

文章编号:1001-9014(2005)02-0143-04

## 基于 SOI 材料的阵列波导光栅的制作

方青, 李芳, 刘育梁

(中国科学院半导体研究所 光电子研发中心, 北京 100083)

**摘要:**采用 ICP 刻蚀的方法,在 SOI 材料上制作出了中心波长为  $1.5509\mu\text{m}$ 、信道间隔为 200GHz 的  $5 \times 5$  阵列波导光栅(AWG)。测试中心波长与设计值相差 0.28nm,测试波长间隔与设计值相差在 0.02nm 之内,相邻信道串扰接近 10dB,信道插入损耗均匀性为 0.7dB,测试结果表明该器件能够初步达到分波功能。

**关键词:**复用/解复用器;阵列波导光栅(AWG);信道间隔;中心波长;相邻信道串扰

**中图分类号:**TN252 **文献标识码:**A

## FABRICATION OF ARRAYED WAVEGUIDE GRATING BASED ON SOI MATERIAL

FANG Qing, LI Fang, LIU Yu-Liang

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:**An arrayed waveguide grating based on SOI material was fabricated by inductive coupled plasma (ICP) etching technology. The central wavelength of the device was designed at  $1.5509\mu\text{m}$  and the channel spacing was 200GHz. Comparing with the values of the design, the differences of the central wavelength and the channel spacing in the test were 0.28nm and 0.02nm, respectively. The adjacent channel crosstalk was about 10dB, and the uniformity of the five channels' insertion loss was only 0.7 dB. The results show that the device can be used as a demultiplexer.

**Key words:** multiplexer/demultiplexer; arrayed waveguide grating (AWG); channel spacing; central wavelength; adjacent channel crosstalk

### 引言

随着通信信息量的增大,需要更高传输速率的光传输系统。在时分复用系统中为控制数据流量,需要克服电子电路方面的障碍;而采用密波波分复用(DWDM)系统可以减少电子电路中的障碍,使容量增大、提高光网络系统的灵活性。阵列波导光栅(AWG)作为合并/分离波长信道的复用/解复用器,是密波波分复用(DWDM)网络中的关键器件<sup>[1-3]</sup>。已经报道的其它光波分复用器,诸如薄膜型波分复用器、闪烁光栅型滤波器<sup>[4]</sup>、熔锥型波分复用器以及光纤布拉格光栅滤波器<sup>[5]</sup>等都被广泛研究与应用;但由于各自的性能特性限制,不适合用于密波波分复用(DWDM)系统。与以上几种波分复用器相比,AWG 具有优异的波长特性,因而能满足每个 ITU 信道所要求的密集波长信道间隔,信道数目大

(目前最大信道数目已经达到  $1010^{[6]}$ ),而且,几乎不受信道数目影响的可靠性能;并具有高的可重复制作性与稳定性、优异的串扰特性、小的插入损耗与插入损耗均匀性,以及为未来网络升级提供方便的完全对称的结构。AWG 还可以通过使自由光谱范围(FSR)为信道间隔的 N 倍而应用  $N \times N$  互连,这种独特的性能也是难以用其它复用/解复用滤波器来实现的<sup>[7,8]</sup>。采用 AWG 不仅可实现各种信道间隔的复用/解复用滤波器,也可以获得高度集成的光学部件。由于 AWG 优越的性能,使其有着广泛的用途,与光开头结合可实现光插分复用器(OADM)、与半导体光放大器(SOA)结合可以作为高速波长选择器,以及用于可调谐滤波器等<sup>[9,10]</sup>。

AWG 在国外已经广泛地被研究,特别是基于  $\text{InP}^{[11]}$ ,  $\text{SiO}_2^{[12]}$ , 以及有机材料<sup>[13]</sup>。由于采用 SOI 材料制成的光波导器件很容易与其它 Si 基器件实现

收稿日期:2004-06-08,修回日期:2004-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90104003)

作者简介:方青(1977-),男,湖北黄冈市人,博士,主要从事 SOI 材料的波导器件(分束器、衰减器、OADM 等)研究。

Received date: 2004-06-08, revised date: 2004-09-02

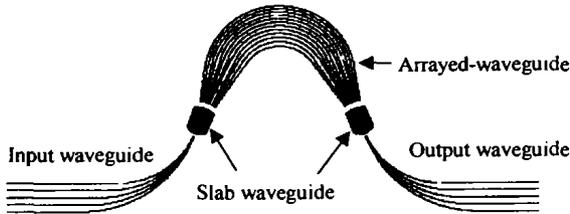


图1 AWG的原理图  
Fig. 1 Schematic of AWG

单片集成,而且制作工艺非常成熟,近年来基于SOI材料的AWG<sup>[14-16]</sup>也被进行了研究,得到了较好的研究成果;而国内由于工艺上的限制,虽然也已涉及了基于SOI材料的AWG研究,但还没有取得实质性的成果.本文报道了基于SOI材料进行设计,并通过ICP刻蚀制作的5×5AWG,经测试表明已经初步达到了分波的效果.

## 1 阵列波导光栅的理论设计

图1是所设计的5×5AWG的原理图. AWG主要由输入波导、平板波导、阵列波导与输出波导组成. 光信号从输入波导进入第一个平板波导区后被耦合进入阵列波导. 相邻阵列波导间的长度差均为一定值 $\Delta L$ ,它决定了信道间隔,光信号在阵列波导中产生相位差. 具有相同相位差的光信号从阵列波导输出,在第二个平板波导区内发生相互干涉,不同波长的光信号会聚在输出平板边缘特定位置,由输出波导出,完成AWG器件的分波功能.

AWG器件的设计参数由光栅方程<sup>[17]</sup>导出:

$$n_s d \sin \theta_i + n_c \Delta L + n_s d \sin \theta_o = m \lambda.$$

式中,

$$\theta_o = j \cdot \Delta x / L_f, \quad \theta_i = i \cdot \Delta x / L_f.$$

$n_s$ 与 $n_c$ 分别为平板波导与阵列波导的有效折射率; $\theta_i$ 与 $\theta_o$ 分别为输入平板波导与输出平板波导的衍射角度; $d$ 为阵列波导的栅距; $m$ 是衍射级数; $\lambda$ 是波长; $i$ 与 $j$ 分别为输入与输出波导的数目; $L_f$ 与 $\Delta x$ 分别为平板波导焦距与输入/出波导的间距; $\Delta L$ 为阵列波导的光程差.

基于SOI材料,我们采用BPM方法设计了中心波长为 $1.5509 \mu\text{m}$ ,信道间隔为200GHz的阵列波导光栅滤波器(AWG). 器件的设计参数如表1所列.

为了芯片能够与光纤阵列耦合匹配,考虑到一般光纤阵列相邻光纤的间距为 $250 \mu\text{m}$ ,在器件端面的输入与输出波导部分,相邻波导间距也均设计为 $250 \mu\text{m}$ . 器件的插入损耗是一个很重要的指标,为减

表1 5×5AWG的设计参数  
Table 1 Designed parameters of 5×5AWG

参数	符号	数值
波长间隔	$\Delta\lambda$	1.6nm
输入/出波导间距	$\Delta x$	$15 \mu\text{m}$
阵列波导光程差	$\Delta L$	$40.24 \mu\text{m}$
衍射级数	$m$	90
阵列波导栅距	$d$	$15 \mu\text{m}$
平板波导焦距	$L_f$	$5201.26 \mu\text{m}$
自由光谱范围	FSR	16.52nm
阵列波导数目	$M$	100
阵列波导有效折射率	$n_c$	3.4673
平板波导有效折射率	$n_s$	3.4714
阵列波导群折射率	$n_g$	3.5841

小插入损耗,在平板波导与阵列波导相连接处采用锥型波导过渡. AWG器件的尺寸主要由弯曲波导的弯曲半径与平板波导的焦距长度来决定的,尤其以弯曲半径最为关键. 本实验设计针对硅波导层厚度为 $5 \mu\text{m}$  SOI芯片进行的,为减小弯曲半径,采用深刻蚀的办法. 在实验中,刻蚀深度选取为 $2.6 \mu\text{m}$ ,弯曲半径可为1.5cm.

## 2 实验与讨论

器件制作在4英寸的SOI芯片上,波导层厚度为 $5.0 \mu\text{m}$ ,中间二氧化硅的厚度为 $1.0 \mu\text{m}$ ,这样厚度的二氧化硅阻止层足以防止光信号从衬底泄露. 对于刻蚀 $2.6 \mu\text{m}$ 的深刻蚀工艺来说,需要采用二氧化硅作为ICP刻蚀中的掩膜层. 在实验中,首先通过热氧化生成400nm厚的二氧化硅掩膜层. 通过工艺摸索,在热氧化中生成400nm厚度的二氧化硅需要氧化掉200nm左右的硅层. 为了使掩膜板与SOI片子不接触,不造成任何损伤,采用1:1投影式曝光. 通过操作摔胶机的速率来控制胶掩膜的厚度,实验中采用的速率为5200rpm,胶掩膜厚度为 $1.2 \mu\text{m}$ . 曝光显影后采用ICP刻蚀,首先对二氧化硅掩膜层进行刻蚀,然后再以二氧化硅为掩膜刻蚀SOI芯片上的顶层硅. 刻蚀出脊型波导后漂去作为掩膜的二氧化硅层. 最后为减小刻蚀后侧壁的粗糙度,再经过热处理生长400nm的二氧化硅保护层. 图2为刻蚀后脊型波导的横断面扫描电镜图片. 从图中可以看到脊型波导上角部分比较圆滑,这是刻蚀气体钻蚀造成的. 图3是平板波导与阵列波导相连接处的扫描电镜图片. 由于国内加工工艺的限制,在阵列波导之间夹角处未充分刻蚀,最大未充分刻蚀量有 $40 \mu\text{m}$ 左右. 流片加工的芯片经过抛光后进行测试.

测试设备是由NEWPORT公司提供的全自动测



图2 脊型波导断面 SEM 图片  
Fig.2 SEM picture of cross section

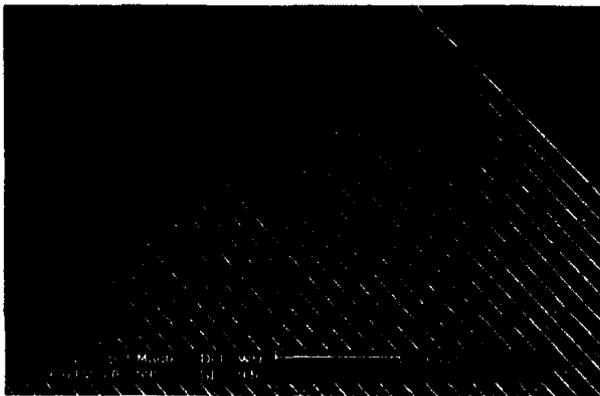


图3 平板波导与阵列波导相连处 SEM 图片  
Fig.3 SEM picture between slab and arrayed waveguides

试平台.为减小测试中的耦合损耗,在测试过程中采用锥型透镜光纤.输入的光信号从输入波导的中间波导输入,测试时温度为  $23^{\circ}\text{C}$ ,测试结果如图 4 与图 5 所示.从图 4 可以看出,该器件具有分光的功能,在输出端出现 5 个光斑.为进一步测其是否具有分波的功能,我们采用光谱仪对各个信道进行监测.图 5 为各个信道输出光谱图.从图中可以显示,该器件具有分波功能.各个信道的中心波长如表 2 所列.

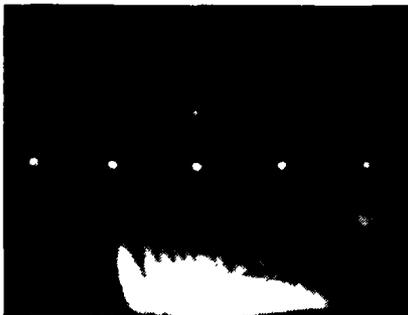


图4 AWG 输出光斑图  
Fig.4 Output field image of AWG

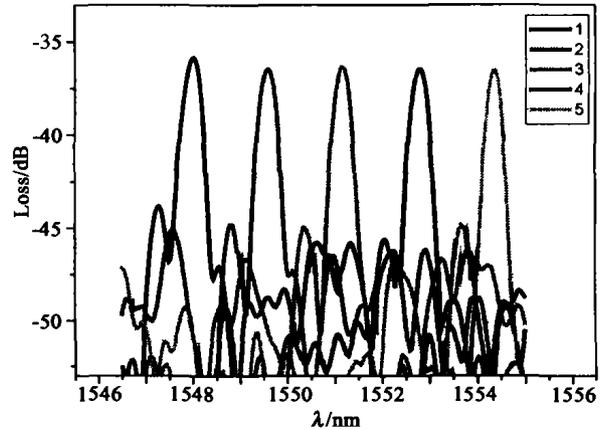


图5 AWG 输出光谱图  
Fig.5 Measured spectral responses of AWG

表2 AWG 器件各个信道的中心波长  
Table 2 Central wavelength of each channel

输出波导信道序号	测试中心波长 (nm)
1	1548.02
2	1549.60
3	1551.18
4	1552.80
5	1554.38

从表 2 可以看出,该 AWG 器件的中心波长与设计时中心波长相差  $0.28\text{nm}$ ,波长间隔与设计值相差在  $0.02\text{nm}$  之内.从图 5 可以看出该器件相邻串扰接近  $10\text{dB}$ ,信道插入损耗比较大,达到近  $35\text{dB}$ ,比模拟结果大  $33\text{dB}$ .器件大的损耗主要来自于两个方面因素:一是光纤与小尺寸的波导结构的耦合损耗,二是加工工艺的精度限制,特别是波导侧面的粗糙度大,导致光信号在弯曲波导传输时侧面散射损耗大.采用合适的模斑转换器降低耦合损耗;同时通过提高版图的制版精度以及采用更精细的工艺条件,可以有效地减小波导侧壁粗糙度,整个器件的性能可得到极大的提高.

### 3 结语

我们设计了中心波长为  $1.5509\mu\text{m}$ 、信道间隔为  $200\text{GHz}$  的  $5 \times 5$  阵列波导光栅 (AWG),并通过 ICP 刻蚀方法实现了在 SOI 材料上制作阵列波导光栅 (AWG).器件的测试结果表明,中心波长和波长间隔与设计值基本一致,相邻串扰接近  $10\text{dB}$ ,信道插入损耗均匀性为  $0.7\text{dB}$ ,初步实现了分波功能.通过减小制板时的分割精度以及采用更精细的工艺加工条件,器件的各项性能有望显著提高.

## REFERENCES

- [1] Chen Y J, Li H. Planar waveguide WDM technology: from components to systems [J]. *SPIE*, 1999, CR71:75—82.
- [2] Klekamp A, Munzner R. Calculation of imaging errors of AWG [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(9):1978—1986.
- [3] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications [J]. *Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8:948—964.
- [4] Thompson G H B, Asghari M, Clements S J, et al. Low-loss eight-channel integrated InGaAsP/InP demultiplexer [C]. CLEO'96, 512—514.
- [5] Thomas Edward Murphy, Jeffrey Todd Hastings. Fabrication and characterization of Bragg-reflection filters in SOI rib waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(12):1938—1942.
- [6] Takada 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 Technology Letters*. 2001, 13(6):577—578.
- [7] Dragone C. An  $N \times N$  optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3:896—899.
- [8] Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, Hiroma Toba, et al. Transmission characteristics of arrayed waveguide  $N \times N$  wavelength multiplexer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(3):447—455.
- [9] Yoshiaki Tachikawa, Yasuyuki Inoue. Arrayed-waveguide grating multiplexer with loop-back optical paths and its applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(6):977—984.
- [10] Tachikawa Y, Inoue Y, Kawachi M, et al. Arrayed-waveguide grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths [J]. *IEE Electron Lett.*, 1993, 29(24):2133—2134.
- [11] Tanobe H, Kondo Y, Kadota Y, et al. Temperature insensitive arrayed waveguide grating on InP substrates [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(2):235—237.
- [12] Ishii M, Takagi A. Low-loss fibre-pigtailed 256 channel arrayed-waveguide grating multiplexer using cascaded laterally-tapered waveguides [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(23):1401—1402.
- [13] Keil N, Yao H H, Zawadzki C. Athermal polarization-independent arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer using an all-polymer approach [J]. *Applied Physics B*, 2001, 73, 619—621.
- [14] Takada K, Yamada H, Okamoto K. 320-channel multiplexer consisting of 100GHz-spaced parent AWG and 10GHz-spaced subsidiary AWGs [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(10):824—826.
- [15] Ooba N, Hibino Y, Inoue Y, et al. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating multiplexer using bimetal plate temperature compensator [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(21):1800—1803.
- [16] Takada K, Abe M, Shibata M. Low-crosstalk 10-ghz-spaced 512-channel arrayed-waveguide grating multi/demultiplexer fabricated on a 4-in wafer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11):1182—1184.
- [17] Meint K Smit, Cor Van Dam. Phasor-based WDM-devices; principles, design and applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(2):236—250.