrated star coupler on silicon-on-insulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2616~2618
- 9 R. N. Sheehan, S. Horne, F. H. Peters. The design of low-loss curved waveguide [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2008, **40**(4-5): 1211~1218
- 10 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0813001
高 原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0813001
- 11 Q. Y. Lu, W. H. Guo, D. Byrne *et al.*. Analysis of leaky modes in deep-ridge waveguides using the compact 2D FDTD method [J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(13): 700~701
- 12 Daoxin Dai, Sailing He. Analysis of characteristics of bent rib waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(1): 113~121

栏目编辑: 韩 峰