**文章编号:**1004-4213(2011)02-0169-5

# 光纤到户用单纤三向复用器芯片的研究

李斌<sup>1</sup>,乐孜纯<sup>1</sup>,胡劲华<sup>1</sup>,任光辉<sup>2</sup>

(1浙江工业大学理学院,杭州 310023)(2中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:采用非对称 Y 分支波导和多模干涉型耦合器级联的方案设计出了一种光纤到户用单纤三 向复用器芯片.模拟光谱响应结果表明,三个波长输出光斑清晰,实现了 1 490 nm 和 1 550 nm 下 行波长的下传和 1 310 nm 波长的上传.有限差分束传播法模拟结果表明:该器件插入损耗小于 1.49 dB,三个响应波长的带宽满足 ITU. 984 规定的带宽要求;1 310 nm 上传信号隔离度达到 47 dB以上,1 490 nm 与 1 550 nm 间信号隔离度达到 29 dB 以上.

关键词:光纤到户;单纤三向复用器;Y分支;多模干涉型耦合器;光束传播算法

**中图分类号:**TN256 **文献标识码:**A

**doi**:10.

doi:10.3788/gzxb20114002.0169

# 0 引言

光纤到户(Fiber To The Home, FTTH)能够 满足数据、语音、CATV等综合业务对高带宽的需 求,但FTTH的广泛应用需要进一步降低成本. EPON和GPON技术规范(ITU-TG.983和G. 984)采用1310 nm、1490 nm以及1550 nm 三波 长分配方案.其中1310 nm专门用于数据和IP视频 信号的上传;1490 nm用于语音、数据和IP视频 信号的下传;1550 nm用于模拟视频信号下传<sup>[1]</sup>. 采用1310/1490/1550 nm三波长单纤三向传输技 术来实现综台业务的传输已经逐渐成为FTTH技 术发展的主流.

相对传统分立元件,集成光电子器件具有结构 稳定,易于封装、体积小,可以大规模单片集成等优 点备受关注,对降低器件成本有巨大潜力.因此集成 光电子器件逐渐成为 FFTH 中新兴的关键器件.

运用平面集成光路技术(Planar Lightwave Circuit,PLC)制作三向复用器(Triplexer),近年来 国内外有很多报道<sup>[2-9]</sup>,各种结构的芯片虽有其各自 的优点,但均存在诸如器件隔离度、通道带宽、插入 损耗等方面的问题.如级联定向耦合器型、定向耦合 器(Directional Coupler,DC)+阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating,AWG)型等器件隔离 度太小;DC+薄膜滤波片(Thin Film Filter,TFF) 型、级联多模干涉耦合器(Multimode Interference, MMI)型等器件的带宽不能满足 ITU. 984 带宽要 求,而且隔离度也较小;AWG型、Mach-Zehnder干 涉仪(Mach-Zehnder Interference,MZI)+平面反射 光栅(Plate Reflection Grating, PRG)型、MMI+ AWG型等器件的插入损耗很大;级联 MZI 型器件 对温度比较敏感,抗干扰能力较差.本文介绍了一种 采用非对称 Y 分支波导级联 MMI型 Triplexer芯 片结构,模拟结果表明该结构具有较高的隔离度,带 宽完全满足 ITU.984 要求.另外该器件还具有尺寸 小和热稳定性好等优点.

# 1 工作原理

本文设计了一种基于非对称 Y 分支和 MMI 结构的单纤三向复用器芯片,如图 1. 其中非对称 Y





基金项目:浙江省自然科学基金(No. Y1080172)和浙江省重大科技计划(No. 2009C11051)资助

第一作者:李斌(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子技术及器件. Email: libin243@163. com

**收稿日期**: 2010-07-11;修回日期: 2010-08-24

**导师(通讯作者):**乐孜纯(1965-),女,教授,博导,主要研究方向为光纤通信组网技术、微结构光电子器件和高密度光学信息存贮. Email:lzc@zjut.edu.cn



图 2 Y 分支波导左、右分支截面

Fig. 2 Schematic sections of Y branch waveguide left and right branch

分支波导的左支是在靠近波导表面刻蚀了一部分空 气槽,如图 2(a)(图 1A 处截面图).非对称 Y 分支 波导的右分支是对称结构波导,如图 2(b)(图 1B 处 截面图).

该器件的所有波导采用掩埋型聚合物基波导: 聚倍半硅氧烷(PSQ),具有硬度高、热稳定性好、透 明均一等优点,是一类性能优良的光子材料<sup>[10-12]</sup>.波 导的芯层折射率为 $n_c = 1.51$ ,包层折射率 $n_s = 1.46$ .这种单片集成的方案使器件结构紧凑,集成度 高,适合大批量生产,从而有望降低成本.

#### 1.1 非对称 Y 分支原理

在非对称 Y 分支波导宽度不同的情况下,当单 一模式光波经过分支处时,随着 Y 分支波导的分 离,光波逐渐集中于分离支中的某一支波导,并最终 完全分布于这一支.这其实是一种波导模式分离的 表现,它要求变换中光波的模数不变,适当选取波导 宽度且保持波导间距足够大可以实现波导模式的分 离.要实现非对称 Y 分支波导的模式分离功能,自 然要求光在传播过程中模式的转换效率要尽可能 高,也就是分支角要尽可能的小.

两个波导有相同的高度,不同的宽度,所以有不同的宽度与高度比.这种非对称Y分支结构之所以能复用1310 nm、1490 nm 和1550 nm 的波长是由于两个输出波导具有不同的宽度与高度比,因而有不同的传输模式,进而具有不同的色散关系,色散曲线在1310 nm、1490 nm 和1550 nm 之间有一个交点.

根据非对称 Y 分支波导的模式分离原理,在分 支角足够小的情况下,由于光在波导中传播时总是 沿着折射率大的方向传输<sup>[13-14]</sup>,输入场的基模耦合 进折射率大的输出波导中,波长小于交点处的波长 在 Y 分支波导左分支中的折射率大于在右分支波 导中的折射率,可以用来从波长 1 490 nm 和 1 550 nm 光中分离波长 1 310 nm 的光.

#### 1.2 MMI 原理

波导模式间的相长干涉所导致的自映像效应是 MMI 器件的最基本的工作原理<sup>[15]</sup>.其本质是输入 场在多模波导中激励起多个模式,各模式间相互干涉,沿波的传播方向周期性地产生输入场的一个或 多个像. MMI 型复用器主要由一个输入单模波导、 一个多模波导和两个输出单模波导构成. 定义 L<sub>π</sub> 为 零阶模和一阶模传播常量差倒数的 π 倍,即两个最 低阶模的拍长

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{n_0 - n_1} \tag{1}$$

式中 $\beta_0$ 和 $\beta_1$ 分别是多模波导区零阶模和一阶模的 传播常量; $n_0$ 和 $n_1$ 是相应的有效折射率; $\lambda$ 是工作 波长,分别为1490 nm或1550 nm.从器件结构紧 凑性和可逆性出发,将采用成对干涉原理,输入波导 位于多模波导(宽度为 $W_{mmi}$ )前端的 $W_{mmi}/3$ 处,输 出两个波导分别位于多模波导后端的 $W_{mmi}/3$ 和  $2W_{mmi}/3$ 处.当多模波导长度 $L = pL_{\pi}(p$ 为整数) 时,在多模波导输出端将得到一个正像(p为偶数) 或反演像(p为奇数).

在非对称 Y 分支波导的右分支处级联 MMI 的 输入波导,为了更好地将光波耦合进 MMI,在输入 波导与多模区波导之间加 taper 结构波导,同样,分 别在多模区波导与两个输出波导处加 taper 结构波 导.在 MMI 的输出端采用了 S 形弯曲波导输出,目 的是快速地将两束光分开,有效克服两输出波导之 间的耦合作用.在非对称 Y 分支波导的左分支处加 S 形弯曲波导输出,可以加大 PORT<sub>1</sub> 与 PORT<sub>2</sub> 之 间的距离,有利于封装.

# 2 器件结构设计和模拟

根据 Y 分支波导左右分支波导的单模条件,确 定波导高度均为 1.5  $\mu$ m,左分支波导宽度为 2  $\mu$ m, 右分支波导宽度为 1.36  $\mu$ m,空气槽宽度等于 2  $\mu$ m.

为了考查两分支口输出功率随夹角的变化关系,在波长为1310 nm、1490 nm、1550 nm 处分别 对Y分支波导进行了模拟,如图3.综合考虑Y分 支对三波长的分光特性,以及工艺加工方面的难度,





图 3 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 光分别在两端口 输出功率随 Y 分支夹角的变化关系图

Fig. 3 1 310 nm, 1 490 nm and 1 550 nm optical output power of each of the two-port branch angle changes with the Y-junction angle

最终选取 Y 分支夹角  $\theta$ =1.2 mrad. 同理, 对 Y 分支 长度也进行了模拟,确定其长度为 12 000  $\mu$ m.

图 4 为非对称 Y 分支结构的左右两分支色散 曲线图. 色散曲线即有效折射率随波长的变化关系. 由于左分支刻有空气槽,故两分支的色散曲线斜率 不同,两曲线相交,交点对应波长  $\lambda_0 = 1.41 \ \mu m$ ,并 且刻有空气槽的左分支色散曲线相对陡峭,而右分 支色散曲线相对平缓.



图 4 非对称 Y 分支结构左右分支波导的色散曲线图 Fig. 4 Dispersion relation (effective index versus wavelength) for the two output guides of the asymmetric Y-junction

从图 4 中可以得到,对于  $\lambda < 1.41 \mu m$  的光波, 左分支的有效折射率相对较高;对于  $\lambda > 1.41 \mu m$ 的光波,右分支的有效折射率相对较高.当波长小于 1.41 μm 时,光波传输到 Y 分支口处将耦合进左分 支中传输;而当波长大于 1.41 μm 时,光波将耦合 进右分支中传输.

采用有限分束传播法(Finite Difference-Beam Propagation Method, FD-BPM) 法分别模拟了 1 310 nm、1 490 nm和1 550 nm 三波长光通过非对称 Y 分支波导的光场传输情况,如图 5. 其中实线指光通过 Y 分支左支的输出能量,而虚线指光通过 Y 分支右支输出能量,从图中可知,三波长的光通过 Y 分支输出效率分别为 87%、97%和 97.4%.



图5 非对称Y分支波导光场传输图

Fig. 5 Optical field propagation spectra of the asymmetric Y branch waveguides

对于 MMI 结构,采用了限制性成像条件 (restricted interference)减小整个器件的尺寸.根据 多模干涉耦合器的自映像原理,MMI 的自成像位置 跟输入波长相关,也即 MMI 的耦合长度  $L_{\pi}$  是波长 相关的,利用这一特性,可以实现波分(解)复用功能.当 MMI 的多模干涉区的长度 L<sub>mmi</sub>满足下式关系时,1 490 nm 和 1 550 nm 的信号光将分别从 MMI 的左臂和右臂输出,成功实现(解)复用功能.

 $L_{nmi} = nL_{\pi}(1\ 490) = (n+m)L_{\pi}(1\ 550)$  (2) 式中 n 是正整数, m 是奇数;  $L_{\pi}(1\ 490) 与 L_{\pi}(1\ 550)$ 分别为 1 490 nm 和 1 550 nm 下 MMI 的耦合长度. MMI 多模区波导的宽度选择为  $W_{mmi} = 8.4\ \mu m$ ,利 用有限差分方法,可以得到多模区的各阶模式的传 播常量,根据式(1)可以得到 MMI 的拍长  $L_{\pi}(1490)$ =222.16  $\mu$ m,  $L_{\pi}(1550) = 126.86\ \mu$ m.根据式(2), MMI 的长度可以选取为  $L_{mmi} = 4\ 441.65\ \mu$ m,根据 式(2)得到的拍长只是一个近似值,最终通过有限差 分束传播法可以得到优化的 MMI 的长度  $L_{mmi} = 4\ 462.1\ \mu$ m.

同样,采用 FD-BPM 法分别模拟了 1 490 nm 和 1 550 nm 波长光通过 MMI 的光场传输情况,如 图 6. 其中实线指光通过 MMI 左臂的输出能量,而 虚线指光通过 MMI 右臂的输出能量,从图中可知, 1 490 nm 和 1 550 nm 波长光通过 MMI 输出效率 都达 80%以上.



图 6 MMI 光场传输图

Fig. 6 Optical field propagation spectra of the MMI

整个 Triplexer 器件的宽度是 39.88  $\mu$ m,总长 度是 17 562.1  $\mu$ m. 在该结构中,1 310 nm 信号光通 过 Y 分支左支直通上传,最终由 PORT<sub>1</sub> 输出; 1 490 nm和 1 550 nm 信号光通过 Y 分支右支下 传,进而传输到 MMI 输入端,1 490 nm 信号光通过 MMI 左臂 (PORT<sub>2</sub>)输出,1 550 nm 信号光通过 MMI 右臂 (PORT<sub>3</sub>)输出,从而达到了分离三个波 长的目的.

## 3 器件性能分析

为了进一步分析 Triplexer 的传输损耗和隔离 度,采用 FD-BPM 法模拟了入射波长为 1.25~ 1.65 μm的信号光在 Triplexer 三个输出端口的光 谱响应,如图 7.



图 7 Triplexer 模拟光谱响应

Fig. 7 Triplexer simulations the spectral responses

在单纤三向复用器芯片的设计中,三个响应波 长的带宽要求不同,根据 ITU.984 标准,1 310 nm 处带宽应在 1 260 nm 到 1 360 nm,1 490 nm 和 1 550 nm处带宽分别为 20 nm 和 10 nm.由图 7 可 知,1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 处的带宽已完 全满足 ITU.984 的标准.

工作波长 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 的 插入损耗分别为 0.96 dB、1.49 dB 和 1.31 dB. 1 310 nm波长与 1 490 nm、1 550 nm 之间的隔离度 最优值分别为 48.31 dB 和 47.12 dB,1 490 nm 与 1 550 nm之间隔离度最优值为 35.92 dB,而实际传 输时由于上行信号和下行信号的双向传输隔度完全 可以达到 ITU 规定的大于 45 dB 要求.

## 4 结论

本文利用非对称 Y 分支波导和 MMI 级联的设 计方案得到了对 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 波长具有较好光谱响应的一种新型 Triplexer 芯片 结构.由模拟光谱响应可知 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm处的带宽已可满足 ITU.984 标准.

该单纤三向复用器芯片具有比较高的隔离度及 较小的尺寸,但器件的插入损耗较大,主要原因在于 Y分支波导和 MMI 耦合器对接时有能量损耗,可 以在工艺加工方面进行改进,比如在 Y 分支波导和

### MMI 对接处加锥形耦合器来减小损耗.

采用该设计结构,基于 PLC 制造技术可以得到

### 性能优越、成本低廉的 Triplexer 芯片.

#### 参考文献

- [1] MCDONALD B. EPON deployment challenges-now and in the future[C]. Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference, 2007 Aisa, 2007: 269-271.
- [2] HUANG Yao, HUANG Xu-guang, HU She-jun. A planar-lightwave-circuit triplexer[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 39-43.
  黄耀,黄旭光,胡社军.平面光波导型单纤三向器的研究[J]. 光

子学报,2009,**38**(1): 39-43.

- [3] AN Jun-ming, LI Jian, LI Jun-yi, et al. Novel triplexing-filter design using silica-based direction coupler and an arrayed waveguide grating [J]. Optical Engineering, 2009, 48(1): 014601-1-014601-4.
- [4] SONG J H, KIM K Y, CHO J, et al. Thin film filterembedded triplexeing- filters based on directional coupler for FTTH networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(8): 1668-1670.
- [5] HONG J K, LEE S S. PLC-based novel triplexer with a simple structure for optical transceiver module applications[J]. *IEEE PhotonTechnol Lett*, 2008, 20(1): 21-23.
- [6] LI Jun-yi, AN Jun-ming, WU Yuan-da, et al. Wide bandwidth low crosstalk triplexers based on silica AWG[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 205-209.
  李俊一,安俊明,吴远大,等.基于硅基二氧化硅阵列波导光栅 宽带低串批单纤三向器[J].光子学报,2010,39(2):205-209.
- [7] BIDNYK S, FENG D, BALAKRISHNAN A, et al. SOI waveguide based planar reflective grating demultiplexer for FTTH[C]. SPIE, 2007, 6477: 64770F-1 - 64770F-6.

- [8] XU Cheng-lin. Design optimization of integrated BiDi triplexer optical filter based on planar lightwave circuit [J]. Optics Express, 2006, 14(11): 4675-4686.
- [9] LEE T, LEE D, CHUNG Y. Design and simulation of fabrication-error tolerant triplexer based on cascaded machzehnder inteferometers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(1): 33-35.
- [10] LI Lin-ke. Study of novel-polymer-based microring resonator
  [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 52-60.
  李林科.基于新型聚合物材料的微环谐振器的基础研究[D].
  大连:大连理工大学,2007:52-60.
- [11] ZHANG Hong-bo, WANG Jin-yan, LI Lin-ke, et al. Synthesis of liquid polysilisiquioxane resins and properties of cured films[J]. Thin Solid Films, 2008, 517: 857-862.
- [12] TENG Jie, SCHEERLINCK S, ZHANG Hong-bo, et al. A PSQ-L polymer microring resonator fabricated by a simple UV-Based soft-lithography process [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(18): 1323-1325.
- [13] AL-GAFY M H, KHALIL D. FTTH triplexer design using asymmetric y-junction with etched branch [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15): 1157-1159.
- BUCCI D. GRELIN J. GHIBAUDO E. et al. Realization of a 980-nm/1550-nm pump-signal(De)multiplexer made by ionexchange on glass using a segmented asymmetric y-junction
   IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(9): 698-700.
- [15] WU Ji-jiang, SHI Bang-ren, KONG Mei. Properties simulation of a multimode interference coupler [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1663-1666.
  武继江,石邦任,孔梅. 一种多模干涉耦合器的性能模拟[J]. 光子学报,2006,35(11):1663-1666.

# **Triplexer Chips for FTTH**

LI Bin<sup>1</sup>, LE Zi-chun<sup>1</sup>, HU Jin-hua<sup>1</sup>, REN Guang-hui<sup>2</sup>

(1 College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023 China)

(2 State Key Laboratory on Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100083, China)

Abstract: A triplexer was fabricated based on asymmetric Y branch waveguides Cascade Multimode interference(MMI) for fiber to the home(FTTH). The simulation results of spectral response show that output optical fields are clearly. And the demultiplexing function for download 1 490 nm and 1 550 nm and multiplexing function for upload 1 310 nm were achieved. The simulation results of finited different beam propagation method (FD-BPM) show that insertion loss is less than 1. 49 dB; the bandwidths of three response wavelengths meet the demand of ITU. 984 completely; the isolation for 1 310 nm is more than 47 dB; the isolation for between 1 490 nm and 1 550 nm is more than 29 dB.

Key words: Fiber To The Home(FTTH); Triplexer; Y-Junction; Multimode Interference(MMI); Beam Propagation Method (BPM)