

提高损耗均匀性的氮氧化硅阵列波导光栅路由器

王书新¹, 郎婷婷², 宋广益¹, 何建军^{1*}

¹浙江大学光电科学与工程学院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;

²中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 通过在阵列波导的出口末端加入辅助波导, 实现一种输入和输出通道数均为 $7(7 \times 7)$, 通道间隔为 400 GHz 的氮氧化硅阵列波导光栅路由器(AWGR), 以提高损耗均匀性。利用引入的辅助波导调节在输出自由传输区的像平面处的场分布, 通过优化其结构参数在像平面获得了平顶形状的场分布。与传统的 AWGR 相比, 当光从中心输入通道输入时, 带有辅助波导的 AWGR 所测得的输出损耗不均匀性从 2.09 dB 减少为 0.76 dB; 而当光从边缘输入通道输入时, 输出通道输出的损耗不均匀性从 1.99 dB 降低为 0.88 dB, 可满足实际光通信、光互连等系统的需求。由于辅助波导的引入, 中心通道的最小插入损耗从 2.99 dB 增加为 3.82 dB, 边缘通道的最小插入损耗从 4.83 dB 增加为 5.46 dB。所有通道的串扰约为 18 dB。

关键词 光学器件; 波导; 光栅; 集成光学器件; 导波应用

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1123001

SiON-Based Cyclic Arrayed Waveguide Grating Routers with Improved Loss Uniformity

Wang Shuxin¹, Lang Tingting², Song Guangyi¹, He Jianjun^{1*}

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Center for Integrated Optoelectronics, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract By employing auxiliary waveguides between the exit ends of arrayed waveguides, we experimentally demonstrate a SiON-Based cyclic arrayed waveguide grating router (AWGR) with 7 input and 7 output channels (7×7) and 400 GHz channel gap, to improve the loss uniformity. The field distribution at the image plane of the output free propagation region is adjusted by the auxiliary waveguides, in the other words, a flat-top shape can be obtained at the image plane by optimizing the parameters. The measured loss non-uniformity of the AWGR with auxiliary waveguides improves from 2.09 dB to 0.76 dB for the central input channel and from 1.99 dB to 0.88 dB for the edge input channel compared to the conventional AWGR. The minimum insertion loss of the central channel increases from 2.99 dB to 3.82 dB, and that of the edge channel increases from 4.83 dB to 5.46 dB. The crosstalk of all the channels is approximately 18 dB.

Key words optical devices; waveguides; gratings; integrated optics devices; guided wave applications

OCIS codes 230.7370; 050.2770; 130.3120; 310.2785

1 引 言

现如今光通信市场发展迅速, 对具有更多功能、更复杂且制作成本低的光子器件有巨大的显示需求。目前, 波分复用(WDM)系统的使用量正在迅速增加, 而具有高精度和高稳定性的阵列波导光栅(AWG)是

一种重要的波长选择器件, 并被广泛应用于光通信系统和光互连系统中^[1]。全光路由在 WDM 系统中具有很大应用潜力, 且已有研究人员为在单个芯片上实现全光路由做了大量的工作^[2]。在各种全光路由器中, 循环的 $N \times N$ 阵列波导光栅路由器(AWGR)不仅允许具有 N 个波长的非阻塞的 N^2 互连, 而且

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-06-16; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61535010, 61875251)、国家 863 计划(2013AA014401)、浙江省基础公益研究计划项目(LGG18F050003)

* E-mail: jjhe@zju.edu.cn

还可同时满足大带宽和低延迟的要求^[3]。

到目前为止,基于各种材料的 AWG 已被实现,例如硅基二氧化硅^[4]、磷化铟^[5]、绝缘体上硅(SOI)^[6]和聚合物^[7-8]等。氮氧化硅(SiON)在集成光学领域是一种极具吸引力的材料,具有良好的稳定性、高透明度和可调节的折射率等特性^[9-11],其折射率可从 1.44(二氧化硅, SiO₂)调节至 2.00(氮化硅, Si₃N₄),而且还可使用互补金属氧化物半导体(CMOS)制作技术同时制备基于 SiON 的波导芯层和基于 SiO₂ 的波导包层。

然而,传统的 AWGR 存在插入损耗不均匀的问题,即边缘输出通道与中心输出通道的输出信号存在至少 3 dB 的本征损耗差异。由于阵列波导中光场模式一般符合高斯分布,因此来自一个输入通道的所有输出通道的透射光谱包络也具有准高斯形状。故边缘通道的插入损耗比中心通道大^[1]。科学家们已提出很多降低损耗不均匀性的方法。例如:在输出通道中引入多模干涉耦合器,组合成不同的输出通道等^[12-13],但这些设计往往会使器件结构变得复杂,也会增加器件的尺寸。利用波前匹配方法设计的模场转换器,也可实现一种基于 SiO₂ 的具有低损耗均匀性的 AWGR,该模场转换器是将阵列波导的基模转换为在平板与输出波导接口处的平顶远场分布^[14-15]。同时,通过适当地分配自由传输区(FPR)的罗兰圆结构(星型耦合器)和整个输出波导阵列之间的阵列波导的方向,也可将不同波长的光均匀分布到不同的输出波导中^[16-17]。此外,在相邻阵列波导之间添加辅助波导有助于形成星型耦合器的辐射模式,从而减小基于 SiO₂ 的 AWGR 的损耗不均匀性^[18]。类似地,也有通过引入双锥形辅助波导来提高 AWGR 多路复用器^[19]和基于绝缘体上硅的路由器^[20]的通道损耗均匀性。

本文首先对 SiON 波导的基模模场分布进行模拟仿真,并对其结构进行验证。随后,在相邻阵列波导的出口末端设计两种引入/未引入辅助波导的 AWGR(特殊设计和常规设计)。两种 AWGR 都是基于 SiON 波导,通道间隔为 400 GHz,输入和输出通道数均为 7(7×7)。并且最终通过实验证明辅助波导的引入可有效降低损耗不均匀性。

2 理论与仿真

当 SiON 和 SiO₂ 的材料折射率分别为 1.60 和 1.44 时,芯层和包层的相对折射率差为 9.75%。图 1(a)为设计波导的横截面图,采用的 SiON 深刻

蚀波导结构的芯层横截面为 1.8 μm×1.0 μm,上下包覆层厚度均为 4.0 μm。图 1(b)为横向磁场(TM)偏振下的模拟基模模场分布。TM 偏振光对波导宽度的变化和波导侧面的粗糙度较不敏感,可减少器件的插入损耗,因此在设计中采用 TM 偏振。

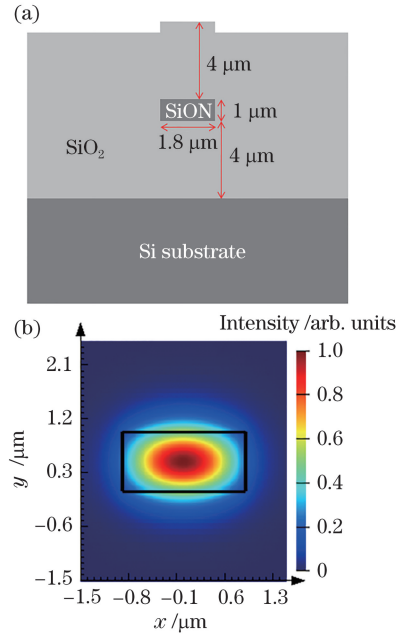


图 1 设计的 SiON 波导。(a)横截面; (b) TM 偏振下的基模模场分布

Fig. 1 Designed waveguide. (a) Cross section; (b) simulated field distribution of TM polarization

基于罗兰圆结构 AWG 的基本衍射方程可表示为

$$n_s d_a \sin \theta_i + n_a \Delta L + n_s d_a \sin \theta_o = m \lambda, \quad (1)$$

式中: n_s 和 n_a 分别为平板区域和阵列波导的有效折射率; θ_i 和 θ_o 分别为中心输入波导及输出波导和罗兰圆的法线所成的角度; m 为衍射级; λ 为波长; d_a 为相邻阵列波导之间的间距。其中相邻阵列波导长度差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{m \cdot \lambda_c}{n_g}, \quad (2)$$

式中: λ_c 为 AWG 的中心波长; n_g 为波导的群折射率。为了实现 $N \times N$ 光学路由,自由光谱范围(FSR)应是通道间隔 $\Delta \lambda$ 的 N 倍。

对于传统的 AWGR,每个阵列波导的输出场分布可近似看作高斯分布,故在像平面上可以得到一个高斯包络的场分布。因此,外侧输出通道的损耗相对于中心通道而言比较大。为提高损耗均匀性,在输出 FPR 末端(即像平面)获取平顶型的场分布是必要的。图 2(a)中显示:当在阵列波导靠近输出自由传输区的区域引入辅助波导时,辅助波导与阵列波导出口末端之间的耦合可在输出 FPR 末端产

生平顶型的场分布。因此,单个阵列波导的输出场分布应接近于 sinc 函数形状。图 2(b)为辅助波导的结构细节图。为尽量减少因阵列波导与辅助波导光场耦合产生的不必要反射,将辅助波导设计为逐渐变宽的结构,从而可保持辅助波导与阵列波导之间的间隙大小不变。因此,梯形辅助波导的设计参数主要为辅助波导和相邻阵列波导之间的间隙 L_{gap} 和辅助波导长度 L_c 。通过模拟仿真在不同 L_{gap} 和 L_c 下的输出光场强度分布,可得到最优的 L_{gap} 和 L_c [20]。为降低设计难度,将间隙大小设计为定值 $1.1 \mu\text{m}$,这是由于实验工艺的精度是 $1 \mu\text{m}$ 。所以唯一可变的变量为 L_c ,通过仿真计算可得到合适的辅助波导长度 L_c 。

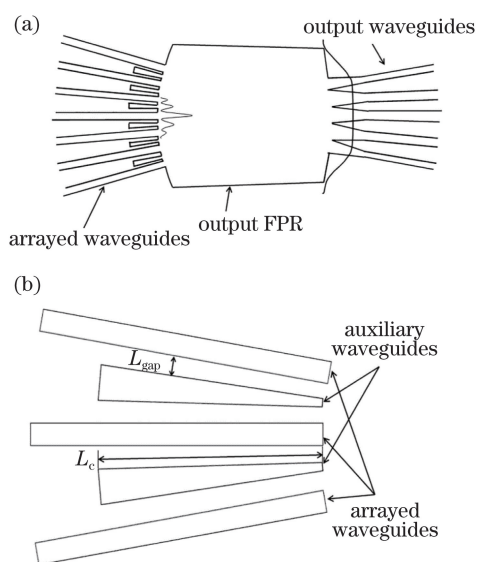


图 2 设计波导阵列的理想远场分布和辅助波导详细结构。(a)带有辅助波导的阵列波导(图中标注了期望的单个阵列波导输出的 sinc 场分布以及在输出像平面的平顶型场分布);(b)辅助波导的结构细节图

Fig. 2 Desired far field distribution of the designed and the detailed structure of the auxiliary waveguides. (a) Desired waveguide array with auxiliary waveguides (expected sinc field distribution in the output of a single array waveguide and the flat-topped field distribution in the output image plane are indicated in the figure); (b) detailed structure of auxiliary waveguides

在模拟仿真中,通过优化辅助波导的结构参数可以在像平面上获得期望的平顶型场分布。将仿真区域设置为输出 FPR、辅助波导和阵列波导,并采用 2.5 维有限差分时域(FDTD)法在像平面计算得到输出场分布。表 1 为设计的 7×7 AWGR 的主要

结构参数。为减小损耗和像差,阵列波导的最小弯曲半径设计为 $80 \mu\text{m}$ 。

表 1 7×7 AWGR 的主要参数

Table 1 Parameters of the 7×7 AWGR

Parameter	Value
Number of channels	7
Central wavelength, λ_c/nm	1550
Channel spacing, $\Delta\lambda/\text{nm}$	3.20
Free spectral range, FSR/nm	22.40
Diffraction order, m	57
Length increment, $\Delta L/\mu\text{m}$	58.50
Pitch of adjacent arrayed waveguides, $d_a/\mu\text{m}$	5
Pitch of adjacent input/output waveguides, $d_r/\mu\text{m}$	4
Length of FPR, $R/\mu\text{m}$	138.55
Number of arrayed waveguides, N_{wg}	31

通过参数扫描,仿真计算得到不同的辅助波导长度下像平面上的场分布。为定量比较在不同耦合长度下图像强度分布的影响,对仿真得到的强度分布进行归一化处理,相对强度为对数函数 $10 \times \lg(I/I_{max})$ 。在输出波导的孔径范围内,损耗差异表示为 $10 \times \lg(I_{max}/I_{min})$ 。损耗均匀性随辅助波导的长度 L_c 变化而变化,当 L_c 约为 $64 \mu\text{m}$ 时,损耗均匀性最好,损耗差异小于 1 dB。当 L_c 增大或减小时,损耗差异会增大。这是因为当辅助波导过长时,辅助波导与阵列波导之间的耦合会增加,从而导致孔径边缘的强度过大;当辅助波导过短时,光强被聚集在阵列波导中,从而增加孔径中心的光强。

因此,设置辅助波导长度 L_c 为 $64 \mu\text{m}$ 。图 3 为常规设计和优化设计下的 AWGR 在像平面场分布的对比图,并对强度进行归一化,例如传统设计下的中心输出通道($r=0 \mu\text{m}$)的强度为 0 dB。从图 3 中

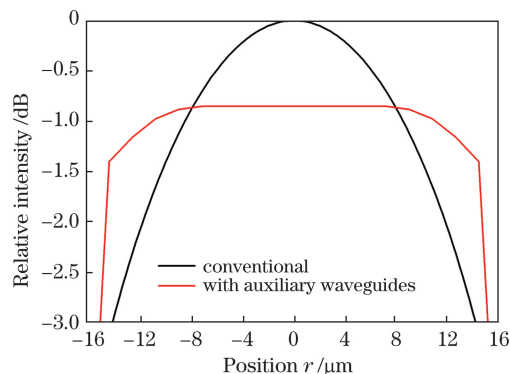


图 3 常规设计和优化设计在像平面的场分布图
Fig. 3 Field distribution with the conventional design and optimal design at the image plane

可以看出,引入辅助波导的 AWGR 在像平面的场分布为平顶分布,与常规设计的 AWGR 相比,具有更小的损耗不均匀性。虽带有辅助波导 AWGR 的中心输出通道插入损耗比常规设计的 AWGR 要大,但所有通道中的损耗最大值有所降低(即边缘输出通道的插入损耗有所减小)。

3 实验结果

为便于比较,同时制备 7×7 基于 SiON 的常规 AWGR 和引入辅助波导后的优化 AWGR。图 4(a) 为加辅助波导后损耗均匀化的 AWGR,图 4(b) 为普通设计的 AWGR。可看出损耗均匀设计的 AWGR 在输入阵列波导处为普通设计,在输出阵列波导之间添加了辅助波导。

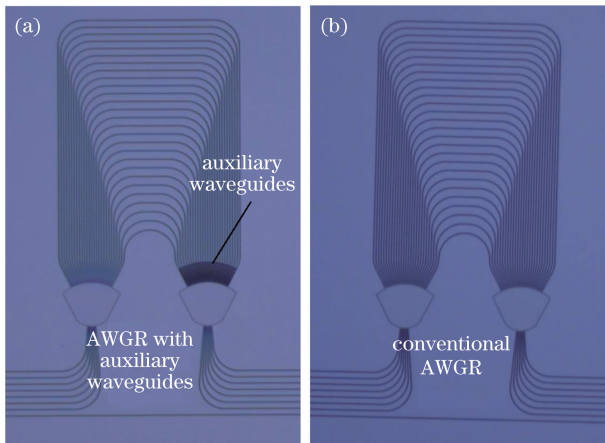


图 4 显影后的 AWGR 在显微镜下的观察图。

(a)加辅助波导的 AWGR;(b)普通结构的 AWGR

Fig. 4 Microscope pictures of the fabricated AWGR.

(a) AWGR with auxiliary waveguides; (b) AWGR without auxiliary waveguides

制备器件的具体步骤如下:1)将具有厚为 $1.0 \mu\text{m}$ 的 SiON 顶层和厚为 $4 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 底层的 SiON 晶片清洗干净,并在其上旋涂一层 AZ5214 光刻胶;2)利用常规光刻机进行曝光和显影;3)用电感耦合等离子体(STS ICP)设备对波导进行刻蚀,刻蚀深度应至少刻穿 SiON 芯层;4)随后用硫酸(H_2SO_4)和过氧化氢(H_2O_2)混合溶液除去剩余的光刻胶;5)用等离子体增强化学气相沉积法(STS PECVD),在刻蚀后的晶片上沉积厚为 $4.0 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 层作为上包层。图 5 为引入辅助波导的 AWGR 的阵列波导与输出 FPR 连接区域的显微镜图及刻蚀后的 SiON 波导横截面的扫描电子显微镜(SEM)图。从图 5(b)中可看出刻蚀后的波导侧壁并不是完全垂直,这是由于刻蚀工艺还不是最优的。

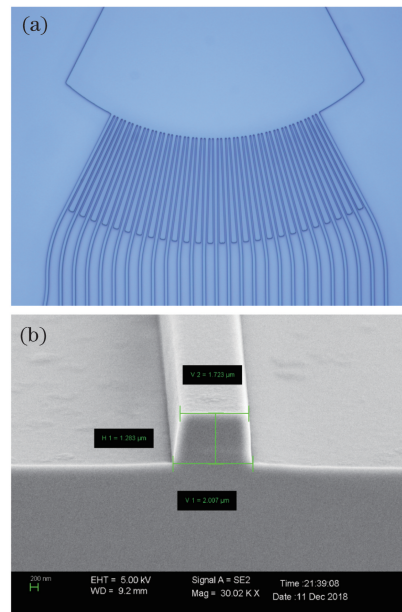


图 5 制备波导的结构图。(a)引入辅助波导的 AWGR 的阵列波导与输出 FPR 连接区域的显微镜图; (b) SiON 波导横截面的 SEM 图

Fig. 5 Pictures of the fabricated waveguides. (a) Microscope picture of the connection area of the waveguide array with auxiliary waveguides and the output FPR; (b) SEM image of the SiON waveguide cross section

通过测量各通道的透射光谱,可表征器件的插入损耗、串扰等性能。采用的光源型号是 keysight 81606A,波长范围为 $1460 \sim 1640 \text{ nm}$,功率计型号为 keysight 81634A,扫描的波长间隔为 10 pm 。图 6 为引入辅助波导优化损耗均匀性后的 AWGR 的透射光谱。由图 6(a)可知,当光从边缘输入通道输入时,7 个输出通道的插入损耗在 $5.46 \text{ dB} \sim 6.34 \text{ dB}$ 之间,损耗不均匀性为 0.88 dB ;由图 6(b)可知,当光从中心输入通道输入时,7 个输出通道的插入损耗在 $3.82 \text{ dB} \sim 4.58 \text{ dB}$ 之间,损耗不均匀性为 0.76 dB ;所有波长通道的串扰约为 18 dB 。

作为对比,常规 AWGR 的边缘和中心输入通道的透射光谱如图 7(a)和图 7(b)所示,当光从边缘输入通道输入时,7 个输出通道的插入损耗在 $4.83 \sim 6.82 \text{ dB}$ 之间,损耗不均匀性为 1.99 dB ;当光从中心输入通道输入时,7 个输出通道的插入损耗在 $2.99 \text{ dB} \sim 5.08 \text{ dB}$ 之间,损耗不均匀性为 2.09 dB ;所有波长通道的串扰在 $15 \sim 20 \text{ dB}$ 之间。

为更好地衡量损耗均匀性的改善情况,整理两种 AWGR 每个通道的插入损耗值和中心波长并进行直观比较,如图 8 所示。可以看出,引入辅助波导

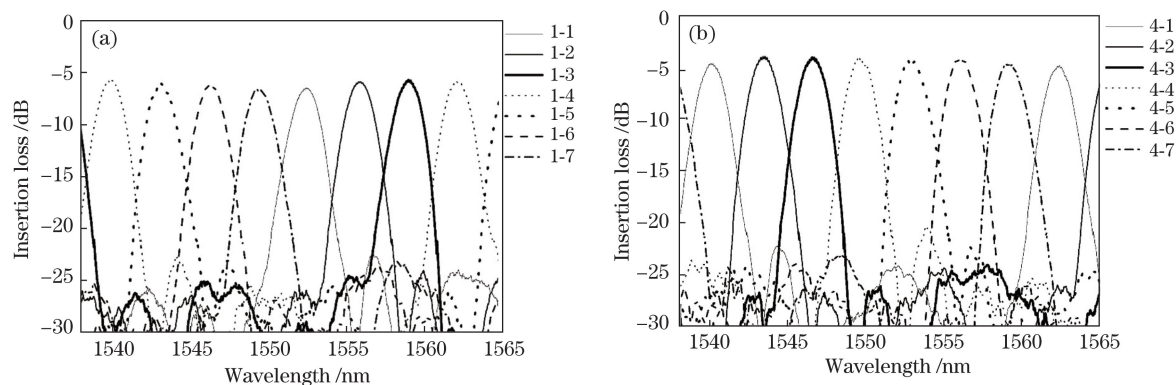


图 6 引入辅助波导后的 7×7 AWGR 的透射光谱。(a)边缘输入通道;(b)中心输入通道

Fig. 6 Transmission spectra of the designed 7×7 AWGR with auxiliary waveguides.

(a) Edge input channel; (b) central input channel

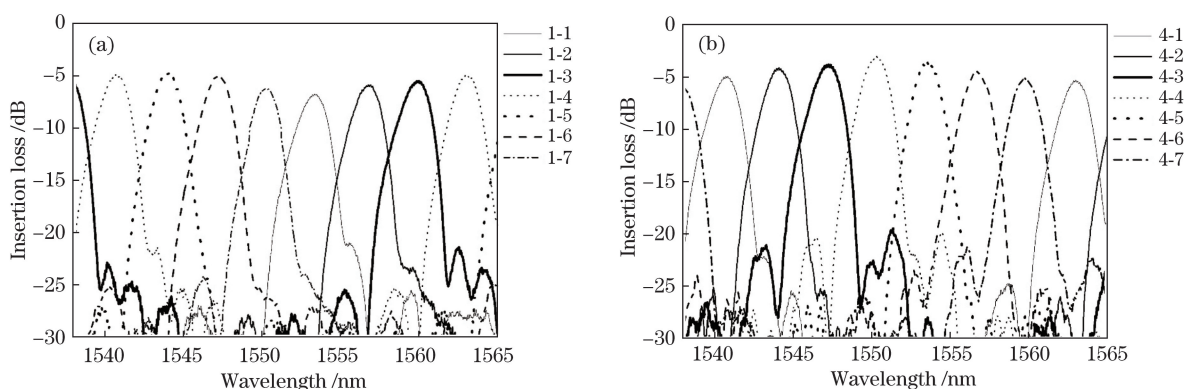


图 7 常规设计的 7×7 AWGR 的透射光谱。(a)边缘输入通道;(b)中心输入通道

Fig. 7 Transmission spectra of the conventional 7×7 AWGR. (a) Edge input channel; (b) central input channel

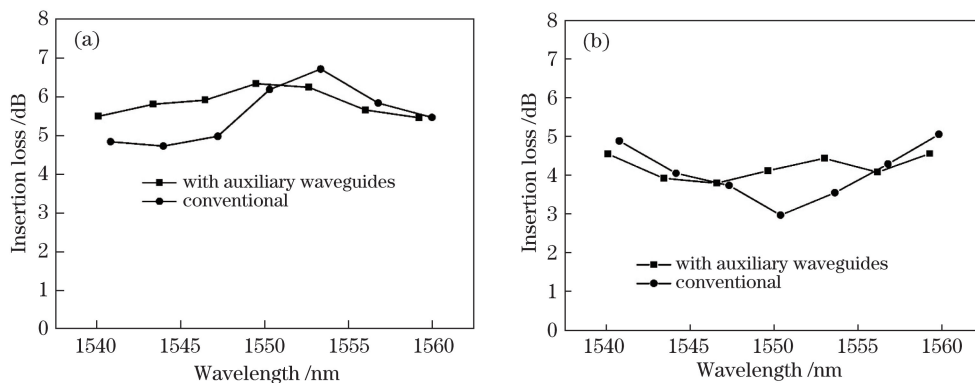


图 8 两种 7×7 AWGR 的输出通道插入损耗对比。(a)边缘输入通道;(b)中心输入通道

Fig. 8 Insertion loss for all output channels of the two 7×7 AWGRs. (a) Edge input channel;

(b) central input channel

后的 AWGR 的损耗均匀性得到明显提高。其中,当光从边缘输入通道输入时的损耗差由 1.99 dB 减小为 0.88 dB,如图 8(a)所示,而光从中心输入通道输入时的损耗差由 2.09 dB 减小为 0.76 dB,如图 8(b)所示。又发现,虽然器件的损耗均匀性得到改善,但最小损耗却增加。边缘通道的最小插入损耗从 4.83 dB 增加为 5.46 dB,中心通道的最小插

入损耗从 2.99 dB 增加为 3.82 dB,这是阵列波导和辅助波导之间的耦合作用引起的能量损耗所导致的。

另一方面,在阵列波导的出口末端之间引入辅助波导后,带有辅助波导的 AWGR 的输入和输出通道不对称且不能互换。因此当连续光从中心输出通道(第 4 输出通道)输入,并从第 1 到

第 7 输入通道输出(即光反向输入)时,带有辅助波导的 AWGR 将不会再有损耗均匀的特点,如图 9 所示。

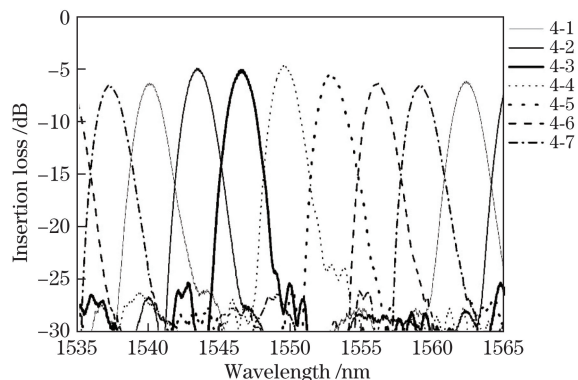


图 9 光反向输入时从各个输入通道输出的透射光谱
Fig. 9 Transmission spectra of each input channel when light is input backward

图 10 为光正向输入(即光从输入通道输入、输出通道输出)或反向输入到中心通道的光谱对比,可观察到当光反向输入时,每个通道的插入损耗均大于光正向输入的情况,这是因为耦合入辅助波导的光被损耗,无法参与到最后的成像过程。

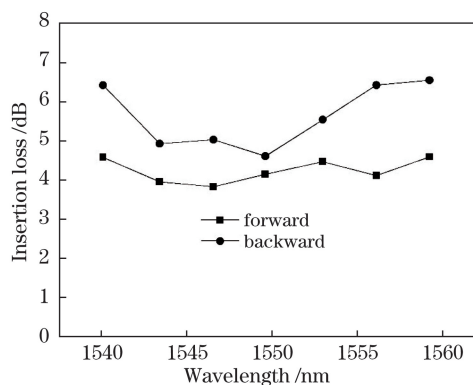


图 10 光分别正向输入/反向输入时的插入损耗对比
Fig. 10 Insertion loss comparison when light is input forward and backward

对 AWGR 研究结果的总结如表 2 所示。基于 SOI 平台的波导尺寸在纳米量级,端面光损耗较大,光栅结构复杂,耦合效率也不高。文献[20]是将耦合损耗归一化后只计算器件本身传输损耗的部分,所得到的插入损耗比较小,而聚合物波导本身传输损耗较大, SiO₂ 波导器件比较大,不利于集成,所以从光场耦合器件传输损耗、器件集成两个方面综合考虑, SiON 波导具有较大优势。

表 2 对 AWGR 研究结果的总结

Table 2 Summary of the research on AWGRs

Year	Material	Number of channels	Channel spacing /GHz	Insertion loss /dB	Non-uniformity /dB	Crosstalk /dB	Size /(mm×mm)
2006 ^[21]	SiO ₂	32	50	4.65	0.92	30	48×80
2008 ^[7]	Polymer	8	200	2.50	1.40	< 25	45×14.5
2009 ^[14]	SiO ₂	64	50	5.40	1.40	23	59×62
2015 ^[17]	SOI	8	800	—	1.10	10	—
2018 ^[20]	SOI	15	200	—	0.46	15	—
This paper	SiON	7	400	3.82	0.88	18	1×1.25

4 结 论

提出并实验验证一种通过在阵列波导出口末端引入辅助波导来改善损耗均匀性的 AWGR。通过设计辅助波导的结构,并利用模拟仿真来优化其耦合长度,可在输出像平面获得平顶型的场分布,从而实现各个输出通道插入损耗的一致性。实验证明:对于引入辅助波导的 AWGR,中心输入通道的输出损耗不均匀性由 2.09 dB 降低为 0.76 dB,而边缘输入通道的输出损耗不均匀性由 1.99 dB 降低为 0.88 dB,同时各通道的串扰约为 18 dB。这种具备良好波长循环特性和损耗均匀性的器件具有很好的发展前景,可应用于各种光互连或光通信系统。

参 考 文 献

- [1] Smit M K, van Dam C. PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 236-250.
- [2] Nicholes S, Mashanovitch M, Jevremović B, et al. 8-channel InP monolithic tunable optical router for packet forwarding[C]// Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, March 6-10, 2011, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2011: OThD1.
- [3] Dragone C. An $N \times N$ optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers [J]. IEEE

- Photonics Technology Letters, 1991, 3(9): 812-815.
- [4] Lang T T, Lin X F, He J J. Fabrication of silica-on-silicon arrayed waveguide gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0213003.
郎婷婷, 林旭峰, 何建军. 硅基二氧化硅阵列波导光栅制作工艺的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0213003.
- [5] Nicholes S C, Masanovic M L, Jevremovic B, *et al.* An 8×8 InP monolithic tunable optical router (MOTOR) packet forwarding chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 641-650.
- [6] Cheung S, Su T H, Okamoto K, *et al.* Ultra-compact silicon photonic 512×512 25 GHz arrayed waveguide grating router[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(4): 310-316.
- [7] Takenobu S, Kuwana Y, Takayama K, *et al.* All-polymer 8×8 AWG wavelength router using ultra low loss polymer optical waveguide material (CYTOP™) [C] // Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. Washington, D.C.: OSA, 2008: JWA32.
- [8] Min Y H, Lee M H, Ju J J, *et al.* Polymeric 16×16 arrayed-waveguide grating router using fluorinated polyethers operating around 1550 nm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(5): 806-811.
- [9] Wörhoff K, Driessen A, Lambeck P V, *et al.* Plasma enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride optimized for application in integrated optics[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 74(1/2/3): 9-12.
- [10] Chuang R W, Liao Z L, Chang C K. Integrated optical beam splitters employing symmetric mode mixing in $\text{SiO}_2/\text{SiON}/\text{SiO}_2$ multimode interference waveguides[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(4): 2440-2444.
- [11] Gorecki C. Optimization of plasma-deposited silicon oxynitride films for optical channel waveguides [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33(1): 15-20.
- [12] Okamoto K, Hasegawa T, Ishida O, *et al.* 32×32 arrayed-waveguide grating multiplexer with uniform loss and cyclic frequency characteristics[J]. Electronics Letters, 1997, 33(22): 1865-1866.
- [13] Kamei S, Ishii M, Itoh M, *et al.* 64×64 -channel uniform-loss and cyclic-frequency arrayed-waveguide grating router module[C] // 2002 28TH European Conference on Optical Communication, September 8-12, 2002, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE, 2002.
- [14] Sakamaki Y, Kamei S, Hashimoto T, *et al.* Loss uniformity improvement of arrayed-waveguide grating with mode-field converters designed by wavefront matching method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(24): 5710-5715.
- [15] Sakamaki Y, Saida T, Tamura M, *et al.* Loss reduction of arrayed waveguide grating with mode converters designed by wavefront matching method[J]. Electronics Letters, 2006, 42(22): 1300-1301.
- [16] Xia X, Chen Y, Zou J, *et al.* Loss uniformity improvement for cyclic arrayed waveguide grating based on silicon nanowire waveguides[C] // 2015 Optoelectronics Global Conference (OGC), August 29-31, 2015, Shenzhen, China. New York: IEEE, 2015: 15619249.
- [17] Jin W, Zou J, Lang T T, *et al.* Design of cyclic arrayed waveguide grating with distributed waveguide directions for uniform loss[C] // 2013 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), July 26-28, 2013, Chengdu, China. New York: IEEE, 2013: 13824749.
- [18] Chen J C, Dragone C. Waveguide grating routers with greater channel uniformity[J]. Electronics Letters, 1997, 33(23): 1951-1952.
- [19] Sheng Z, Dai D X, He S L. Improve channel uniformity of an Si-nanowire AWG demultiplexer by using dual-tapered auxiliary waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(10): 3001-3007.
- [20] Song G Y, Wang S X, Zou J, *et al.* Silicon-based cyclic arrayed waveguide grating routers with improved loss uniformity[J]. Optics Communications, 2018, 427: 628-634.
- [21] Takiguchi K, Okamoto K, Sugita A. Arrayed-waveguide grating with uniform loss properties over the entire range of wavelength channels[J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 459-461.