

# 基于非对称圆弧 Y 分叉单元的多模光功率分配器结构设计

李 书 林 巧 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 采用光束传播法(BPM)获取一种全新的基于非对称 Y 分叉单元的多模光功率分配器设计。针对光能量在多模传输波导中分布不均的特点,引入了基于圆弧结构的非对称结构,从而实现了波导中能量的平均分配。通过对各设计参数与输出功率的关联分析,导出了一系列同多模功率分配器结构相关的公式。以此为基础确定了分别对应于  $62.5\ \mu\text{m}$ ,  $120\ \mu\text{m}$  波导宽度的  $1\times 4$ ,  $1\times 8$  多模光功率分配器的结构及具体参数。其器件长度分别为  $7.6\ \text{mm}$ ,  $21.7\ \text{mm}$ 。理论计算表明此两种器件在  $1.31\ \mu\text{m}$  窗口具有极为均匀的分光性,对应的插入损耗为  $6.05\ \text{dB}$  及  $9.06\ \text{dB}$ ,器件的偏振相关损耗大约在  $0.2\ \text{dB}$ 。

**关键词** 光学设计;光功率分配器;集成光器件;组件

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0323005

## Design of Multimode Optical Power Splitter Based on Asymmetric Arc-Shaped Y Branch Unit

Li Shu Lin Qiao Wu Xingkun

(Research Center of Light and Electromagnetic Wave, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Efforts are made to obtain a novel multimode optical power splitter based on asymmetric Y splitter by means of beam propagation method (BPM). As lack of uniformity for multimode light power in waveguides, a special asymmetric Y branch on curves is brought into the structure to reach an evenly divided power output. Relation between splitter parameters and the output power has been analyzed. A series of equations for the splitter structure design are obtained. Both  $1\times 4$  and  $1\times 8$  power splitter designs with a  $62.5\ \mu\text{m}$  and  $120\ \mu\text{m}$  waveguide width respectively are provided with an overall length of  $7.6\ \text{mm}$  and  $21.7\ \text{mm}$ , respectively. The calculation results show that these splitters exhibit an excellent splitting uniformity in  $1.31\ \mu\text{m}$  window. The calculated insertion loss for the two designs are  $6.05\ \text{dB}$  and  $9.06\ \text{dB}$  with the polarization-dependent loss to be  $0.2\ \text{dB}$ .

**Key words** optical design; optical power splitter; integrated optical device; assembly

**OCIS codes** 230.1360; 130.3120; 130.1750

## 1 引 言

作为集成光学光纤到户(FTTH)中的经典器件结构,波导型功率分配器的设计及制作日趋成熟,商业应用也有了较为完善的发展<sup>[1~3]</sup>。该结构目前的制作方式通常都基于光纤熔融以及离子交换等途径<sup>[4,5]</sup>。然而,前述相关研究大多仅限于普通的单模器件<sup>[6,7]</sup>。随着低成本光纤接入(FTTx)线路的开

发,局域网高速数据传输业务(LAN backbones)的发展,以及全光路板间通信为代表的短距离光通信应用<sup>[8]</sup>,多模功率分配器的增加促使该方面研究被提上日程<sup>[9,10]</sup>。

由于多模光源在功率传输模式上具有不确定性<sup>[11]</sup>,使得对其进行光束均匀分配存在一定的难度。在多模传输器件的研究方面,最为常见于已有

收稿日期: 2010-07-05; 收到修改稿日期: 2010-10-08

作者简介: 李 书(1983—),男,博士研究生,主要从事微光学以及应用光器件方面的研究。E-mail: liysue@163.com

导师简介: 吴兴坤(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事集成波导通信器件应用方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

文献的是采用基于自成像原理的多模干涉(MMI)块状形式,并且大多采用完全对称的结构形式<sup>[12]</sup>。本文以目前这种背景为出发点,通过光束传播方法(BPM)研究一种非对称型Y分叉为基本单元的多模光功率分配器的结构设计,以获得功率分配均匀性好,同时又具有小的器件外观尺寸的全新结构设计。

## 2 分配器结构设计

分配器设计的根本目的在于对输入光源进行逐次均匀分配,从而在最终级实现每一端口 $1/2^n$ 输出( $n=1,2,3,\dots$ ),其中 $2^n$ 为分光器件对应的输出端口数目。遵循此原则,采用级联的方式来对分配器结构进行规划。具体设计细节按逐级结构在下列段落进行详细说明。

### 2.1 圆弧Y分叉单元研究分析

Y形分叉结构就是功率分配器的设计中的关键构建单元。与单模器件的要求不同,由于介质中传输功率模式的非均匀分布,使其在面临光束分路时表现出明显的与Y分叉的角度及长度参数的不确定性,直接导致难于对输入光源实现强度均分。传统的Y分叉一般都是以正、余弦曲线为两支的结构要素,本文则采用更为简单的圆弧为结构部件来构造Y形分叉。在BeamProp软件环境之下(系统条件:光源多模,输入功率强度为单位1,波长 $1.31\ \mu\text{m}$ ,介质/背景折射率差为0.025),针对不同的波导宽度下这一结构的功率分配表现进行了计算分析。BeamProp软件工具的算法原理来自于BPM理论,采用有限差分的模型来进行,在分析光的传输强度上有着很高的精确度。

本文的Y形分叉直观示意在图1(a)给出,其中

的要素包含前端直波导k,以及作为两个输出端口的圆弧m,n。该Y分叉结构的决定因素为直波导长度 $L$ ,m,n的半径 $R$ 以及圆心角 $\beta$ 。利用BeamProp里面的参数变量扫描功能,可以了解这些因素对于输出功率的影响(为了简化研究,将前端直波导 $L$ 设定为 $350\ \mu\text{m}$ ,且在计算过程中仅记录左支m的输出功率大小)。这里主要进行了两部分的研究工作:1)圆心角一定(以 $\beta=6^\circ$ 为例),半径值 $R$ 对输出功率的影响,2)当Y形分支圆弧对应半径值一定时(以半径 $R=25\ \text{mm}$ 为例),不同宽度波导条件下,圆心角值 $\beta$ 对输出功率的影响。

以上两部分的计算结果分别在图1(b),(c)中给出。从图1(b)中可以看到,在确定值的圆心角条件下,单支输出功率随着半径值的改变而发生变化,在该图中不难看出,对于不同的波导宽度条件,均存在使单支输出为0.5的半径值,并且随着所用的波导宽度值增大,实现功率均匀分配输出的半径区域越宽,这一现象主要得益于光功率在宽波导中更为分散而趋于均匀化;另一方面当分支圆弧半径值一定时,对各不同宽度波导所作的计算结果进行研究,得到如图1(c)所示的输出曲线,发现圆心角度的变化带来的功率跳动幅度对 $62.5\ \mu\text{m}$ 波导宽度为 $2.3\times 10^{-3}$ , $90\ \mu\text{m}$ 时为 $3.64\times 10^{-3}$ ,而 $120\ \mu\text{m}$ 波导宽度条件下仅为 $1.27\times 10^{-3}$ ,在误差考虑范围之内对功率输出并不会造成影响。针对特定的波导宽度,影响分支输出的主要因素在于圆弧半径,而角度不会对输出造成影响,通过细化扫描步长的方法便能确定获得 $1/2$ 功率输出的圆弧半径值,从而确定一级输出分叉的具体参数。在该条件之下,一级分叉也可视为一个3 dB的多模功率分配器。

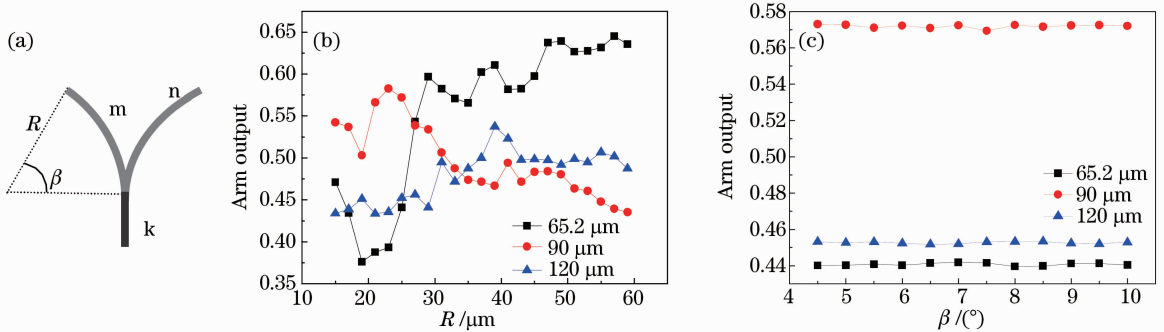


图1 (a)Y分叉基本结构组成,(b)圆心角不变时圆弧半径与左支输出功率关系,  
(c)半径值不变时不同圆心角条件下的左支输出

Fig.1 (a) Structure of Y branch, (b)  $R$  versus left branch output power at a stable central angle,  
(c) left branch output power versus  $\beta$  at a radius  $R$

## 2.2 非对称 Y 分叉研究

在前面一级分叉研究工作的基础上,进行二级的功率再分配。输入功率在第一级分叉进行均分之后,虽然在数值强度上处于相等的状态,但是光能量在单个波导中的分布并不均匀。因此,想要在这个基础之上继续进行均分而获得 1/4 的功率输出,并不能简单地依靠同第一级相似的对称 Y 分叉来实现。在这里拟采用非对称的圆弧分叉来达成次级的功率分配的目标,其基本结构如图 2(a)所示(仅给出分配器左侧部分)。

次级分叉是基于第一级的输出端口的延续部分,以一级输出端口作为其输入端。同样的,此处可以考虑两种情况:1)次级分叉的左侧输出端是基于第一级分叉的左支延续,其半径参数保持不变,而另外的右侧输出端半径值确定,整个结构取决于 Q 的具体位置,2)Q 点的位置以及右支参数确定,整个结构取决于左侧输出端的半径变化。需要提及的是,无论针对哪种情况,Q 为所涉及到三段圆弧的公共切点,且对于左支弧的圆心角,可以自由设定,因为其大小不会影响最终功率输出,仅仅可用于调整最终的输出端口间距,另外右侧输出端的最终走向为竖直方向。

以上面所述的研究内容为基础,便可以进行次级的分叉设计确定。另外还要说明的是经过上一部分的研究,一级分叉的圆弧半径值已经可以被确定(此处针对  $62.5 \mu\text{m}$  选取数值  $25950 \mu\text{m}$ )。在情况 1)当中,为了研究切点 Q 的变化对最终功率输出的影响,选取一组右支半径值 [25 mm, 30 mm, 35 mm],分次扫描角度  $\gamma$  的变化与右支输出的关系,其结果如图 2(b)中所示。从图中可以看出,在所选取的数个右支半径条件下,扫描曲线走向趋势极为一致并且均存在  $\gamma$  值使得输出达到 0.25。针对情况 2),同样的一组右支半径数值 [25 mm, 30 mm, 35 mm]作为计算条件。选取角度  $\gamma=5^\circ$ ,定下 Q 的位置。将左输出支的半径数值设为变量,进行扫描运算,结果曲线如图 2(c)所示。根据所得的结果,可以看出,随着左支半径的不断增大,右支输出功率呈下降趋势,与情况 1)的研究相似的是,对于每次的扫描均存在实现输出为 0.25 的半径数值。从该计算结果分析,可以看出,在所研究的圆弧条件下,只要调整  $m_1, n_1$  的半径值,构造一个非对称的分叉结构单元,即可实现两分支对上一级输出的再次均匀分配,即获得 1/4 功率输出。

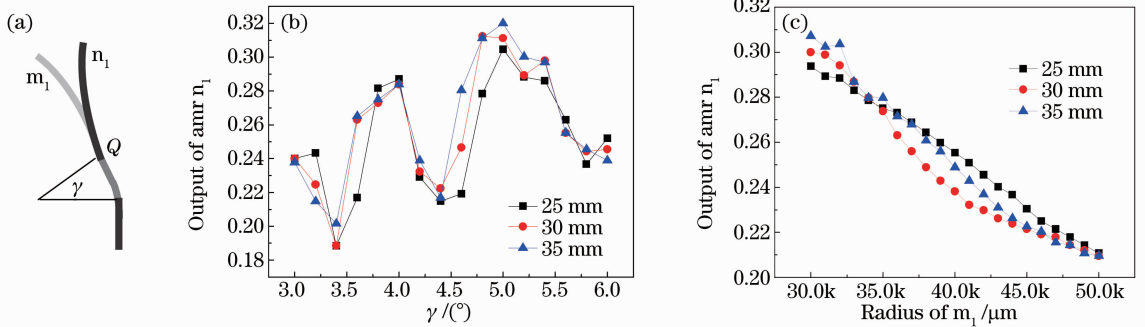


图 2 (a) 基于一级分叉输出的非对称 Y 形结构, (b)  $m_1$  与一级分叉圆弧半径相同以及不同数值的  $n_1$  半径条件下, 切点 Q 变化与  $n_1$  输出的关系, (c)  $\gamma=5^\circ$  以及不同数值的  $n_1$  半径条件,  $m_1$  的半径变化与  $n_1$  输出的关系

Fig. 2 (a) Asymmetric Y structure based on the first branch output, (b) Q position versus  $n_1$  output with  $m_1$  radius being the same as the first branch arm at the situation of several  $n_1$  radius values, (c) radius of  $m_1$  versus  $n_1$  output with  $\gamma=5$  at the situation of several  $n_1$  radius values

## 2.3 分配器结构确定

基于前述部分对于分配器主要结构要素的研究分析,便可以进行整个分配器的设计,从而确定其结构。此处先以  $1 \times 4$  为例,进行结构端口分析。图 3(a)所示为  $1 \times 4$  分配器的结构组分(为了简化,图中仅给出了上半侧)。其中包括了 4 段圆弧波导 ( $a, b, c, d$  与之对应的半径值为  $R_1, R_2, R_3, R_4$ ) 以及分别与  $a, b, d$  相连接的 3 条直线型波导。每段圆弧都与其相邻的圆弧通过相切而连接。设定圆弧  $a$  的

圆心角为  $\theta$ , 圆弧  $c$  对应的圆心角为  $\Delta$ , 则其终止角度为  $\theta + \Delta$ , 而对于  $d$  来说, 其起始角度为  $\theta + \Delta$ , 终止于水平方向。根据图中的几何关系, 可以获得内侧的输出端口中心跨距  $H_2$  可以由

$$H_2 = (R_1 + R_2)(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

来确定。

图 3(b)中给出的是针对  $c, d$  几何关系示意的具体描绘, 通过该关系确定最外侧输出端口与内侧输出端的间距可以表示为

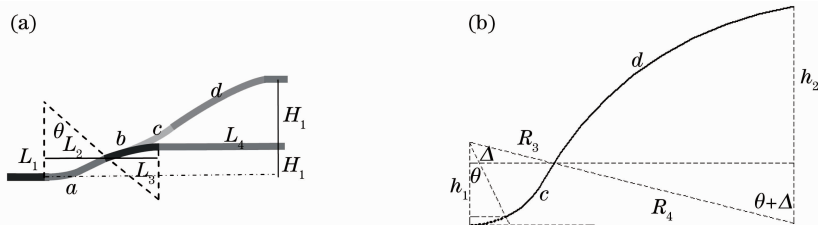


图 3 (a) 1×4 分配器结构组成, (b) 圆弧 c 与 d 的具体几何关系

Fig. 3 (a) Components of 1×4 splitter, (b) geometric relation for c and d

$$H_1 = R_3 [\cos \theta - \cos(\theta + \Delta)] + R_4 [1 - \cos(\theta + \Delta)] - R_2 (1 - \cos \theta). \quad (2)$$

对于一般的分配器应用来说,应该保证其端口间距均匀,于是有  $H_1 = 2H_2$ 。

而整个器件的长度为

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4, \quad (3)$$

该关系式可以进一步表示为

$$L = L_1 + (R_1 + R_2) \sin \theta + L_4. \quad (4)$$

通过上述对分配器基本构件的分析以及归纳,并基于既得的理论条件为依据,具体的器件参数设计便可以实现。

这里以 1×4 器件为代表,其设计的基本思想是,根据某一特定要求的波导宽度以及输出端口间距值,首先确定第一级分叉的圆弧半径参数  $R_1$ ,之后选定一个次级分叉角度  $\theta$ (理论上来说,可以选取任意值,但是出于整体结构考虑,通常选在  $4^\circ \sim 5^\circ$  左右),通过 (1) 式计算得出数值  $R_2$ 。继续在 BeamProp 中进行扫描即可确定  $R_3$  的数值。接下来,挑选任意的  $\Delta$  数值,该数值的前提是不会超出间距要求而使 (2) 式不成立或者无意义 ( $R_4 < 0$ ),于是便可以计算出所需要的最后一段圆弧  $d$  所需要的半径参数及圆心角度。这样分配器的整个结构便可以完全确定。

从设计理念中可以得知,由于中间某些参数的可变性,此方法的结果产物可以有多种情况,也就是说基于该方法的结构设计具有灵活多样性。而对于更多端口数目的分配器 ( $N \geq 3$ ),其基本的设计思路也是如此,同次级分叉的设计原理一样,仅仅需要在次级分叉输出的基础之上进行再次级的输出分析,值得注意的是此时的次级输出端口的中心跨距  $H_1$  数值要根据实际的最终端口间距进行调整,但是前面的关系等式仍然成立。

### 3 分配器具体参数以及单元输出分析

常见于局域网数据通信的光纤直径在  $62.5 \sim 125 \mu\text{m}$ ,针对这一应用需要实现更好的耦合,将主

要研究的波导宽度定在  $62.5 \mu\text{m}$  作为典型(并不局限于这些宽度,也可根据实际的需要选取其他的数值以获得不同数量级的结构)。按照前部分的设计原则,设计了一种波导宽度为  $62.5 \mu\text{m}$ ,输出端口间距为  $400 \mu\text{m}$  的 1×4 多模功率分配器,另外在波导宽度为  $120 \mu\text{m}$ ,输出端口间距同样为  $400 \mu\text{m}$  的条件下对 1×8 分配器结构进行确定,用于对比。

在图 4 中给出了此两种分配器的各组成成分具体参数值。在图中直波导直接用长度标注,单位为毫米,对于圆弧,则给出其半径和圆心角的数值,二者的单位分别为毫米、度。对这两种器件结构的最终输出进行了理论分析,亦在图中给出其示意。由图 4 可以看出,该方法所设计的分配器结构,在功率的均匀分配上,有着十分优良的表现,计算的条件为输入功率为 1 个单位,光源与端口耦合的效率为理想状态,通过与输出端口对应的监视器来获取经过分配后的分支功率大小。由上述方法获得二者的功率分配均匀度的差异性都在 1% 以内,理论的单端口插入损耗的平均值分别为 6.05 dB 以及 9.06 dB,另外通过改变输入光源的偏振模式,可以对输出端口的偏振相关损耗(PDL)进行计算。

根据公式  $l_{\text{PDL}} = \lg(P_{\text{maxc}}/P_{\text{min}})$  可以获取其在 0.2 dB 左右。而在整个单元结构的长度上,前者为 7.6 mm 而后者为 21.7 mm。

对于文中的理论模拟,该软件采用的是 FD-BPM 的算法思想,利用传输波的 Helmholtz 方程来进行细化计算,拥有很高的近似度<sup>[13]</sup>。而本文研究的对象主要包括直线波导以及小角度圆弧波导,简单且典型,其计算分析的精度是可以保证的。

## 4 结 论

本文以多模光功率分配器设计研究为出发点,对圆弧 Y 分叉各结构参数对输出功率的关系进行了细致分析。通过在次级结构加入非对称圆弧分叉来实现对光功率强度的均匀分配输出。采用逐级展开的方式对分配器各部分参数进行了深入研究。综

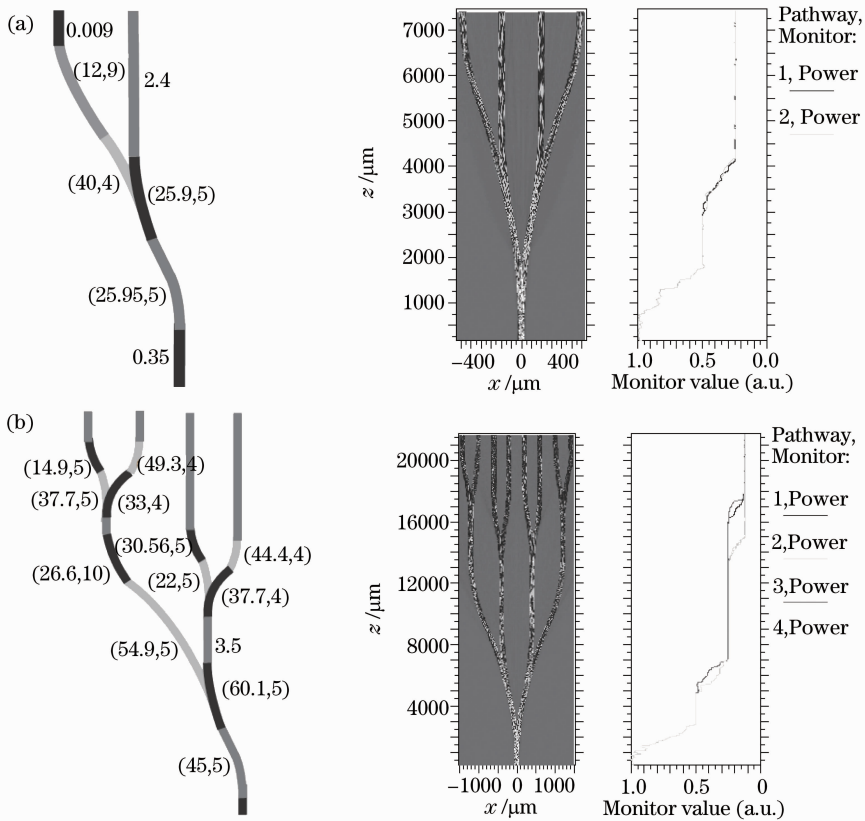


图4 (a)  $1 \times 4$  多模分配器结构及各部分具体参数以及端口功率输出示意, (b)  $1 \times 8$  分配器各部分具体参数以及端口功率输出示意

Fig. 4 (a) Structure of  $1 \times 4$  multimode splitter with detailed parameters and its power output at port, (b) structure of  $1 \times 8$  splitter with detailed parameters and its power output at port

合出了分配器的构成公式,并根据以上的研究基础确定了分别属于不同波导宽度条件下的4端口、8端口多模功率分配器。理论计算表明本文所提出并确定的分配器结构,在对多模光源的功率均匀分配上可获得极为优秀的性能。该研究工作将对多模光功率分配器的设计制作将起到有力的推动作用。

## 参考文献

- 1 G. L. Bona. Integrated optical planar waveguide components[J]. *Microsys. Technol.*, 2003, **9**(5): 291~294
- 2 J. M. Ruano, A. Glidle, A. Cleary. Design and fabrication of a silica on silicon integrated optical biochip as a fluorescence microarray platform[J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2003, **18**(2-3): 175~184
- 3 S. Balslev, B. Bilenberg. Fully integrated optical systems for lab-on-a-chip applications[C]. *SPIE*, 2005, **5730**: 211~217
- 4 Tang Xiongwei, 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
- 5 Luo Wen, Tang Xiongwei, Liao Jinkun. Design and analysis for a novel  $1 \times N$  optical splitter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 95~98

- 6 罗文, 唐雄贵, 廖进昆等. 新型  $1 \times N$  光功率分束器的设计与分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 95~98
- 6 A. K. Das. Laser direct writing polymeric single-mode waveguide devices with a rib structure[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(12): 1236~1243
- 7 M. Olivero, M. Svalgaard. UV-written integrated optical  $1 \times N$  splitters[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14): 162~170
- 8 Ni Wei, Wu Xingkun. Soft-lithography-based inter-chip optical interconnection circuit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 813~818  
倪玮, 吴兴坤. 基于软光刻的片间光学互连线路[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 813~818
- 9 R. Baets, M. J. Goodwin *et al.*. Multimode polymeric Y junctions for star couplers in backplane optical interconnect[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 5091~5096
- 10 D. R. Beltrami, J. D. Love, F. Ladouceur. Multimode planar devices[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1999, **31**(4): 307~326
- 11 Li Shu, Lin Qiao, Wu Xingkun. A novel compact soft-lithography based polymeric multimode power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1062~1066  
李书, 林巧, 吴兴坤. 基于软光刻的高聚物多模光功率分配器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1062~1066
- 12 M. H. Ibrahim, Shuying Lee, N. M. Kassim *et al.*. Multimode interference optical splitter based on photodefinable benzocyclobutene (BCB 4024-40) ... polymer[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(1): 013401(1-4)
- 13 BeamProp User Guide. <http://www.cadfamily.com/download/Optical/Rsoft/beamprop.pdf>