

文章编号: 0253-2239(2008)06-1062-05

# 基于软光刻的高聚物多模光功率分配器

李 书 林 巧 倪 玮 楼 歆 晔 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** 设计并制作了一种紧凑型高聚物光功率分配器,该器件长度比传统器件结构缩短近 1/3,实现了器件的微型化改进。利用设计仿真工具 BeamProp 对器件所需参量进行详细的筛选分析,最终确定了器件结构的具体数值。采用极具优势的软光刻技术印制成功高聚物  $1 \times 8$  光功率分配器,在实际的测量中所得损耗结果与模拟仿真符合较好。该器件很大程度上迎合了通信器件微型化的发展趋势,且所采用的制作工艺具有加工便捷,成型快速,成本低廉等独特优势,使器件的规模生产成为可能。

**关键词** 光通信; 光功率分配器; 软光刻

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## A Novel Compact Soft-Lithography Based Polymeric Multimode Power Splitter

Li Shu Lin Qiao Ni Wei Lou Xinye Wu Xingkun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A novel compact polymeric multimode power splitter was designed and fabricated, with its overall length 30% shorter than the conventional Y-junction splitter. Using the simulation software BeamProp, we have done selective analysis to determine the parameters of the splitter. By using soft-lithography the  $1 \times 8$  polymeric power splitters were prototyped and the measurement was in a good agreement with the calculated result. This splitter caters for the trend of micromation of the optical communication devices and the technology used features unique advantages of fast-easy producing, low-cost fabrication and possible mass-production.

**Key words** optical communication; optical power splitter; soft-lithography

### 1 引 言

光纤通信中的一个重要组成部分——光纤到户技术 (FFTH) 的不断发展,无源光网络 (PON) 的大规模应用,提升了对无源光器件成本以及结构的要求,而高聚物<sup>[1]</sup>光功率分配器作为未来传输网络中的核心器件,已经引起各研究机构越来越多的关注<sup>[2]</sup>。现有的光功率分配器制作方法如熔融光纤或石英波导刻蚀等,所得器件结构单一,体积较长,制作程序复杂,不能有效控制成本,难以实现所需的低成本、大规模工业化生产。在众多的高聚物微光学器件制作方法中,软光刻技术简便快速,易于实现,并且能够有效控制成本,实现批量生产,具有极大的优势<sup>[3]</sup>。在该

技术中较常用的方法是:使用光学透明的硅酮弹性体 (Elastomeric polydimethylsiloxane, PDMS) 的转印用“印章”(Stamps),在此印章上填充光学高聚物,通过光固化或热固化过程可将微结构极为方便地转印至一个光滑表面,采用这种方法可以来“印制”大量、形状相同的微结构零件<sup>[4]</sup>。本文提出了一种新型的光功率分配器结构,与同类型其它的结构相比,具有体积小、显著的特点,使得器件集成化<sup>[5]</sup>成为可能,并且能显著地降低制造成本。

### 2 功率分配器的结构设计

传统光功率分配器采用完全的对称级联结构,不

**收稿日期:** 2007-09-12; **收到修改稿日期:** 2007-12-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(60477019,60577025) 资助课题。

**作者简介:** 李 书 (1983—),男,博士研究生,主要从事微光学以及光器件应用等方面的研究。

E-mail: liysue@163.com

**导师简介:** 吴兴坤 (1961—)男,教授,博导,主要从事集成波导通信器件应用等方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

仅在第一级的 Y 分叉,而且在整个的次级分叉均以标准的上下对称形式来体现,如图 1(a)所示。它由一系列高度分别为  $h, 2h, 4h$  和  $8h$  的弧线组成。上一级分叉的输出波导间距是下一级分叉的两倍,并且每一级 Y 分叉的输出臂和下一级分叉的输入臂均呈水平。器件主体部分长度  $L$  可以由(1)式得到<sup>[6~8]</sup>:

$$L = \sum_{k=1}^n \sqrt{ah_n R_{\min}} = \sqrt{ah R_{\min}} \frac{\sqrt{2^n} - 1}{\sqrt{2} - 1}, \quad (1)$$

式中  $h$  为输出波导间距的二分之一,一般与封装后光纤半径相等; $R_{\min}$  为弯曲波导的最小曲率半径; $N = 2^n$  为输出光波导的数目;对于正弦、余弦和双圆形 Y 分叉结构,系数  $a$  分别等于  $2\pi, \pi^2/2$  和  $4$ <sup>[6~8]</sup>,可以看出,随着输出端口数的增加,器件的长度  $L$  将明显增大;而本文所设计的新型功率分配器则不受此条件的限制,其结构如图 1(b)所示,其中深颜色部分代表统一的 Y 分叉结构,器件整体上仍然采用对称结构,但是与传统结构不同的是,每一级分叉的输出不再保持水平方向,下一级 Y 分叉的输入波导与上一级输出波导平行连接,即两者的切线互相重合。在器件的最下级输出端,用圆弧将波导调整至

水平方向。为使器件的最终输出端与光纤带(fiber ribbon)相匹配,输出波导的间距需与匹配光纤的直径相同。同时,为了保证器件的低插入损耗,结构中所有圆弧的曲率半径均大于一特定的最小弯曲半径。上插图图为新型功率分配器两功能部分的放大图,深色部分为 Y 分叉结构,圆弧波导与之的衔接面用明显的分界线来表示;下插图图为 Y 分叉结构连接圆弧波导,深色的为其中一段圆弧。该圆弧左边相连于 Y 分叉的输出端,右方与下一级 Y 分叉的输入端相接, $x$  为圆弧的横向跨距。在新型的 Y 分叉光功率分配器结构中,由于下一级分叉的输入波导在上一级分叉的输出波导还未恢复至水平位置时就与之相耦合,因此在保持最末级输出波导间距不变的情况下,可以显著减小器件的长度。以  $1 \times 8$  光功率分配器为例,新型器件的典型长度为 10 mm,比传统结构的长度 16mm 缩短了 37%,另外对于  $1 \times 16$  型,传统器件长度为 26 mm,新型器件仅为 19 mm,长度缩短幅度约为 27%。图 1(c)中则对器件中的各个模块进行标注,以供图中各部分结构的参量确定(由于对称性,仅给出上半部分)。

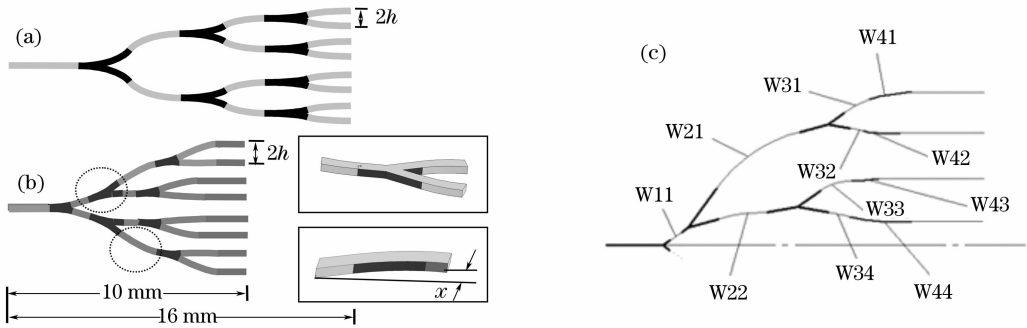


图 1 传统 Y 级联与新型光功率分配器结构比较。(a)传统型的 Y 分叉功率分配器,(b)新型功率分配器结构图,(c)各功能模块的标注

Fig. 1 Schematic of traditional structure (a), and new approach (b), labels of constituent parts of the design (c)

### 3 分配器参量确定

#### 3.1 多模 Y 分叉角度的研究

与单模器件相比,在多模情况下实现对各分支功率的均衡在设计上难度较高。由于传输模式的特殊性,将散模完全限制在波导中要比纯粹的单模光波导存在更多的障碍<sup>[9]</sup>。对器件各结构的具体参量,采用 BeamProp 分别进行设计计算从而确定其数值。

考虑到器件输出端必须与光纤匹配,波导的横截面采用  $62.5 \mu\text{m} \times 62.5 \mu\text{m}$  的规格,介质为阶越型,折射率增量为 0.02,背景折射率设为 1.54,光源

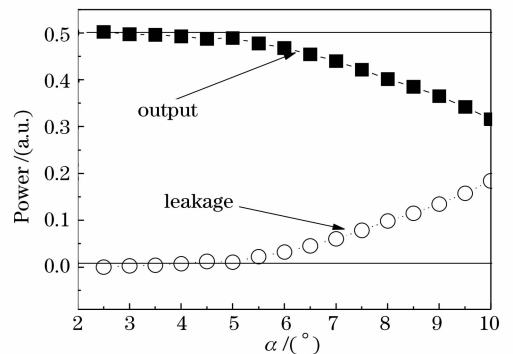


图 2 分叉输出功率/损耗与半分叉角度之间的关系

Fig. 2 Output power and leakage versus half branch angle of the free space wavelength  $1.31 \mu\text{m}$ . Y single branch angle with branch output

输出功率以及泄漏功率的关系曲线如图 2 所示,其中  $\alpha$  为 Y 分叉半角,该变量的扫描范围为  $2^\circ \sim 10^\circ$ ,所取的扫描步长为  $0.5^\circ$ ,图中曲线的总体趋势是:随着 Y 分叉角度的不断增大,输出臂的泄漏功率越来越大,输出功率不断减小;特别在区间  $5^\circ \sim 10^\circ$ ,输出功率随着角度的减小而迅速增大。可以看出较为合适的分叉角度区域为  $5^\circ$  以内,综合考虑损耗大小以及对器件制作的影响等多方面的因素,取  $\alpha = 4^\circ$  的平衡点,此时的波导损耗值为  $0.06 \text{ dB}$ 。

### 3.2 圆弧波导参量

为了使光功率分配器在封装时与光纤带进行耦合,器件的输出端的波导间距应能与光纤带匹配。由于新型器件的设计要求尽可能的缩短分配器长度,同时又要保证一定的输出波导间距,因此需要使用与传统 Y 分叉结构不同的特殊方式,即采用一段或多段圆弧波导来实现不同级之间的连接及跨越调整,最终在末级达到预定的跨距。

对圆弧波导参量的研究分析,主要包括波导半径、圆心角的大小与波导输出功率之间的关系。如图 3 所示为圆弧波导的输出功率同半径的关系曲线,分析前提是不同半径圆弧具有相同的横向跨距  $x = 125 \mu\text{m}$  (普通多模光纤装配半径,在 BeamProp 中设定),并且另一端与长度为  $400 \mu\text{m}$  的直波导切线方向连接。随着半径的增大,输出功率增加并且趋于平缓,由图可知,当  $R < 500 \mu\text{m}$  时,由于圆弧半径过小,插入损耗很大,几乎无功率输出;当  $500 \mu\text{m} < R < 10^4 \mu\text{m}$  时,半径的增加导致功率输出迅速增大,当半径增加至  $10^4 \mu\text{m}$  时,功率传输效率达到  $91.5\%$  ( $-0.38 \text{ dB}$ );随着半径的继续增加,输出功率缓慢地上升,在  $R = 2.5 \times 10^4 \mu\text{m}$  时,插入损耗已非常小,传输率达  $96.7\%$ 。无疑圆弧波导半径越大,其插入损耗就会越小,但是器件内的圆弧连接波

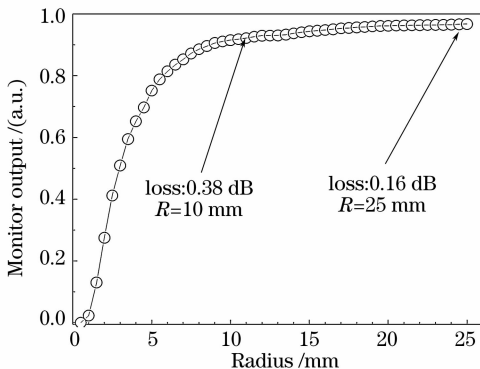


图 3 圆弧波导输出功率与半径的关系曲线

Fig. 3 Radius of the arc as a function of output power

导半径并非越大越好,因为在追求低损耗的同时,要保证尽量小的器件长度,这就要充分考虑到选取适当的圆弧半径和展开角度,从而可以在二者之间作出平衡。在进行参量分析时采用与之前类似的设置,不同的是此时圆心角定为  $20^\circ$ , $x$  则是随着半径的不同而变化的变量。取具有代表性的数个半径值进行仿真,记录下沿波导方向的传输功率,通过所得结果计算出输出功率在某一定值时所对应的圆弧展角。例如,对于半径  $1000 \mu\text{m}$ ,  $3000 \mu\text{m}$ ,  $5000 \mu\text{m}$ ,  $10000 \mu\text{m}$ ,  $20000 \mu\text{m}$ ,  $30000 \mu\text{m}$  以及  $40000 \mu\text{m}$ ,功率传输率为  $90\%$  时对应的圆弧展角分别为  $8.63^\circ$ ,  $5.37^\circ$ ,  $4.59^\circ$ ,  $13.3^\circ$ ,  $16.26^\circ$ ,  $13.69^\circ$  以及  $10.66^\circ$ ,将其连接可得到图 4 所示的等功率线。由图可见:在相等的圆弧展角下,大的圆弧半径更容易积累大的插入损耗,大半径圆弧输出端获得的横向跨距值较大。同时,由图 4 中的等功率线(点线)可见,对于给定的输出端跨距,可找到一个最佳的曲率半径以实现最低插入损耗。

表 1  $1 \times 8$  聚合物光功率分配器参量

Table 1 Parameters for the  $1 \times 8$  polymer splitter

Waveguide	Parameters	Radius	Centreangle	Insert
	$R / \mu\text{m}$	$\theta / (^\circ)$	loss / dB	
W11	1474.9	4	0.132	
W21	40000	2	0.088	
W22	2000	2	0.044	
W31	1500	2	0.065	
W32	1500	2	0.065	
W33	6500	4	0.145	
W34	0	0	0.008	
W41	11935.4	16	0.396	
W42	17716.3	10	0.221	
W43	10688	12	0.314	
W44	0	0	0.008	

基于上述分析方法,调整圆弧半径与圆心角的值来进行大量的参量模拟筛选,最终优化出比较理

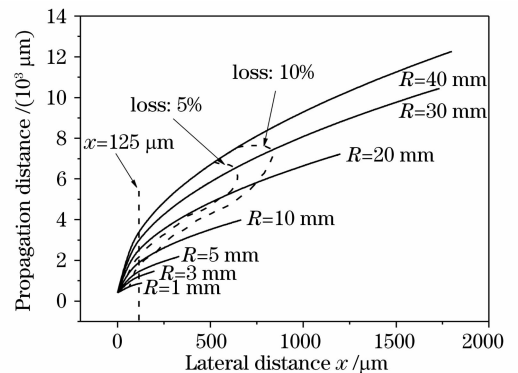


图 4 圆弧波导曲率半径、长度与损耗的关系

Fig. 4 Insertion loss as a function of the arc length and radius

想的参量值,从而达到最低插入损耗和较小的器件尺度,具体的参量在表 1 中列出,器件的总体长度小于 10 mm,相邻输出波导间的间距为 250  $\mu\text{m}$ 。对器件结构进行模拟仿真,得到的损耗分布如图 5(a)中的模拟部分所示,从图中可以直观的看到分配器的 8 个输出分支的功率损耗情况,端口理想状态下的损耗为 9.03 dB,每个输出端口的插入损耗大于该

值的部分即为每个支路上所存在的附加损耗。得到器件的分光均匀性为 1.61 dB,总的附加损耗为 0.65 dB,从模拟结果来看,在 8 路分支中,位于两旁的第 1、2、7、8 路的附加损耗相对较大。在考虑误差的情况下,该结构设计在性能上已基本满足了器件的需要。

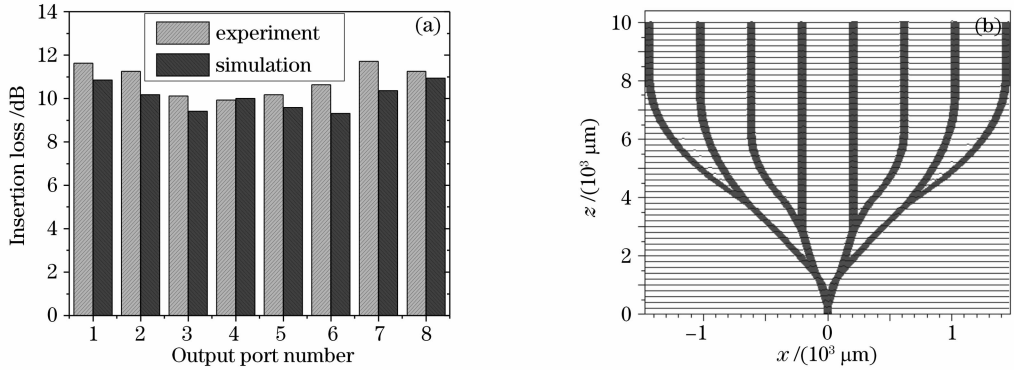


图 5 分配器各分支的实验测量损耗与模拟值对比(a), 光束传输法对分配器的模拟显示(b)

Fig. 5 Experimental loss versus that in simulation of the splitter channels (a) along with the simulation scheme (b)

### 4 制作及实验结果

采用软光刻方法进行器件的制作,首先利用三维精密雕刻机在铝板上刻制母版,其 X、Y、Z 轴的运动定位精度为 0.1  $\mu\text{m}$ 。首先实现的是阴模的制作,而后对其进行模具抛光,用硅酮弹性体(DOW CORNING, Sylgard™ 184)在 60  $^{\circ}\text{C}$  温度下加热固化以低收缩率翻制阳模,重复进行上述步骤,利用 PDMS 阳模精确翻印 PDMS 阴模,之后将 UV 固化树脂通过毛细管成模(MIMIC)工艺填充该模具,将模具覆盖在光学玻璃表面,紫外光固化成形后,将 PDMS 模具剥离,并将成型的高聚物功率分配器从

光学玻璃表面表面剥离,形成自承式(stand-alone)光功率分配器。所得器件实物如图 6(a)所示,而器件的通光效果如图 6(b)所示,可以看出激光经过分配器后从各个分支出射,在端面处形成均匀的亮点光斑。使用光功率计测出各个输出端的功率大小,获得实际的损耗值,并将其与理论模拟所得值进行对比,如图 5 所示,实验中所测得总的器件附加损耗为 1.37 dB,大于理论模拟值 0.65 dB。实验值大于理论值的主要原因在于加工过程当中的附加损耗,要进一步减小附加损耗,需进一步完善制作工艺,提高软光刻翻印母版的表面精度,器件表面的光滑度将很大程度上影响附加损耗的大小。

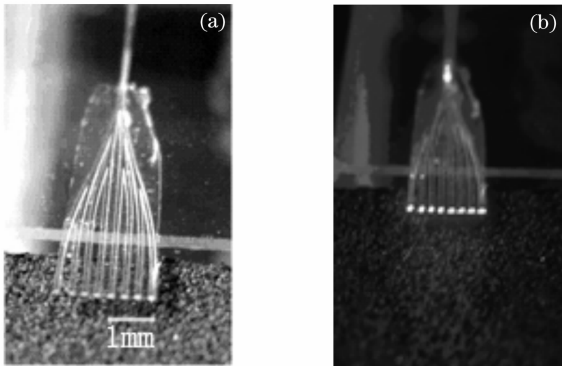


图 6 分配器实物图。(a)软光刻印制的 1×8 高聚物分配器, (b)高聚物分配器通光图

Fig. 6 Actual splitter. (a)1×8 splitter prototype fabricated by soft-lithography (a), 1×8 splitter in operation (b)

### 5 结 论

本文提出了一种结构独特的紧凑型 1×8 多模高聚物光功率分配器结构,通过 BeamProp 软件进行了大量的耦合结构参量分析和筛选工作,确定了器件中各部分波导的构造参量,进一步使用软光刻技术进行器件样机的加工制作,通过实验测量发现器件的实际输出损耗与模拟值基本相符合。实测器件的总附加损耗为 1.37 dB。

该设计较之传统器件的最大优点是所得器件具有更为紧凑的结构,有利于器件的小型化发展;另外采用软光刻这一制造工艺技术,大幅度提高了制作

效率,并且可以显著降低成本,有利于实现器件的大规模生产。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Yongsheng, Xie Zhiguo, Zheng Rongsheng *et al.*. Mode coupling in polymer optical fiber and its enhancement to transmission bandwidth[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1234~1238  
张永生,谢志国,郑荣升等. 聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1234~1238
- 2 Chin Lung Chen, Fuhua Jen. Fabrication of polymer splitter by micro hot embossing technique[J]. *Tamkang J. Science and Engineering*, 2004, **7**(1): 5~9
- 3 Junhao Wu, Jing Wu, Junfeng Bao *et al.*. Soft-lithography-based optical interconnection with high misalignment tolerance [J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(16): 6259~6267
- 4 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
- 5 Yanyi Huang, George T. Paloczi, Jacob Scheuer *et al.*. Soft lithography replication of polymeric microring optical resonator [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(20): 2452~2457
- 6 Yasuhiro Hida, Yasuyuki Inoue, Fumiaki Hanawa *et al.*. Silica-based  $1 \times 32$  splitter integrated with 32 WDM couplers using multilayers dielectric filters for fiber line testing at  $1.65 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(1): 96~98
- 7 Shanying Lu, Xihua Li, Xiaqing Jiang *et al.*. Compact design of  $1 \times 16$  cascaded Y-branch splitter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 459~461
- 8 Hiroshi Sasaki, Iain Anderson. Theoretical and experimental studies on active Y-junctions in optical waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(11): 883~892
- 9 R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla *et al.*. Numerical techniques for modeling guided-wave photonics devices[J]. *IEEE J. Selected Topics on Quantum Electronics*, 2000, **6**(1): 150~162
- 10 Y. Hida, T. Fukumitsu, F. Hanawa *et al.*. Highly compact silica based PLC-type  $1 \times 32$  splitters using  $127 \mu\text{m}$ -spacing output and  $0.4\%-\Delta$  waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1): 75~76