

doi:10.3788/gzxb20174608.0823003

O 波段 8 通道硅基二氧化硅平坦化阵列波导光栅的设计及制备

李超懿^{1,2}, 安俊明^{1,2}, 张家顺¹, 王亮亮¹, 李建光¹, 王红杰¹,
吴远大^{1,2}, 尹小杰¹, 王玥¹

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

(2 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘 要:设计并制作了一款应用于 IEEE 200/400 GbE 标准 80.3 bs 的阵列波导光栅. 该阵列波导光栅使用 2.0% 的超高折射率差硅基二氧化硅材料, 使得芯片尺寸及损耗较小. 为了获得平坦化的接收光谱, 将输出波导进行展宽, 采用多模波导结构, 激发若干个高阶模, 数个模式叠加使得原本高斯状的光谱顶部产生平坦化, 形成箱形接收光谱. 设计的阵列波导光栅的中心波长为 1 291.10 nm, 通道间隔为 800 GHz, 芯片尺寸为 11 mm×4 mm. 经过等离子增强化学气相沉积和感应耦合等离子刻蚀工艺制备了芯片, 测试结果表明最小的插入损耗为 -3.3 dB, 相邻通道间串扰小于 -20 dB, 单通道 1 dB 带宽在 2.12~3.06 nm 范围, 实现了良好的解复用和平坦化效果, 在实际光通信系统中有一定的实用价值.

关键词:阵列波导光栅; 波分复用; 光子器件; 平坦光谱响应; 光通信

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0823003-9

Design and Fabrication of O Band 8 Channel Flat-top Arrayed Waveguide Grating Based on Silica on Silicon

LI Chao-yi^{1,2}, AN Jun-ming^{1,2}, ZHANG Jia-shun¹, WANG Liang-liang¹,
LI Jian-guang¹, WANG Hong-jie¹, WU Yuan-da^{1,2}, YIN Xiao-jie¹, WANG Yue¹

(1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy
of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: An arrayed waveguide grating, which is applied to IEEE 200/400 GbE standard 80.3 bs, is designed and manufactured. The arrayed waveguide grating uses the silica-on-silicon material, which has 2.0% ultra-high refractive index difference, making the less chip size and insertion loss. In addition, in order to obtain a flattened receiving spectrum, the output waveguides are widened and the multimode waveguide structures are used to excite a few of higher order modes. Several patterns are overlaid so that the top of the original Gaussian spectrum is flattened and forms a box-like receiving spectrum. At last, the designed center wavelength of the arrayed waveguide grating is 1 291.10 nm, the channel spacing is 800 GHz, and the device size is 11 mm×4 mm. The microchip is manufactured by plasma enhanced chemical vapor deposition and inductively coupled plasma etching. The test results show that, the minimum insertion loss is about -3.3 dB, the crosstalk between adjacent channels is less than -20 dB,

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2015AA016902)、国家自然科学基金 (Nos. 61435013, 61405188) 和集成光电子学国家重点联合实验室自主研究课题资助

第一作者: 李超懿 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子集成芯片. Email: lichaoyi@semi.ac.cn

导师 (通讯作者): 安俊明 (1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光波导器件及光电子集成研究及产业化. Email: junming@semi.ac.cn

收稿日期: 2017-03-01; **录用日期:** 2017-04-18

<http://www.photon.ac.cn>

and the single channel 1 dB bandwidth ranging from 2.12 nm to 3.06 nm, realizing a good wavelength demultiplexing and flattening effect, and having a certain practical value in the actual optical communication system.

Key words: Arrayed waveguide gratings; Wavelength division multiplexing; Photonic devices; Flat spectral response; Optical communication

OCIS Codes: 230.3120; 230.7370; 060.4510

0 引言

随着信息时代的到来,以及云计算、视频流和移动服务等应用的普及,人们对光通信网络中数据传输的速率和容量有了更高的要求^[1-2].在数据中心和局域网等光通信网络中,越来越多地使用波分复用技术来提高数据传输的容量^[3-5].常用的波分复用器有阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)^[6]、刻蚀衍射光栅(Etched Diffraction Grating, EDG)^[7]、微环谐振器(MicroRing Resonator, MRR)^[8]以及级联马赫-曾德干涉仪结构(Cascaded Mach-Zehnder Interferometer, CMZI)^[9]等.2014年IEEE成立了工作小组,着手制定200/400 GbE的标准802.3 bs,并于2015年推出了标准初稿,预计2017年确定标准终稿^[10].标准里规定在传输最大距离2 km(400GBASE-FR8)和10 km(400 GBASE-LR8)情况下在O波段上通过8个通道、每个通道50G的波分复用技术来实现400G的传输要求.

在目前的40/100G系统中,常采用4通道波分复用/解复用器构成光发射组件(Transmitter Optical Sub-Assembly, TOSA)和光接收组件(Receiver Optical Sub-Assembly, ROSA)^[11-13].在400G系统短距离传输中通道数则扩展为8个,因此需要结构紧凑、损耗低、容差性高的器件,对其的研究也刚刚起步.微环谐振器或级联马赫-曾德结构会随着通道数的提高而增加器件的单元数,从而增加器件尺寸,不利于集成^[14].刻蚀衍射光栅的结构比较紧凑,但对刻蚀反射面要求较高.阵列波导光栅因为其通道数扩展较方便,光谱平坦化较显著成为较好的选择.制作AWG的材料种类也有很多,聚合物(Polymer)^[15]、硅基二氧化硅(Silicon-on-Silicon)^[16-17]、磷化铟(InP)^[18]和绝缘体上硅(Silicon-on-Insulator, SOI)^[19]等都是比较常见的材料,其中硅基二氧化硅材料的AWG因为其损耗和串扰很小,成本较低,易于加工且和光纤耦合损耗较低等优点在光通信系统中得到广泛应用.

本文采用超高折射率差硅基二氧化硅材料设计并制作了应用于IEEE 200/400G协议标准802.3 bs的O波段8通道平坦化阵列波导光栅,信道间隔800 GHz,输出波导展宽从而使光谱平坦化,具有一定的波长漂移容差性.整个器件尺寸约为11 mm×4 mm,结构紧凑,便于和其它光电器件集成.

1 基本原理

图1为典型的AWG示意图,它的输入波导、输出波导和阵列波导均为条形波导,而两个罗兰圆结构为平板波导,称为自由传播区(Free Propagation Region, FPR)^[20].解复用情形下,光从其中一条输入波导输入,经过FPR时将发生高斯远场衍射,以相同相位耦合进阵列波导的输入端,再经过相邻长度差为 ΔL 的阵列波导传输后产生相位差,通过输出端的罗兰圆结构将不同波长的光聚焦到不同的位置,从而从不同的输出波导输出,实现解复用功能.复用功能就是它的逆过程,器件结构不用改变.

相邻阵列波导的长度差 ΔL 由式(1)确定

$$n_c \Delta L = m \lambda_0 \quad (1)$$

式中, n_c 为矩形波导的有效折射率, m 为衍射级数, λ_0 为中心波长.衍射级数 m 可由式(2)计算得出

$$\text{FSR} = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g} \quad (2)$$

式中,FSR为自由光谱区(Free Spectrum Range),即某一个通道出现两次波峰之间的波长间距.罗兰圆直径

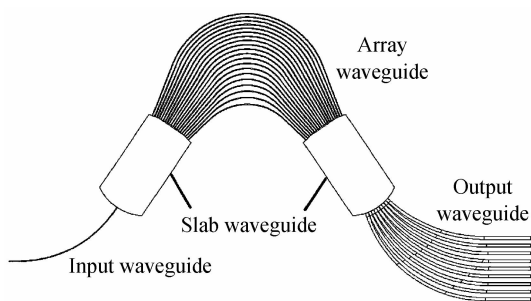


图1 AWG基本结构
Fig.1 AWG basic structure

R 一般由式(3)求出,即

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta x_0 n_s d n_c}{R m n_g} \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为信道间隔, Δx_0 为输出波导间距, n_s 为平板波导有效折射率, n_g 为群折射率, d 为阵列波导间距。

2 参量确定

2.1 中心波长、通道间隔和 FSR 的选择

设计并制作的 AWG 是应用于 200/400 GbE 光通信协议 802.3 bs 中的波分复用器件. 协议的初稿中已经明确地提出了 8 通道传输所对应的波长^[10],见表 1.

表 1 IEEE 802.3bs 波分复用通道分配
Table 1 IEEE 802.3bs WDM lane assignments

Lane	Center frequency/THz	Center wavelength/nm	Wavelength range/nm
L ₀	235.4	1 273.55	1 272.55 to 1 274.54
L ₁	234.6	1 277.89	1 276.89 to 1 278.89
L ₂	233.8	1 282.26	1 281.25 to 1 283.28
L ₃	233.0	1 286.66	1 285.65 to 1 287.69
L ₄	231.4	1 295.56	1 294.53 to 1 296.59
L ₅	230.6	1 300.05	1 299.02 to 1 301.09
L ₆	229.8	1 304.58	1 303.54 to 1 305.63
L ₇	229.0	1 309.14	1 308.09 to 1 310.19

从表 1 可以看出,8 个通道的间隔并不是均匀的,在 L₃ 和 L₄ 通道之间有一个跳变,正好跳过了一个波长间隔,因此设计的时候就设计成九个通道,实际使用中选取两边的各四个通道,每两个通道间的间隔为 800 GHz,L₃ 和 L₄ 之间的通道间隔为 1 600 GHz,中心波长 λ_0 约为 1 291.10 nm.

为了不增加额外损耗,FSR 的范围应该尽可能扩展到传输范围之外,如果传输范围与 AWG 的 FSR 大小相同,则靠近边缘的通道中会有额外的损耗,影响性能,因此 FSR 应尽可能达到传输范围的两倍.但是,根据式(2)、(3),增大 FSR 又会增大罗兰圆直径,从而增大器件的尺寸,造成集成的困难.因此,折中后选取 FSR 为 1.5 倍的信道带宽,即 9.6 THz,如图 2 所示.

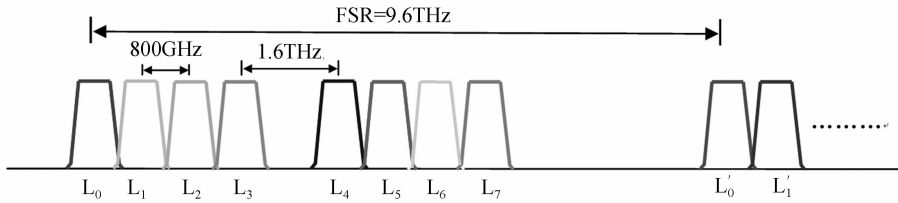


图 2 波长分配示意图

Fig. 2 Wavelength Allocation diagram

2.2 输入、阵列波导和输出波导几何尺寸的选择

AWG 选取硅基二氧化硅材料来制作,根据实际工艺条件,芯层和包层的折射率分别为 1.476 53 和 1.447,折射率差为 2%. 利用平板波导和矩形波导的模式条件^[21]

$$m = \frac{2h}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

$$b_{\max} = 2^{-\frac{3}{2}} \Delta^{-\frac{1}{2}} \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (5)$$

式中, m 为模式数,可以取 0、1、2……(整数), h 为波导厚度, n_1 、 n_2 分别为芯层和包层折射率, b_{\max} 为矩形波导保持单模的最大宽度. 令 m 小于 2,可以求得厚度 h 小于 4.394 μm ,考虑实际加工的复杂度,选取波导厚度为 4 μm . 根据式(5),求得矩形波导工作在单模时的最大宽度约为 2.2 μm ,但是利用薄膜模式匹配法(Film Mode Matching, FMM)^[22-23]进行模拟计算后发现光学限制因子偏低. 适当增大波导宽度来减小光的泄漏,如图 3 所示,选取限制因子达到 0.9 时的宽度 4 μm 作为波导宽度,求得平板波导有效折射率 n_s 为 1.471 753,矩形波导的有效折射率 n_c 为 1.466 957,群折射率 n_g 为 1.480 628. 根据式(2)求得衍射级数 m ,

再根据式(1)求得 ΔL .

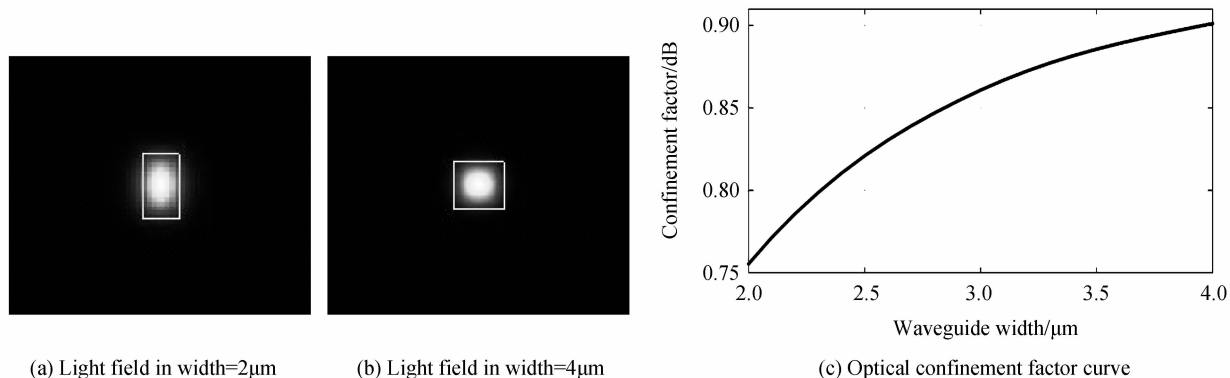


图3 波导宽度变化时,光场分布图及限制因子曲线

Fig. 3 Light field diagram and optical confinement factor curve with changing width

在实际通信过程中光波的波长可能发生微小漂移,与标准中规定的不一致,这就要求通信器件需要有一定的容差能力.对于 AWG 来说,需要接收光谱的顶端平坦化,能够容许波长发生微小漂移而不影响接收性能.光谱平坦化有许多方法,比较常用的方法有二种,一种是在输入波导与输入罗兰圆之间或输出罗兰圆与输出波导之间引入及矩形或锥形 MMI 结构^[24],另一种是输出波导采用多模波导结构^[25].第一种方法在实现平坦的同时,增加了损耗,但输出可与单模光纤匹配.第二种方法在实现平坦化的同时,损耗较小,但输出需要与多模光纤匹配,适用于输出后短距离传输.考虑本文针对数据中心混合集成应用,距离较短,选用第二种方案.根据 FMM 模拟值,当输出波导的宽度增加到 $11 \mu\text{m}$ 时,传播中心波长 λ_0 的光波情况下可以激发出足够多的模式,如图 4 所示,使得叠加波形平坦化.

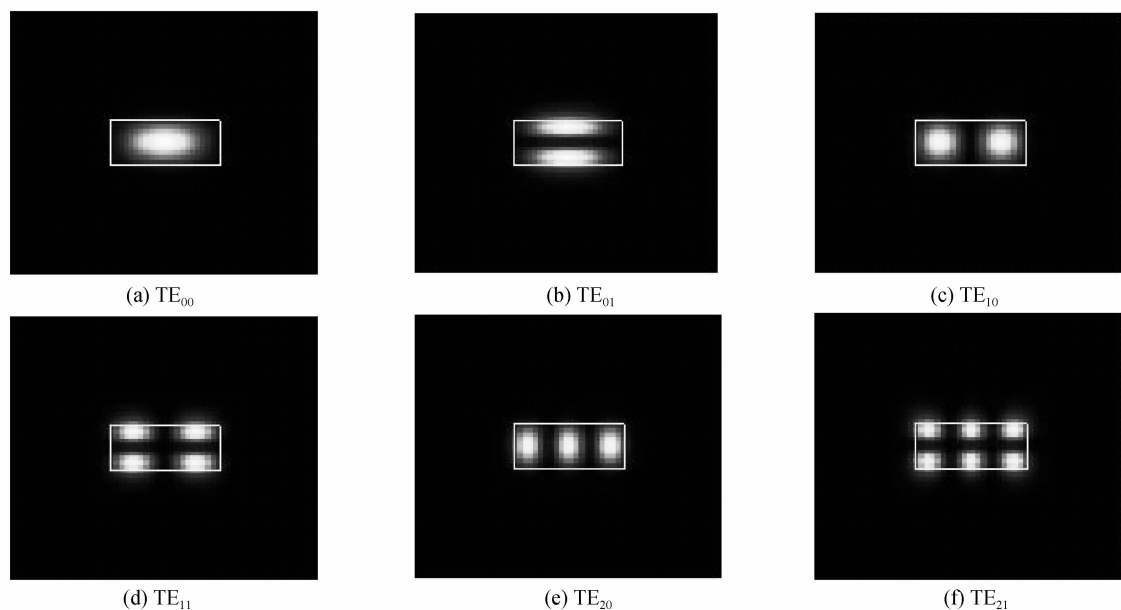


图4 波导宽度为 $11 \mu\text{m}$ 时激发出的波导模式

Fig. 4 The waveguide patterns with the waveguide width is $11 \mu\text{m}$

2.3 阵列、输出波导间隔和最小弯曲半径的选择

需要确定波导间隔 d 和 Δx_0 ,如图 5 所示,当阵列波导间距为 $6 \mu\text{m}$ 时,传输会产生很大的耦合,而间距扩大到 $8 \mu\text{m}$ 时耦合则很小,输出功率基本不发生变化,本文选择 d 为 $8 \mu\text{m}$,同理可确定输出波导间距 Δx_0 为 $13 \mu\text{m}$,根据式(3)可以求得罗兰圆直径 R ,从而最终确定 AWG 各参量.图 6 将输入和输出波导进行等比例对比以显示两者的宽度差异和波导间隔大小,输入波导末端采用喇叭形展宽来减小模式失配^[26].

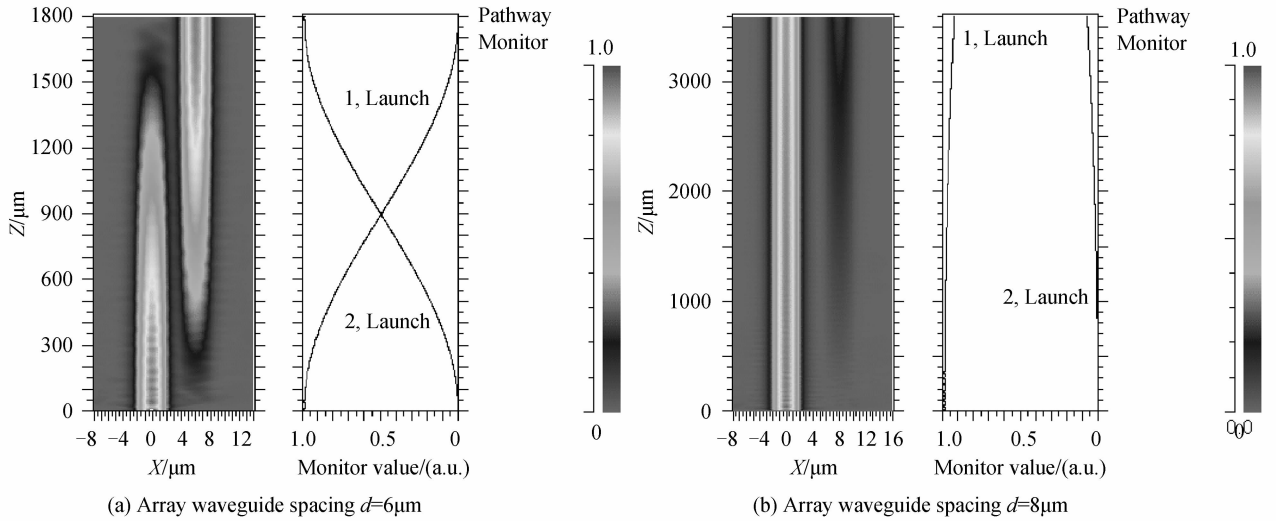


图5 阵列波导耦合与间距关系

Fig. 5 The relationship diagram between array waveguide coupling and spacing

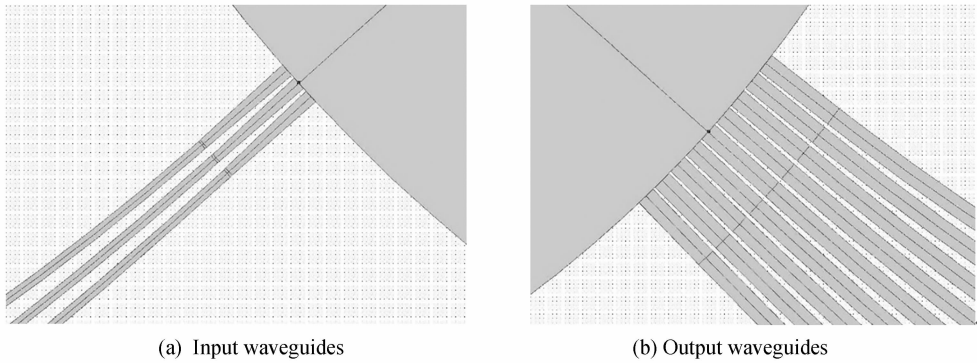


图6 输入和输出波导结构

Fig. 6 Input and output waveguide structure

为了方便在使用时和输入光纤、探测器对接,在设计 AWG 版图时,需要将输入、输出波导居中,这将大量使用弯曲波导.当弯曲半径越小时,器件尺寸可以相对减少,使得版图更加紧凑.但是弯曲半径太小时,也会使损耗大幅增加,因此需要选取一个折中值^[27].采用数值模拟方法中的光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)^[28]得到图7输出波导光功率随弯曲半径变化的曲线,弯曲波导长度为2 mm.从图中可以看出,当弯曲半径大于500 μm时,造成的弯曲损耗就可以忽略.因此输入波导的最小弯曲半径选择500 μm.

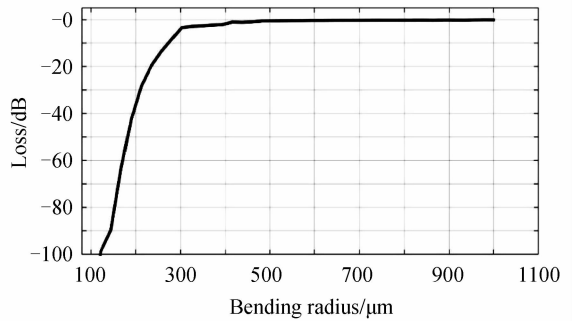


图7 矩形波导弯曲半径与损耗的关系

Fig. 7 The relationship between bending radius and loss of rectangular waveguide

整个 AWG 版图如图8,尺寸为11 mm×4 mm.最终,各项具体参量见表2.



图8 AWG 整体版图

Fig. 8 AWG overall layout

表 2 AWG 参量列表
Table 2 AWG parameter list

Name	Symbol	Value
Center wavelength/ μm	λ_0	1.291 1
Wavelength spacing/GHz	$\Delta\lambda$	800
Waveguide thickness/ μm	h	4
Array waveguide width/ μm	a	4
Output waveguide width/ μm	b	11
Diffraction order	m	23
Array waveguide spacing/ μm	d	8
Output waveguide spacing/ μm	Δx_0	13
Adjacent array waveguide length difference/ μm	ΔL	20.243
Roland circle diameter/ μm	R	1 465.2
Free spectral region/ THz	FSR	9.6
Array waveguide number	M	59

3 实验与结果分析

3.1 制作流程

AWG 的制作流程是在硅衬底上热氧化生成二氧化硅下包层,然后利用等离子体增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)生长掺 Ge 的二氧化硅芯层,对芯层进行光刻和刻蚀形成 AWG 的波导结构,再利用 PECVD 淀积二氧化硅上包层,工艺流程见图 9. 制成的 AWG 芯片局部结构和端面扫描电子显微镜照片分别见图 10 和 11,从图中可以看出,波导边界清晰,宽度与设计值相符. 将制备好的芯片从晶圆中切割解成单独的芯片,再经过端面抛光,以减小与光纤的耦合损耗.

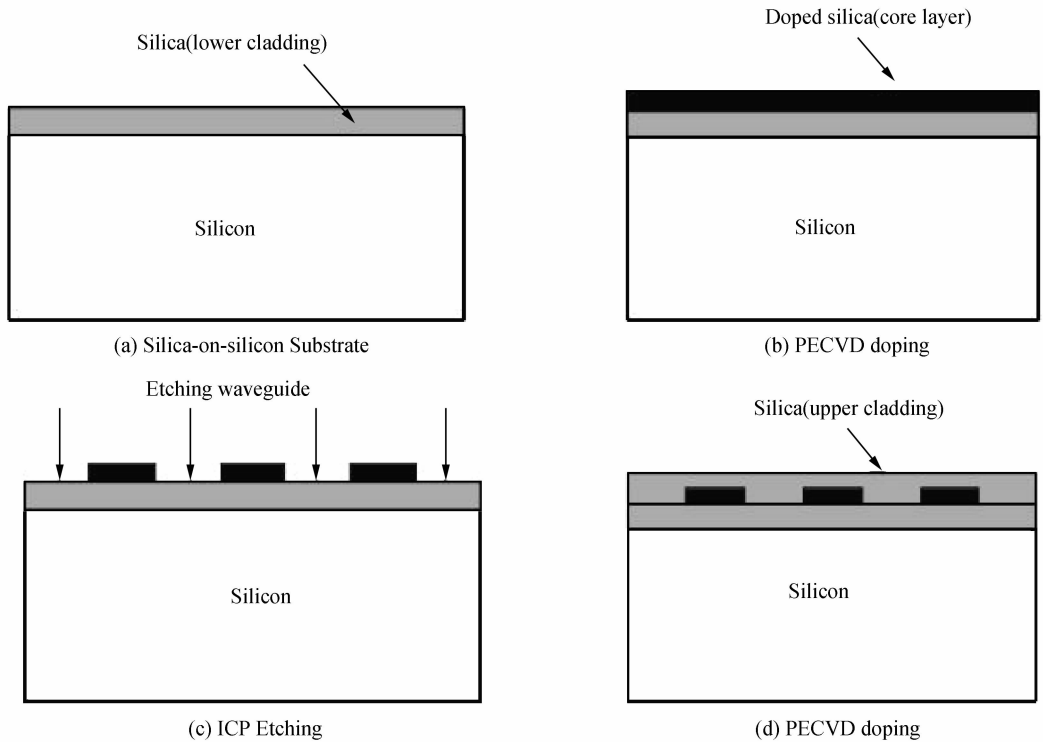


图 9 硅基二氧化硅 AWG 芯片的制作工艺流程
Fig.9 Flow chart of the fabrication progress for silica AWG chips

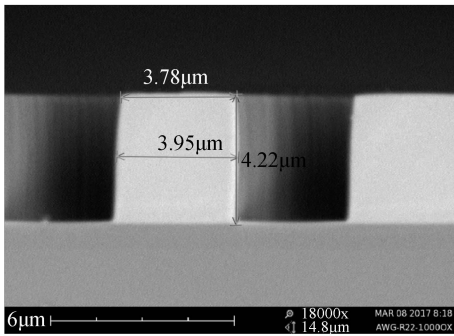
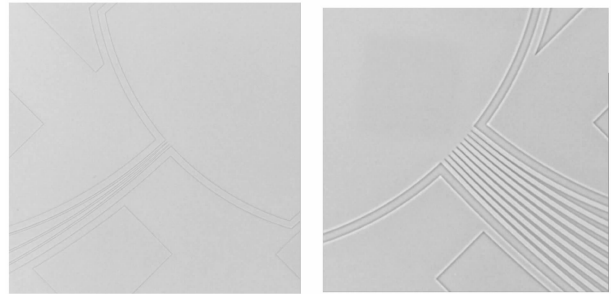


图 10 AWG 芯片的刻蚀波导扫描电子显微照片

Fig. 10 Waveguide SEM of AWG chips



(a) Singlemode input waveguide (b) Multimode output waveguide

图 11 AWG 芯片的局部显微镜照片

Fig. 11 Local microscopy of AWG chips

3.2 测试过程与结果分析

将输入和输出光纤阵列分别固定在左右二个六轴光学精密微调架上,AWG 芯片固定在中间平台上,通过调节左侧微调架,将 O 波段(1 260~1 360 nm)可调谐光源通过输入光纤耦合进入 AWG 芯片输入波导,调节右侧微调架,AWG 芯片输出多模波导和输出光线阵列耦合,同时滴上匹配液进一步减小耦合损耗,将调节到损耗最小值时,进行输出谱数据采集.测试得到的光谱如图 12 所示.从图中可以看出,器件的插损在-3.3~-4.3 dB 范围内,信道间的串扰小于-20 dB,两侧通道的损耗比靠近中部的通道损耗要大一些,可适当增大 FSR,以减少两侧通道与中间通道损耗的非均匀性.

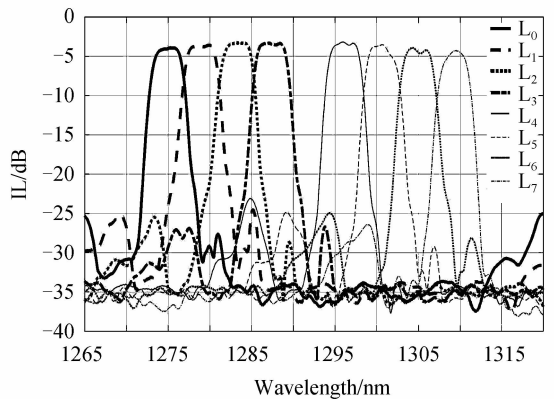


图 12 AWG 测试光谱图

Fig. 12 AWG spectrum diagram

图 13 为单个通道 1 dB 带宽的分析示意图.表 3 为八个通道各自的 1 dB 带宽、对应的始末波长以及中心波长数值,可以看到和标准里规定的相比,各通道实际中心波长偏大了约 1 nm,这是由于制作芯区波导时,波导宽度和高度和设计值有偏差造成的.设计里波导宽度和高度均为 4 μm,然而实际的尺寸如图 10 所示,波导宽度变窄,高度变高.通过 BPM 数值模拟得到的芯区折射率与波导宽度、高度的等高线图如图 14 所示,图中三角形为设计值,而圆形为实际值,可以看到实际折射率 n_e 比设计折射率偏高,再根据式(1)可得 λ_0 增大,从而使各个通道中心波长均偏大.另外也可以看出 1 dB 带宽逐渐减小,接收光谱特性显示从短波长通道到长波长通道逐渐由箱形向高斯状过渡.这说明在长波长的通道内激发的模式数还不够多,导致光谱平坦化程度还不足.进一步从式(4)也可以看出,随着 λ 的逐渐增大,波导内可以传播的模式数逐渐减少,也就是说 λ 逐渐增加的情况下,要达到同样大的模式数量,波导的尺寸需要逐渐增大,而 AWG 各通道的波导尺

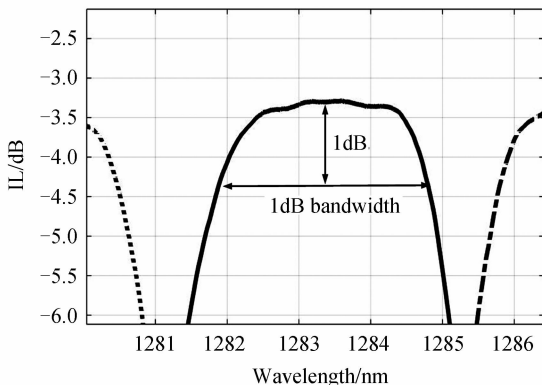


图 13 光谱顶部放大图

Fig. 13 Magnifying image of the spectral top

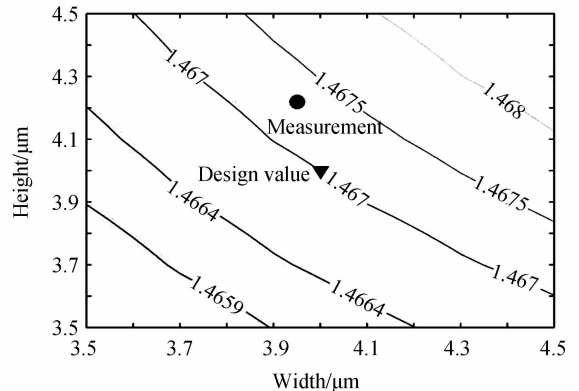


图 14 矩形波导有效折射率 n_e 随宽度和高度变化等高线

Fig. 14 Contour map of effective refractive index and width or height of rectangular waveguide

寸是均一的,从而导致了上述结果.因此,如果需要各个通道的平坦化效果都较好,则需要继续增大输出波导的尺寸.

表 3 8 通道 1 dB 带宽测试数值
Table 3 8 channel 1 dB bandwidth testing values

Lane	Center wavelength/nm	Starting wavelength/nm	Ending wavelength/nm	1 dB bandwidth/nm
L ₀	1 274.41	1 273.58	1 276.4	2.82
L ₁	1 278.99	1 277.46	1 280.52	3.06
L ₂	1 283.34	1 281.92	1 284.76	2.84
L ₃	1 287.39	1 285.8	1 288.98	3.18
L ₄	1 296.18	1 294.66	1 297.7	3.04
L ₅	1 300.31	1 299.2	1 301.42	2.22
L ₆	1 304.94	1 303.5	1 306.38	2.88
L ₇	1 309.5	1 308.44	1 310.56	2.12

4 结论

本文设计了一种可以应用于 IEEE 200/400G 光通信协议 802.3 bs 中的 8 通道 AWG,输出波导进行了宽度展宽,从而得到多模波导结构,使得接收光谱平坦化,可以降低实际工作中工作波长的准确性.经过实验测得的 AWG 片上最小插入损耗为-3.3 dB,串扰小于-20 dB,1 dB 带宽为 2.12~3.06 nm.整个器件尺寸约为 11 mm×4 mm,结构紧凑,利于后续与激光器、探测器等有源器件集成,从而在光通信系统中发挥重要作用.

参考文献

- [1] DOI Y, NAKANISHI Y, YOSHIMATSU T, *et al.* Compact 8-wavelength receiver optical sub-assembly with a low-loss AWG demultiplexer for 400-gigabit datacom [C]. 2015 41st European Conference on Optical Communication, 2015.
- [2] KANAZAWA S, FUJISAWA T, TAKAHATA K S, *et al.* 400-Gbs operation of flip-chip interconnection EADFB laser array module [C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015.
- [3] ARIMA R, YAMASHITA T, YAHAGI T, *et al.* Demonstration of world-first 103 Gbit/s transmission over 40 km single mode fiber by 1310 nm LAN-WDM optical transceiver for 100GbE [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011.
- [4] FUJISAWA T, KANAZAWA S, ISHII H, *et al.* 1.3-mu m 4×25-Gb/s monolithically integrated light source for metro area 100-Gb/s ethernet [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(6): 356-358.
- [5] KANG S K, LEE J K, LEE J C, *et al.* A compact 4 × 10-Gbps CWDM ROSA module for 40G ethernet optical transceiver [C]. Electronic Components and Technology Conference, 2010; 2001-2005.
- [6] ZHANG Jia-shun, AN Jun-ming, ZHAO Lei, *et al.* Ultra compact triplexing filters based on SOI nanowire AWGs [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, **32**(4): 044009.
- [7] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, DUMON P, *et al.* Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(5): 1269-1275.
- [8] FANG Q, PHANG Y T, TAN C W, *et al.* Multi-channel silicon photonic receiver based on ring-resonators [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(13): 13510-13515.
- [9] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, *et al.* WDM filters for Silicon Photonics Transceivers [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2011; 842-844.
- [10] IEEE P802.3bs. 200Gb/s and 400Gb/s ethernet task force [EB/OL]. (2016-5-16) [2017-2-27]. <http://www.ieee802.org/3/bs/>.
- [11] DOI Y, OGUMA M, YOSHIMATSU T, *et al.* Compact high-responsivity receiver optical subassembly with a multimode-output-arrayed waveguide grating for 100-Gb/s ethernet [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(15): 3286-3292.
- [12] OHYAMA T, DOI Y, KOBAYASHI W, *et al.* Compact hybrid-integrated 100-Gb/s TOSA using EADFB laser array and AWG multiplexer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(7): 802-805.
- [13] OHYAMA T, DOI Y, KOBAYASHI W, *et al.* Compact hybrid integrated 100-Gb/s transmitter optical sub-assembly using optical butt-coupling between EADFB lasers and silica-based AWG multiplexer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(3): 1038-1046.
- [14] AN Jun-ming, ZHANG Jia-shun, WANG Yue, *et al.* Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(11): 110006.

安俊明, 张家顺, 王玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**(11): 53-58.

- [15] QIN Zheng-kun, YU Yue, SONG Jia, *et al.* Analysis of fabrication results for 17×17 polymer arrayed waveguide grating multiplexers with flat spectral responses [J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, **34**(9): 094011.
- [16] QI Wei, SHAO Hai-feng, YU Hui, *et al.* Second harmonic distortion comparison of Mach-Zehnder silicon modulators based on lateral and interdigitated PN junctions[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(6): 758-763.
戚伟, 邵海峰, 余辉, 等. 基于侧向PN结和交趾型PN结的硅基Mach-Zehnder调制器的二阶谐波失真特性[J]. *发光学报*, 2016, **37**(6): 758-763.
- [17] DAI Hong-qing, AN Jun-ming, WANG Yue, *et al.* Monolithic integration of a silica-based 16-channel VMUX/VDMUX on quartz substrate [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, **35**(10): 104010.
- [18] PAN Pan, AN Jun-ming, WANG Liang-liang, *et al.* Error analysis of InP arrayed waveguide grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 293-297.
潘盼, 安俊明, 王亮亮, 等. InP阵列波导光栅的误差分析[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 293-297.
- [19] YUAN Pei, WU Yuan-da, WANG Yue, *et al.* Monolithic integration of a 16-channel VMUX on SOI platform [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, **36**(8): 084005.
- [20] SMIT M K. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased-array [J]. *Electronics Letters*, 1988, **24**(7): 385-386.
- [21] XU Yong-qing, LIANG Chun-guang, YANG Yong-jun, *et al.* Silica-on-silicon optical waveguides [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, **22**(12): 1546-1550.
徐永青, 梁春广, 杨拥军, 等. 硅基SiO₂光波导[J]. *半导体学报*, 2001, **22**(12): 1546-1550.
- [22] SUDBO A S. Numerically stable formulation of the transverse resonance method for vector mode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(3): 342-344.
- [23] SUDBO A S. Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides [J]. *Pure & Applied Optics*, 1993, **2**(3): 211-233.
- [24] ZHANG Li-yao, WU Yuan-da, AN Jun-ming, *et al.* Flat spectral response of arrayed waveguide grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 379-385.
张伶俐, 吴远大, 安俊明, 等. 阵列波导光栅平坦化的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 379-385.
- [25] AMERSFOORT M R, DEBOER C R, VANHAM F P G M, *et al.* Phased-array wavelength demultiplexer with flattened wavelength response [J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(4): 300-301.
- [26] MILTON A F, BURNS W K. Mode coupling in optical waveguide horns [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, **13**(10): 828-835.
- [27] MARCATILI E A J. Bends in optical dielectric guides [J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(7): 2103-2133.
- [28] VANROEY J, DERDONK J V, LAGASSE P E. Beam-propagation method: analysis and assessment [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, **71**(7): 803-810.