

工艺公差对阵列波导光栅波分复用器性能的影响*

秦政坤^{1,2} 马春生^{1,†} 李德禄¹ 张海明¹ 张大明¹ 刘式壖¹

(1 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, 长春 130012)

(2 吉林师范大学, 四平 136000)

摘要: 依据阵列波导光栅(AWG)的传输理论,分析了工艺公差对硅基聚合物 AWG 波分复用器性能的影响.分析结果表明,工艺公差将引起 AWG 传输光谱的漂移,并使串扰增大.为了实现 AWG 器件正常的解复用功能,我们对 AWG 工艺公差的累积和补偿效应进行了讨论.

关键词: 阵列波导光栅; 波分复用器; 工艺公差; 传输光谱; 串扰

EEACC: 1320

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)05-0926-06

1 引言

阵列波导光栅(AWG)波分复用器具有波分复用、解复用、路由、 $N \times N$ 互连等基本功能,是光通信密集波分复用(DWDM)网络中的关键器件^[1~5].与其他材料制作的 AWG 器件相比,聚合物 AWG 器件具有成本低、工艺简单、折射率容易控制等优点.近年来,聚合物 AWG 器件已成为国内外研究的热点,并已制作出了一些不同聚合物材料的 AWG 器件^[6~8].

AWG 器件的性能依赖于精确的结构设计和精细的制作工艺,但是在 AWG 器件制作过程中很难避免工艺公差,因此对 AWG 器件工艺公差的分析是非常必要的.

本文在中心波长为 1550.918 nm,波长间隔为 0.8nm 的情况下,分析了工艺公差对硅基聚合物 AWG 波分复用器传输光谱和串扰的影响,研究了工艺公差的累积和补偿效应,以实现 AWG 器件正常的解复用功能.最后在分析和讨论的基础上得出了一些结论.

2 器件的材料和参数优化值

AWG 波分复用器的结构如图 1 所示,它是由两个聚焦平板波导、 $2N + 1$ 条输入信道、 $2N + 1$ 条输出信道和 $2M + 1$ 条阵列波导组成,图中右上方的长方形表示信道和阵列波导的横截面.选取 PFS-co-GMA^[9]作为包层材料,苯乙烯为 PFS-co-GMA 的折射率

调节剂,通过对苯乙烯摩尔比的控制,PFS-co-GMA 的折射率在 1.461 ~ 1.555 区间内可调.调节后的 PFS-co-GMA 作为芯层材料,在波长 1550nm 附近其传输损耗小于 0.4dB/cm.选择国际电信联盟(ITU)推荐的标准中心波长为 $\lambda_0 = 1550.918\text{nm}$ (频率 193.3THz)^[10],芯层折射率为 $n_1 = 1.472$,包层折射率为 $n_2 = 1.461$,相对折射率差为 $\Delta n = (n_1 - n_2) / n_1 = 0.75\%$.

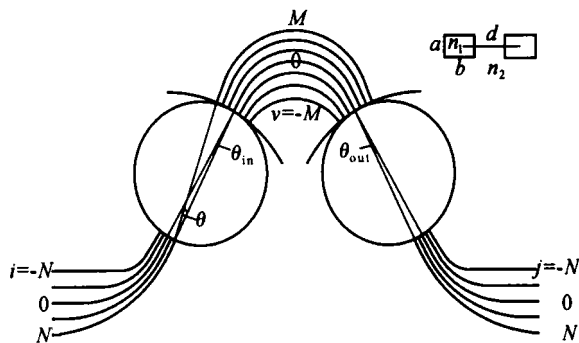


图 1 AWG 波分复用器的结构简图 右上方的长方形表示输入/输出信道和阵列波导的横截面及有效折射率分布.

Fig. 1 Diagram of an AWG multiplexer The inserted rectangles express the cross sections and the refractive index profiles of I/O channels and arrayed waveguides.

利用矩形波导的特征方程^[11]、AWG 的光栅方程^[12]以及相关的公式^[13],我们对这种聚合物 AWG 器件进行了参数优化,这里只给出优化结果如表 1 所示.

*国家自然科学基金资助项目(批准号:60576045)

†通信作者. Email: mcsheng@163.com

2006-01-04 收到,2006-02-16 定稿

表 1 聚合物 AWG 波分复用器的参数优化值

Table 1 Optimizing values of polymeric AWG multiplexers

中心波长	$\lambda_0 = 1550.918 \text{ nm}$
波长间隔	$\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$
波导芯的宽度和厚度	$a = b = 4.4 \mu\text{m}$
相邻波导间距	$d = 15.0 \mu\text{m}$
聚合物波导芯的折射率	$n_1 = 1.472$
聚合物包层的折射率	$n_2 = 1.461$
衍射级数	$m = 56$
相邻阵列波导长度差	$L = 59.310 \mu\text{m}$
平板波导焦距	$f = 7330.342 \mu\text{m}$
自由光谱区	$\text{FSR} = 27.532 \text{ nm}$
输入/输出信道数	$2N + 1 = 33$
阵列波导数	$2M + 1 = 151$

3 工艺公差分析

通常在聚合物 AWG 器件制作过程中存在两种主要的工艺公差. 一种是调整波导芯折射率 n_1 所引起的误差 δn_1 , 另一种是旋涂芯厚度 b 所引起的误差 δb . 下面讨论这两种工艺公差对聚合物 AWG 器件性能的影响.

3.1 工艺公差引起的中心波长的漂移

假定芯折射率在 $n_1 \sim n_1 + \delta n_1$ 范围内变化, 芯厚度在 $b \sim b + \delta b$ 范围内变化, 模式的有效折射率在 $n_c \sim n_c + \delta n_c$ 范围内变化. 令衍射级数 m 不变, δn_c 将使中心波长从 λ_0 移动到 $\lambda_0 + \delta\lambda$. 当光由中心信道输入输出时, AWG 的光栅方程^[12]变为 $n_{c0} L = m \lambda_0$, 由此则可得到波长移动 $\delta\lambda$ 的表达式为

$$\delta\lambda = \frac{L}{m} \times \left[\frac{\partial n_c}{\partial n_1} \delta n_1 + \frac{\partial n_c}{\partial b} \delta b \right] \quad (1)$$

其中 $\partial n_c / \partial n_1$ 和 $\partial n_c / \partial b$ 可由文献[11]中的(6)和(7)式得到.

$$E(\text{out}) = E_0(\text{out}) \frac{1 + 2 \sum_{v=1}^M E_0(v) \cos[vk(n_s \sin \theta_{in} + n_c L + n_s \sin \theta_{out} + \phi)]}{1 + 2 \sum_{v=1}^M E_0(v)} \quad (2)$$

式中

$$E_0(v) = k_x^2 q_x \cos \alpha \frac{q_x \cos[k_x(a/2) \sin \theta] - k_s \sin[k_x(a/2) \sin \theta] \sin \alpha}{(k_x^2 - k_s^2 \sin^2 \alpha)(q_x^2 + k_s^2 \sin^2 \alpha)} \quad (3)$$

其中 α 为衍射角; $\alpha = (m n_g) / (n_s n_{c0} d)$ 为相邻波导的角间距; $E_0(v)$ 为 $E_0(\text{out})$ 的包络线; $k_s = (2\pi / \lambda) n_s$ 为平板波导的传播常数; k_x, q_x 分别为矩形波导包层中的横向传播常数和衰减常数; $\phi = n_c L$ 为工艺公差 $\delta n_1, \delta b$ 引起的微扰相移. 工艺公差 $\delta n_1, \delta b$ 的存在导致了传输光谱的漂移和串扰

图 2 给出了波长漂移 $\delta\lambda$ 与工艺公差 δn_1 (当 $\delta b = 0$ 时) 和 δb (当 $\delta n_1 = 0$ 时) 的关系曲线. 由图中可以看出, 当 $\delta n_1, \delta b > 0$ 时, 波长漂移 $\delta\lambda > 0$, 即中心波长变大. 相反地, 当 $\delta n_1, \delta b < 0$ 时, 波长漂移 $\delta\lambda < 0$, 即中心波长变小. 波长漂移的绝对值随着工艺公差 δn_1 和 δb 绝对值的增大而增大. 为了保证 AWG 器件正常的解复用功能, 中心波长只能在允许的范围移动. 我们设定 $-0.1 \text{ nm} \leq \delta\lambda \leq 0.1 \text{ nm}$, 远小于波长间隔 0.8 nm , 此时可以确定工艺公差的变化范围分别为: $-1.4 \times 10^{-4} \leq \delta n_1 \leq 1.4 \times 10^{-4}$, $-100 \text{ nm} \leq \delta b \leq 100 \text{ nm}$.

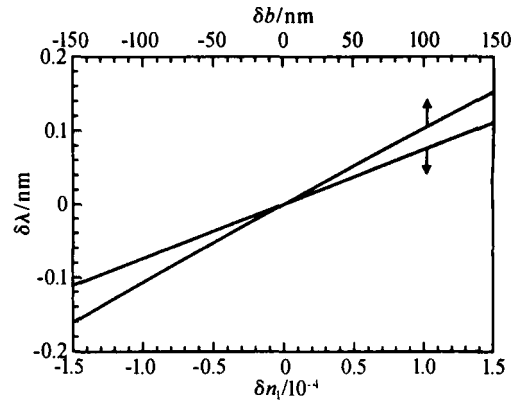


图 2 工艺公差 δn_1 (当 $\delta b = 0$ 时) 和 δb (当 $\delta n_1 = 0$ 时) 与波长漂移 $\delta\lambda$ 的关系曲线 $\lambda_0 = 1550.918 \text{ nm}$.

Fig. 2 Shift of the central wavelength $\delta\lambda$ versus the manufacturing tolerances δn_1 (when $\delta b = 0$), and δb (when $\delta n_1 = 0$)

3.2 工艺公差对传输和串扰的影响

工艺公差 $\delta n_1, \delta b$ 的存在, 将使导模的有效折射率由 n_c 变为 $n_c + \delta n_c$. 根据 AWG 的衍射理论, 我们可以得到所有 $2M + 1$ 条阵列波导在输出平板波导内的归一化远场分布 $E(\text{out})$ 为

的变化. (2) 式中的 $E_0(v)$ 括号中的 v 为自变量, $E_0(v) = E_0(\lambda) |_{\lambda=v}$, $E_0(\lambda)$ 由 (3) 式给出.

AWG 器件的远场分布 $E(\text{out})$ 也是波长 λ 的函数, 可以表示为 $E(\lambda)$. AWG 的每一条输出信道的传输和串扰分别定义为

$$T_j(\lambda) (\text{dB}) = 10 \lg [E_j^2(\lambda)] \quad (4)$$

$$L_{\text{CT}}^{(j)}(\lambda) (\text{dB}) = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=-N}^N E_i^2(\lambda)}{E_j^2(\lambda)} \right] \quad (5)$$

式中 $j = -N, -N + 1, \dots, N$; λ 为设计的解复用波长.

当不考虑工艺公差时,即 $\phi = 0$,图 3 给出了 AWG 器件的 33 条输出信道的传输光谱和串扰.图中可以看出,33 个复用波长从 33 条对应的输出信

道输出,实现了解复用功能.每条传输光谱的 3dB 带宽为 0.22nm,中心输出信道的串扰约为 -31.2dB,边缘输出信道的串扰约为 -34.0dB.

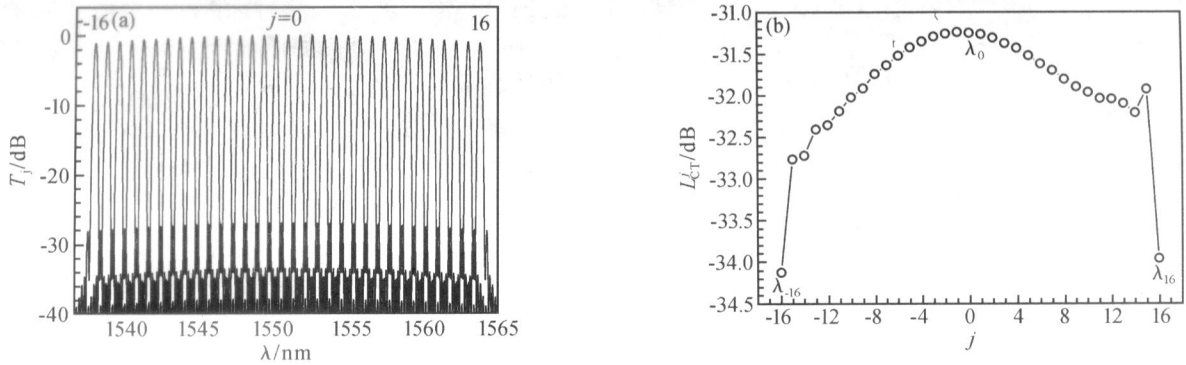


图 3 当不考虑工艺公差时, $\phi = 0$,AWG 的 33 条输出信道的传输光谱(a)和串扰(b) 相关的参数值见表 1.

Fig. 3 Transmission spectrum (a) and crosstalk (b) of 33 output channels of the theoretically designed AWG $\phi = 0$ and the values of parameters are given in Table 1.

当考虑工艺公差时,即 $\phi = n_c L$,图 4 给出了工艺公差 n_1 , b 对传输光谱和串扰的影响,为了方便比较,我们也给出了不考虑工艺公差即 n_1

$= b = 0$ 时的情况.在图 4(a)和(c)中仅画出了 3 个衍射峰,可以确定出,当输出光谱产生 -0.1 或 0.1 nm 的波长漂移时,所能允许的工艺公差分别为:

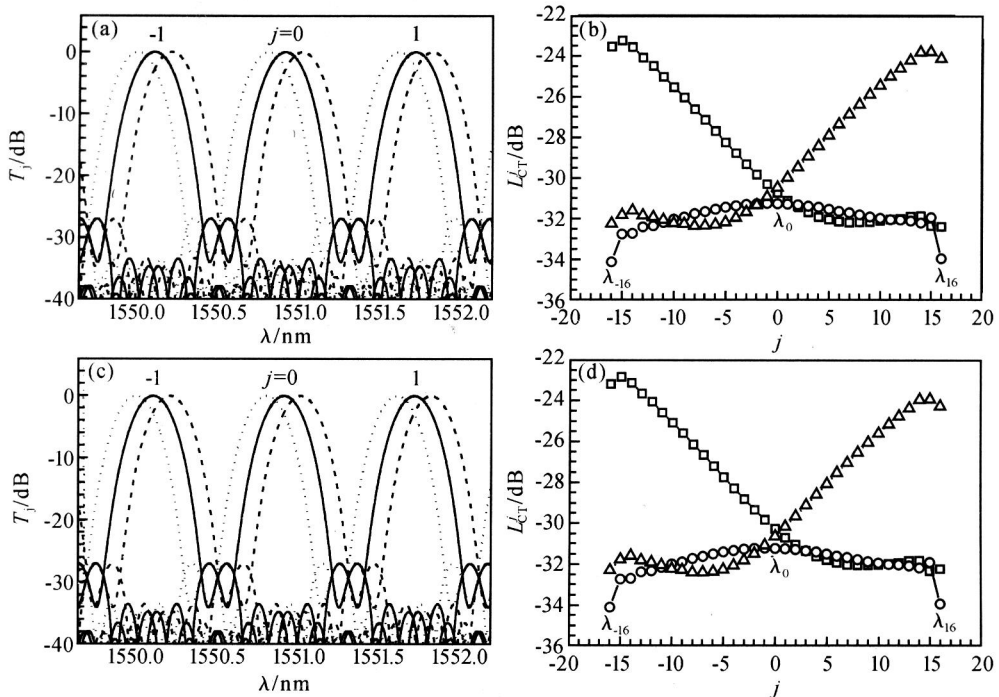


图 4 工艺公差 n_1 , b 对传输光谱和串扰的影响 $\phi = n_c L$ 在(a),(c)中仅给出了 3 个衍射峰.在(a)和(b)中,取 $b = 0$, $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}$ (点线和方形), 0 (实线和圆圈), 1.4×10^{-4} (虚线和三角形).在(c)和(d)中,取 $n_1 = 0$, $b = -100$ (点线和方形), 0 (实线和圆圈), 100nm (虚线和三角形).

Fig. 4 Effects of the manufacturing tolerances n_1 and b on the transmission spectrum and the crosstalk where only three peaks around the central wavelength λ_0 are plotted in (a) and (c), where $\phi = n_c L$. (a), (b) $b = 0$, $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}$, (dotted line and squares), 0 (solid line and circles), 1.4×10^{-4} (dashed line and triangles); (c), (d) $n_1 = 0$, $b = -100$ (dotted line and squares), 0 (solid line and circles), 100 nm (dashed line and triangles)

在图 4(a) 和 (b) 中,当 $b = 0$ 时, $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}, 1.4 \times 10^{-4}$;在图 4(c) 和 (d) 中,当 $n_1 = 0$ 时, $b = -100, 100\text{nm}$.

从图 4(a) 和 (c) 中可以看出,工艺公差引起了光谱的漂移.与不考虑工艺公差($n_1 = b = 0$)的情况相比,当 $n_1, b > 0$,传输光谱向右移动.当 $n_1, b < 0$,传输光谱向左移动.因为限制了光谱的漂移为 -0.1 和 0.1nm ,所以图 4(a) 与图 5(c) 非常接近.如果通过选择 n_1, b 的值,使光谱发生不同的移动,图 4(a) 与图 5(c) 将会明显地不同.

从图 4(b) 和 (d) 可以看出,与不考虑工艺公差($n_1 = b = 0$)的情况相比,当 $n_1, b > 0$ 和 $n_1, b < 0$ 时,某些输出信道的串扰明显地增大.因为限制了光谱的漂移为 -0.1 和 0.1nm ,所以图 4(b) 和图 5(d) 非常接近,但我们还是可以观察到二者之间

的细微差别.

3.3 工艺公差的累积和补偿

当 n_1, b 都为正值或负值时,即 $n_1, b > 0$ 或 $n_1, b < 0$,将会引起公差的累积.当 n_1, b 为一正一负时,即 $n_1 < 0, b > 0$,或 $n_1 > 0, b < 0$,时,将会引起公差的补偿.

图 5 给出了传输光谱和串扰与公差累积和补偿的关系.公差累积的情况如图 5(a) 和 (b) 所示,取一组值为 $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}, b = -100\text{nm}$;另一组值为 $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = 100\text{nm}$.公差补偿的情况如图 5(c) 和 (d) 所示,取一组值为 $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = 100\text{nm}$;另一组值为 $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = -100\text{nm}$.为了方便比较,我们也给出了不考虑工艺公差即 $n_1 = b = 0$ 时的情况.

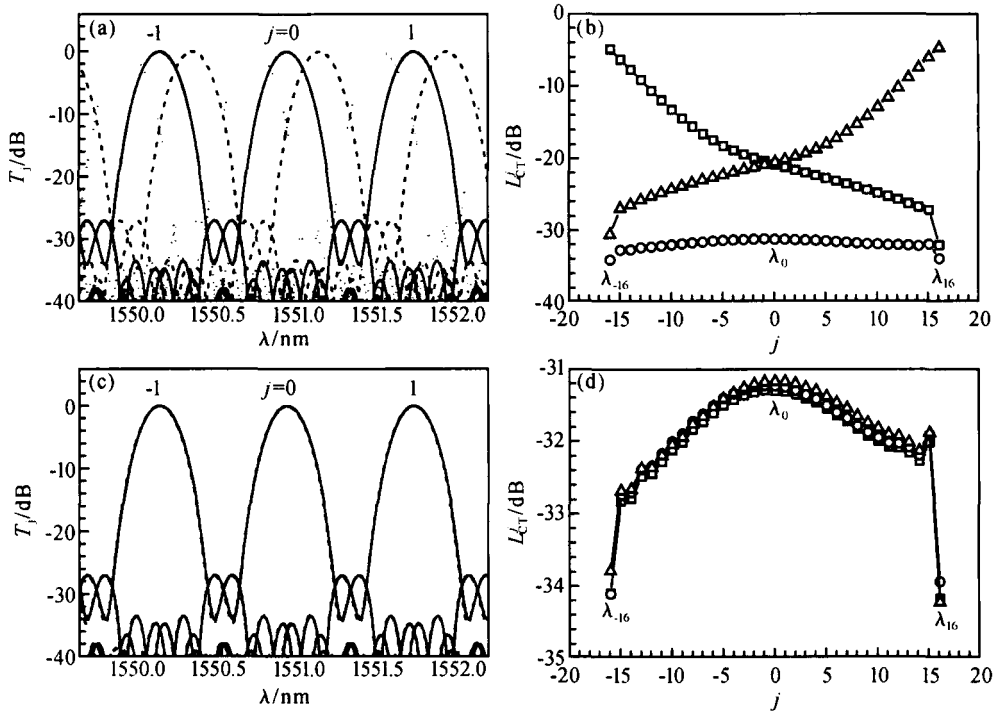


图 5 传输光谱((a), (c))和串扰((b), (d))与公差累积((a), (b))和公差补偿((c), (d))的关系.在(a)和(b)中, $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = -100\text{nm}$ (点线和方形); $n_1 = b = 0$ (实线和圆圈); $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = 100\text{nm}$ (虚线和三角形).在(c)和(d)中, $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}, b = 100\text{nm}$ (点线和方形); $n_1 = b = 0$ (实线和圆圈); $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}, b = -100\text{nm}$ (虚线和三角形).

Fig. 5 Accumulation [(a), (b)] and compensation [(c), (d)] of manufacturing tolerances of the transmission spectra [(a), (c)] and the crosstalk [(b), (d)] where $\phi = n_c L$ (a), (b) $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}$ and $b = -100\text{nm}$ (dotted line and squares), $n_1 = b = 0$ (solid line and circles), $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}$ and $b = 100\text{nm}$ (dashed line and triangles); (c), (d) $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}$ and $b = 100\text{nm}$ (dotted line and squares), $n_1 = b = 0$ (solid line and circles), $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}$ and $b = -100\text{nm}$ (dashed line and triangles)

从图 5(a) 和 (b) 中可以看出,公差的累积增大了光谱漂移和串扰.从图 5(c) 和 (d) 中可以看出,公差的补偿减少了光谱漂移和串扰,与不考虑工艺公差($n_1 = b = 0$)的情况相比,传输光谱的移动和串扰的变化都非常小.

4 结论

基于上述对 33×33 硅基聚合物 AWG 波分复用器工艺公差的分析 and 讨论,可以得出下述结论.

在 AWG 器件的制作过程中,工艺公差的存在影响了的传输性能,引起了传输光谱的漂移和串扰的变化. 为了保证 AWG 器件具有正常的解复用功能,所能允许的工艺公差将被限制得很严格. 如当光谱漂移被控制在 -0.1nm ~ 0.1nm 范围内时,则工艺公差的允许范围为 -1.4×10^{-4} ~ 1.4×10^{-4} (当 $b = 0$ 时) 和 -100 ~ 100nm (当 $n_1 = 0$ 时).

公差的累积将会增大光谱漂移和串扰,相反地,公差的补偿将会减少光谱漂移和串扰. 因此在 AWG 器件的制作过程中,应尽量避免公差的累积,充分利用公差的补偿来改善器件的性能. 例如,当 $n_1 = -1.4 \times 10^{-4}$, $b = 100\text{nm}$, 或 $n_1 = 1.4 \times 10^{-4}$, $b = -100\text{nm}$ 时,与不考虑工艺公差 ($n_1 = b = 0$) 的情况相比,光谱漂移接近于零,串扰的变化也非常小.

参考文献

- [1] Uetsuka H. AWG technologies for dense WDM applications. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2004, 10 (2): 393
- [2] Jeong G, Kim D, Choi J, et al. Low-loss compact arrayed waveguide grating with spot-size converter fabrication by a shadow-mask etching technique. *ETRIJ*, 2005, 27(1): 89
- [3] Long W H, Li G B, Jia K M, et al. Design and fabrication of silica-based arrayed waveguide grating. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(9): 1798 (in Chinese) [龙文华,李光波,贾科森,等. 硅基二氧化硅阵列波导光栅的研究. *半导体学报*, 2005, 26(9): 1798]
- [4] Wei K, Liu X C, Cao Z Y, et al. A deep vertical SiO_2 etching technique for AWG fabrication. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(11): 1222 (in Chinese) [魏珂,刘训春,曹振亚,等. 运用于阵列波导光栅制作的厚 SiO_2 陡直刻蚀技术. *半导体学报*, 2003, 24(11): 1222]
- [5] An J M, Gao D S, Li J, et al. Numerical analysis for polarization compensation of silica on silicon AWG using SiON . *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(7): 858 [安俊明,郜定山,李健,等. SiON 对 Si 基 SiO_2 AWG 偏振补偿的数值分析. *半导体学报*, 2004, 25(7): 858]
- [6] Min Y H, Lee M H, Ju J J, et al. Polymeric arrayed-waveguide grating router using fluorinated polyethers operating around 1550 nm. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2001, 7(5): 806
- [7] Keil N, Yao H H, Zawadzki C. A thermal polarization-independent arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer using an all-polymer approach. *Appl Phys B-Lasers and Optics*, 2001, 73(5/6): 619
- [8] Lee J M, Ahn J T, Park S, et al. A thermalized polymeric arrayed-waveguide grating by partial detachment from a Si substrate. *ETRIJ*, 2004, 26(3): 281
- [9] Pitois C, Vukmirovic S, Hult A, et al. Low-loss passive waveguides based on photosensitive poly (pentafluorostyrene-glycidylmethacrylate). *Macromolecules*, 1999, 32 (9): 2903
- [10] Kuznetsov M, Froberg N M, Henion S R, et al. Dispersion-induced power penalty in fiber-Bragg-grating WDM filter cascades using optically preamplified and nonpreamplified receivers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, 12(10): 1406
- [11] Marcatili E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell System Tech J*, 1969, 48(7): 2071
- [12] Takahashi H, Oda K, Toba H, et al. Transmission characteristics of arrayed waveguide wavelength multiplexer. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(3): 447
- [13] Guo W B, Ma C S, Chen W Y, et al. Analysis of transmission characteristics of polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(6): 619 (in Chinese) [郭文滨,马春生,陈维友,等. 聚合物阵列波导光栅波分复用器传输特性分析. *半导体学报*, 2002, 23(6): 619]

Effect of Manufacturing Tolerances on Characteristics of Arrayed Waveguide Grating Multiplexers^{*}

Qin Zhengkun^{1,2}, Ma Chunsheng^{1,†}, Li Delu¹, Zhang Haiming¹, Zhang Daming¹, and Liu Shiyong¹

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

(2 Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract : The effects of manufacturing tolerances on transmission characteristics are analyzed for a 33 × 33 polymer arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer via transmission theory. Simulated results show that manufacturing tolerances result in a shift of the transmission spectrum and in the increase of the crosstalk compared with theoretical device. The accumulation and compensation of manufacturing tolerances are investigated. In order to realize the normal demultiplexing for a fabricated AWG device, some allowed manufacturing tolerances are discussed.

Key words : arrayed waveguide grating; multiplexer; manufacturing tolerance; transmission spectrum; crosstalk

EEACC : 1320

Article ID : 0253-4177(2006)05-0926-06

^{*}Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60576045)

[†]Corresponding author. Email: mcsheng@163.com.

Received 4 January 2006, revised manuscript received 16 February 2006