

新型非对称 Y 分支波导设计与分析

唐雄贵 廖进昆 李和平 陆荣国 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 非对称型 Y 分支波导是用于实现分支波导光功率非均分输出的重要单元器件, 在集成光子器件中有广泛应用。基于全内反射原理, 提出了一种新型非对称 Y 分支波导, 通过将左右分支波导相对于输入波导在横向方向上进行偏移以实现特定分束比光输出, 并对其光学特性进行模拟分析。结果表明, 该波导结构不仅能实现任意特定分束比光输出, 在分支角达到 14° 条件下其输出损耗仅为 0.417 dB, 而且偏振依赖性低、工艺制作难度小, 这种新型非对称 Y 分支波导在集成光子器件中具有重要应用意义。

关键词 集成光学; 非对称 Y 分支波导; 全内反射; 低损耗; 大分支角

中图分类号 TN252; TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2077

Design and Analysis for Novel Asymmetric Y-Branch Waveguides

Tang Xiongguai Liao Jinkun Li Heping Lu Rongguo Liu Yongzhi

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

Abstract Asymmetric Y-branch waveguides are important passive components for unequal power splitting, and are widely used in integrated optical circuit. Based on total internal reflection, novel asymmetric Y-branch waveguide is proposed, in which there is little horizontal offset distance between the branch point of the two branch waveguides and the axe of the input waveguide, and the branching ratio can be controlled by changing offset distance. Its optical characteristic is thoroughly investigated by using finite difference beam propagation method (FD-BPM). The simulated results show that arbitrary branching ratio can be realized, and the optical power loss is only 0.417 dB while the branching angle is 14° . This novel asymmetric Y-branch waveguides with low polarization dependence can be easily fabricated, and have more advantages than previously designed ones while being used in integrated optical devices.

Key words integrated optics; asymmetric Y-branch waveguides; total internal reflection; low loss; wide branching angle

1 引言

Y 分支波导是集成光子器件中的重要单元器件之一。根据其几何结构形状不同, Y 分支波导分为对称型与非对称型两种结构。对称型 Y 分支波导是一种将光功率进行均分的单元器件, 人们对此研究较为深入, 已提出多种不同结构以实现大角度、低损耗输出^[1~9], 在波导干涉仪、调制器、模数转换器、光开关、光功分器等有广泛应用; 非对称 Y 分支波导研究处于初级阶段, 这是由于设计与制作的难

度相对较大。非对称 Y 分支波导是一种实现特定分束比光输出的单元器件, 这种单元结构在集成光子器件中实现特定功能方面具有不可替代的作用, 如用来对波导输入光功率的在线检测、用于实现紧凑型 $1 \times N$ 功分器^[10]、用于光子射频相移阵列中以提高器件的线性动态范围和降低射频功率波动^[11]等。非对称 Y 分支波导的特殊功能已引起人们的关注, 设计与制作出高性能的非对称 Y 分支波导对集成光子器件的发展有重要意义。

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(60736038, 60908024)、国家 863 计划(2007AA01Z269)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0805)、国防预研基金(9140A02060807 $\times\times\times$)和电子科技大学青年科技基金资助课题。

作者简介: 唐雄贵(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光波导器件与技术、微光学等方面的研究。

E-mail: tangxg@uestc.edu.cn

H. Sasaki 等提出了直接将左右分支臂分别偏离中心轴线不同角度来实现光功率非均匀输出,该方案虽然设计简单,但光功率输出受分支角度变化敏感,而且光功率输出随分支角增大会发生振荡变化;另外,设计中要求分支角很小,这使得分支波导长度很长,若增大分支角又会导致输出损耗急剧上升^[12]。K. Shirafuji 等针对前述设计结构所存在问题,提出了在分支位置处引入空隙结构,通过控制空隙宽度来改变分支波导中的输出光功率比例,该方法虽然解决前述结构的设计不足,但该方法要求空隙工艺精度高,工艺制作难度大,在实际应用中受到很大限制^[13]。S. Suzuki 等通过将分支臂在横向方向上偏移来改变左右分支波导中的光功率输出分束比,但分束比最高仅为 75.6%,而且对横向精度控制要求高^[14]。Han-Bin Lin 等通过在分支处引入高折射率微棱镜结构来实现非对称光功率输出,该方法由于微棱镜的引入而导致较大的散射损耗,且制作难度较大^[10]。Y. Qian 提出了分支角度为 90° 的非对称 Y 分支结构,但光功率损耗大,而且工艺制作精度要求高^[15]。

本文以低折射率差的单模波导为研究对象,通过对波导结构进行合理设计,利用偏向波导内壁来实现全内反射,提出一种易于制作的新型非对称 Y 分支波导结构,以实现任意分束比光功率输出。

2 结构设计

通常,按制作材料来源分为无机和有机聚合物波导,有机聚合物波导具有诸多优异特性,目前已引起人们的广泛关注。由于它是一种低折射率差光波导,因而其单模波导宽度相对较大(约 $5\sim 8\ \mu\text{m}$),这有利于工艺制作以及波导与光纤的耦合。其波导横截面常为脊形,横截面如图 1(a)所示,其中脊的宽度为 W ,上下包层的折射率分别为 n_1 和 n_3 ,芯层的折射率为 n_2 ,芯层的厚度为 d ,脊高厚度为 h 。对于脊形光波导,由于其截面结构复杂,因而没有严格的解析解,通常用近似方法或数值计算来进行分析计算。为准确、快速获得波导横截面光场分布,采用变分有效折射率法^[16]将波导截面用等效平板波导来替代,如图 1(b)中的 I, II, III 区,对应有效折射率为 N_1, N_2, N_3 ,利用波导本征方程来求解有效折射率;而波导横截面区域中光场分布采用分段函数的叠加来表示,其求解过程这里不再累赘^[16]。由于使用了有效折射率方法,三维光波导在 xz 平面的传输问题转化为二维光波导传输问题,利用束传播法

可快速求解。

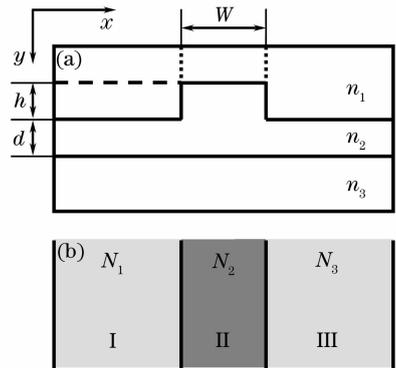


图 1 脊形波导结构(a)和对应有效折射率(b)

Fig. 1 Ridge waveguide structure (a) and corresponding effective refractive index (b)

当光波从光密介质射向光疏介质,且入射角大于全反射临界角时,光波将发射全内反射。基于全内反射原理,设计一种新型的非对称 Y 分支波导结构。首先,根据所选择的芯层、包层材料,确定在工作波长处的相应折射率;然后,确定波导结构参数(包括芯层厚度、宽度以及脊处高度);接着,根据所确定的波导结构参数,计算有效折射率 N_1, N_2, N_3 ;最后,根据所获得的有效折射率,设计出二维波导结构,其结构如图 2 所示。光波在直波导中由 A 向 B 方向传播,进入锥形波导 BC 中,在分支处分为两束光波,由于入射角大于全内反射的临界角,光波在波导 CD 内壁处因发生全内反射而改变传播方向。其波导 DE 偏向角等于波导 CD 偏向角的 2 倍,即 $\theta_2 = 2\theta_1$,使反射后光波波矢方向沿波导 DE 方向。波导 CD 设计成锥形,这可使输出分支波导 DE 宽度与波导 AB 宽度相同。由图 2 可以看出,其 Y 分支波导的分支角为

$$\theta = 2\theta_2 = 4\theta_1. \quad (1)$$

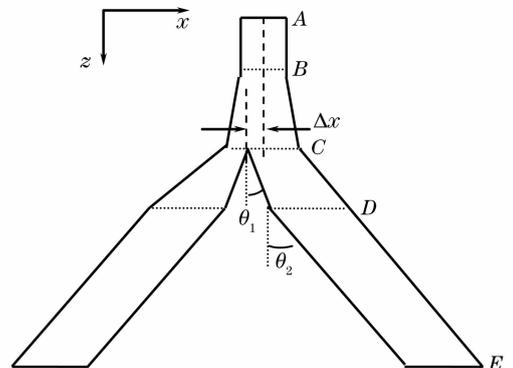


图 2 非对称 Y 分支光波导示意图

Fig. 2 Schematic diagram of asymmetric Y-branch waveguide

波导 CD 的偏向角 θ_1 的大小由有效折射率 N_1 与 N_2 共同决定(折射率对称分布波导 $N_1 = N_3$), 其最大值不能超过 $\theta_{1\max}$, 即

$$\theta_{1\max} = \arccos(N_1/N_2), \quad (2)$$

为使左右分支波导中光功率输出达到所要求的特定分束比, 在设计中应使分支处顶点相对于波导 AB 轴线在横向发生一定偏移 Δx , 使射向左右内侧臂发生全内反射的光功率大小不同, 从而实现非均匀光功率输出。其偏移量大小可根据其光输出分束比来确定, 分束比越大, 偏移量也越大。由设计结构可以看出, 这种新型 Y 分支波导具有结构简单、易于制作等突出优点。当然, 当波导结构设计完成后, 需对其光学特性进行模拟分析, 以验证波导设计是否满足要求。

3 模拟实例

在上面设计过程中, 已将三维波导传输问题转化为二维问题。有限差分光束传播法(FD-BPM)具有算法简便、计算量小的优点, 是用于分析光波导光学特性的最为广泛方法之一。这里采用该方法对所设计波导的光学特性进行模拟分析^[17,18]。以有机聚合物波导为例, 其横截面与平面结构如图 1 和图 2 所示, 上包层为紫外固化环氧 NOA61, 折射率为 $n_1 = 1.55$, 下包层为紫外固化环氧 UV15, 折射率为

$n_3 = 1.50$, 芯层是聚砜中掺入生色团 ICP-E(质量分数为 25%, 美国康宁公司生产)构成, 折射率 $n_2 = 1.67$, 芯层的厚度、宽度以及脊高分别为 $d = 1.0 \mu\text{m}$, $W = 5 \mu\text{m}$, $h = 0.8 \mu\text{m}$, 锥形波导 BC 、 CD 的长度分别为 $l_{BC} = 200 \mu\text{m}$, $l_{CD} = 286 \mu\text{m}$, 锥形波导 BC 下底宽度 $W_0 = 7.5 \mu\text{m}$, 工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 光波场为 TM 模。通过变分有效折射率法计算, 该波导处于单模工作状态, 有效折射率 $N_1 = N_3 = 1.6074$, $N_2 = 1.6399$, 波导 CD 段的最大偏向角 $\theta_{1\max} = 11.4^\circ$ 。首先, 考察左右分支波导光功率输出随偏移量 Δx 的变化关系, 分支角为 2° , 计算结果如图 3(a) 所示(‘▲’和‘■’分别表示左分支与右分支波导光功率输出计算值相对于输入光功率的归一化值, 实线与虚线表示其相应拟合曲线, 后续图中相同), 当分支波导相对于波导 AB 轴线向右移动(Δx 为正值), 右分支波导光输出功率随偏移量的增大而单调降低, 最低值接近零, 而左分支单条增加, 最大值接近 1; 当分支波导相对于波导 AB 轴线向左移动(Δx 为负值), 则左右分支光功率变化与前面相反。由曲线可以看出, 分支波导光输出分束比变化范围大, 可实现任意分束比要求, 且在较大范围内光输出变化与偏移量呈近似线性关系。图 3(b)~图 3(d) 分别表示偏移量 $\Delta x = 0.2 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $2.2 \mu\text{m}$ 时波导中光场传输情况(用灰度表示)。

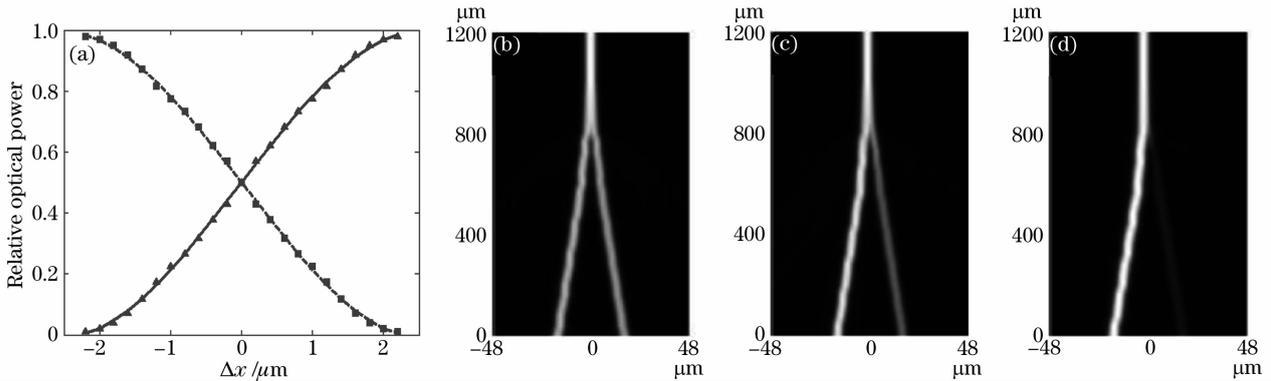


图 3 左右分支光功率输出随偏移量变化关系(a)及偏移量分别为(b) $0.2 \mu\text{m}$, (c) $1.2 \mu\text{m}$, (d) $2.2 \mu\text{m}$ 时波导中光场分布
Fig. 3 Optical power output of branch waveguide with different shifted distance Δx (a), and optical field distribution when shifted distance is (b) $\Delta x = 0.2 \mu\text{m}$, (c) $\Delta x = 1.2 \mu\text{m}$, (d) $\Delta x = 2.2 \mu\text{m}$, respectively

当入射波为 TE 波时, 在其他参数不变条件下, 该波导同样处于单模工作状态, 其有效折射率 $N_1 = N_3 = 1.6134$, $N_2 = 1.6424$, 波导 CD 段的最大偏向角 $\theta_{1\max} = 10.8^\circ$, 这表明最大偏向角在不同偏振光条件下变化很小, 仅为 0.6° 。其左右分支波导光功率输出随偏移量 Δx 的变化关系如图 4 所示, 与图 3(a)

的结果一致。表明上述所设计的波导结构对入射光波的偏振依赖性很小, 这是由于当偏向角 θ_1 小于 TE, TM 波所决定的最大偏向角中的较小者时, 其分束比由分支处顶点的横向偏移大小决定。

在设计制作中, 若分支角偏小, 则分支臂需要足够长, 才能使输出端口分开足够距离, 这不利于工艺

制作和器件尺寸微型化,有效的手段是通过增大分支角的大小来缩短分支臂长度。这里考察分支角变化对左右分支波导光功率输出影响。计算结果如图 5(a)所示,偏移量 $\Delta x = 1.2$,其它参数与图 3 中对应参数相同。当分支角从 2° 增加到 14° 时,左右分支波导光功率输出变化缓慢,且输出损耗增长缓慢[当分支角为 14° 时,其损耗仅为 0.417 dB,如图 5(b)所示],这是由于分束比取决于分支处顶点横向偏移大小,而输出损耗变化是由分支角增大所导致模场失配程度决定,这对于制作大分支角的非对称 Y 分支波导十分有利。

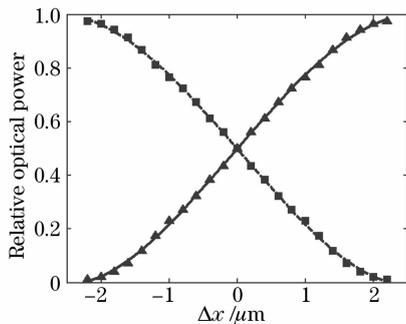


图 4 在 TE 波入射时左右分支光功率输出随偏移量变化关系
Fig. 4 Optical power output of branch waveguide with different Δx , under TE wave

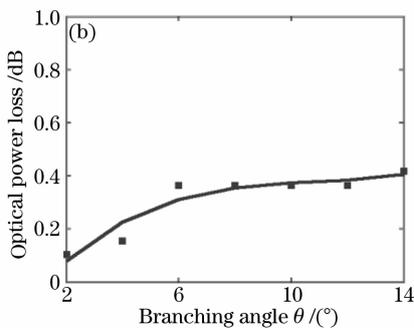
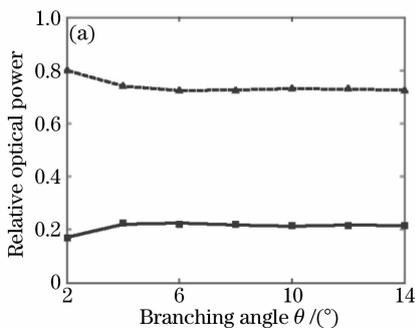


图 5 光功率输出(a)和输出损耗(b)随分支角变化曲线

Fig. 5 Optical power output (a) and optical power loss (b) with different branching angle

由于制作中工艺偏差不可避免,因此需对工艺偏差的影响进行分析。对于分支角,其工艺偏差通常很小(例如,将偏差控制在 0.2° 以内很容易达到)。而由图 5(a)和图 5(b)可知,分支角变化对分支波导光功率输出影响小,因而其工艺偏差所产生的影响可忽略不计。另外,图 2 中的波导 CD 的内侧壁是用于实现全内反射,但由于工艺制作偏差的存在,使得实际长度偏离设计长度(变长或缩短)。设偏移量 $\Delta x = 1.2$,波导 CD 长度变化范围为 $0.8l_{CD} \sim 1.2l_{CD}$,其他参数与图 3 中对应参数相同,其计算结果如图 6(a)所示。由图 6 可以看出,内侧

壁长度偏离设计长度 $\pm 20\%$ 内时,其输出光功率变化很小,即左分支光功率输出略有增加而右分支略有降低,表明内侧壁长度工艺偏差影响小。最后,分支处顶点在工艺制作过程中易被圆化,为便于分析计算,这里假设分支点的尖顶状用平顶状来替代,即尖顶被切掉而变成一个平顶。模拟参数与图 3 中对应参数相同,偏移量 $\Delta x = 1.2$,左右分支波导光输出功率如图 6(b)所示,横坐标表示尖顶被切掉高度,当切掉高度为零时,即为理想情形。由图可以看出,当所切掉高度在 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内,左右分支波导光功率输出影响不大,表明分支处顶点的圆化对光

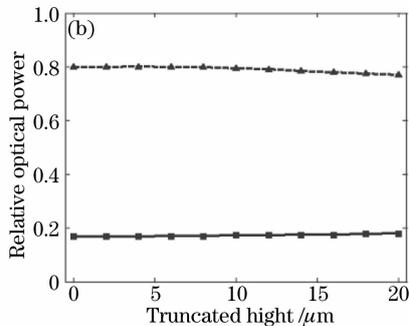
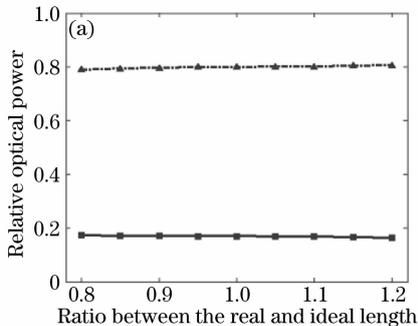


图 6 光功率输出随内侧臂长度(a)和楔形顶部高度(b)变化曲线

Fig. 6 Optical power output with length of waveguide CD (a) and truncated height of wedge (b)

功率分束输出略有影响。这是由于分支处顶点的圆化强弱,影响分支点对光波的散射强弱,从而对左右分支光输出有微弱改变。以上分析表明,该非对称 Y 分支波导的光功率输出分束比主要由分支点的横向偏移大小决定,其分支角,分支臂长偏差以及分支点圆化程度对其影响很小,这对于工艺制作十分有利。另外,由图 6 可以看出,可通过适当增加波导 CD 内侧壁长度来削弱因分支点圆化所引起的光输出变化。

4 结 论

提出了一种新型非对称 Y 分支波导结构,该方法基于全内反射原理,可使分支波导实现大角度、低损耗输出,并通过将分支点相对于输入波导在横向上进行一定偏移,可改变左右分支波导的光功率输出。模拟分析表明,该结构能实现任意特定分束比光输出,在较大范围内光输出变化与偏移量呈近似线性关系,且在分支角达 14° 条件下其输出损耗仅为 0.417 dB。非对称 Y 分支波导具有分束比可任意设计、偏振依赖性低、制作难度低等特点,这在集成光子器件中具有重要应用前景。

参 考 文 献

- 1 Han-Bin Lin, Rei-Shin Cheng, Way-Seen Wang. Wide-angle low-loss single-mode symmetric Y-junctions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **11**(6): 825~827
- 2 Wen-Ching Chang, Han-Bin Lin. A novel low-loss wide-angle Y-branch with a diamond-like micropillar [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 683~685
- 3 Yang Yongjun, Chen Fushen. Novel low-loss wide-angle Y-junctions of optical waveguides with graded-index profiles [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2004, **41**(2): 156~159
- 4 T. Yabu, M. Geshiro, S. Sawa. New design method for low-loss Y-branch waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1376~1384
- 5 K. K. Chung, H. P. Chan, P. L. Chu. A 1×4 polarization and wavelength independent optical power splitter based on a novel

- wide-angle low-loss Y-junction [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 367~372
- 6 S. Y. Lin, E. Chow, J. Bur *et al.*. Low-loss, wide-angle Y splitter at 1.6-mm wavelengths built with a two-dimensional photonic crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1400~1402
- 7 L. Dekkiche, R. Naoum. Improved transmission for photonic crystal Y-junctions [J]. *Electrical Engineering*, 2006, **89**(1): 71~77
- 8 Zhao Huawei, Huang Xuguang, Su Hui. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1649~1652
- 赵华伟,黄旭光,苏 辉. 基于表面等离激元波的新型 Y 分支波导 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1649~1652
- 9 Georgios Veronis, Shanhui Fan. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(13): 131102-1~3
- 10 Han-Bin Lin, Jung-Yong Su, Rei-Shin Cheng *et al.*. Novel optical single-mode asymmetric Y-branches for variable power splitting [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(7): 1092~1096
- 11 Jeehoon Han, Byoung-Joon Seo, Seong-Ku Kim *et al.*. Single-chip integrated electro-optic polymer photonic RF phase shifter array [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12): 3257~3261
- 12 H. Sasaki, Ei-Ichi Shiki, N. Mikoshiba. Propagation characteristics of optical guided waves in asymmetric branching waveguides [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(6): 1051~1057
- 13 K. Shiafuji, S. Kurazono. Transmission characteristics of optical asymmetric Y-junction with a gap region [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(4): 426~429
- 14 S. Suzuki, T. Kitoh, Y. Inoue *et al.*. Integrated optic Y-branching waveguides with an asymmetric branching ratio [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(8): 735~736
- 15 Yusheng Qian, Jiguo Song, Seunghyun Kim *et al.*. Compact 90° trench-based splitter for silicon-on-insulator rib waveguides [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16712~16718
- 16 Liao Jinkun, Tang Xiongguo, Lu Rongguo *et al.*. Variational effective index analysis of polymer ridge 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
- 17 Lu Rongguo, Liu Yongzhi, Liao Jinkun *et al.*. TM mode analysis of polymeric Y-junction waveguide [J]. *Laser J.*, 2007, **28**(1): 14~15
- 陆荣国,刘永智,廖进昆等. 聚合物 Y 分支波导的 TM 分析 [J]. *激光杂志*, 2007, **28**(1): 14~15
- 18 W. P. Huang, C. L. Xu. A wide-angle vector beam propagation method [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(10): 1118~1120