

文章编号: 1001-3806(2013)05-0582-05

玻璃基离子交换型宽带 2×2 3dB 耦合器研究

张 文, 杨建义, 王明华*

(浙江大学 信息与电子工程学系 微电子与光电子研究所, 杭州 310027)

摘要: 为满足 $2 \times N$ 光功率分配器的制作和应用的需求, 对宽带集成化 2×2 3dB 耦合器进行了深入的理论和实验研究。采用 3-D 光束传播法, 对传统的非对称 X 结进行了模拟改进, 设计了低损耗且具有较宽工作带宽的 2×2 3dB 耦合器。采用 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术在玻璃基上成功制作了非对称 X 结结构的宽带 2×2 3dB 耦合器。通过对 1260nm ~ 1360nm 和 1460nm ~ 1600nm 两个波段宽带光源的光谱测试, 得到在宽带范围内小于 4.0dB 的插入损耗, 光谱谱线相对平坦, 波长依赖性较小, 均匀性小于 0.5dB。结果表明, 采用这种非对称 X 结并结合离子交换工艺, 可以在玻璃基上制作出宽带的 2×2 3dB 耦合器, 这为进一步优化器件性能, 研制成功具有应用价值的器件奠定了基础。

关键词: 集成光学; 3dB 耦合器; 离子交换; 非对称 X 结; 宽带; 玻璃; 光功率分配器

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.005

Broadband 2×2 3dB coupler based on ion-exchange in glass

ZHANG Wen, YANG Jian-yi, WANG Ming-hua

(Institute of Microelectronics and Optoelectronics, Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to meet the demand of fabrication and application of $2 \times N$ optical power splitters, theoretical and experimental researches were carried out for broadband integrated 2×2 3dB couplers. The traditional asymmetric X-junction was improved by using three-dimension beam propagation method, through simulation and design, 2×2 3dB couplers with low loss and wide operating bandwidth were obtained. Considering characteristics of asymmetric X-junction, the broadband 2×2 3dB coupler was successfully made by using $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange in glass. The measurement of light spectrum, using two broadband light source with wavelength respectively in 1260nm ~ 1360nm and 1460nm ~ 1600nm, showed that the insertion loss was less than 4.0dB in the broadband range, wavelength response was relatively flat and wavelength insensitive, uniformity was less than 0.5dB. The results prove that, using the improved asymmetric X-junction combined with ion-exchange technique, broadband 2×2 3dB couplers with good performance can be fabricated in glass, which lays good foundation for further optimization of the device performance and successful development of its valuable application.

Key words: integrated optics; 3dB coupler; ion-exchange; asymmetric X-junction; broadband; glass; optical power splitter

引 言

近年来, 光通信和光网络的发展越来越迅速。

无源光网络(passive optical network, PON) 因其在成本和效率方面的优势, 被认为是近年来最受欢迎且最适合应用在光纤到户工程(fiber to the home, FTTH)的组网架构。其中, 光功率分配器是无源光网络主要器件之一。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977043; 61228501); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2012AA012203)

作者简介: 张 文(1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事集成光学无源器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangmh@zju.edu.cn

收稿日期: 2012-12-13; 收到修改稿日期: 2013-01-15

离子交换和等离子体增强化学气相沉积(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 是当今制造无源光器件的两种主要技术。自 IZAWA 和 NAKAGOME 于 1972 年发表了第 1 篇关于在玻璃基上采用离子交换技术制作光波导器件的论文以

来^[1],离子交换技术已经得到了广泛的发展。与 PECVD 技术相比较,离子交换光波导不仅同样具有低的插入损耗,且其偏振相关损耗也较低、内部应力较小,与光纤的光学匹配性好,特别是在成本方面(包括原材料成本,设备成本及其维护成本等)更具有较明显的优势,因而更适合以较低的成本来大批量生产^[2-3]。

随着光纤网络化的快速发展,传统的 1×N 光功率分配器应用于庞大的光网络系统,数据传送的稳定性显得十分重要,作为传输系统的备份通道,2×N 光功率分配器的研发是很有必要的。另一方面,众所周知,光功率分配器的工作波长是从 1260nm 到 1600nm。其中数据服务上行是工作在 1310nm 波段,下行工作在 1490nm 波段,而视频服务上下行通常工作在 1550nm 波段。通过引进 2×N 光功率分配器,可以将数据和视频服务分别从不同的输入端传送,从而减轻了不同信息处理的复杂性和网络负担,这在越来越庞大的光网络中也是十分有意义的。

大部分的 1×N 光功率分配器是采用 Y 分叉结构级联而成的,这是因为 Y 分叉结构具有波长和偏振的不依赖性以及输出端的良好均匀性等优点,且结构简单易于设计和可由不同工艺实现。所以 2×N 光功率分配器就是采用一个 2×2 3dB 耦合器级联上 1×N 类型的光功率分配器组成。由 Y 分叉结构级联而成的 1×N 光功率分配器,无论是设计还是工艺实现都已经相当成熟,所以 2×2 3dB 耦合器的设计与实现自然就成为 2×N 光功率分配器设计的关键。

通常的四端口器件,诸如定向耦合器(directional coupler, DC)和 2×2 多模干涉(multimode interference, MMI)耦合器,都不适合作为 2×N 光功率分配器的第一级,即 2×2 3dB 耦合器,因为它们都有较强的波长依赖性,或者说它们的工作带宽太窄,如参考文献[4]中提出一种基于绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)技术的 2×2 MMI 耦合器的设计,尽管损耗和均匀性等性能都很好,但工作带宽只有 1490nm 到 1590nm,且 SOI 技术限制了其作为光功率分配器低成本地批量生产。近几年来,还有学者提出采用一种波长不敏感的耦合器(wavelength-insensitive coupler, WINC)的结构作为 2×2 3dB 耦合器^[5-7],这种结构是采用两个或两个以上的定向耦合器以及相移结构级联而成。这种 WINC 结构具有

较好的波长和偏振不依赖性以及较低的损耗。但是由于定向耦合器以及相关的相移结构,对工艺要求比较高且对工艺条件的改变比较敏感,从而提高了成本,也难以采用类似于离子交换技术进行大批量生产。

作者在理论仿真设计的基础上,对传统的非对称 X 结结构做了改进。采用剥离法及玻璃基 Ag⁺-Na⁺ 离子交换技术制得了 2×2 3dB 耦合器,该 3dB 耦合器不仅具有良好的功率性能,而且有较宽的工作带宽。

1 理论分析和设计优化

在 20 世纪 80 年代,日本大阪大学的 IZUTSU 等人提出了一种非对称 X 结(见图 1a),并对其理论作了比较详细的阐述^[8]。这种结构一经提出,就被广泛应用于像光开关和光调制器等有源器件^[9-11],而应用于无源领域的还比较少, HUSSEL 等人^[12]中提出要用类似图 1a 中的非对称 X 结来实现 2×2 3dB 耦合器。2×2 3dB 耦合器是由这种非对称 X 结构成,结的一侧是对称分叉波导,另一侧是非对称分叉波导,其需满足如下模式分离关系式:

$$\Delta\beta \gg 0.43\theta\bar{\gamma} \quad (1)$$

式中, $\Delta\beta = \beta_A - \beta_B$, $\bar{\beta} = (\beta_A + \beta_B)/2$, β_A 为非对称分叉侧较宽波导, β_B 为较窄波导的传播常数; θ 表示分叉的夹角; $\bar{\gamma}$ 称为平均衰减常数, $\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{\beta}^2 - (k_0 n_s)^2}$, k_0 为波数, n_s 是衬底折射率。由(1)式可以看出,非对称端的两臂的传播常数差 $\Delta\beta$, 以及它们之间的夹角 θ , 是设计该 2×2 3dB 耦合器的两个关键参量。 $\Delta\beta$ 越大,即两臂差异越大,则所容许的 θ 越大,这样可以降低工艺实现该分叉的难度。但 θ 增大会使器件长度加长,而且过大的 $\Delta\beta$ 工艺上实现起来也有一定的难度,所以好的设计是在充分考虑工艺实现

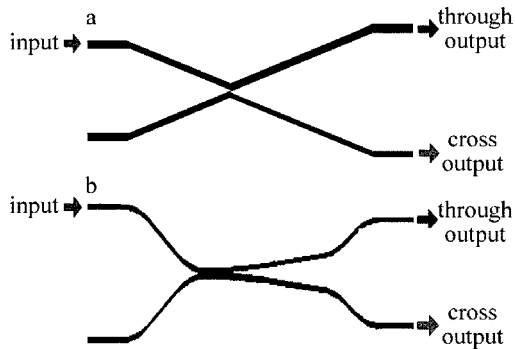


Fig. 1 Schematic configuration
a—traditional asymmetric X-junction b—improved asymmetric X-junction

难的情况下,折衷考虑 $\Delta\beta$ 和 θ 。

HUSSEL 等人在理论研究的基础上,利用 $Ag^+ - Na^+$ 离子交换技术在玻璃基上制得了如图 1a 所示的这种 3dB 耦合器^[13],该耦合器在插入损耗方面有较好的性能,但是它的工作波长只有从 1200nm 到 1400nm,在波长大于 1400nm 后插入损耗迅速增大,这显然无法满足当今光网络与光通信对该类器件的要求。

在大量阅读相关文献和理论研究的基础上,并结合掩埋波导型离子交换工艺的特点,作者尝试对如图 1a 这种传统的非对称 X 结结构做了改进,用具有一定曲率半径的弯曲波导代替原先的倾斜波导,如图 1b 所示。通过如此改进,使得非对称 X 结同一侧的两波导更加靠近,两波导间的距离函数由原来的线性关系变成了二次方的关系,这样更加有利于模式分离的实现,从而在宽带范围内降低了插入损耗。

作者利用 3 维光束传播法 (three-dimensional beam propagation method, 3-D-BPM) 模拟计算器件工作环境,分别对图 1 中的两种结构进行了仿真计算,结果如图 2 所示。传统的非对称 X 结结构有稍大的插入损耗,而改进后的结构插入损耗控制在 $3.0\text{dB} \pm 0.2\text{dB}$ 。改进后的结构不仅在插入损耗的控制方面得到改善,从而在 1260nm 到 1600nm 波段,谱线较为平坦,带宽较大,即波长依赖性较小,同时弯曲波导也略微提高了等效的分叉角 θ ,一定程度上减小了器件的尺寸。作者正是利用该结构,采用 3-D-BPM 法进行了大量的数值分析和参量仿真后,得到了有较低插入损耗和较宽且平坦的工作带宽特性的 2×2 3dB 耦合器的设计。在图 1b 的设计中关键参量的确定主要分为对称端和非对称端两个部分。一方面,输入对称端两波导的参量所依据的是以往进行的玻璃基离子交换型 $1 \times N$ 光功率分配器中的 Y 分叉结构的设计,波导宽度均定为 $3\mu\text{m}$ 。这是因为随着波导宽度减小,光刻难度会增大,又因离子交换工艺中波导将展宽,若设计时波导宽度增大,容易出现多模波导。弯曲半径取值为 4cm,理论仿真和大量实验结果已经表明当 Y 分叉的弯曲半径大约大于 4cm 时,损耗几乎可以忽略不计。另一方面,非对称输出端参量的取值是最为关键的,理论依据是上述的模式分离关系式,即(1)式,同样为了防止出现多模波导,以 $3\mu\text{m}$ 为中心,宽波导和窄波导分别为 $3.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$,将相关参量代入(1)式

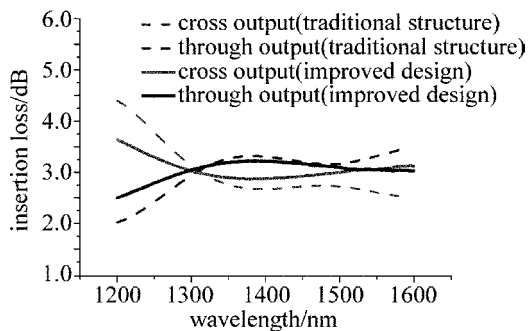


Fig. 2 Calculated wavelength response of insertion loss for the output ports by 3-D-BPM method

可得到对应等效 θ 的大致估计值,从而得到弯曲半径粗略的估计值,最后采用 3-D-BPM 法仿真得到弯曲半径约为 75cm。当宽波导和窄波导的弯曲半径大于此值时,不仅实现所需要的模式分离,且两波导间串音基本可忽略。随着弯曲半径的增大,器件的总长度也会大大增大,当弯曲半径约为 75cm 时,所对应的器件总长为 1.42cm。特别地,图 3 中列出了该设计在 1310nm 和 1550nm 两关键通信波段,传输过程中的光振幅分布。由该图可以直观地看出光从输入端均匀地传输到两个输出端,在 1310nm 波长处基本没有发生光的耗散(见图 3a),在 1550nm 波长处光虽有少许耗散(见图 3b),但基本可以忽略不计。

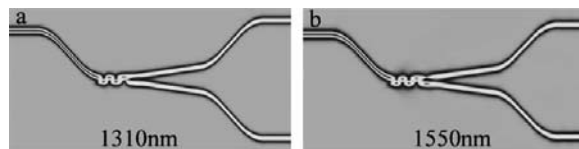


Fig. 3 Optical amplitude distribution

2 实验和结果分析

基于前面介绍的改进后的设计,采用 $Ag^+ - Na^+$ 离子交换工艺制得了基本满足要求的 2×2 3dB 耦合器。受篇幅限制,本文中就不再赘述离子交换的工艺实现及测试过程^[2-3]。

图 4 是两种常用的离子交换工艺。传统的离子交换工艺是采用如图 4a 所示的腐蚀法,另一种离子交换工艺是如图 4b 所示的剥离法。两种不同工艺最大区别就是,前者所用光刻掩膜是让有波导的地方曝光,且先镀膜再光刻,最后腐蚀出所需要图形;而后者是采用掩膜图案相反的光刻版来做掩膜,即让非波导区域曝光,且先光刻再镀膜,最后采用剥离的方法生成图形。两种方法各有优点,理论上都能制得所需器件,但非对称 X 结 ($\Delta\beta \neq 0$) 不像对称的 Y 分叉结构 ($\Delta\beta = 0$) 不用考虑到 $\Delta\beta$ 的影响。若采用腐蚀法,容易出现欠腐蚀或过腐蚀现象,这对传播

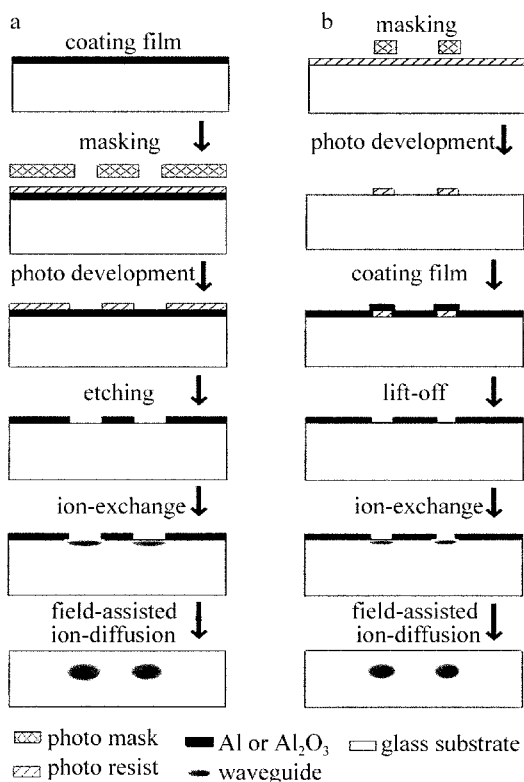


Fig. 4 Ion-exchange process
a—etching method b—lift-off method

常数差 $\Delta\beta$ 的影响比较大,而非对称 X 结的性能对 $\Delta\beta$ 还是比较敏感,而采用剥离法是通过剥离生成图形,剥离对波导宽度的影响不大,所以,作者尝试采用的是基于剥离法的离子交换工艺来制得所需 2×2 3dB 耦合器。

为了方便测试,将非对称端两输出波导通过梯形波导转换成波导宽度与输入一致的波导,图 5 中给出了实验获得的 2×2 3dB 耦合器芯片两个输出端口在光学显微镜透光模式下的端面显微结构图像。从图 5 可以看出,在玻璃基片内部,有个类似于彗星的高亮度区域,高亮度区域中心的横向宽度和高亮区域底部到玻璃表面的纵向距离分别约为 $8\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 。

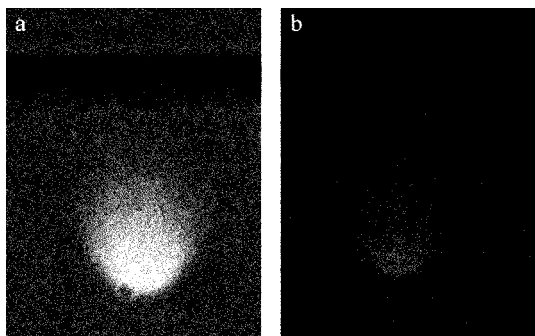


Fig. 5 Microscopic image of optical waveguide of two output ports

作者对所制得的 2×2 3dB 耦合器的波长响应特性进行了测试,测试平台主要仪器有两个工作波长分别在 $1260\text{nm} \sim 1360\text{nm}$ 和 $1460\text{nm} \sim 1600\text{nm}$ 的宽带光源,以及一台光谱分析仪,测试结果如图 6 所示。由图可见,作者制得的 2×2 3dB 耦合器输出端口在 $1260\text{nm} \sim 1360\text{nm}$ 和 $1460\text{nm} \sim 1600\text{nm}$ 宽带范围内,插入损耗基本控制在 4.0dB 左右,且均匀性小于 0.5dB 。如图 6 所示,在关键的 1310nm 和 1550nm 处,两输出端口的插入损耗分别为 3.8dB 和 4.0dB , 3.6dB 和 4.0dB 。与图 2 的仿真结果相比较,理论与实验曲线特性基本吻合。插入损耗略微偏大,主要是由于离子交换工艺实验引入的损耗以及测试时引入的耦合损耗,总体来说,该 2×2 3dB 耦合器的性能在 $1260\text{nm} \sim 1360\text{nm}$ 和 $1460\text{nm} \sim 1550\text{nm}$ 表现良好,尤其是谱线依赖性很小,而在大于 1550nm 的波长范围无论是插入损耗和均匀性都有待改善。

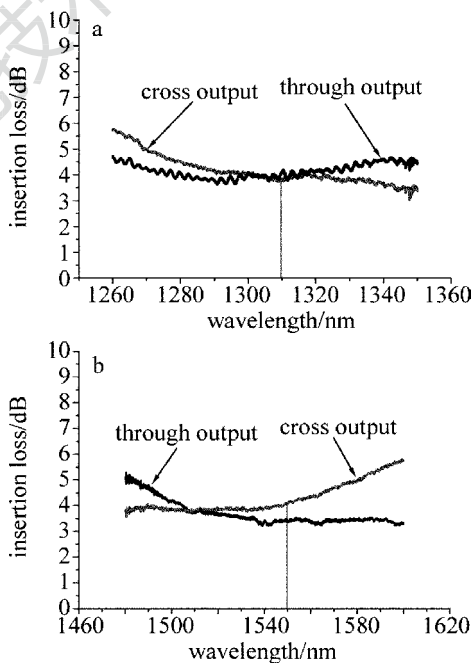


Fig. 6 Wavelength response of the 2×2 3dB coupler
a— $1260\text{nm} \sim 1360\text{nm}$ b— $1460\text{nm} \sim 1600\text{nm}$

3 结 论

通过对传统的非对称 X 结结构的理论研究,设计了改进型宽带非对称 X 结器件,并采用剥离法及离子交换工艺,在玻璃基上制得了 2×2 3dB 耦合器。分析测试结果表明,这样制得的 3dB 耦合器在所测试的宽带范围内不仅插入损耗小,且波长依赖性很小,基本能满足 $2 \times N$ 光功率分配器对该器件

性能的需求。

为了改善器件的性能,需要通过测试信息的反馈,如通过进一步的工作,深化非对称波导尺寸展宽、折射率分布等工艺参量对器件性能的影响等方面的研究,从而优化器件设计。同时配合工艺参量的改进,进一步降低器件总体插入损耗和提高宽带情况下的均匀性。考虑到离子交换在成本上的优势,以及能够大批量生产的特点,该研究成果具有一定的市场应用前景。

参 考 文 献

- [1] IZAWA T, NAKAGOME H. Optical waveguides formed by electrically induced migration of ions in glass plates[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(12): 584-586.
- [2] HAO Y L, ZHENG W W, JIANG S H, *et al.* Engineering-oriented research of glass-based planar optical power splitter manufacturing technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 299-304 (in Chinese).
- [3] ZHENG W W, JIANG S H, CHEN W W, *et al.* Fabrication and characterization glass-based integrated optical power splitter[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2011, 45(7): 1194-1197 (in Chinese).
- [4] DONG X Y, LI H Q, CHEN H D. Design of a 2 × 2 MMI coupler based on SOI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012(9): 63-69 (in Chinese).
- [5] JINGUJI K, TAKATO N, HIDA Y, *et al.* Two-port optical wave-length circuits composed of cascaded Mach-Zehnder interferometers with point-symmetrical configurations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(10): 2301-2310.
- [6] NAREVICH R, BLUMDE R D, HO C, *et al.* Ultra-wide-band adiabatic coupler as a building block for 2 × 32 PLC splitter[C]// *Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference 2008 (OFC/NFOEC 2008)*. San Jose, USA: OSA Technical Digest (CD), 2008: 1-3.
- [7] GREER M K, TICKNOR J A, XU H. Broadband 2 × 2 optical splitter; US, 7587138[P]. 2009-09-08.
- [8] IZUTSU M, ENOKIHARA A, SUETA T. Optical-waveguide hybrid coupler[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(11): 549-551.
- [9] SAKAMAKI T, NARITA Y, TSUDA H, *et al.* LiNbO₃ optical switch using asymmetric X-junction waveguide for broadband optical network node[J]. *IEICE Electronics Express*, 2010, 7(5): 360-364.
- [10] KISHIKAWA H, KIMIYA K, GOTO N, *et al.* All-optical wave-length-selective switch consisting of asymmetric X-junction couplers and Raman amplifiers for wide wavelength range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 172-180.
- [11] IHARA A, KISHIKAWA H, GOTO N, *et al.* Passive waveguide device consisting of cascaded asymmetric X-junction couplers for high-contrast recognition of optical BPSK labels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(9): 1306-1313.
- [12] HUSSEL C P, RAMASWAMY R V, SRIVASTAVA R, *et al.* Adiabatic invariance in GRIN channel waveguides and its use in 3-dB cross couplers[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4105-4110.
- [13] HUSSEL C P, RAMASWAMY R V, SRIVASTAVA R. Wave-length and polarization insensitive 3dB cross-coupler power dividers by ion exchange in glass[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(24): 2381-2383.