

文章编号: 0253-2239(2010)11-3221-06

激光直写非对称多模高聚物光功率分配器

李 书¹ 诸葛群碧² 林 巧¹ 吴兴坤¹

(¹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)

²Department of Physics, Mcgil University, Canada

摘要 设计并制作了一种基于激光直写工艺的多模高聚物 1×8 光功率分配器。该器件采用了独特的次级非对称结构实现了光功率在各个输出端口的均匀分配。借助紫外激光直写的方式,配合高精度平移台实现了器件的加工,并将整个分配器的制作过程控制在 5 min 以内,从而在加工周期上颇具优势。对所得的分配器进行了性能测试,实验结果表明,端口输出光功率最大均匀度差异小于 4%,证明了器件具有较为理想的分光性能。提出的激光直写法结构加工无需掩模或离子蚀刻等复杂加工手段,有助于大幅度提高制造效率并能够有效地控制器件性能。

关键词 激光直写;非对称;高聚物;功率分配器

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103011.3221

Multimode Polymeric Optical Power Splitter Based on an Asymmetrical Structure Using Laser Direct Writing

Li Shu¹ Zhuge Qunbi² Lin Qiao¹ Wu Xingkun¹

(¹Centre for Optical Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China
²Department of Physics, Mcgil University, Canada)

Abstract A 1×8 power splitter made of UV curable optical epoxy was proposed and fabricated. A novel asymmetrical structure was utilized in power splitting scheme to enable a uniform distribution of energy among all branches. By the use of laser direct writing process and high precision translation stages, the prototyping process was completed within a short fabrication phase of 5 min. Power splitting test was made and power from output ports were analyzed. The splitter has a nearly-equal output for all channels except for one with a 4% fluctuation. The asymmetric design and mask-less fabrication make it possible to realize an effective and high-yield production of this device.

Key words laser direct writing; asymmetrical; polymer; power splitter

1 引 言

集成光学的飞速发展及其在实际应用中不断扩展,使该方向的研究成为近年的热点。综观十年来光电器件的发展,从光通信器件到微型光学芯片等都已见证集成光学举足轻重的影响。其中,高聚物集成光学器件以其低廉的成本和可批量化的生产特性备受瞩目。作为光纤到户(FTTH)光通信领域中重要的部件,多模功率分配器一度受到很多的关注^[1~3],多模功率分配器中功率的均匀分配,相比单

模功率分配器^[4],在设计制作实现上更具难度;其主要原因是接入器件的光模式功率分布通常是非均匀的,进入多模功率分配器后首先必须通过一段直波导或弯折波导进行充分的模式混合(Mode scrambling),之后再借助分叉实现功率分配。但实际情况是受波导折射率差的限制,模式混合至一定程度后无法进一步均匀化,从而不能很好地实现功率均分。为克服这一缺点,必须在结构上进行大幅度的改革。李书等^[5],采用软光刻方法实现器件的

收稿日期: 2010-01-21; 收到修改稿日期: 2010-04-06

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等方面的研究。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

制作,但该工艺对模板的要求非常高,前期模板制作过程较为复杂。随着芯片化短距离光通信的发展和研究的进一步开展,特别是随着 LOC (Lab-on-a-chip) 理念的兴起^[6],如何在基板上直接生成器件,并快速有效地缩短此类光学元器件的加工周期从而大大提高加工生产效率已成为当前的一个重要研究方向。本文详细报告该器件在这两方面的研究结果:1)通过采用非对称分叉的新型结构克服上述模式混合的限制;2)使用激光直写这一新工艺来获得设计结构的灵活性,并进一步提高效率。

2 结构设计

传统型的光功率分配器一般都借助正弦或余弦曲线作为其结构的基本组成部分,并且每一级都是完全对称的形式。在进行分配器结构设计中采用圆弧分叉来替代传统的直线型 Y 分叉作为基本构件的方式^[7,8],并且在传统结构的基础之上,针对模式混合需要,尝试引入次级分叉的不对称性来实现整个器件的构造。

2.1 直线与圆弧分叉研究

对于直线型 Y 分叉,输出端口之间的夹角将决定输出功率的损耗大小以及均匀与否。另外一方

面,由两对称圆弧所构成的分叉,其整体结构由圆弧半径以及所对应的圆心角所决定。借助光束传播法 (BPM),分别对这两类不同结构进行了功率特性计算比较[此处采用平板 (Slab) 模式光源进行计算分析,设定光源输入功率为 1 mW]。分析结果如图 1 所示。图 1(a)表示分叉角度为 α 的直线型分叉,而图 1(b)则描绘了由半径为 r ,对应中心角为 β 的两段圆弧所组成的弧线型分叉。图 1(c)所表示的是不同波导尺寸条件下角度 $\alpha/2$ 同输出功率之间的关系曲线,可以看到,对于不同宽度条件的波导, $\alpha/2$ 的数值在区间 $[2^\circ, 8^\circ]$,分叉输出端功率随着夹角的增大而下降,仅当 $\alpha/2 \approx 3^\circ$ 左右时,功率损耗才算理想;图 1(d)~(f)中展示了在不同 β 角度($3^\circ, 6^\circ, 8^\circ$)条件下分别用波导宽度(50, 60, 90 和 130 μm)对不同 r 进行数值计算的结果(仅研究其中一支的功率输出),可以看出,所取波导宽度条件下,圆弧角度的变化在很大范围内对输出端的功率影响并不明显,这就与直线 Y 分叉形成了明显的对比,由于分叉对圆弧角度的要求不高,只要选取适当的圆弧半径,就能够获得功率的均匀输出,这就使得设计制作的外在条件更加自由宽松,制作更为便捷简单。

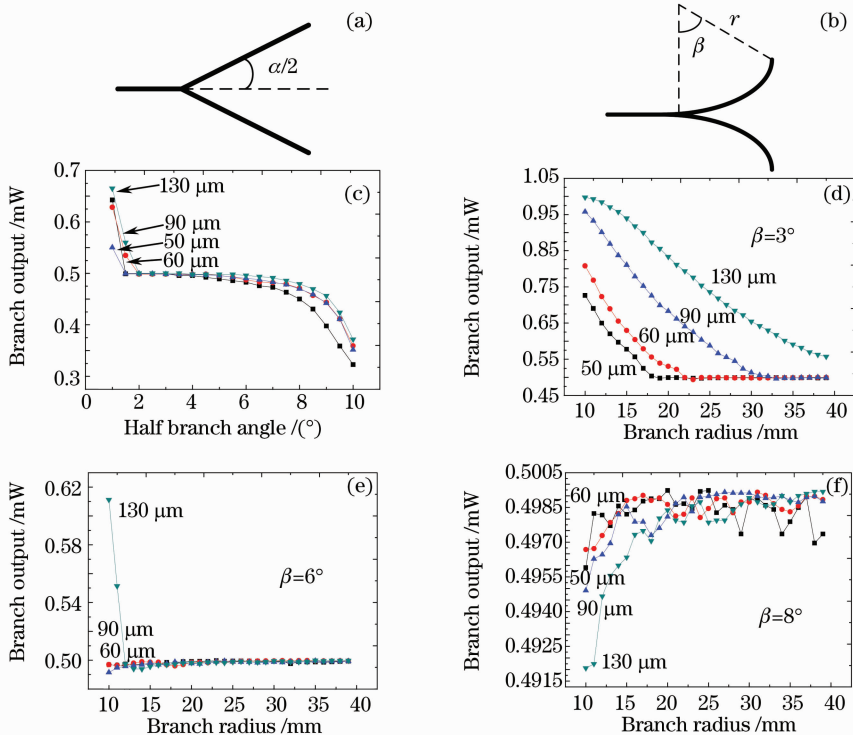


图 1 直线 Y 分叉与圆弧分叉在不同角度条件下的功率输出分析对比

Fig. 1 Power outputs comparison for Y branches by straight and curving lines under different angle

2.2 次级圆弧分叉计算及分析

整个分配器的结构要求在首次分叉之后继续进行功率均分,因此必须在一级圆弧分叉的基础上再扩展形成下一级分叉的构造。实际测量表明,此时在“主干道”中的光强密度分布仍然是中间强,周边低,其原因是受折射角度小及器件长度的限制无法获得完全均匀的分布。一个最为有效的解决方案是放弃传统的 Y 对称结构,而采用非对称的后级分叉。如图 2 所示(仅以左侧进行分析考虑),采用与上一级输出边相外切的一段新圆弧来实现功率的再分配。对于具体确定的圆弧半径条件来进行理论计

算(第一级圆弧半径为 45 mm,新增切线半径为 31.5 mm),得到新增切弧的输出功率曲线。从计算的结果可以看出,切点 Q 在圆弧上位置变化将直接影响到输出功率的均匀度。结果体现了这样一个规律:对应于确定半径值的新增圆弧,当切点不断上移(即所对应的圆弧中心角 γ 越大),光功率在两端口输出的分配上出现一定的反复波动,对于不同的波导宽度,输出功率的变化趋势一致。由此计算结果可以推断,对于确定规格的波导宽度,可调节各圆弧半径、中心角取值来获得使功率均匀输出要求的切点。

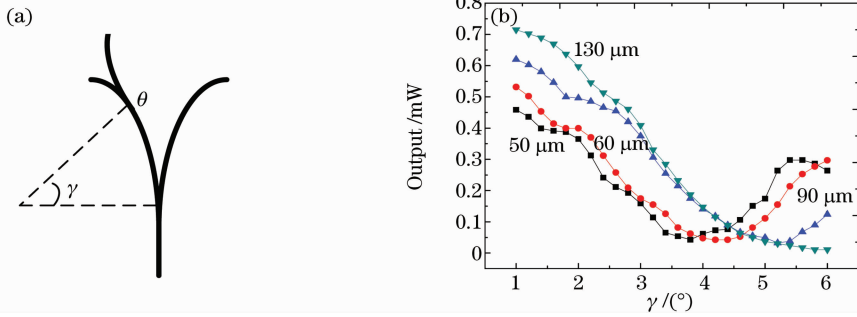


图 2 (a)次级圆弧分叉切点示意图,(b)对不同的波导参数条件下切点角度模拟计算对比结果

Fig.2 (a) Tangential point of secondary branch by curving line, (b) calculation results of tangential point angle under different waveguide width

2.3 末级分叉结构输出研究

以 1×8 分配器为例对末级分叉结构进行描述,但整个设计理念不限于 1×8 结构。末级分叉结构的输出将直接决定最终的功率输出均匀度。而对于

整个分配器的结构,最外侧的两个输出设计可以参考次级圆弧分叉的分析方法。需要考虑的重点是次级输出为直波导时的情况,由直波导再引入圆弧分叉而实现功率均分。具体的结构成分如图 3(a)所

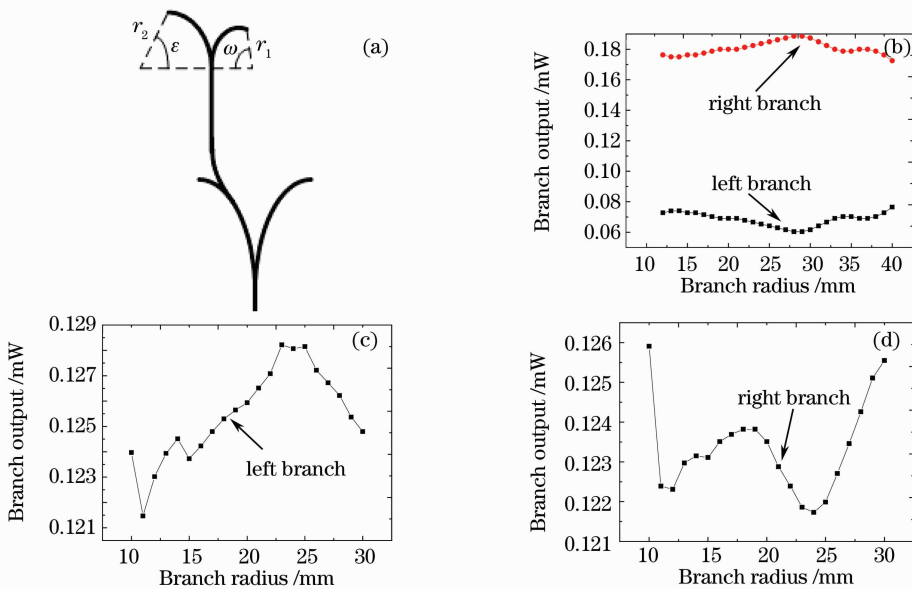


图 3 (a)末级分叉结构波导输出示意图,(b)对称结构条件下结果曲线,(c)(d)非对称结构时较大半径端输出

Fig.3 (a) Scheme output from the waveguide of the last branch, (b) output as a function of branch radius in the case of symmetrical configuration, (c) (d) outputs of the larger arms as a function of curve radius for asymmetric configuration

示。在前述分析计算的基础之上,研究了对称以及非对称情况下的端口最终输出并比较,其具体表现如图 3(b)~(d)所示。图 3(b)表示的是两输出端采用 $\omega=\epsilon=4^\circ$ 的完全对称性圆弧结构时的输出情况,而在图 3(c)和(d)中则分别表示 $\omega=4^\circ, \epsilon=5^\circ$ 以及 $\omega=5^\circ, \epsilon=4^\circ$ 时弧心角较大分支的输出计算。由分析结果可见,由于次级输出直波导中的功率分布特殊性,对称结构不能实现均分,要使得其后的分叉端口均匀输出,必需根据这一分析综合考虑设置两分支的参数,建立非对称结构。

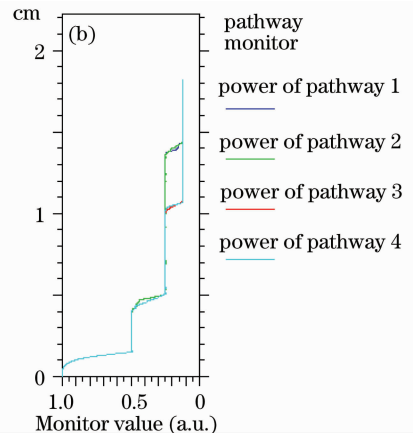
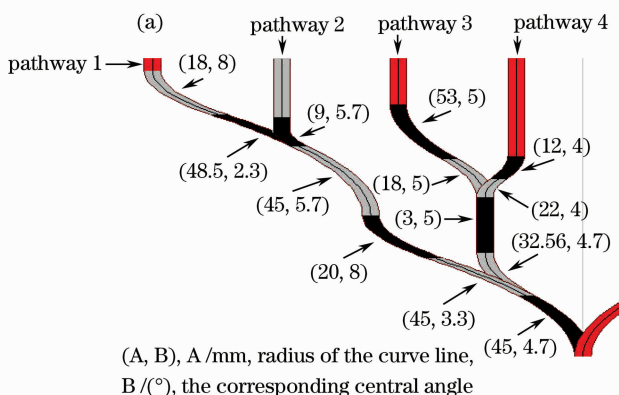


图 4 (a)最终确定的非对称分配器及(b)相对应的理论输出

Fig. 4 (a) Parameter scheme for the asymmetrical splitter and (b) the numerical output

3 光功率分配器制作

3.1 激光直写

激光直写^[9,10]作为一门微加工技术,近年来在高聚物波导结构制造研究中得到较大关注。其基本原理在于采用激光照射而对感光材料的折射率进行选择改变,从而获得各种波导结构^[11,12],包括平面光通信器件和传感单元等。借助该方式,在一般情况下器件成型快速,可以极大地提高制作效率,并且可以有效控制成本。本文正是基于缩短周期的考虑,尝试采用无掩模的 UV 激光直写方式,来获取前面部分所确定的分配器结构。

3.2 激光直写系统

借助于 PI 公司(Physik Instrumente)的二维高精度平移台,构建进行直写的装置系统。具体的结构示意如图 5 所示。主体部分为沿 X,Y 两个方向移动的平移台,其具体行动受控于连接的 PC 并且位移精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。平移台的上方放置高度可调的直写激光光源($\lambda=408 \text{ nm}$,最大功率控制为 20 mW),光源下方安放用于调节光斑大小的显微物镜。

2.4 整体器件结构确定

基于前面所描述的一系列分析,对分配器波导结构特征进行综合考虑,继而可以确定分配器各个部分的具体结构参数。图 4 所示为 1×8 光功率分配器(仅给出左侧的具体组分,其中折射率设定为 1.475,波导宽度为 $50 \mu\text{m}$),各个构成组分的参数在图中给予了标示。可以直观的看出,基于本设计所确定下来的分配器结构,在分叉处均用到了圆弧结构。对输入光功率输出的计算结果也在图中给出,其理论计算端口输出功率均匀性非常好,且损耗小,非对称整体结构对功率的分配,起到了良好的调节作用。

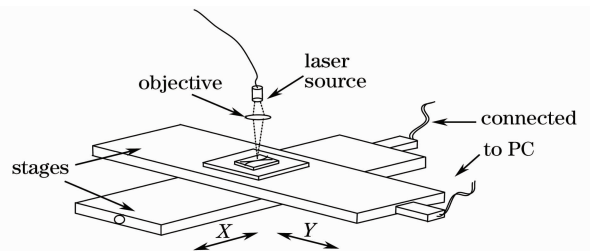


图 5 基于高精度平移台的激光直写装置

Fig. 5 High-precision translation stages for laser direct writing

3.3 激光直写过程

直写采用生物盖玻片作为基板,首先通过化学清洗对其表面进行彻底清洁,并对其进行烘干以备用。将 UV 固化光学高聚物(UV-curable polyurethane acrylate prepolymer DSM Desotech)涂覆到玻片表面,经匀胶处理使其厚度控制在 $50 \mu\text{m}$ 左右。接下来将制作好的样品玻片置于平移台上的载物基表面,此时可以开始进行直写。在 PC 内的控制程序中设定平台运行参数,对于直波导部分,采用恒定的 $200 \mu\text{m/s}$ 匀速;而对于弧形波导,仅仅采用匀速来刻写将导致

波导线条的不平滑,因而需采用变速运动方式,可以通过在控制程序中设定相关的加减速系数来实现。

在分配器直写过程中,调节光源与会聚透镜,使得光斑直径大小在 $70\sim 80\ \mu\text{m}$,配合平台的移动以及控制激光光源的开闭获得所需结构。由于直写样品的特性以及所用光源功率参数,对其经过一次照射就可以将感光胶固化。在直写步骤结束后,取下样品板,利用有机溶剂(甲醇)清除没有固化的光学胶清除来实现显影。此阶段处理之后,为了确保已经成形的波导结构固化充分,将其放入功率为 $5\ \text{W}$ 的紫外灯箱进行强照射处理,时间控制在 $1\sim 2\ \text{min}$ 左右。该步骤之后,波导结构已经充分固化。经过

这一后续处理之器件的折射率稳定在 1.475 ,前述整个制作过程耗时为 $5\ \text{min}$ 左右。通过直写方式制作获得的 1×8 光功率分配器如图 6(a)所示。整个器件的长度仅为 $1.9\ \text{cm}$,这就与文献[2]中的所获得的器件相比,集成化的优势甚为明显。近距离拍摄观察所获得输出端口,如图 6(b)所示,同时在图中给出了端口局部在显微镜下的放大示意,如图 6(c)所示,从放大图可以看到,波导的整体排列较为理想,特别是对光学性能有直接影响的顶、侧面的表面质量相当好。图 6(d)则给出了分配器的 Y 分叉放大情况。

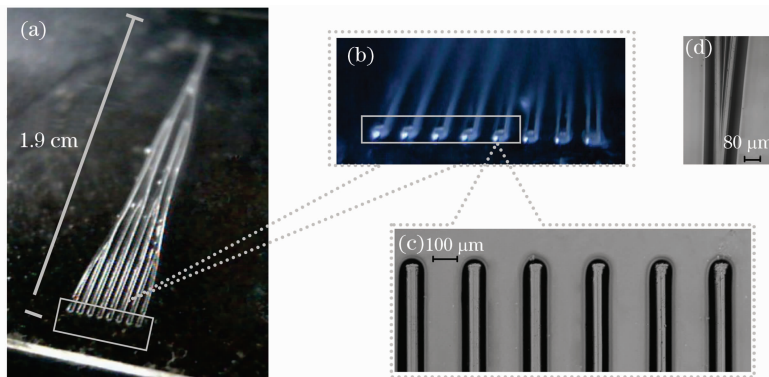


图 6 激光直写所获得的 1×8 光功率分配器。(a) 器件整体视图, (b) 端口近距离拍摄图, (c) 端口局部放大图示, (d) Y 分叉显微拍摄视图

Fig. 6 1×8 light power splitter by laser direct writing. (a) overview of the whole device, (b) a close-up view of the output ports, (c) enlarged top-view of terminal ports, (d) Y branch area viewed under microscope

4 分配器实际通光效果

将获得的功率分配器从玻片上揭下,并对输出以及输入端口进行切平齐处理。采用普通光纤将输入光源耦合至分配器,端口实际输出效果如图 7(a)所示,其中图 7(b)为分配器各个端口输出光功率均匀性对比(图中所示数值仅用于表示相对的大小,而非含有量纲的数值),可以直观的看出文中所制作

的功率分配器除了个别端口的输出光强存在一定的过强或偏弱情况外,总体来说在分光均匀性上表现十分良好。功率相差最大的两端口其均匀差异结果约为 4% ,其他的端口输出均匀度均在 1% 以内。器件端口的插入损耗在 $11.5\ \text{dB}$ 左右,而总附加损耗则在 $1.5\sim 2\ \text{dB}$ 之间。测量过程中用到多模光纤进行耦合匹配,此处产生的附加损耗主要源于加工过

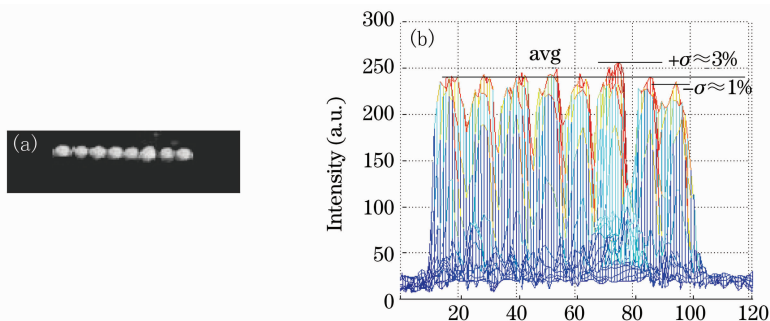


图 7 (a) 分配器端口面通光示意图, (b) 端口输出光功率排列分布

Fig. 7 (a) End-view of light output from the splitter port, (b) light power distribution from the port

程带来的器件结构偏差。缺陷产生的原因主要在于直写过程中微气泡、尘埃粒子和胶层厚度变化三个因素,使得各输出波导的参数不能达到绝对的一致。进一步改善直写时的外部条件并进行 UV 环氧树脂实施真空去气泡等工艺,可提高波导器件质量。

5 结 论

设计了一种基于圆弧分叉非对称新型结构的 1×8 多模光功率分配器,利用非对称的圆弧分支来实现光功率的均匀分配。详细介绍了该设计所依靠的基于 BPM 理论分析计算,并通过激光直写的方法制作出了该分配器样品。对所得的分配器进行透光实验获取并分析了端口输出功率分布情况,证明了本设计制作方法所获得的新型分配器具有较好的分光效果。采用级次非对称分叉的方法在理论和实践上对多模光功率分配器设计上均为一次突破,使得分配器的设计变得灵活,同时无掩模的激光直写加工使其制作变得十分便捷,极大地缩短了成型周期,提高了效率,并且较某些其他方式更具集成化优势。

参 考 文 献

- 1 Z. Zhou, D. Liu. 1×4 buried optical power splitter fabricated by $Tl^{\pm} Na^+$ ion-exchange[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 651~652
- 2 G. Yang, G. Zhao, B. Ren *et al.*. Multimode-waveguide-based optical power splitters in glass[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(8): 2912~2914
- 3 Lu Shanying, Li Xia, Li Xihua *et al.*. Design of 1×32 optical power splitters in glass by $K^+ - Na^+$ ion exchange[J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 2005, **16**(11): 1297~1300
卢山鹰, 李霞, 李锡华等. $K^+ - Na^+$ 离子交换 1×32 光功分

- 器的设计[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(11): 1297~1300
- 4 Luo Wen, Tang Xionggui, Liao Jinkun *et al.*. Design and analysis for a novel $1 \times N$ optical power splitter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 95~98
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**(s2): 95~98
- 5 Li Shu, Lin Qiao *et al.*. A novel compact soft-lithography based polymeric multimode power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1062~1066
李书, 林巧等. 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
- 6 S. Balslev, B. Bilenberg. Fully integrated optical systems for lab-on-a-chip applications[C]. *SPIE*, 2005, **5730**: 211~217
- 7 Tang Xionggui, 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
- 8 Dong Miao, Tang Xionggui, Nuermaiti *et al.*. Design and analysis for wide-angle low-loss Y-branch waveguides with graded-index profiles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 97~100
董淼, 唐雄贵等. 努尔买买提等大角度、低损耗渐变折射率型 Y 分支波导设计与分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 97~100
- 9 Li Fengyou, Xie Yongjun, Sun Qiang *et al.*. Analyzing of line profile for laser direct writing lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 136~139
李凤有, 谢永军, 孙强等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 136~139
- 10 I. Hardy, P. Grosso *et al.*. Fabrication of polymer waveguides and spot size converters by UV induced refractive index modification[C]. *SPIE*, 2005, **5825**: 290~299
- 11 Alok K. Das. Laser direct writing polymeric single-mode waveguide devices with a rib structure[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1236~1243
- 12 Qi Heng, Wang Xiansong, Chen Tao *et al.*. Fabrication and application of PMMA continuous-flow PCR microfluidic chip with CO_2 laser direct-writing ablation micromachining technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **36**(5): 1239~1245
祁恒, 王贤松, 陈涛等. PMMA 基连续流式 PCR 微流控芯片的 CO_2 激光直写加工与应用[J]. *中国激光*, 2008, **36**(5): 1239~1245