

# 基于 SU-8 聚合物的越级衍射型单纤三向波分复用器

郎婷婷<sup>1</sup> 吕飞<sup>1</sup> 邹俊<sup>2</sup> 夏翔<sup>2</sup> 金里<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018  
<sup>2</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室集成光电子研究中心, 浙江 杭州 310027  
<sup>3</sup> 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 310023

**摘要** 介绍了基于阵列波导光栅(AWG)的单纤三向波分复用器的设计、仿真、制作与测试。利用阵列波导光栅的频谱周期性,采用越级衍射方法可在无需改变 AWG 布局,无需额外元件的情况下覆盖三向波分复用器的整个工作波段(1310~1550 nm)。器件的芯层采用较高折射率的 SU-8 聚合物,下包层是二氧化硅,并用空气作为覆盖层,制作流程简单,只需要紫外光刻,成本低。仿真结果显示三个工作通道 3 dB 带宽都大于 11 nm,偏振波长漂移不超过 0.65 nm。器件测试结果验证了越级衍射设计的正确性,在 TM 偏振态下的第二和第三波长通道的额外损耗是 3 dB 左右,第一波长通道的额外损耗是 7 dB 左右,串扰在 -15 dB 左右。整个器件大小仅 1.3 mm×0.402 mm。

**关键词** 集成光学;阵列波导光栅;三向波分复用器;SU-8 聚合物;越级衍射

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0413001

## Ultra Compact Cross-Order Arrayed Waveguide Grating Triplexer Based on SU-8 Polymer

Lang Tingting<sup>1</sup> Lü Fei<sup>1</sup> Zou Jun<sup>2</sup> Xia Xiang<sup>2</sup> Jin Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China  
<sup>2</sup> Centre for Integrated Optoelectronics, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China  
<sup>3</sup> Centre for Optical and Electromagnetic, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** A compact arrayed waveguide grating (AWG) triplexer based on SU-8 strip waveguides is designed and realized. The cross-order design method utilizing the spectral periodicity of AWG don't need to change the layout of AWG, and there is no need of extra component to cover all three operating wavelengths of 1310 nm, 1490 nm and 1550 nm for the triplexer. The core layer is SU-8 polymer, the under-cladding is SiO<sub>2</sub>, and the upper-cladding is air. The AWG triplexer can be easily fabricated by using direct ultraviolet photolithography process without additional etching process. The simulation results show that the 3 dB bandwidth of three working channels are all larger than 11 nm, and the polarization dependence wavelength shift is less than 0.65 nm. Experimental results verify the cross-order design. For transverse magnetic (TM) polarization, the excess loss of the second and the third wavelength channel is about 3 dB, which is about 7 dB for the first. The crosstalk is better than -15 dB. The whole device has a compact size of as small as 1.3 mm×0.402 mm.

**Key words** integrated optics; arrayed waveguide grating; triplexer; SU-8 polymer; cross-order

**OCIS codes** 130.0130; 130.3120; 130.5460

## 1 引 言

随着人们对网络带宽需求的增加,光纤从光网

络的干线网络向接入网延伸。光纤到户(FTTH)可向用户提供极丰富的带宽,是光纤通信系统解决“最

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61205029)

作者简介: 郎婷婷(1981—),女,博士,副教授,主要从事光通信、集成光学等方面的研究。

E-mail: langtingting@cjlu.edu.cn

后一公里”的最好方式之一。FTTH 要得到普及,关键是降低接入成本。如何能够低成本高效率地实现 FTTH 系统中关键器件,例如单纤三向波分复用器,已成为目前人们最关注的问题<sup>[1-3]</sup>。虽然三向波分复用器已有了长足的发展,但其性能还有待改善,因此三向波分复用器的研究一直方兴未艾<sup>[4-5]</sup>。根据 ITU G. 983 标准,单纤三向波分复用器由三个通道组成,其中第一工作波长通道 1310 nm 用于语音业务的传输,第二工作波长通道 1490 nm 用于数据业务的传输,第三工作波长通道 1550 nm 用于视频业务的传输<sup>[6]</sup>。

用阵列波导光栅(AWG)来实现三向波分复用器具有很多优点,例如体积小、性能稳定可靠等。但是三向波分复用器的工作波长范围至少为 240 nm (1310~1550 nm),具有较大的波长跨度。若采用常规设计将会使 AWG 的衍射级次很小(小于 6),阵列波导间的长度差很小,导致常规 AWG 的几何结构无法画出。有研究者建议可以改变 AWG 常用的布局,使用多段直波导和弯曲波导的结构来实现低衍射级次 AWG,这样明显会增加器件大小<sup>[7]</sup>。利用 AWG 的频谱周期性,采用越级衍射原理<sup>[1-3]</sup>,让离第二、三信道(1490 nm 和 1550 nm)较远的第一信道(1310 nm)工作在另一个较高的衍射级次,映射到第二、三信道中间的一个虚拟信道。这样,AWG 的自由光谱范围(FSR)只需大于 60 nm(1490~1550 nm),从而大大提高衍射级次和阵列波导长度差。这样的越级衍射设计,不仅不增加器件大小,

还可以简化 AWG 的布局。

目前商用 AWG 器件主要集中在硅基二氧化硅材料上,这种波导材料的制作设备复杂,常依赖进口,例如成膜需要等离子气相沉积(PECVD);干法刻蚀需要电感耦合等离子刻蚀机(ICP)等,造成器件价格昂贵,制约了其应用普及。因此,许多研究者开始研究用聚合物材料制作 AWG 器件。聚合物和传统无机材料相比,具有许多优点,如可与多种不同的衬底材料匹配,制作设备简化,只需紫外光刻机,成本低、制作简单等<sup>[8]</sup>。已有文献证明 SU-8 聚合物材料在 800~1600 nm 之间有着很低的透射损耗和很高的稳定性<sup>[9]</sup>。本文采用具有较高折射率差的 SU-8(Microchem 2015)聚合物条型波导<sup>[9-11]</sup>实现越级衍射型的单纤三向波分复用器。

## 2 原理与结构

所采用的波导结构是用 SU-8 作为芯层,空气作为上包层,二氧化硅作为下包层。芯层和包层之间有很大的折射率差,可用来实现结构紧凑、集成度高的平面光波导回路(PLC)。而且基于聚合物波导的器件制作工艺较为简单,仅需要紫外光刻<sup>[12]</sup>。SU-8 聚合物和二氧化硅的材料折射率满足的色散关系式如表 1 所示<sup>[13]</sup>。同时,SU-8 和二氧化硅在 1550 nm 处的折射率分别为 1.574 和 1.45。设计波导芯层的宽度为 2.5  $\mu\text{m}$ ,高度为 1.8  $\mu\text{m}$ ,符合单模条件<sup>[11]</sup>。

表 1 芯层和下包层的材料特性

Table 1 Core and under cladding material characteristics

Material	Refractive index at 1550 nm	Dispersion relation $/( \lambda / \mu\text{m} )$
SU-8	1.574	$n = 1.5753 - 0.0003(\lambda - 1.47) + 0.0028(\lambda - 1.47)^2$
SiO <sub>2</sub>	1.45	$n = 1.4445 - 0.012(\lambda - 1.47) - 0.0017(\lambda - 1.47)^2$

采用越级衍射原理设计三向波分复用器,第一信道和第二、三信道工作在不同衍射级次,所以 AWG 的自由光谱范围只需覆盖第二、三信道(60 nm 左右),远小于包含全部信道的波长范围(至少为 240 nm),从而增大衍射级次和阵列波导长度差,使得 AWG 的几何结构容易实现<sup>[1-3]</sup>。

根据越级衍射原理,假设第二信道的 1490 nm 波长和第三信道的 1550 nm 波长衍射级次为  $m$ ,第一信道的 1310 nm 波长的衍射级次为  $m+i$ ,其中  $i$  为整数。根据 AWG 的频谱周期性,在  $m$  级衍射级次下,与 1310 nm 波长通道相同输出位置,会有其他衍射级次的波长  $\lambda'_1$  存在,这是只在设计中使用

的,实际应用中并不用的非工作信道,称为虚拟信道。设该波长  $\lambda'_1$  位于 1490 nm 和 1550 nm 波长通道的中间,即从中心输出波导输出,则可得到以下不同衍射级次在中心通道处的衍射方程:

$$n_a(\lambda_1)\Delta L = (m+i)\lambda_1, \quad (1)$$

$$n_a(\lambda'_1)\Delta L = m\lambda'_1, \quad (2)$$

式中  $n_a$  为阵列波导的有效折射率, $\Delta L$  为阵列波导长度差, $m$ 、 $i$  都为整数,并使用有限差分方法(FDM)计算不同波长下的 AWG 阵列波导有效折射率和平板区的有效折射率,再结合以上两式便能求出虚拟信道的波长、器件衍射级次及阵列波导长度差。

在设计过程中,选取  $i=2, m=12$ , 同时得到  $\lambda_1'$  的值为 1515.3 nm, 阵列波导长度差  $\Delta L=11.987$  mm。完成以上步骤后,就能保证第一信道和虚拟信道有相同的传播路径,会从同一个输出通道输出。在后面的步骤中,就无需考虑第一信道,只需要根据第二、第三信道和它们所在的衍射级次,按常用方法继续完成余下的 AWG 设计。

表 2 为单纤三向波分复用器的主要设计参数。图 1 为设计得到的单纤三向波分复用器的布局示意图,可以看到,采用越级衍射设计后,第一波长信道 1310 nm 位于第二波长信道和第三波长信道中间,其总尺寸为  $1.3 \text{ mm} \times 0.402 \text{ mm}$ , 比基于二氧化硅的单纤三向波分复用器小二十倍左右<sup>[2-3]</sup>。

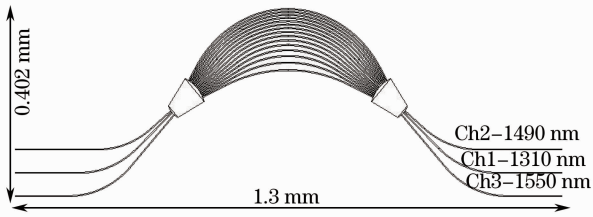


图 1 单纤三向波分复用器的布局图

Fig. 1 Layout of the designed AWG triplexer

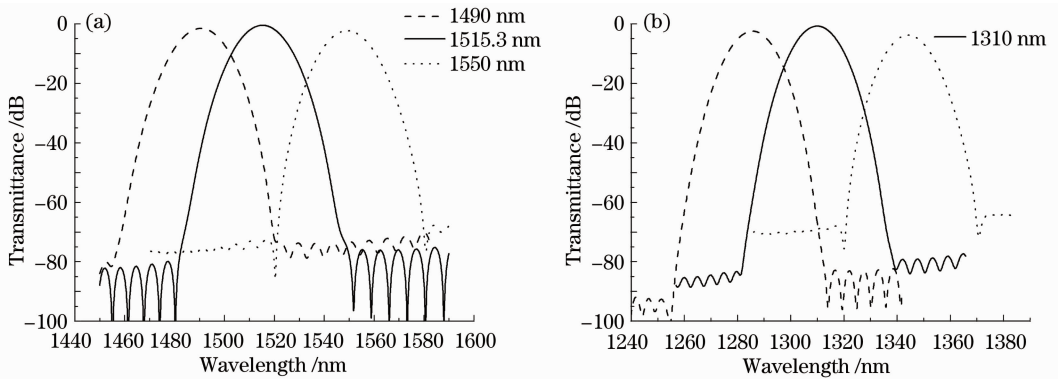


图 2 TE 偏振态下三向波分复用器器件的频谱图。(a) 1460~1600 nm 波段(衍射级次为 12 级);

(b) 1240~1380 nm 波段(衍射级次为 14 级)

Fig. 2 Simulated spectral responses of AWG triplexer for TE polarization. (a) 1460~1600 nm waveband (diffraction order is 12); (b) 1240~1380 nm waveband (diffraction order is 14)

表 3 给出了各输出通道在仿真情况下的输出能量和 3 dB 带宽值。第一信道 1310 nm 和虚拟信道 1515.3 nm 都是从中心输入波导输入,从中心输出波导输出,所以具有相对小的损耗值,同时这个数值随着波长的减小而增大,这是因为对于短波长来说,波导模式受到更强的限制作用,有更窄的模式分布,阵列波导区和自由传输区的耦合损耗会更大一些。其他两个信道的损耗值略大,是因为所有阵列波导都

表 2 AWG 三向波分复用器的主要设计参数

Table 2 Main design parameters of AWG triplexer

Design specification	Numerical value
Diffraction order for 1490 nm and 1550 nm	12
Diffraction order for 1310 nm	14
Central wavelength / nm	1515.3
Output waveguide spacing between channel 1 and 2 / $\mu\text{m}$	4.8
Output waveguide spacing between channel 1 and 3 / $\mu\text{m}$	6.6
Adjacent arrayed waveguide pitch / $\mu\text{m}$	3.5
Number of arrayed waveguides	15
Length of FPR / $\mu\text{m}$	80
Length difference between adjacent waveguides / $\mu\text{m}$	11.987
Minimum bending radius / $\mu\text{m}$	200

### 3 仿真模拟

根据以上设计原理,用光束传播方法(BPM)对 AWG 三向波分复用器进行仿真。图 2(a)、(b)为 AWG 三向波分复用器三个输出通道分别在 12 级(1460~1600 nm 波段)和 14 级衍射级次(1240~1380 nm 波段)下的频谱响应图,偏振态为 TE 模式。可以看到,中心输出通道在 1310 nm 波长和 1515.3 nm 波长下都有响应峰值,这就验证了越级衍射设计的正确性。

是对准中心输出波导的,所以旁边输出波导的损耗会略大。此外,三个信道的 3 dB 带宽都大于 11 nm,从第一波长通道的 11.1 nm 逐渐增大到第三波长通道的 14.1 nm。这一变化主要是由于波导的本征模场分布的宽度随着波长的增大而增大。同时也仿真了该器件分别在 TE、TM 偏振态下的输出特性,获得了偏振相关波长漂移(PD $\lambda$ )。如图 3 所示第一、二、三信道的 PD $\lambda$  分别为 0.56、0.61、0.65 nm,虚

拟信道的  $PD\lambda$  为 0.51 nm, 相对三向波分复用器器件较大的 3 dB 带宽可以忽略不计。这一数值也可

以通过优化 SU-8 条型波导的波导结构来进一步减小。

表 3 TE 偏振态下各通道的仿真特性

Table 3 Simulated characteristics for different channels of the TE polarization

Parameter	Value			
Wavelength /nm	1310	1490	1515.3 (dummy)	1550
Output power loss /dB	-0.81	-1.59	-0.53	-2.3
3 dB bandwidth /nm	11.1	13.9	14.1	14.1

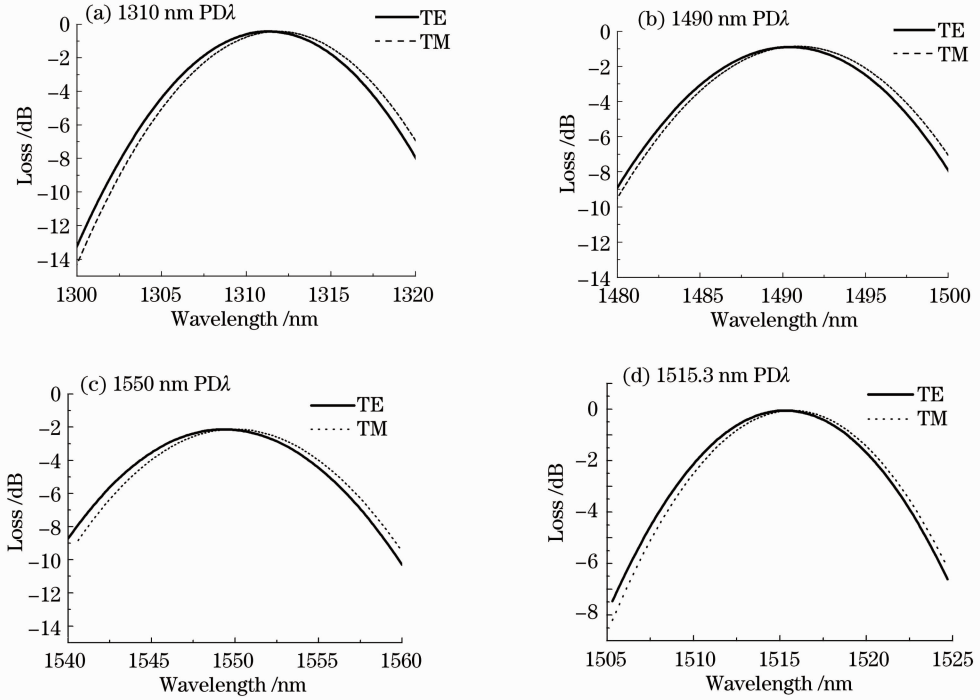


图 3 三个输出通道的  $PD\lambda$

Fig. 3  $PD\lambda$  of all three output channels

#### 4 器件制作、测试及分析

基于 SU-8 的三向波分复用器的制作工艺流程如图 4 所示。首先由等离子体增强化学气相沉积法(英国 STS Multiplex)在硅晶片上沉积 8  $\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  作为三向波分复用器的下包层。其次,通过匀胶机(CKF-411)沉积 SU-8 芯层。根据所需的 SU-8

厚度,设定匀胶的转速分为两档。第一档设定为 500 r/min,第二档为 2000 r/min,持续时间分别为 5 s、29 s。在波长为 365 nm 的紫外光下用接触式光刻机(SUSS MA6 Mask Aligner)曝光 9 s 后,在乙酸乙酯显影液下显影 15 s。最后,在 120  $^\circ\text{C}$  下后烘 1 h 用于坚固聚合物膜。

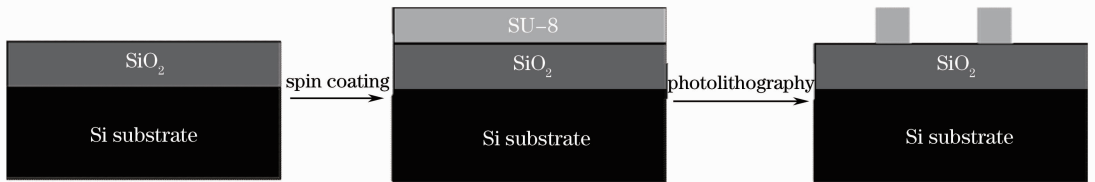


图 4 三向波分复用器制作工艺流程

Fig. 4 Production process of triplexer

由以上工艺制作了 AWG 三向波分复用器基片,图 5 为制作好的 SU-8 条型波导横截面以及整个三向波分复用器器件的电子显微镜(SEM)照片。

由于在制作聚合物波导的匀胶和光刻曝光过程中存在了一定的误差,使得制作得到的 SU-8 条型波导结构与理论设计值存在一定差异。从图中可以看

到,波导的宽度和高度分别约为  $2.3 \mu\text{m}$  和  $2.0 \mu\text{m}$ 。图中波导的侧壁不够平滑,可以使用蒸气回溶技术来进一步减小侧壁的粗糙度<sup>[14]</sup>。波导的端面也比

较粗糙,这是由于是用手工解理的方式来分割硅基片,获得单个 AWG 三向波分复用器芯片的。

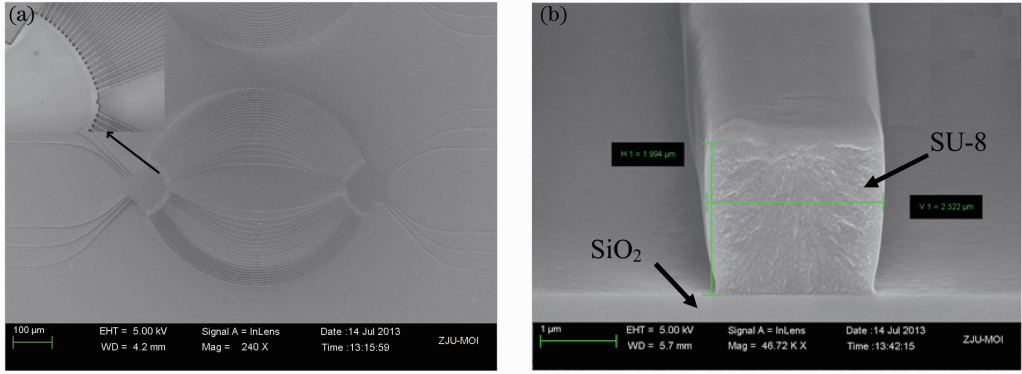


图 5 电子显微镜照片。(a)制作好的整个三向波分复用器；(b) SU-8 条形波导横截面

Fig. 5 SEM pictures. (a) Fabricated triplexer; (b) cross section of SU-8 strip waveguide

图 6 为三向波分复用器芯片的测试系统框图。为验证越级衍射的设计,测试中使用了两台可调激光器,工作波长范围分别为  $1460 \sim 1620 \text{ nm}$  (Agilent 81600B)和  $1240 \sim 1360 \text{ nm}$ (Anritsu Tunics-plus)。激光器输出的单偏振激光经过保偏光纤和光纤旋转器(Thorlabs HFR001)后,可以依次输出线性度很好的 TE 或 TM 偏振光。使用保偏光纤和透镜光纤将单偏振光耦合进三向波分复用器芯片中,在芯片的另

一端使用另一根透镜光纤和保偏光纤收集信号,最后由光谱仪(Agilent 81635A)对波长扫描得到相应的频谱。测试中,三向波分复用器芯片是固定在一个多维调节架,并利用压电陶瓷控制器(MDT693A)微调光纤位置,通过端面的三维搜索(上下,左右和前后),找到最佳位置,使得光纤和芯片的耦合效率最高。

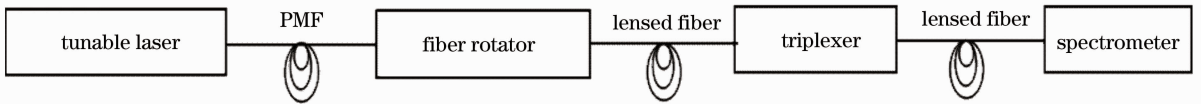


图 6 三向波分复用器测试系统框图

Fig. 6 Block diagram of the measurement system for triplexer

图 7(a)、(b)为测试得到的 AWG 三向波分复用器分别在  $1460 \sim 1560 \text{ nm}$  波段(衍射级次为 12 级)和  $1260 \sim 1360 \text{ nm}$  波段(衍射级次为 14 级)时的

频谱图。图中实线为 TM 偏振,虚线为 TE 偏振。频谱图已用与三向波分复用器同样长度的直波导的频谱进行了归一化处理。虚拟通道位于  $1500.1 \text{ nm}$

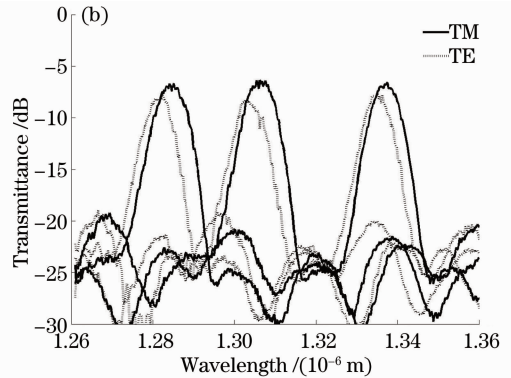
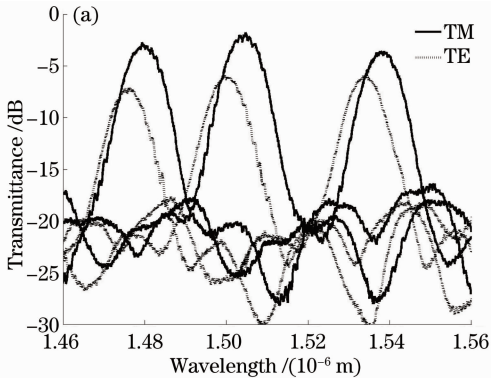


图 7 制作好的三向波分复用器的频谱图。(a)  $1460 \sim 1560 \text{ nm}$  波段(衍射级次为 12 级);  
(b)  $1260 \sim 1360 \text{ nm}$  波段(衍射级次为 14 级)

Fig. 7 Spectral responses of prepared triplexer. (a)  $1460 \sim 1560 \text{ nm}$  waveband (diffraction order is 12);  
(b)  $1260 \sim 1360 \text{ nm}$  waveband (diffraction order is 14)

(TE 偏振)或 1504.3 nm(TM 偏振),与第一波长通道的输出位置重合,从而验证了越级衍射设计的正确性。

从图 7 中可看出各个波长通道损耗较大,这有以下几方面原因:1)制作时是手工显影,显影时间稍长导致波导变窄,使得 AWG 自由传输区的平板波导和阵列波导间的耦合损耗增大;2)是由于波导端面 and 侧面较粗糙,使得器件的传输损耗以及和光纤的耦合损耗较大导致的。可以分别通过在 AWG 的自由传输区和阵列波导区的连接处加上锥形结构,或是制作工艺的优化、解理后端面抛光等方法来减小损耗。TM 偏振态下的器件损耗明显小于 TE 偏振态下的,这是由于 TM 偏振态的振动方向是在波导的垂直方向,对波导的侧壁粗糙度更不敏感;3)频谱图中的第一、二、三波长通道以及虚拟通道的中心波长与理论设计的波长相比偏离了 10 nm 左右,这主要是由实际制作中二氧化硅和 SU-8 的材料折

率以及条型波导的宽度和高度与理论设计值存在一定的偏差所引起的。

此处串扰值选取信道的峰值功率和旁瓣的最大功率值之差。三向波分复用器器件的串扰在 -15 dB 左右,这主要是由于 AWG 阵列波导的宽度变化所导致的相位误差而引起的<sup>[15]</sup>。表 4 列出了各输出通道的中心波长及其相应的 PDλ 和偏振相关损耗(PDL)。由表可知各个波长的 PDL 均在 4 dB 以内,通过选取合适的输入输出耦合结构可以将其补偿。而 PDλ 值也都在 4 μm 左右,与理论设计值不符,主要是由于波导材料折射率和结构的变化所导致的,而且由图 5(b)可见波导结构类似倒梯形结构,在靠近二氧化硅下包层处有一定底切。波长越小回波反射也越大,所以图 7(b)中的波纹比图 7(a)严重。同时由频谱图可知道各通道波长的 3 dB 带宽都在 9 nm 左右,比设计值小,这主要是由于波导变窄导致的。

表 4 三向波分复用器芯片的测试结果

Table 4 Testing results of the triplexer

Channel number	Central wavelength of TE /nm	Central wavelength of TM /nm	PDλ /nm	PDL /nm	3 dB bandwidth of TE /nm	3 dB bandwidth of TM /nm
First channel	1303.5	1306.4	2.9	1.7	7.2	8.1
Second channel	1475.8	1479.8	4.0	4.0	8.7	9.0
Third channel	1533.9	1538.1	4.2	2.2	8.7	9.1
Dummy channel	1500.1	1504.3	4.2	3.8	9.1	8.9

## 5 结 论

完成了基于 SU-8 聚合物的单纤三向波分复用器的设计、仿真、制作及测试。利用越级衍射方法,在覆盖单纤三向波分复用器的整个工作波长范围的同时,相比普通 AWG 三向波分复用器设计可以做到衍射级次更高,器件更小,布局更简单。用 SU-8 条型波导来实现三向波分复用器具有结构紧凑,集成度高,制作简单,成本低等优点。器件大小仅为 1.3 mm×0.402 mm,比二氧化硅材料制作的三向波分复用器小二十几倍。测试结果验证了越级衍射的正确性。TM 偏振态下,第二和第三波长通道的额外损耗是 3 dB 左右,第一波长通道的额外损耗是 7 dB 左右,串扰在 -15 dB 左右。

## 参 考 文 献

- 1 N Zhu, J Song, L Wosinski, *et al.*. Experimental demonstration of a cross-order echelle grating triplexer based on an amorphous silicon nanowire platform [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 383–385.
- 2 T Lang, J-J He, S He. Cross-order arrayed waveguide grating

design for triplexers in fiber access networks [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 18(1): 232–234.

- 3 X Lin, T Lang, J-J He. Design analysis and experimental verification of cross-order AWG triplexer based on silica-on-silicon [J]. *IEEE Lightwave Tech*, 2011, 29(9): 1407–1413.
- 4 W Ling, Z Sheng, C Qiu, *et al.*. Design of compact bi-directional triplexer based on silicon nanowire waveguides [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(4): 041301.
- 5 C D Truong, T A Tran, D H Tran. A design of triplexer based on a 2×2 butterfly MMI coupler and a directional coupler using silicon waveguides [J]. *Opt Commun*, 2014, 312: 57–61.
- 6 ITU-T G. 983. 3. A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation [S].
- 7 C R Doerr, M Cappuzzo, L Gomez, *et al.*. Planar lightwave circuit eight-channel CWDM multiplexer with <3.9-dB insertion loss [J]. *Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 62–65.
- 8 Wang Xianyin, Ma Chunsheng, E Shulin, *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(1): 45–50.  
王现银, 马春生, 鄂布林, 等. 聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(1): 45–50.
- 9 M Nordström, D A Zauner, A Boisen, *et al.*. Single-mode waveguides with SU-8 polymer core and cladding for MOEMS applications [J]. *Lightwave Technol*, 2007, 25(5): 1284–1289.
- 10 R Hu, D Dai, S He. A small polymer ridge waveguide with a high index contrast [J]. *Lightwave Technol*, 2008, 26(13):

1964—1968.

- 11 B Yang, Y P Zhu, Y Q Jiao, *et al.*. Compact arrayed waveguide grating devices based on small SU-8 strip waveguides [J]. *IEEE Lightwave Technol*, 2011, 29(13): 2009—2014.
- 12 K K Tung, W H Wong, E Y B Pun. Polymeric optical waveguides using direct ultraviolet photolithography process [J]. *Appl Phys A*, 2005, 80(3): 621—626.
- 13 J Zou, T Lang, L Wang, *et al.*. Uniform polarization dispersion compensation of all channels in highly birefringent silicon nanowire-based arrayed waveguide grating [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2011, 23(23): 1787—1789.
- 14 Zhang Haiming, Ma Chunsheng, Qin Zhengkun, *et al.*. Steam-redissolution technique for reduction of polymer/Si arrayed waveguide grating loss [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 690—694.  
张海明, 马春生, 秦政坤, 等. 减少聚合物阵列波导光栅损耗的蒸气回溶技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 690—694.
- 15 Zhu Daqing, Lu Dongsheng, Xu Zhen'e, *et al.*. Impact of the design parameters of AWG on crosstalk [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29: 409—411.  
朱大庆, 陆冬生, 许振鄂, 等. AWG 设计参数对串扰特性的影响[J]. *中国激光*, 2002, 29: 409—411.

栏目编辑：韩 峰