

# 1 ×32 硅基二氧化硅阵列波导光栅的研制<sup>\*</sup>

龙文华<sup>1</sup> 李广波<sup>1,2</sup> 贾科森<sup>1,2</sup> 屈红昌<sup>1</sup> 唐衍哲<sup>1,2</sup>  
吴亚明<sup>1</sup> 杨建义<sup>1,2,†</sup> 王跃林<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

(2 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要:** 采用高精度光刻版、PECVD 材料生长、反应离子刻蚀和端面 8 角抛光等技术,设计并研制了 1 ×32 硅基二氧化硅阵列波导光栅. 研制的 AWG 芯片,其相邻通道引起的通道串扰小于 - 28dB,非相邻通道引入的串扰小于 - 35dB. 通道的插入损耗在进行光纤耦合封装后进一步提高,平均损耗约为 4.9dB,不均匀性约为 1.72dB.

**关键词:** 阵列波导光栅; 硅基二氧化硅; 光波导; 光波分复用器/解复用器; 集成光学

**PACC:** 4270J; 4280L; 4225J

**中图分类号:** TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)09-1798-06

## 1 引言

阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 是密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 通信技术中的重要平面集成光学器件之一. 其优良的光波分复用/解复用性能, 可以使其应用于许多波长相关的光器件中, 如波分复用/解复用器 (mux/demux)、光路由器 (router)、波长选择器、光分插复用器 (OADM)、多波长光源、多波长接收机、光谱分析仪、多波长监测仪、色散补偿器等. 荷兰 Delft 大学的 Smit 教授于 1988 年首先提出了波导相位器 (phasar) 的概念, 并从实验上加以论证<sup>[1]</sup>; Vellekoop 和 Smit 在 1989 年首先报道了短波长器件<sup>[2]</sup>; 日本 NTT 公司的 Takahashi 等人于 1990 年利用该原理制成了长波段 (1.55μm) 的复用/解复用器, 并将其称为阵列波导光栅<sup>[3]</sup>; 美国贝尔实验室的 Dragone 等人于 1991 年将单一的 1 × N 器件拓展成为 N × N 的波长路由器<sup>[4]</sup>. 在随后的十几年中, 各种高性能、小通道间隔、大通道数的 AWG 不断问世并进入产品阶段. 目前已见报道的 AWG 中最小通道间隔仅 2GHz<sup>[5]</sup>, 最大通道数已超过 1000<sup>[6]</sup>; 制作 AWG 的衬底材料也开始多样化,

除了 InP、二氧化硅两种主流材料外, 制作在聚合物、铌酸锂、SOI 材料上的 AWG 也不断问世. 目前依然有相当多的研究报道<sup>[7,8]</sup>.

近几年, AWG 的研制也成为国内学者关注的焦点, 在国家项目的支持下已经开展了相当多的研究工作. 但是目前大多数的报道还是理论分析<sup>[9~13]</sup>, 实际器件的制作研究较少<sup>[14~17]</sup>. 本文基于硅基二氧化硅光波导技术, 设计并成功研制了 1 × 32 的 AWG 芯片, 同时对器件封装问题进行了研究.

## 2 器件设计

### 2.1 光波导基本参数

本文中, 阵列波导光栅的制作采用硅基二氧化硅光波导技术. 考虑到器件的规模大小, 光波导的芯区与包层间的折射率差 取为 0.75%, 以使弯曲光波导的曲率半径可以取较小的值. 实际制作中, 波导的芯区折射率为 1.455, 包层折射率为 1.444, 此时根据单模条件, 设计的条形光波导尺寸为 6μm × 6μm. 采用保角变换和有限差分光束传输法 (FD-BPM) 进行的计算表明, 此时, 当取弯曲波导的曲率

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号:60377030 和 60436020),上海市上海应用材料科技合作计划(批准号:0417)和国家教育部重点科技资助项目

<sup>†</sup>本文通信作者, Email: yangjy @zju.edu.cn

2005-02-07 收到, 2005-04-01 定稿

半径为 5mm 时, 90° 的弯曲损耗小于 0.001dB. 在我们的设计中, 所有的波导弯曲曲率半径均大于 5mm.

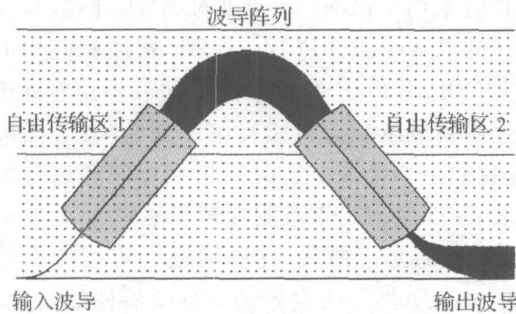


图 1 1 ×32 阵列波导光栅结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 1 ×32 arrayed waveguide grating

### 2.2 平行波导间的耦合

在阵列波导光栅中, 必须控制阵列波导间的最小相隔间距. 两相邻波导过于靠近, 将导致波导间的耦合, 使输出信道间发生大的串扰等现象; 但是两相邻波导离得过远, 将使器件整体尺寸过大. 为此, 相邻波导必须控制在一定间距内, 以保证波导间不会发生耦合, 同时器件又可以保持在小的尺寸上. 在设计中, 我们取两平行波导长度为 1mm 时, 耦合串扰小于 -50dB 为波导间隔的判据. 由 FD-BPM 法分析表明, 当波导间距大于 20μm 时, 耦合串扰满足这一条件. 当波导间距为 15μm 时, 串扰上升为 -27dB. 在我们的设计中, 除了在自由传输区的耦合接口外, 输出波导间和阵列波导间的间距均大于 20μm.

### 2.3 锥形耦合结构

在阵列波导光栅中, 在自由传输区与阵列波导间通常设计锥形耦合结构, 如图 2(a) 所示, 以提高光的传输耦合效率, 降低由此引入的器件插入损耗. 在具体的锥形耦合结构设计中, 如图 2(b) 所示, 需要考虑两个关键结构参量  $d_g$  和  $L_t$ . 首先考虑两个波导间的最终间隔  $d_g$ . 由于受光刻分辨精度的限制, 将此间隔值  $d_g$  设计为零是不可行的, 它将会导致制作中在锥形区阵列波导无法分辨, 此时光波没有真正分离, 最终引入串扰. 实际设计中, 我们考虑到光刻的分辨精度, 取  $d_g$  为 1.5μm. 锥形长度  $L_t$  是

另一个关键参量. 过长的  $L_t$  将导致相邻波导间的耦合, 引入串扰; 而过短的  $L_t$  将使光波导结构变化过快, 导致损耗. 表 1 给出了阵列波导位置周期  $d_w$  为 20, 25μm 情况下, 取  $d_g$  为 1.5μm, 锥形耦合结构长度  $L_t$  分别为 500, 1000 和 1500μm 时, 波导中光场的损耗和串扰. 从计算结果看,  $d_w = 20μm$  时, 相邻波导间串扰较大, 因此实验中选取  $d_w = 25μm$ . 我们采用 BPM 计算了  $d_w = 25μm$  时具有不同锥形耦合结构的 AWG 的频谱曲线. 模拟表明, 在自由传输区和阵列波导间的过渡区, 在设计版图时相邻条形波导间预留工艺可以接受的小间隙并不会对器件性能造成明显的恶化, 而从实验角度讲则具有可操作性, 有利于器件性能的控制和实现. 考虑到器件应使用尽可能短的波导, 我们设计的锥形区最终结构为:  $w_t = 23.5μm, L_t = 1000μm, d_w = 25μm$ .

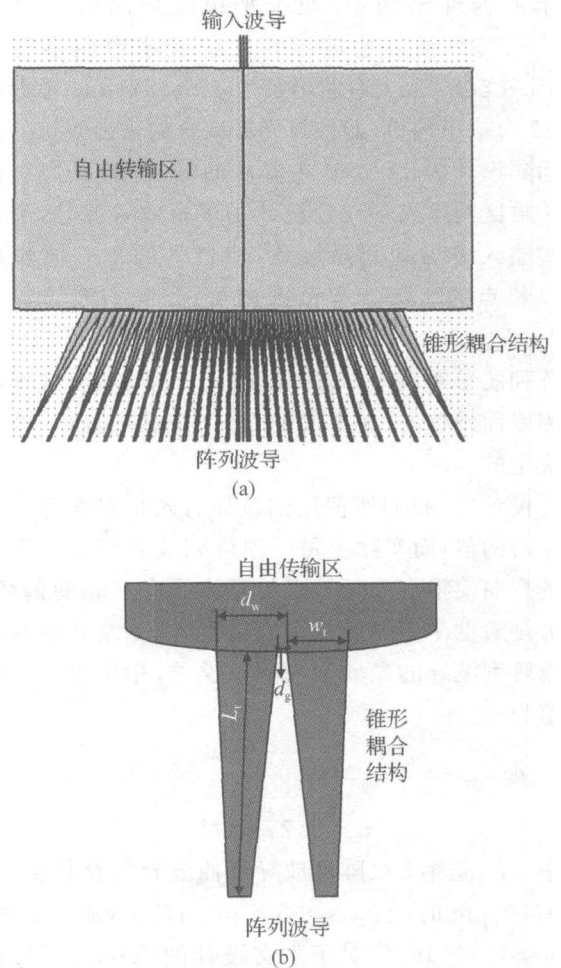


图 2 (a) 阵列波导与自由传输区间的锥形耦合结构; (b) 结构参量

Fig.2 (a) Taper structures of arrayed waveguides coupling to the slab region; (b) Structural parameters

表 1 不同锥形区长度和不同间距的相邻阵列波导损耗及串扰  
Table 1 Loss and crosstalk of the two adjacent waveguides with various taper length and waveguide separation

$w_i/\mu\text{m}$	18.5	18.5	18.5	23.5	23.5	23.5
$d_w/\mu\text{m}$	20	20	20	25	25	25
$L_i/\mu\text{m}$	500	1000	1500	500	1000	1500
Loss/dB	-0.03	-0.04	-0.04	-0.08	-0.03	-0.03
Crosstalk/dB	-32	-27.7	-24.8	-40.9	-36.5	-33.4

## 2.4 阵列波导光栅的其他参数

阵列波导光栅的原理在许多文献中已有很全面的概括<sup>[18]</sup>. 我们所设计的  $1 \times 32$  AWG 器件, 通道间隔为  $0.8 \text{ nm}$ , 衍射级数为 52, 相邻波导长度差为  $55.59 \mu\text{m}$ . 由于通道数多, 结构的 FSR 较大、衍射级数  $m$  较小、相邻波导长度差  $L$  较小, 因此如图 1 所示的器件结构中, 两个平板波导间的夹角为  $100.5^\circ$ . 阵列波导中波导弯曲的最小弯曲半径为  $6105.706 \mu\text{m}$ , 最大弯曲半径为  $8166.811 \mu\text{m}$ . 考虑到有 32 个输出端口, 器件与光纤耦合的输出端口的波导间隔设计为  $127 \mu\text{m}$ . 在器件的输入端, 我们在自由传输区的输入端口处设计了多根输入波导, 通过这些输入波导的间隔设置, 使器件的中心波长在 ITU 格点的  $\pm 0.2 \text{ nm}$  范围内可调. 阵列波导数为 182 个, 这是在综合考虑衍射级数和自由传输区 1 与阵列波导间耦合时波阵面的光场能量收集效率两个因素而设置的, 在本文的设计中主要是后一因素所决定的.

设计中, 我们所使用的波导有效折射率都是直波导时的值, 而实际上每一根阵列波导都会由于波导的弯曲使得有效折射率与直波导有  $n_{bi}$  的偏移.

$n_{bi}$  随着曲率半径的减小而增大, 因此波导的弯曲会给阵列波导的光场引入相位误差, 相位误差的最大值为

$$b_{\max} = 2 \left[ (n_{bi} L_{bi})_{\max} - (n_{bi} L_{bi})_{\min} \right]$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

其中  $L_{bi}$  是第  $i$  根阵列波导弯曲波导的总长度. 当  $R = 5000 \mu\text{m}$  时,  $n_b = 4.8 \times 10^{-5}$ ;  $R = 8000 \mu\text{m}$  时,  $n_b = 1.9 \times 10^{-5}$ . 对于本文设计的 AWG, 通过估算得到弯曲波导引入的最大误差在  $0.1 \text{ rad}$  以下. 相对于其他误差源, 如光刻版生成时的曲线拟合精度等, 弯曲所引入的相位扰动是很小的, 还不会对器件性能造成明显的恶化. 实际中, 也可以根据需要, 在

设计的时候通过调整各阵列波导长度来对这种误差进行补偿.

## 2.5 器件性能模拟

我们采用 Optiwave 公司的 AWG 模拟软件对所设计的 AWG 器件进行了模拟. 软件所使用的算法为 FD-BPM. 由于通道数较多, 要获得所有通道的谱特性需要对波长进行相当细的划分模拟. 实际设计中, 我们主要模拟了边缘通道和中间通道等的光谱曲线, 图 3 给出了谱范围覆盖了通道 1, 2, 3, 8, 9, 15 和 16 等的光谱曲线, 这些通道一定程度上已经能够很好地反映出所设计的 AWG 器件的特性. 从图上可以看出, 所模拟的各通道的一致性符合得较好, 串音均小于  $-25 \text{ dB}$ , 通道损耗小于  $5 \text{ dB}$ . 当然中间通道(通道 15 和 16)较边缘通道(通道 1, 2 和 3)的通道损耗要小约  $2.5 \text{ dB}$ .

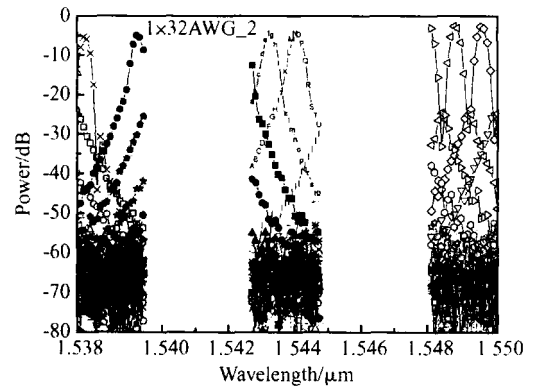


图 3  $1 \times 32$  AWG 输出功率频谱曲线 BPM 法模拟结果

Fig. 3 BPM-simulated spectra of  $1 \times 32$  AWG

## 3 器件的制作与测试

### 3.1 器件的制作

基于二氧化硅材料的  $1 \times 32$  AWG 是通过标准 LPCVD 加工流程制作的. 反应离子刻蚀会使波导的宽度比设计值变窄  $1.6 \mu\text{m}$ , 因此在版图绘制时将所有的波导人为地加宽  $1.6 \mu\text{m}$ , 但这会导致阵列波导与平板波导连接处的狭缝增加  $1.6 \mu\text{m}$ , 稍稍增加了器件的插入损耗. 为了得到好的器件性能, 我们所采用的光刻版具有  $10 \text{ nm}$  的高制版精度. 制作中, 使用的衬底材料为硅片, 为了使波导芯区与衬底间有好的隔离, 制作中下限制层的厚度大于  $15 \mu\text{m}$ . 波导芯区上的包层厚度为  $15 \mu\text{m}$ .

研制的 AWG 芯片在完成划片后,进行了端面 8 角抛光.采用的是自行设计的不锈钢高精度夹具,设计的夹具角度公差为  $8 \pm 0.1^\circ$ ,经过三坐标测量机 LEITZ PMM544 的测量,实际夹具的角度为  $7.9692^\circ$ ,在设计范围内.将芯片安装在夹具上抛光后,经过化学机械抛光(logitech PM-5 型化学机械抛光机),对波导端面抛光处理,使用度数显微镜,实测角度在 50 倍放大倍率时为  $7.9899^\circ$ ,100 倍放大倍率时测到角度为  $8.0102^\circ$ ,如图 6 所示.实际测试得到器件的回损指标在 45dB 以上.

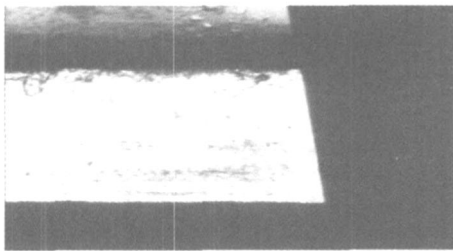


图 4 波导端面 8 角测试图

Fig. 4 Photo of the 8°polished end-face of waveguide

### 3.2 器件的测试

测试中,首先使用宽带 ASE 光源,波长范围覆盖 1520 ~ 1610nm,对抛光后的 1 ×32 AWG 进行测试,图 5(a)为用红外 CCD 摄到的近场光斑图.为了更加准确地得到每个通道的谱线,我们采用可调谐激光器、偏振控制器、波长校准器、高速探测器构成的测试系统对器件芯片进行了测试.激光器的波长精度达到了 0.01nm,得到未封装前 1 ×32 AWG 芯片的输出谱线如图 5(b)所示.这里需要说明的是,图中谱线光功率包括了测试中由光纤阵列经芯片再回到光纤阵列的两次耦合损耗.在对同一芯片中直波导的测试表明,即使是直波导,插入损耗依然达到 2.2 ~ 3.2dB 左右.由于波导本身传输损耗相当小,应小于 0.05dB/cm,所以端面引入的耦合损耗还是相当大的.

从图 5(b)中可以看到,中间通道的损耗要小,如通道 16 的损耗仅为 4.26dB;边缘通道的损耗要大,如通道 1 的损耗为 7.2dB,不均匀性约为 3dB.这种不均匀性的分布与模拟结果是一致的.测得的通道间的串扰为,相邻通道引起的通道串扰小于 -28dB,非相邻通道引入的串扰小于 -35dB.通道的 1dB 带宽约为 0.11nm,3dB 带宽约为 0.22nm,

20dB 带宽约为 0.56nm.我们对器件的 PDL 特性也进行了测试,在中心波长处,PDL 值小于 0.1dB.这种器件较低 PDL 值主要是通过退火工艺来减弱应力效应而获得.

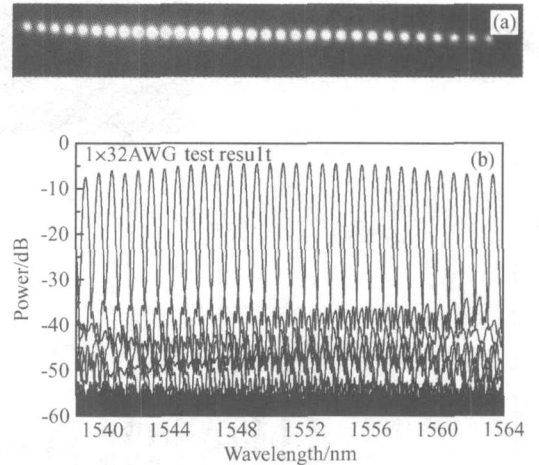


图 5 (a) 器件在 ASE 光源输入时的近场光斑输出;(b) 波长扫描时的功率谱线图

Fig. 5 (a) Near-field output when ASE light source is applied;(b) Output spectrum

我们也对器件芯片进行了光纤阵列耦合与封装.图 6(a)给出了光纤耦合后的器件发光照片.由于使用胶水的折射率大于空气的折射率,接近于波导和光纤纤芯的折射率,降低了端面处菲涅尔反射和 FP 效应的影响,进一步提高了耦合效率.图 6(b)给出了封装前后每个通道插入损耗,从图中可以看到,边缘通道的插入损耗特性得到明显改善,此时,通道的均匀性从封装前的 3.13dB 降为 1.72dB,平均损耗约为 4.9dB.

### 4 结论

本文设计并研制了 1 ×32 硅基二氧化硅阵列波导光栅.文中对设计给出了详细的描述,包括波导弯曲、波导间耦合、锥形耦合结构等.采用高精度光刻版、PECVD 材料生长、反应离子刻蚀和端面 8 角抛光等,研制出了 AWG 芯片.所制作的器件,其相邻通道引起的通道串扰小于 -28dB,非相邻通道引入的串扰小于 -35dB.通道的插入损耗在进行光纤耦合封装后进一步提高,平均损耗约为 4.9dB,不均匀性约为 1.72dB.

文中理论分析和数据模拟都是用 BPM 软件来实现的,从结果上看,实际 AWG 器件的性能与理论

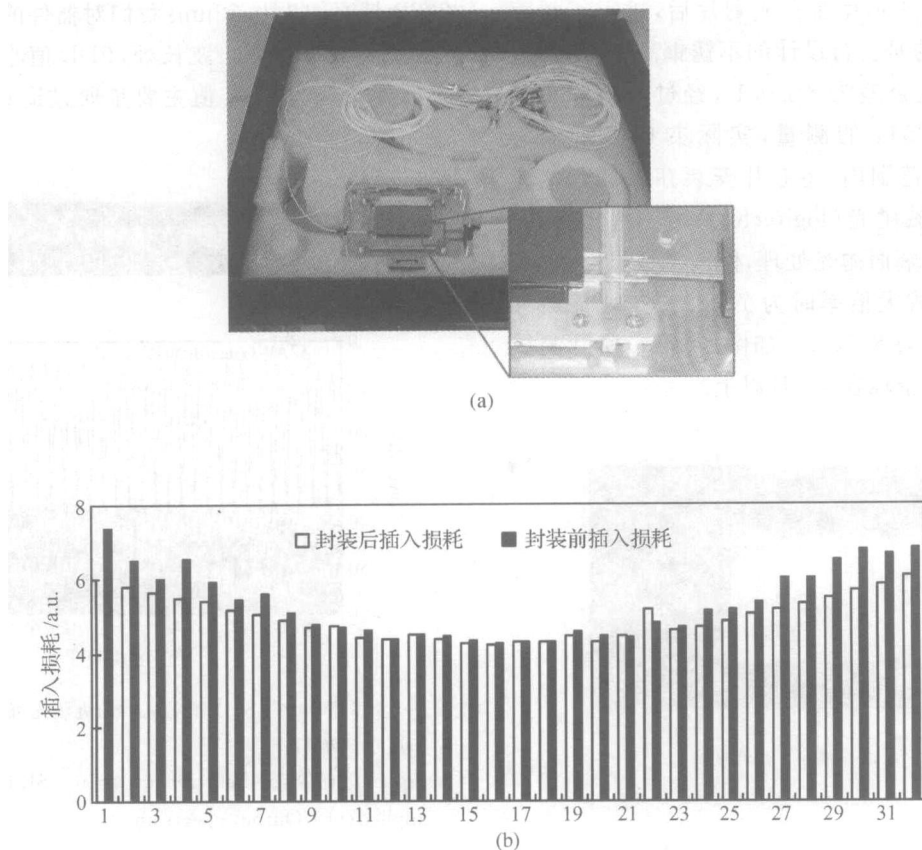


图 6 (a)  $1 \times 32$  AWG 器件封装后的照片; (b) 器件封装前后插入损耗变化

Fig. 6 (a) Photo of  $1 \times 32$  AWG after packaged; (b) Insertion loss of all 32 channels before and after the device is packaged

值基本符合,这说明用 BPM 来模拟二氧化硅波导的特性可以达到相当准确的程度.从设计上来说, $1 \times 32$  AWG 的结构有些偏大,进一步优化设计波导弯曲,优化波导排布结构及光栅周期结构,将可以使器件结构更紧凑.对于阵列波导光栅温度与波长的关系等问题,需要进一步的实验工作来解决.

## 参考文献

- [ 1 ] Smit M K. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array. *Electron Lett*, 1988, 24:385
- [ 2 ] Vellekoop A, Smit M. Low loss planar optical polarization splitter with small dimensions. *Electron Lett*, 1989, 25:385
- [ 3 ] Takahashi H, Suzuki S, Kato K, et al. Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution. *Electron Lett*, 1990, 26:87
- [ 4 ] Dragone C. An  $N \times N$  optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3:812
- [ 5 ] Takada K, Abe M, Hida Y, et al. Fabrication of 2 GHz spaced 16-channel arrayed-waveguide grating demultiplexer for optical frequency monitoring applications. *Electron Lett*, 2000, 36:1643
- [ 6 ] Takdada K, Abe M, Shibata T, et al. 10 GHz spaced 1010-channel tandem AWG filter consisting of one primary and ten secondary AWGs. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13:577
- [ 7 ] Yang J, Jiang X, Wang M, et al. Two-dimensional wavelength demultiplexing employing multilayer arrayed waveguides. *Opt Express*, 2004, 12(6):1084
- [ 8 ] Jia K, Wang W, Tang Y, et al. Silicon-on-insulator-based optical demultiplexer employing turning-mirror-integrated arrayed-waveguide grating. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(2):378
- [ 9 ] Dai Daoxin, Liu Shuzhe, He Sailing, et al. Optimal design of an MMI coupler for broadening the spectral response of an AWG demultiplexer. *J Lightwave Technol*, 2002, 20:1957
- [ 10 ] Zhao Y, Ma C S, Wang F, et al. Suppression of polarization dependence in the design of a  $11 \times 11$  polymer/Si arrayed waveguide grating. *Optic and Quantum Electronics*, 2004, 36(6):567

- [11] Ma Chunsheng, Guo Wenbin, Zhang Daming, et al. Analytical modeling of loss characteristics of a polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *Optics and Laser Technology*, 2002, 34: 621
- [12] Guo Wenbin, Ma Chunsheng, Zhang Daming. Parameter optimization and structural design of polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *Opt Commun*, 2002, 201: 45
- [13] An Junming, Li Jian, Gao Dingshan, et al. Polarization-insensitive silica on silicon arrayed waveguide grating design. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(11): 1360
- [14] Tang Y, Jia K, Li B, et al. Silica based arrayed waveguide grating with flattened spectral response using multimode interference coupler. *Chin Phys Lett*, 2004, 21(6): 1064
- [15] Jiang Xiaoqing, Li Baiyang, Yang Jianyi, et al. A novel compact-structure arrayed-waveguide grating device. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(6): 632
- [16] Wang F, Zhang D, Ma C. 32-channel arrayed waveguide gratings multiplexer using fluorinated polymers with high thermal stability. *Microwave Optical Technol Lett*, 2004, 42(3): 192
- [17] Li Jian, An Junming, Wang Hongjie, et al. Design, fabrication, and testing of single-side alignment of 16 × 0.8 μm arrayed waveguide grating. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(2): 254
- [18] Smit M, van Dam C. PHASAR-based WDM-device: principles, design and applications. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1996, 2(2): 236

## Design and Fabrication of 1 × 32 Silica-Based Arrayed Waveguide Grating \*

Long Wenhua<sup>1</sup>, Li Guangbo<sup>1,2</sup>, Jia Kemiao<sup>1,2</sup>, Qu Hongchang<sup>1</sup>, Tang Yanzhe<sup>1,2</sup>,  
Wu Yaming<sup>1</sup>, Yang Jianyi<sup>1,2,†</sup>, and Wang Yuelin<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

(2 Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A 1 × 32 silica-on-silicon-based arrayed waveguide grating is designed and fabricated. The detailed consideration of waveguide bending, coupling between adjacent waveguides, and the taper structure for the design of the arrayed waveguide grating is presented. By applying the high-resolution photomask, PECVD-based silica deposition, reactive ion etching, and 8° end-face polishing, a AWG chip is obtained with crosstalk lower than -28 dB for the adjacent channels and -35 dB for the non-adjacent channels. The average insertion loss is about 4.9 dB and the imbalance is approximately 1.72 dB after the chip is fiber-array coupled and packaged.

**Key words:** arrayed waveguide grating; silica-on-silicon; optical waveguide; optical multiplexer/demultiplexer; integrated optics

**PACC:** 4270J; 4280L; 4225J

**Article ID:** 0253-4177(2005)09-1798-06

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60377030, 60436020), the Shanghai-AM Project (No. 0417), and the Key Project of Chinese Ministry of Education

† Corresponding author. Email: yangjy@zju.edu.cn

Received 7 February 2005, revised manuscript received 1 April 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics