

# 17×17 信道光谱响应平坦化的聚合物阵列 波导光栅的研制\*

秦政坤<sup>1,2,†</sup> 马春生<sup>2</sup>

(1 吉林师范大学, 四平 136000)

(2 吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

**摘要:** 选用氟化聚芳醚 FPE 聚合物材料, 设计并制备出了 17×17 信道光谱响应平坦化阵列波导光栅(AWG)波分复用器. 实验测试结果表明, 器件的中心波长为 1550. 83nm, 波长间隔为 0. 8nm, 3dB 带宽约为 0. 476nm, 插入损耗为 13~15dB, 串扰低于 -21dB.

**关键词:** 集成光学; 阵列波导光栅; 传输频谱; 箱形光谱响应; 串扰

**EEACC:** 1320

**中图分类号:** TN252

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)09-1804-04

## 1 引言

阵列波导光栅(AWG)是光通信系统中实现波分复用技术的关键性器件<sup>[1~5]</sup>, AWG 的光谱响应对其波分复用功能具有重要的影响. 工艺误差、温度变化等诸多方面的原因都将导致 AWG 器件传输光谱的漂移. 由于常规型 AWG 器件具有高斯形光谱响应, 需要在光通信网络中对其工作波长进行精确的控制, 增大了工艺制作的难度, 因此 AWG 器件具有平坦化的光谱响应是非常重要的.

为了降低对波长控制精度的要求, 人们提出了一些实现 AWG 传输光谱平坦化的方法, 使器件产生所谓的“箱形”(box-like)光谱响应. 这些方法包括利用多模输出波导<sup>[6]</sup>、输入波导的多模干涉<sup>[7]</sup>、三倍罗兰圆结构<sup>[8]</sup>、改变阵列波导的长度和位置<sup>[9]</sup>等. 我们曾提出过一种新的光谱响应平坦化 AWG 的设计方法<sup>[10]</sup>, 即在常规型 AWG 器件中把奇数阵列波导的芯宽度减少一个增量, 同时把偶数阵列波导增加一个相同的增量, 即可获得平坦的箱形光谱响应. 作者在工艺实验中应用这一方法, 制备出了光谱响应平坦化的聚合物 AWG 器件样品.

## 2 器件的优化设计

我们在文献 [10] 中曾提出一种新的光谱响应平坦化 AWG 的设计方法, 即在常规型 AWG 中, 把奇数阵列波导的芯宽度由  $a$  减小到  $a - \delta a$ , 同时把偶数阵列波导的芯宽度由  $a$  增大到  $a + \delta a$ , 即把一个 AWG 分为两个亚 AWG. 因为两个亚 AWG 的芯宽度不同, 它们各

自的模有效折射率互不相同, 因此它们各自的传输光谱也不相同. 根据光栅方程, 对于同一衍射级, 将会在原来常规型 AWG 的主衍射波长的两侧出现两个新的主衍射峰. 由此可见, 改进型 AWG 的衍射远场是由这两个亚 AWG 衍射远场叠加而成. 适当地选择增量  $\delta a$  的值, 可使改进型 AWG 的光谱响应平坦化, 从而形成箱形光谱响应.

我们选用聚合物 FPE-51 作为制作 AWG 的芯层材料, 其折射率为 1. 5100. 调节 FPE-51 和 FPE-49 混合物的比例, 获得折射率为 1. 4979 的包层材料, 二者的相对折射率  $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 = 0. 8\%$ . 利用以前我们给出的 AWG 的参数优化和结构设计方法<sup>[10, 11]</sup>对器件进行了优化设计, 这里略去器件的优化过程, 只给出参数的优化结果, 列于表 1 中, 器件的光刻版图如图 1 所示.

表 1 光谱响应平坦化聚合物 AWG 的参数优化值  
Table 1 Optimum values of parameters of a polymer AWG with flat spectral response

中心波长	$\lambda_0 = 1550. 918\text{nm}$
波长间隔	$\Delta\lambda = 0. 8\text{nm}$
信道波导和阵列波导的芯宽度	$a = 6\mu\text{m}$
信道波导和阵列波导的芯厚度	$b = 4\mu\text{m}$
阵列波导的芯宽度增量	$\delta a = 0. 24\mu\text{m}$
相邻波导间距	$d = 15\mu\text{m}$
聚合物波导芯区的折射率	$n_1 = 1. 51$
聚合物波导包层的折射率	$n_2 = 1. 4979$
衍射级数	$m = 56$
相邻阵列波导的长度差	$\Delta L = 57. 786\mu\text{m}$
平板波导焦距	$f = 7519. 539\mu\text{m}$
自由光谱区	$\text{FSR} = 13. 77\text{nm}$
输入/输出信道波导数	$2N + 1 = 17$
阵列波导数	$2M + 1 = 151$

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60576045)

† 通信作者. Email: qin\_zhengkun@126. com

2008-03-08 收到, 2008-04-16 定稿

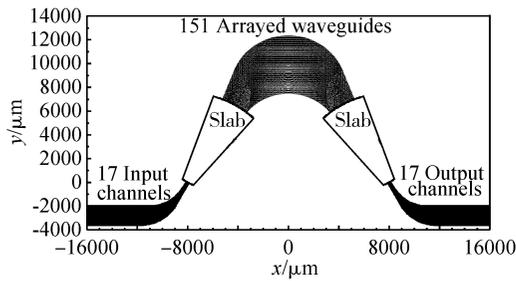


图 1 设计的 AWG 的光刻版图  
Fig. 1 Schematic layout of the designed AWG

利用光栅衍射理论,我们可以得到 AWG 的归一化远场表达式为<sup>[12]</sup>

$$E(\theta_{out}) = E_0(\theta_{out}) \times \frac{1 + 2 \sum_{v=1}^M E_0(v\Delta\theta) \cos[v(k_s d \sin\theta_{in} + k_c \Delta L + k_s d \sin\theta_{out})]}{1 + 2 \sum_{v=1}^M E_0(v\Delta\theta)} \quad (1)$$

式中

$$E_0(\theta) = \frac{q_x \cos(\frac{1}{2} k_x a_v \sin\theta) - k_s \sin\theta \sin(\frac{1}{2} k_s a_v \sin\theta)}{k_x^2 q_x \cos\theta (k_x^2 - k_s^2 \sin^2\theta) (q_x^2 + k_s^2 \sin^2\theta)} \quad (2)$$

其中  $\theta$  为衍射角;  $\theta_{in}, \theta_{out}$  分别为入射角和出射角;  $k_s$  为平板波导的模传播常数;  $k_x, q_x$  分别为矩形波导芯中模的横向传播常数和包层中模的衰减常数;  $\Delta\theta$  为相邻阵列波导的角间距;  $E_0(\theta_{out})$  为  $E(\theta_{out})$  的包络线. 当阵列波导为奇数时,  $v = 1, 3, 5, \dots$ , 取芯宽度  $a_v = a - \delta a$ ; 当阵列波导为偶数时,  $v = 2, 4, 6, \dots$ , 取芯宽度  $a_v = a + \delta a$ .

由(1)式计算得到的器件的 17 条输出信道的解复用光谱如图 2 所示. 图中可以看出, 每条信道的传输光谱均呈现平坦的箱型光谱响应, 其 3dB 带宽的模拟值约为 0.49nm.

### 3 器件的制备及测试

我们采用旋转涂覆、Al 掩膜、光刻、反应离子刻蚀

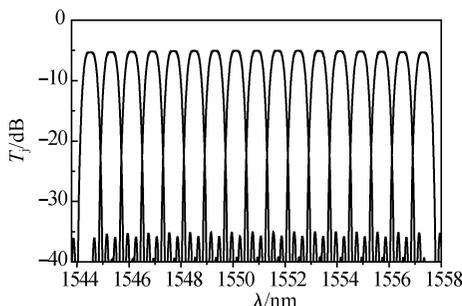


图 2 设计的 AWG 的理论模拟传输光谱  
Fig. 2 Simulated transmission spectrum of the designed AWG

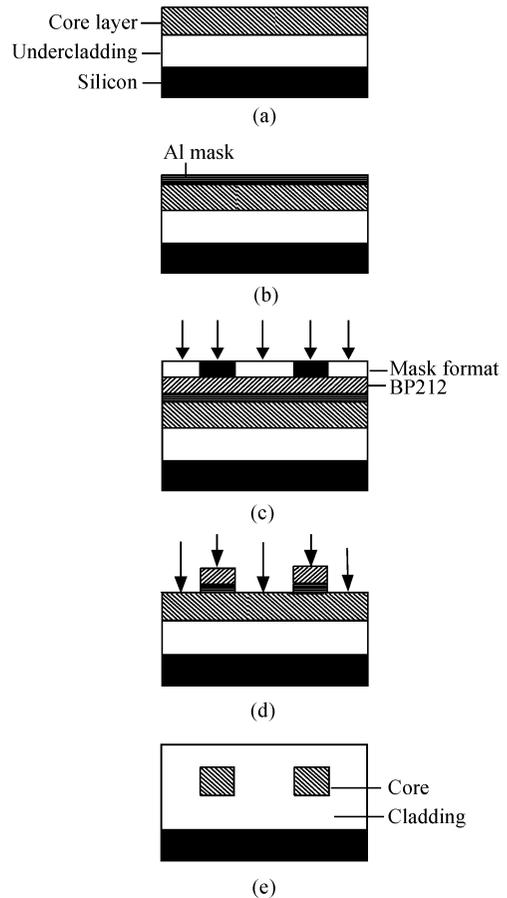


图 3 工艺流程图 (a) 旋涂下包层和芯层; (b) 蒸 Al; (c) 光刻; (d) RIE; (e) 旋涂上包层

Fig. 3 Process steps of fabrication (a) Spin-coating the undercladding layer and core layer; (b) Depositing metal mask; (c) Photolithography; (d) RIE; (e) Spin-coating the overcladding layer

等工艺技术制备了 17×17 信道聚合物光谱响应平坦化的 AWG 器件. 工艺流程如图 3 所示, 具体实验步骤如下.

(1) 依次旋涂下包层和芯层. 下包层采用 1500r/min 的旋涂转速, 旋涂时间 20s, 然后梯度升温至 120℃ 下坚膜 2h. 冷却后, 采用 1500r/min 的旋涂转速, 旋涂时间 30s, 梯度升温至 125℃, 恒温固化 3h, 使其完全交联. 两次旋涂, 使下包层厚度达到 15μm, 可以有效地减小因高折射率硅衬底引起的光功率泄漏损耗. 芯层旋涂低速预转 2min 后, 梯次升高至 2500r/min, 旋涂时间 30s, 使芯层厚度达到 4μm, 在烘箱梯度升温至 125℃, 恒温固化 3h.

(2) 蒸 Al. 用蒸 Al 台真空淀积 Al 薄膜, 用膜厚仪控制其厚度. 当 Al 膜太厚(大于 50nm)时, 均匀性不易控制, 增加后续显影难度, 使显影时间拉长, 波导条宽度减小, 对矩形波导的形状影响加大. Al 膜太薄(小于 10nm)时, 金属掩膜不够致密, 会使光刻胶渗透, 导致 Al 膜有裂纹, 影响到器件的性能. 通常情况下, Al 膜厚度在 20~30nm 之间较佳.



图 4 制备的 AWG 的近场光斑

Fig. 4 Near-field photograph of the fabricated AWG

(3) 光刻. 在 Al 膜上, 使用粘度为 30% 的薄型 BP-212 正性光刻胶进行旋涂, 采用 4000r/min 的旋涂转速, 旋涂时间 20s, 使膜厚达到 1.5 $\mu$ m. 在烘箱梯度升温至 80 $^{\circ}$ C, 前烘 20min, 使其处于半交联状态. 利用预制的刻模版和光刻机进行光刻, 光刻时间为 38s.

(4) 显影及反应离子刻蚀 (RIE). 使用 1:200 的 NaOH 水溶液, 显影时间 28s, 然后进行反应离子刻蚀. 使用高纯氧气作为刻蚀气体, 流量控制在 40 SCCM 左右, 射频功率为 40W, 刻蚀时间为 40min.

(5) 去铝后旋涂上包层, 形成掩埋式波导结构的 AWG. 用 NaOH 溶液去掉附在波导芯上表面的 Al 掩膜条, 去 Al 的时间为大约 20s 左右. 在波导芯表面旋涂上包层材料, 重复旋涂下包层的工序, 采用两次旋涂, 使包层厚度达到 15 $\mu$ m.

我们在上述工艺条件下, 制备出了聚合物光谱响应平坦化的 AWG 器件. 利用 ASE 光源, 将宽谱光信号通过单模输入光纤耦合进入 AWG 器件样品的输入信道波导, 由红外摄像机探测输出光斑, 测得近场光斑如图 4 所示. 将其接入智能测试系统的输入端, 得到的实验测试光谱如图 5 所示. 实验测试结果为: 器件的中心波长为 1550.923nm, 波长间隔为 0.8nm, 箱型光谱响应的 3dB 带宽约为 0.476nm, 插入损耗为 13~15dB, 最大串扰约为 -21dB, 自由光谱区为 13.765nm.

我们对上述实验测试结果作下述讨论:

(1) 从图 5 可以看出, 试制的氟化聚芳醚 FPE 聚合物 AWG 已经实现了光谱响应平坦化, 这说明了我们在理论上给出的 AWG 光谱响应平坦化的设计方法在工艺实验上是可行的, 具有一定的实用参考价值.

(2) 试制器件的箱型光谱响应的 3dB 带宽约为 0.476nm, 是未平坦化的常规型 AWG 器件 3dB 带宽

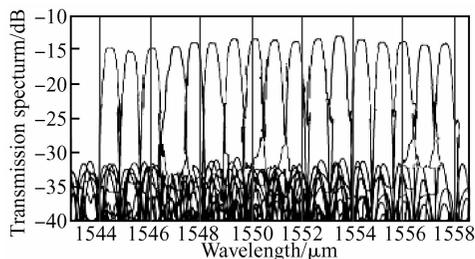


图 5 制备的 AWG 的实验测试传输光谱

Fig. 5 Measured transmission spectrum of the fabricated AWG

的 2.2 倍. 因而当工艺误差、温度变化等方面的原因导致 AWG 光谱漂移时, 放宽了对其工作波长的控制.

(3) 试制的器件的中心波长约为 1550.923nm, 与设计值 1550.918nm 相比, 产生了一个约为 0.005nm 的波长漂移. 这一中心波长漂移远小于波长间隔 0.8nm, 因而这一器件可以实现良好的波分复用功能.

(4) 试制器件的插入损耗和串扰偏大, 分别为 13~15dB 和 -21dB, 这主要是因为, 在实现 AWG 的光谱响应平坦化的过程中产生了附加损耗和附加串扰, 与未平坦化的常规型 AWG 相比, 分别增大了 5dB 和 4dB. 因此如何减小器件的插入损耗和串扰, 是今后在器件的优化设计和实验工艺上需要进一步解决的问题.

## 4 结论

利用氟化聚芳醚 FPE 聚合物材料和一种新的光谱响应平坦化 AWG 的设计方法, 我们制备出了 17 $\times$ 17 信道光谱响应平坦化的聚合物 AWG 器件样品. 这种方法是在常规型 AWG 中把奇数阵列波导的芯宽度减少一个增量, 同时把偶数阵列波导增加一个相同的增量, 即可获得平坦的箱型光谱响应. 实验测试结果为: 器件的中心波长为 1550.923nm, 波长间隔为 0.8nm, 箱型光谱响应的 3dB 带宽约为 0.476nm, 插入损耗为 13~15dB, 串扰约为 -21dB, 自由光谱区为 13.765nm. 虽然我们获得了聚合物 AWG 器件平坦化的箱型光谱响应, 但是在如何减小器件的插入损耗和串扰, 进一步改善器件的性能方面, 仍有大量的工作要做.

## 参考文献

- [1] Maru K, Okawa M, Abe Y, et al. Silica-based 2.5%-delta arrayed waveguide grating using simple polarisation compensation method with core width adjustment. *Electron Lett*, 2007, 43(1): 26
- [2] Yasumoto M, Suzuki T, Tsuda H, et al. Fabrication of (Pb, La) (Zr, Ti)O<sub>3</sub> thin-film arrayed waveguide grating. *Electron Lett*, 2007, 43(1): 24
- [3] Lim J G, Lee S S, Lee K D. Polymeric arrayed waveguide grating using imprint method incorporating a flexible PDMS stamp. *Opt Commun*, 2007, 272(1): 97
- [4] Lang Tingting, He Jianjun, He Sailing. A novel triplexer design based on arrayed waveguide grating. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(2): 368 (in Chinese) [郎婷婷, 何建军, 何赛灵. 基于阵列波导光栅的单纤三重波分复用器. *半导体学报*, 2006, 27(2): 368]
- [5] Long Wenhua, Li Guangbo, Jia Kemiao, et al. Design and fabrication of 1 $\times$ 32 silica-based arrayed waveguide grating. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(9): 1798 (in Chinese) [龙文华, 李广波, 贾科淼, 等. 1 $\times$ 32 硅基二氧化硅阵列波导光栅的研制. *半导体学报*, 2005, 26(9): 1798]
- [6] Amersfoort M R, de Boer C R, van Ham F P G, et al. Phased-array wavelength demultiplexer with flattened wavelength response. *Electron Lett*, 1994, 30: 300
- [7] Amersfoort M R, Soole J B D, LeBlance H P, et al. Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers. *Electron Lett*, 1996, 32: 449
- [8] Ho Y P, Li H, Chen Y. Flat channel-passband-wavelength multiplexing and demultiplexing devices by multiple-Rowland-circle design. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(3): 342

- [9] Kamalakis T, Sphicopoulos T. An efficient technique for the design of an arrayed-waveguide grating with flat spectral response. *J Lightwave Technol*, 2001, 19(11): 1716
- [10] Ma C S, Zhang H M, Zhang D M, et al. Box-like spectral response of arrayed waveguide grating multiplexers. *Opt Commun*, 2005, 249(1~3): 209
- [11] Guo W B, Ma C S, Zhang D M, et al. Parameter optimization and structural design of polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *Opt Commun*, 2002, 201(1~3): 45
- [12] Ma C S, Wang X Y, Zhang H M, et al. An efficient technique for analyzing transmission characteristics of arrayed waveguide grating multiplexers. *Opt Quantum Electron*, 2004, 36(8): 759

## Fabrication of a $17 \times 17$ Polymer Arrayed Waveguide Grating with Flat Spectral Response\*

Qin Zhengkun<sup>1,2,†</sup> and Ma Chunsheng<sup>2</sup>

(1 Jinlin Normal University, Siping 136000, China)

(2 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A  $17 \times 17$  polymer arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer with flat spectral response is designed and fabricated using FPE polymer materials. Measured results are: the center wavelength is 1550.83nm, the wavelength channel spacing is 0.8nm, the 3dB bandwidth is about 0.476nm, the insertion loss is 13~15dB, and the crosstalk is about -21dB.

**Key words:** integrated optics; arrayed waveguide grating; transmission spectrum; box-like spectral response; crosstalk

**EEACC:** 1320

**Article ID:** 0253-4177(2008)09-1804-04

\* Project supported by the National Science Foundation of China (No. 60576045)

† Corresponding author. Email: qin\_zhengkun@126.com

Received 8 March 2008, revised manuscript received 16 April 2008