

文章编号:1004-4213(2010)02-0205-5

# 基于硅基二氧化硅阵列波导光栅宽带 低串扰单纤三向器\*

李俊一, 安俊明, 吴远大, 李建光, 王红杰, 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所 光电研发中心, 北京 100083)

**摘要:**采用硅基二氧化硅阵列波导光栅设计并制作了宽带低串扰单纤三向器. 为使三个波长间隔相差较大的输出谱获得相同的带宽, 在输出波导与罗兰圆交界采用了不同结构的多模干涉器. 二维有限差分束传播法的模拟结果表明, 理论上 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 波长的 3 dB 带宽分别达到 23 nm、23.5 nm 和 25 nm, 插入损耗均为 4 dB, 1 310 nm 波长的串扰小于 -40 dB, 1 490 nm 与 1 550 nm 波长间串扰小于 -40 dB; 采用宽带光源测试结果表明, 1 550 nm 波长的 3 dB 带宽为 23 nm, 采用三个独立窄带光源测试结果表明, 三个波长的插入损耗均为 7 dB, 1 310 nm 波长的串扰小于 -40 dB, 1 490 nm 与 1 550 nm 波长间的串扰小于 -39 dB, 测试与模拟结果基本一致.

**关键词:**集成光学; 单纤三向器; 平面光波导; 阵列波导光栅; 多模干涉器; 光纤到户

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0205

## 0 引言

随着用户接入网带宽需求的提高, 光纤到户 (Fiber-To-The-Home, FTTH) 技术得到迅速发展. FTTH 将现有的电话网、有线电视网、互联网三网合一, 被认为是解决“最后一公里”的最佳方案. 其中单纤三向器 (Triplexer) 是 FTTH 中用户端关键器件, 该器件将光纤中 1 490 nm 波长下行语音、数据信号和 1 550 nm 波长下行有线电视信号解复用, 且将上行的语音、数据信号用 1 310 nm 波长逆向上传<sup>[1]</sup>. 传统的 Triplexer 使用两级薄膜滤波片 (Thin Film Filter, TFF) 与 To-can 激光器、探测器紧凑封装在一金属固件中, 这一工艺较复杂, 成本较高; 基于硅基平面光波回路 (Planar Lightwave Circuit, PLC) 的 Triplexer, 采用平面光波导器件如多模干涉器 (Multimode Interferences, MMIs)、马赫-曾德尔干涉仪 (MZIs)、定向耦合器、布喇格光栅和阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Gratings, AWGs)<sup>[2-9]</sup> 代替 TFF 作为粗波分复用/解复用器, 将激光器、探测器芯片与其混合集成在同一平台, 这种新型的混合集成 Triplexer 适合于大规模生产, 可使 Triplexer 的成本进一步降低. 但在已报道的硅基

PLC 三波长复用/解复用器, 其输出谱 3dB 带宽较窄. 本文通过在硅基二氧化硅 AWG 输出波导与罗兰圆之间引入不同结构的 MMI, 使得 Triplexer 三个波长 3dB 带宽均得到改善.

## 1 器件设计及模拟

采用折射率差为 0.75% 的硅基二氧化硅作为波导, 为确保单模条件, 波导芯区尺寸选为  $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}^2$ . 由于 Triplexer 中 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 波长相差达 240 nm, 由 AWG 自由波谱区 (Free Spectral Range, FSR) 与阵列波导长度差  $\Delta L$  关系

$$\text{FSR} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta L \cdot n_g} \quad (1)$$

可知, 采用硅基二氧化硅 AWG 在同一个 FSR 内输出这三个波长, 其阵列波导间长度差  $\Delta L$  很小, AWG 中阵列波导将无法排列. 因此, 设计时将 1 310 nm 与 1 490 nm、1 550 nm 波长分布在两个不同的衍射级数<sup>[6-7]</sup>. 首先, 选取衍射级数  $m$  为 12, 1 490 nm 和 1 550 nm 波长工作在该衍射数, 其中心波长为 1 520 nm, 对应的 FSR 为 108 nm, 1 490 nm 和 1 550 nm 波长分别由中心波导的上、下输出端口 a、c 输出, 如图 1. 1 310 nm 波长被设计工作在衍射级数  $m$  为 14 波谱区, 由于 FSR 随衍射级数  $m$  的增大而减小, 其所对应的 FSR 缩短为 94 nm. 同时, 由于衍射级数  $m$  只能为整数, 造成 FSR 不连续, 对中心输出波导 1 520 nm 对应的输出波长为 1 318 nm.

\* 国家高技术研究发展计划 (2006AA03Z420、2007AA03Z420) 和国家自然科学基金 (60776057、60837001、60877014) 资助

Tel: 010-82304473

Email: junyi\_lee@semi.ac.cn

收稿日期: 2009-04-20

修回日期: 2009-06-09

两个衍射级数满足

$$n_c(1\ 318\ \text{nm})\Delta L = m(14) \cdot \lambda(1\ 318\ \text{nm}) \quad (2)$$

$$n_c(1\ 520\ \text{nm})\Delta L = m(12) \cdot \lambda(1\ 520\ \text{nm}) \quad (3)$$

为了实现 1 310 nm 波长从中心输出波导逆向上传,根据 AWG 的色散关系,需将中心输出波导向端口 a 移动 4.5  $\mu\text{m}$ ,如图 1 中的端口 b. 基于此设计,可实现下行 1 490 nm 和 1 550 nm 信号波长的解复用,同时 1 310 nm 信号波长可复用逆向上行传输. 表 1 中还列出了 AWG 其它关键设计参量. 由于相邻阵列波导增量比较小,所以两个星形耦合器均被倾斜为 21°,且间距为 7 980  $\mu\text{m}$ . 考虑到该三向滤波器与激光器和探测器的集成,在这个设计中,将端口 a 和 c 布置在芯片的右侧,端口 b 布置在下侧. 整个芯片尺寸为 20 $\times$ 10 mm<sup>2</sup>.

表 1 Triplexer 中 AWGs 的设计参量

Table 1 Design parameters of AWGs for triplexers

Items	Value
Channels	3
Length difference of adjacent waveguides	13.62 $\mu\text{m}$
1520 nm wavelength diffraction series	12
1310 nm wavelength diffraction series	14
Length of FPR	812 $\mu\text{m}$
Space of arrayed waveguides	9 $\mu\text{m}$
Space between port a and b	19.83 $\mu\text{m}$
Space between port b and c	28.81 $\mu\text{m}$
Number of arrayed waveguides	19

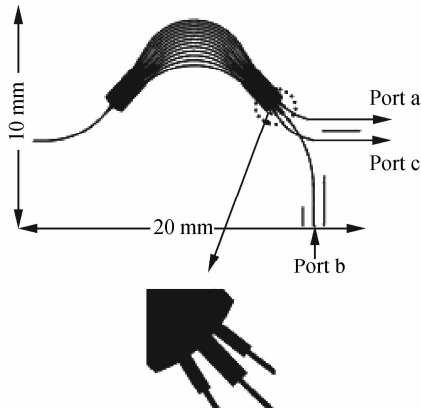


图 1 基于平坦化 Silica AWGs 的 triplexer 原理

Fig. 1 Schematics of a triplexer based on flat-top Silica AWGs

对基于硅基二氧化硅 AWG 三向滤波器进行数值分析,来验证设计的正确性. 为了减少模拟时间,采用有效折射率法将三维二氧化硅掩埋波导转换为二维平面波导,采用二维有限差光束传播法(Finite Difference-Beam Propagation Method, FD-BPM)模拟输入平板波导的传输光场,累积每个阵列波导的相位,将计有累积相位的光场作为输出平板波导的输入光场,再进行 FD-BPM 模拟,便可得到特定波长在输出波导的功率输出. 对衍射级数为 12 和 14 两个自由波谱区的波长扫描模拟,得到这两个自由

波谱区下的输出谱. 图 2 给出的是高斯型输出谱,其中(a)和(b)分别对应衍射级数  $m$  为 14 和 12 的输出谱,图中的点线、实线和虚线分别对应端口 a、b 和 c 的输出谱. 显然,1 310 nm 波长工作在  $m$  为 14 的衍射级数,从中间输出波导 b 端口输出,而 1 490 nm 和 1 550 nm 波长工作在  $m$  为 12 的衍射级数,分别从两侧端口 a 和 c 输出,模拟结果与设计相一致. 图 2 中的其它响应谱在 Triplexer 中实际上不存在,可以忽略它们的影响. 由于波导模场半径随波长的增加而增加,所以 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 波长的 3 dB 带宽依次增加,分别为 6.5 nm、8 nm 和 8.5 nm. 端口 b 1 310 nm 的插入损耗是 0.5 dB,端口 a 和 c 由于偏离中心波导,插入损耗增加为 1 dB. 采用足够多的阵列波导数可以充分地抑制背景噪声,串扰小于 -40 dB. 可以看出,AWG 的插入损耗和串扰都有较好的特性<sup>[10]</sup>,但 3 dB 带宽太窄.

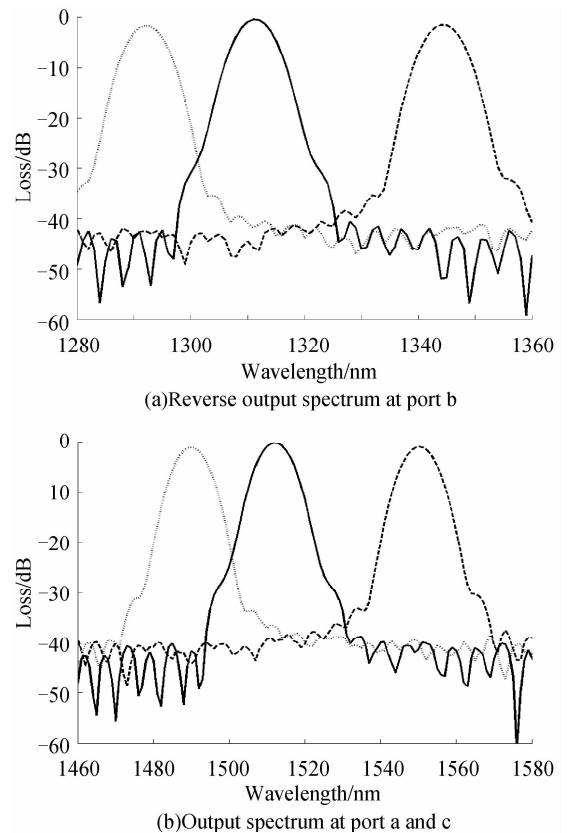


图 2 Silica AWGs 的仿真高斯输出谱

Fig. 2 Simulated Gauss output spectra of Silica AWGs

为了使 Triplexer 有较大的带宽响应,分别在输入波导的末端和输出波导与罗兰圆交界采用一个锥形波导和 MMIs. 如图 1,经优化锥形波导 18  $\mu\text{m}$  宽和 300  $\mu\text{m}$  长,输出端口 a 和 c 采用 16  $\mu\text{m}$  宽和 175  $\mu\text{m}$  长的 MMIs;由于 1 310 nm 有较窄的模场半径,如果对 1 310 nm 波长采用同样的 MMI 结构将会造成其 3 dB 带宽变窄,为此在端口 b 采用了 22  $\mu\text{m}$  宽和 330  $\mu\text{m}$  长的 MMI. Triplexer 的宽带响

应谱模拟结果如图 3, 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 光波的 3 dB 带宽分别为 23 nm、23.5 nm 和 25 nm, 3 dB 带宽比高斯情形下分别增加了 16.5 nm、15.5 nm 和 16.5 nm, 带宽得到明显的改善; 三个波长的插入损耗均增加为 4 dB; 1 310 nm 波长的串扰小于 -40 dB, 1 490 nm 和 1 550 nm 波长间的串扰也小于 -40 dB.

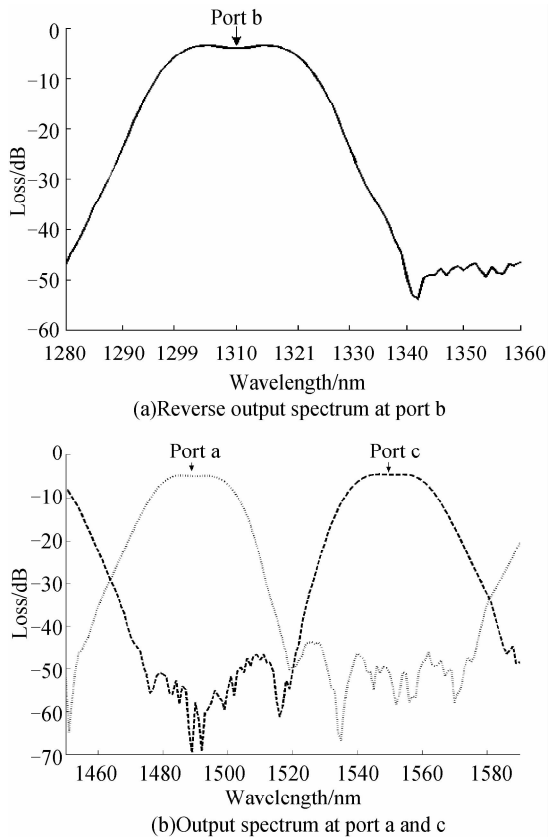


图 3 Silica AWGs 的仿真输出谱  
Fig. 3 Simulated output spectra of Silica AWGs

## 2 制作和测试

采用等离子化学汽相 (PECVD) 沉积生长二氧化硅和诱导耦合等离子 (ICP) 干法刻蚀工艺, 制作设计了宽带硅基二氧化硅 AWGs. 为降低相位随机误差, 采用分辨率为 25 nm 的光刻掩模版. 制作器件经过划片和抛光进行测量.

首先, 采用可调谐激光光源测量 Triplexer 端口 c 的传输特性. 波长调谐范围为 1 520~1 600 nm, 输出谱如图 4, 可以看到 1 550 nm 光波的 3 dB 带宽大约为 23 nm, 与模拟结果相近, 这证明设计和模拟方法是正确的; 包括两端面耦合损耗在内, 整个插入损耗为 7 dB. 由于实验室目前没有覆盖 1 310 nm 和 1 490 nm 波长的宽带光源, 所以这两个波长的宽带特性现在无法验证, 但从 1 550 nm 波的模拟和测试结果的一致性来看, 可以推断这两个波长的 3 dB 带宽也会达到约 20 nm 以上.

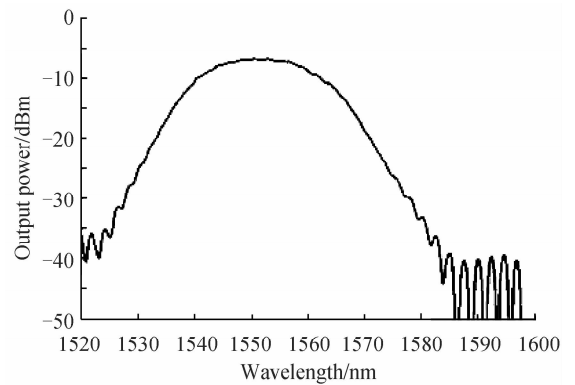


图 4 端口 c 的输出谱  
Fig. 4 Output spectrum at port c

其次, 采用光功率为 0 dBm 的 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 三个窄带光源通过复用器复用到一根单模光纤, 将其对准 AWGs 的输入波导, 端口 a 和 c 的输出谱分别如图 5(a) 和 (b), 由图可知

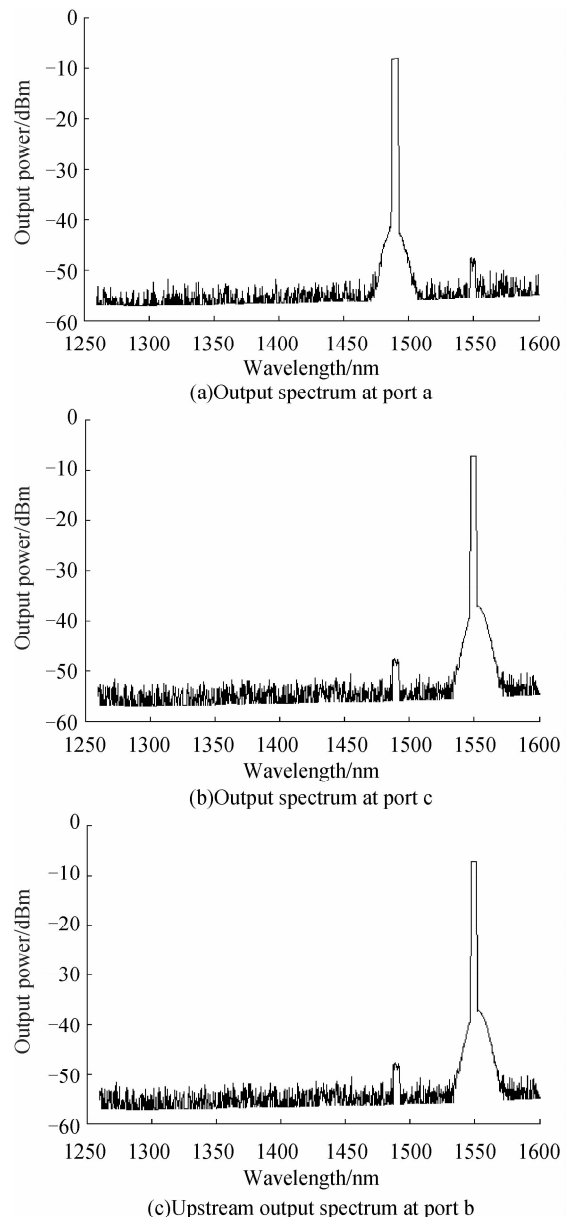


图 5 各端口输出谱  
Fig. 5 Output spectra at all ports

端口 a 的 1 490 nm 光功率和端口 c 的 1 550 nm 光功率都是大约 -7 dBm, 而端口 a 的 1 550 nm 光功率和端口 c 的 1 490 nm 光功率都被抑制到小于 -46 dBm, 且端口 a 和 c 的 1 310 nm 光谱都被抑制在噪声中, 所以可以得到这两个下行波长之间的串扰小于 -39 dB; 端口 b 的上行输出谱如图 5(c) 所示, 端口 a 和 b、端口 c 和 b 的串扰都小于 -40 dB; 三端口的中心波长与设计的完全一致. 从测试数据可知, 设计的 Triplexer 具有宽带和低串扰特性.

### 3 结论

通过在输出波导与罗兰圆之间加入不同结构的 MMIs, 设计并制作出硅基二氧化硅 AWGs 型宽带低串扰 Triplexer. 采用可调谐激光光源作为 Triplexer 的输入, 测得 1 550 nm 光波的 3 dB 带宽为 23 nm, 且插入损耗为 7 dB; 采用 1 310 nm、1 490 nm 和 1 550 nm 三个窄带光源复用到一根单模光纤上, 测得 1 310 nm 波长的串扰小于 -40 dB, 波长 1 490 nm、1 550 nm 间的串扰小于 -39 dB. Triplexer 有很好的宽带和低串扰特性, 为进一步与激光器、探测器混合集成奠定了基础.

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] HONG J K, LEE S S. PLC-based novel triplexer with a simple structure for optical transceiver module applications[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, **20**(1): 21-23.
- [3] LEE T, LEE D, CHUNG Y. Design and simulation of fabrication-error tolerant triplexer based on cascaded Mach-Zehnder Interferometers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, **20**(1): 33-35.
- [4] SONG J H, LIM J H, KIM R K, et al. Bragg grating-assisted WDM filter for integrated optical triplexer transceivers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(12): 2607-2609.
- [5] SONG J H, KIM K Y, CHO J, et al. Thin film filter-embedded triplexer-filters based on directional coupler for FTTH networks[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(8): 1668-1670.
- [6] LANG Ting-ting, HE Jian-jun, HE Sai-ling, et al. Cross-order arrayed waveguide grating design for triplexers in fiber access networks[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, **18**(1): 232-234.
- [7] AN Jun-ming, Wu Yuan-da, LI Jian, et al. Fabrication of triplexers based on flattop SOI AWG[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(5): 1717-1719.  
安俊明, 吴远大, 李健, 等. 基于平坦化 SOI AWG 的单纤三向器的制作[J]. *中国物理快报*, 2008, **25**(5): 1717-1719.
- [8] AN Jun-ming, Wu Yuan-da, Li Jian, et al. Triplexers Based on SOI Flattop AWGs[J]. *Journal of Semiconductor*, 2008, **29**(8): 1504-1506.  
安俊明, 吴远大, 李健, 等. 基于平坦化 SOI AWGs 的单纤三向器[J]. *半导体学报*, 2008, **29**(8): 1504-1506.
- [9] LANG Ting-ting, He Jian-jun, He Sai-ling. A novel triplexer design based on arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Semiconductor*, 2006, **27**(2): 368-372.  
郎婷婷, 何建军, 何赛灵. 基于阵列波导光栅的单纤三重波分复用器[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(2): 368-372.
- [10] XU Ying-chao, ZHANG Guo-wei, E Shu-lin, et al. A New Design to Reduce Insertion Loss and Crosstalk of AWG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 224-228.  
许英朝, 张国伟, 鄂书林, 等. 降低 AWG 插入损耗和串扰设计新方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 224-228.

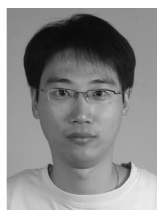
## Wide Bandwidth Low Crosstalk Triplexers Based on Silica AWG

LI Jun-yi, AN Jun-ming, WU Yuan-da, LI Jian-guang, WANG Hong-jie, HU Xiong-wei

(R&D Center of Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A wide bandwidth low crosstalk triplexer is designed and fabricated using silica arrayed waveguide gratings (AWGs). In order to obtain wide bandwidth for all three wavelengths whose wavelength differences are large, multimode interferences (MMIs) with different structures are used at the junction between output waveguides and Rowland circle. Using two-dimensional finite difference beam propagation method, the simulated results show that 3 dB bandwidth of the designed triplexer are up to 23 nm, 23.5 nm and 25 nm for 1 310 nm, 1 490 nm and 1 550 nm, respectively. The insertion losses all are 4 dB. The crosstalk is less than  $-40$  dB for 1 310 nm, and are less than  $-40$  dB for 1 490 nm and 1 550 nm. Using broadband light source, the measured results show that 3dB bandwidth for 1 550 nm is 23 nm. Using three independent narrowband light sources, the measured results show that the insertion losses of the three waves all are 7 dB. The crosstalk is less than  $-40$  dB for 1 310 nm, and are less than  $-39$  dB for 1490 nm and 1 550 nm. The measured and simulated results are basically consistent.

**Key words:** Integrated optics; Triplexer; Planar lightwave circuit (PLC); Arrayed waveguide gratings (AWGs); Multimode interferences (MMIs); Fiber-to-the-home (FTTH)



**LI Jun-yi** was born in 1981. He is pursuing his Ph. D. degree at Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, his research interests focus on triplexers in optical communication.



**HU Xiong-wei** was born in 1945. He is a researcher at the Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, and his research interests focus on waveguide devices and hybrid optoelectronic integration.