

# 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析

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** 以有机聚合物非对称脊波导为研究对象,采用半矢量有限差分光束传输法(FD-BPM),系统地分析了不同脊高、脊宽和芯层平板短侧宽度条件下非对称脊形波导的基模截止和单模条件。得出:在芯层高度一定的情况下,基模截止区域和单模区域均随脊高或脊宽的缩小而增大,单模区域随脊形波导芯层平板短侧宽度  $s$  的减小而减小;其尺寸以选择芯层厚度  $h \geq 1.5 \mu\text{m}$ ,脊高  $(H-h) \leq 0.4 \mu\text{m}$ ,脊宽  $4 \mu\text{m} \leq w \leq 8 \mu\text{m}$ ,芯层平板短侧宽度  $s = 2 \mu\text{m}$  为佳。研究表明,非对称脊波导单模条件区域仍能满足实际应用要求。

**关键词** 导波光学;有机聚合物;非对称脊形波导;单模条件;截止条件;半矢量有限差分光束传输法

**中图分类号** TN252.34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0813001

## Analysis of Single-Mode Condition for Organic Polymer 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** The fundamental mode cut-off and single-mode conditions of asymmetric ridge waveguide under different ridge heights, ridge widths and the short side widths of core plate are systematically studied in semi-vector finite-difference beam propagation method (FD-BPM) with organic polymer asymmetric ridge waveguide as the object. The result shows that both fundamental mode cut-off area and single-mode area increase with reduction of ridge height and ridge width while single-mode area decreases with reduction of short side width of core plate at a certain core height. The structure is optimized as core height  $h \geq 1.5 \mu\text{m}$ , ridge height  $(H-h) \leq 0.4 \mu\text{m}$ , ridge width  $4 \mu\text{m} \leq w \leq 8 \mu\text{m}$ , short side width  $s = 2 \mu\text{m}$ . The research shows that the single-mode area of asymmetric ridge waveguide meets requirements of practical application.

**Key words** guided-wave optics; organic polymer; asymmetric ridge waveguide; single mode condition; cut-off condition; semi-vector finite-difference beam propagation method

**OCIS codes** 130.3120; 130.5460; 230.3120; 230.7370

## 1 引 言

集成光器件的高度集成化,促进了紧凑型光器件的发展<sup>[1]</sup>,目前已将非线性有机聚合物波导应用于生物光电制作传感器<sup>[2]</sup>。有机聚合物波导在光陀螺、光通信以及谐振滤波器方面的研究也有一定进展<sup>[3,4]</sup>,同时,其在电光调制器中的应用也得到快速

发展<sup>[5~7]</sup>。电光调制器中弯波导不可或缺。研究如何兼顾弯波导的长度和损耗,对紧凑型电光调制器的设计具有实际意义。研究表明,针对 SOI 圆弧弯波导,可采用非对称脊波导制作圆弧弯波导的方法减小辐射损耗,还可采用在直波导和圆弧弯波导连接处引入横向位移的方法,减小光场的过渡损

收稿日期: 2010-12-02; 收到修改稿日期: 2011-03-06

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,主要从事集成光学理论器件,光通信技术与器件方面的研究。

E-mail: xxzhang@uestc.edu.cn

耗<sup>[8,9]</sup>。

将聚合物非对称脊波导应用于电光调制器的正弦弯分支波导,仿真结果显示,选择合适的脊波导尺寸,能在相同损耗的条件下缩短弯波导长度 40%左右。因此,研究聚合物非对称脊波导极具参考价值。本文以聚合物非对称波导为研究对象,采用半矢量有限差分光束传输法(FD-BPM)对其基模截止条件和单模条件的变化进行分析研究,得出不同脊高、脊宽以及芯层平板短侧宽度情况下,基模截止条件和单模条件的变化规律,为应用非对称脊波导设计聚合物电光调制器提供了一定的指导。

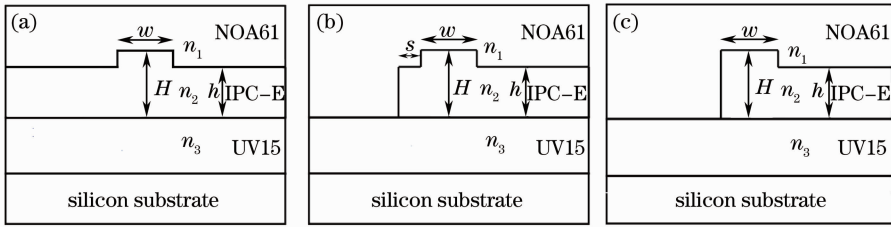


图 1 对称和非对称脊形波导结构。(a)对称结构;(b)非对称结构  $s=2\ \mu\text{m}$ ;(c)非对称结构  $s=0$

Fig. 1 Symmetric and asymmetric rib waveguide structures. (a) Symmetric structure; (b) asymmetric structure  $s=2\ \mu\text{m}$ ; (c) asymmetric structure  $s=0$

## 2.2 非对称脊形波导光场

在上述材料构成的非对称脊形波导中,由于脊两侧芯层的宽度不同,场的横向分布也随之受到影响。图 2 显示了  $h=1.5\ \mu\text{m}$ ,  $H=1.8\ \mu\text{m}$ ,  $w=$

## 2 基本原理

### 2.1 非对称脊形波导结构

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( $n_2=1.67$ )<sup>[10]</sup>,其结构如图 1 所示。图 1(a)为对称脊波导;图 1(b)为非对称脊波导,其两边芯层长度是不相等的,芯层短的一侧其宽度  $s$  很短,一般为几微米;当  $s=0$  时脊形波导的一侧没有平板芯层,如图 1(c)所示。

$4\ \mu\text{m}$ ,脊高  $0.3\ \mu\text{m}$  时采用 OptiBPM 软件模解析器对  $\text{TM}_{00}$  模  $E_y$  分量光场在对称和非对称波导中的横向分布进行仿真的结果。

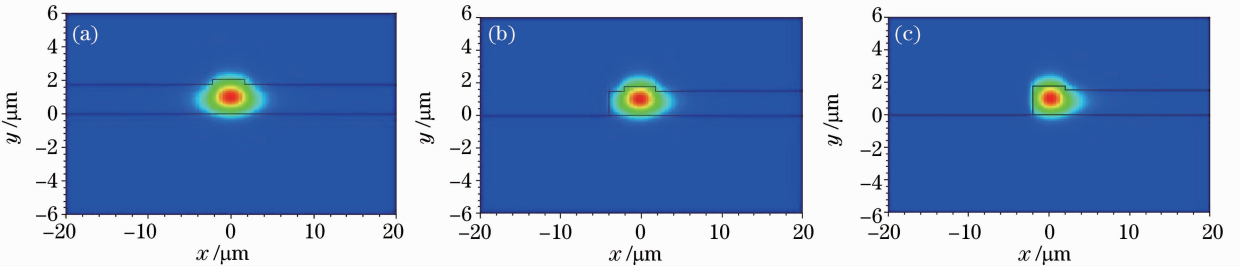


图 2 脊形波导对称和非对称结构  $\text{TM}_{00}$  模  $E_y$  分量光场。(a)对称结构,(b)非对称结构  $s=2\ \mu\text{m}$ ,(c)非对称结构  $s=0$

Fig. 2 Optical fields of symmetric and asymmetric rib waveguide structures,  $E_y$  component,  $\text{TM}_{00}$  mode.

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

从图中可以看出,非对称结构脊形波导的不对称性导致了光场的不对称性,光场基模的中心向芯层完整的一侧偏离,波导平板芯层较短一侧由于芯层的缩短,光场被压缩<sup>[11]</sup>。

### 2.3 仿真方法

采用 OptiBPM 软件模解析器进行仿真,通过改变脊波导结构尺寸,对不同波导结构的模场进行计算,分别得出不能传输基模的波导结构临界点和产生第一个高阶模的波导结构临界点,从而确定基模截止条件和单模条件,并将基模截止条件与通过公

式计算得出的理论值进行比较。

针对各向同性材料,模解析器可根据不同需要,采用标量、半矢量和全矢量 FD-BPM 与交替方向隐式(ADI)法相结合进行分析。考虑到半矢量法既可减少运算量,同时又对计算结果精度影响不大,因此,选择半矢量 FD-BPM 与 ADI 法相结合。该方法的具体思路如下。

首先采用半矢量 FD-BPM 对矢量耦合波方程进行差分处理,得到方程<sup>[12]</sup>:

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

式中  $k_0$  为真空中传播常数,  $\beta = n_{\text{eff}} k_0$  为等效折射率,  $\phi$  为慢变包络函数,  $n$  为介质折射率,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $\alpha_w = \alpha_e = 1/(\Delta x)^2$ ,  $\alpha_n = \alpha_s = 1/(\Delta y)^2$ ,  $\alpha_x = -2/(\Delta x)^2$ ,  $\alpha_y = -2/(\Delta y)^2$ , 差分格式为  $x =$

$$p\Delta x, y = q\Delta y, z = l\Delta z.$$

然后使用 ADI 法, 将三维的 FD-BPM 公式转化为二维公式, 在纵向将一步运算 ( $z \rightarrow z + \Delta z$ ) 分成两步运算 ( $z \rightarrow z + \Delta z/2$  和  $z + \Delta z/2 \rightarrow z + \Delta z$ )。

第一步, 计算由  $z$  到  $z + \Delta z/2$  ( $l \rightarrow l + 1/2$ ), 迭代公式为

$$\begin{aligned} & -\alpha_w^{l+1/2} \phi_{p-1,q}^{l+1/2} + \left[ -\alpha_x^{l+1/2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} - \frac{k_0^2}{2} (n^2 - n_{\text{eff}}^2) \right] \phi_{p,q}^{l+1/2} - \alpha_e^{l+1/2} \phi_{p+1,q}^{l+1/2} = \\ & -\alpha_n^l \phi_{p,q-1}^l + \left[ -\alpha_y^l + \frac{4j\beta}{\Delta z} - \frac{k_0^2}{2} (n^2 - n_{\text{eff}}^2) \right] \phi_{p,q}^l - \alpha_s^l \phi_{p,q+1}^l. \end{aligned} \quad (2)$$

第二步, 计算由  $z + \Delta z/2$  ( $l \rightarrow l + 1/2$ ) 到  $z + \Delta z$  ( $l + 1/2 \rightarrow l + 1$ ), 迭代公式为

$$\begin{aligned} & -\alpha_n^{l+1} \phi_{p,q-1}^{l+1} + \left[ -\alpha_y^{l+1} + \frac{4j\beta}{\Delta z} - \frac{k_0^2}{2} (n^2 - n_{\text{eff}}^2) \right] \phi_{p,q}^{l+1} - \alpha_s^{l+1} \phi_{p,q+1}^{l+1} = \\ & \alpha_w^{l+1/2} \phi_{p-1,q}^{l+1/2} + \left[ \alpha_x^{l+1/2} + \frac{4j\beta}{\Delta z} + \frac{k_0^2}{2} (n^2 - n_{\text{eff}}^2) \right] \phi_{p,q}^{l+1/2} + \alpha_e^{l+1/2} \phi_{p+1,q}^{l+1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

在一定的边界条件下, 给出第  $L$  步的场值, 就可以根据上面迭代公式(2)式和(3)式得出的三对角方程, 求解出第  $L+1$  步的场解。对不同波导结构的模场进行计算, 就可以得到基模截止条件(即不能求解出模场时的波导结构)和单模边界条件(即求解出多模模场存在时的波导结构)。由于使用 ADI 法的半矢量 FD-BPM 充分考虑了光场的偏振依赖性, 因此, 对波导基模截止条件和单模条件进行的仿真计算所得出的结果较为精确<sup>[12]</sup>。

本文所采用的计算参数为: 波导  $40 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$  (宽度  $\times$  高度), 波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 初始场为光纤模场, 采用 Neumann 边界条件, 网格点数  $x, y$  方向均为 100。

## 3 非对称脊形波导单模条件

### 3.1 对称脊波导单模条件

在脊形光波导的设计中, Soref 等<sup>[13]</sup> 针对大截面 SOI 脊型光波导提出单模特性可以通过选择适当的脊宽  $w$ 、内脊高  $H$  和外脊高  $h$  来实现, 且有

$$\frac{w}{H} \leq 0.3 + \frac{h/H}{\sqrt{1 - (h/H)^2}}, \quad (4)$$

$$0.5 \leq \frac{h}{H} < 1. \quad (5)$$

(4), (5) 式是以 SOI 脊波导为模型推导的, 由于 SOI 波导芯层的折射率与其他两层折射率之差相对有机聚合物脊波导要大, 同时它们限定满足关系式  $\frac{H}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \geq 1$  的大横截面脊波导, 且仅适用

于脊的浅刻蚀情况, 即  $\frac{h}{H} \geq 0.5$  的情况, 而有机聚合物脊波导对上述两个条件不能精确满足, 因此应用(4)式和(5)式讨论其单模条件存在一定局限性。为此, 本文针对聚合物材料脊形波导结构, 采用半矢量 FD-BPM 对 TM 基模的截止和单模条件进行仿真计算, 在芯层高度  $h = 1.5 \mu\text{m}$  不变的情况下, 分析 TM 基模截止条件和单模条件随脊宽、脊高以及芯层平板短侧宽度  $s$  的变化情况, 从而得出对设计具有指导意义的结论。

### 3.2 非对称脊波导基模截止条件

在波导设计中首先需要考虑的是基模的截止条件。基模的截止是由于光线不再被封闭于波导层, 部分光能泄漏到衬底中, 从而不能形成基模的传输所导致的。在波长一定时, 脊波导的基模截止条件与脊宽、脊高和芯层厚度有关。图 3 显示了芯层厚度为  $1.5 \mu\text{m}$  时, 对称波导和不同芯层短边宽度  $s$  的非对称波导在不同脊宽和脊高的情况下的基模截止条件, 图中曲线为基模截止边界线, 曲线下部为基模截止区域。

由图 3 可以看出, 对称波导的基模截止条件最低, 非对称波导则随着  $s$  的不断减小, 基模截止条件不断提高, 对同一脊高,  $s$  越小, 基模截止条件对应的脊宽越大。

基模截止的原因是当有效折射率  $n_{\text{eff}}$  接近衬底折射率时, 光线不再被封闭于波导层, 基模的大部分光能泄漏到基底中, 从而导致不能形成基模的传输,

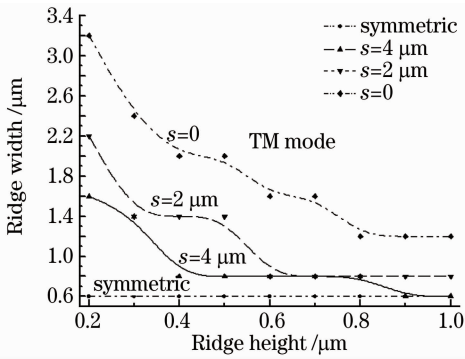


图 3 不同脊高和脊宽时的基模截止条件

Fig. 3 Fundamental mode cut-off condition under different ridge heights and ridge widths

基模被截止。基模的泄漏损耗与有效折射率的大小有关,有效折射率越大泄漏损耗就越小,而影响有效折射率的因素包括芯层厚度、脊高(刻蚀深度)、脊宽以及  $s$  的大小等。

研究表明,脊高或脊宽的增加均使有效折射率增加,泄漏损耗减少,且当脊高达到一定程度后,泄漏损耗降低缓慢并趋于稳定<sup>[14]</sup>。同时仿真也显示,  $s$  的减小引起有效折射率的减小,因此泄漏损耗随  $s$  的减小而增大,基模截止曲线上移。

因此当  $s$  一定时,随着脊高的增加,泄漏损耗减

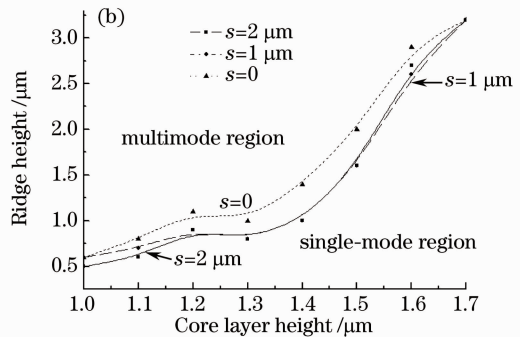
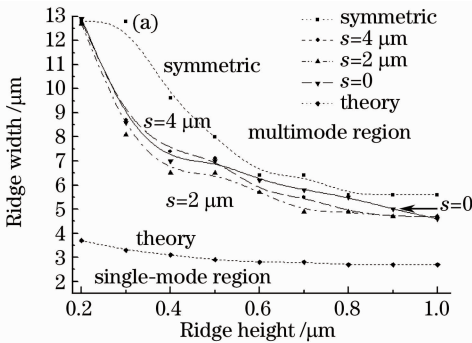


图 4 单模条件变化曲线。(a)芯层高度不变;(b)脊宽不变

Fig. 4 Change curve of single-mode condition. (a) Core height unchanged; (b) ridge width unchanged

图 4(a)是当芯层高度不变时,不同脊宽和脊高在不同  $s$  情况下仿真所得的单模条件曲线,并与(4)式和(5)式导出的单模条件进行比较。结果显示,针对有机聚合物对称脊波导,从(4)式和(5)式计算所得的单模条件与仿真结果相差较大,因此将该两式应用于有机聚合物对称脊波导有较大的偏差。同时,从图中可以看出脊高越小可实现单模的脊宽范围就越宽,因此在设计非对称脊波导的结构尺寸时,应选择较小的脊高。

单模条件的确定与图 3 中基模截止条件有所不同:基模截止边界是根据基模的截止来判定,而单模

少变缓,基模截止边界下移并趋于稳定;同时由于  $s$  越大有效折射率的变化越小,基模截止曲线的变化越接近,因而导致  $s=2 \mu\text{m}$  和  $s=4 \mu\text{m}$  两曲线出现重合点的现象。

由此可知,在  $s$  不变的条件下,脊高越小可实现导模传输的脊宽范围越小。图中显示当  $w \geq 4 \mu\text{m}$ , 脊高大于  $0.2 \mu\text{m}$  时波导均能满足基模传输条件。

### 3.3 非对称脊波导单模条件

波导设计中需考虑的另一个重要条件是单模条件。在脊形光波导中,由于脊形和其他部分波导层厚度在水平方向的不同,将引起较小的折射率差,该折射率差导致脊波导在水平方向只能承载单模传输;而垂直方向由于高阶模泄漏到侧向基模中,也形成单模传输。脊波导中单模传输条件是由第一个高阶模的截止边界条件(高阶模的泄漏损耗)所决定的,它与折射率差相关且取决于脊高、脊宽和芯层高度等参数<sup>[15]</sup>。当脊波导的一侧芯层引入深刻蚀形成非对称脊波导时,由于芯层发生变化,有效折射率也随之变化,此时高阶模损耗将随  $s$  发生变化。

图 4 显示了单/多模边界在不同条件下的变化情况,曲线下部为单模区域,上部为多模区域。

条件边界则是由第一个高阶模(包括  $\text{TM}_{01}$  和  $\text{TM}_{10}$ )的截止(即高阶模的泄漏损耗)来判定<sup>[15]</sup>。由于相同波导结构条件下,模序越高,有效折射率越小,泄漏损耗就越大;同时有效折射率变化的快慢也不同,模序越高变化越慢<sup>[14]</sup>,因此,单模条件随  $s$  变化的曲线较基模截止条件更接近,变化规律也有所不同。

仿真表明,对称波导当脊高较小时,单模条件为包括 2 阶模在内的多阶模的截止边界,因此它的多模泄漏速度较非对称波导要快,导致单模条件曲线上移到非对称波导曲线之上。

另外,非对称脊波导单模条件为  $TM_{01}$  或  $TM_{10}$  模的截止,由于两种模在改变脊高、脊宽、 $s$  等参数时,有效折射率的变化有所差异;同时,对小波导横截面来说由于少数场分量可能会改变有效折射率,必须同时考虑多数场与少数场对有效折射率的共同作用<sup>[16]</sup>。这些原因均导致高阶模泄漏变化规律与基模有所不同,从而引起非对称脊波导的单模条件随  $s$  的变化规律与基模截止条件有所差异,且变化不大。

图 4(b)为脊宽不变时不同脊高、芯层高度所对应的单模条件曲线,可以看出,随着芯层厚度的增加,脊高对单模条件的影响减弱,这是由于芯层厚度增加,高阶模泄漏呈指数减少,相对脊高的影响较大的缘故<sup>[14]</sup>。

图 5 显示了在芯层高  $h=1.6 \mu\text{m}$ 、脊高  $(H-h)=0.4 \mu\text{m}$ 、脊宽  $w=5 \mu\text{m}$  时,  $s=2 \mu\text{m}$  和  $s=0$  两种情况的单模光场。

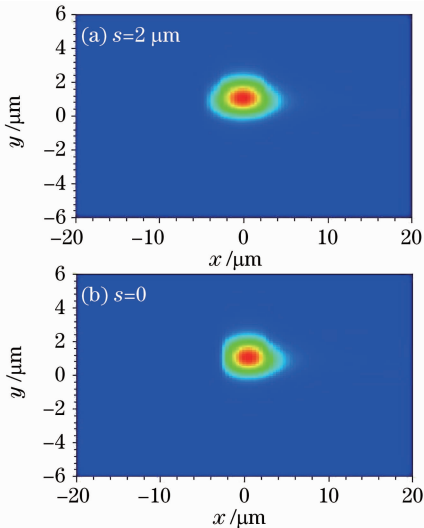


图 5  $TM_{00}$  模  $E_y$  分量光场

Fig. 5  $E_y$  component of  $TM_{00}$  mode

图 6 显示了当芯层厚度  $h=1.5 \mu\text{m}$ 、 $s=2 \mu\text{m}$  时的单模区域。

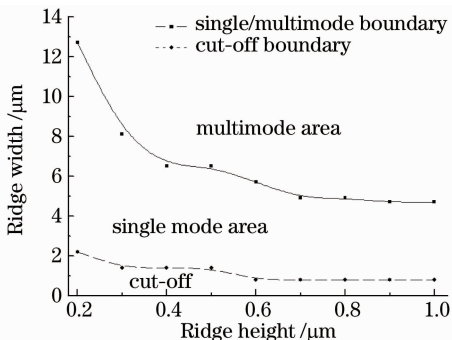


图 6  $s=2 \mu\text{m}$ 、 $h=1.5 \mu\text{m}$  时的单模区域

Fig. 6 Area of single-mode with  $h=1.5 \mu\text{m}$  and  $s=2 \mu\text{m}$

## 4 结 论

针对有机聚合物非对称脊波导的基模截止条件和单模条件进行仿真和研究,得出不同脊高、脊宽和芯层平板短侧宽度情况下的基模截止条件和单模条件。研究表明,在芯层厚度和  $s$  一定时,基模截止区域和单模区域均随脊高或脊宽的缩小而增大;当脊高和脊宽一定时,芯层平板短侧宽度  $s$  越小,基模截止区域越大,单模区域则越小。综合上述因素,非对称脊波导的尺寸以选择脊宽  $4 \mu\text{m} \leq w \leq 8 \mu\text{m}$ ,芯层厚度  $h \geq 1.5 \mu\text{m}$ ,脊高  $(H-h) \leq 0.4 \mu\text{m}$ ,芯层平板短侧宽度  $s=2 \mu\text{m}$  较佳。此结果对有机聚合物非对称脊波导的应用具有参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 B. J. Seo, S. Kim, B. Bortnik *et al.*. Optical signal processor using electro-optic polymer waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3092~3106
- 2 J. Halldorsson, N. B. Arnfinnsdottir, A. B. Jonsdottir *et al.*. High index contrast polymer waveguide platform for integrated biophotonics[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16217~16226
- 3 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
- 4 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,田惠平,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
- 5 Tang Xionggu, 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 Hong Jianxun, Xu Kai, Zhou Limin *et al.*. Tapers in electro-optic polymer waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2686~2691  
洪建勋,徐凯,周立民等.电光聚合物波导中的锥形结构[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2686~2691
- 7 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
- 8 R. K. Navalakhe, N. Dasgupta, B. K. Das. Design of low-loss compact  $90^\circ$  bend optical waveguide for photonic circuit applications in SOI platform [C]. *Industrial and Information Systems, 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIS*, 2008. 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]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(31): G125~G130
- 10 Liao Jinkun, Tang Xionggu, 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
- 11 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
- 12 M. S. Stern. Semivectorial polarized finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles[J]. *IEE Proc. J Optoelectron.*, 1988, **135**(1): 56~63
- 13 R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann. Large single-mode rib waveguides in Ge-Si and Si-on-SiO[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(8): 1971~1974
- 14 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
- 15 R. Hu, D. X. Dai, S. L. He. A small polymeric ridge waveguide with a high index contrast [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1964~1968
- 16 Seong Phun Chan, Ching Eng Png, Soon Thor Lim *et al.*. Single-mode and polarization-independent silicon-on-insulator waveguides with small cross section [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2103~2111