

氟化聚合物光谱响应平坦化阵列 波导光栅的优化设计和制备

秦政坤^{1,2}, 马春生²

(1. 吉林师范大学信息技术学院, 吉林四平 136000; 2. 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林长春 130012)

摘要: 本文基于阵列波导光栅(AWG)的传输理论,利用含氟聚合物(PFS-co-GMA)共聚物材料,对 17×17 信道光谱响应平坦化 AWG 波分复用器进行了参数优化.由于在聚合物阵列波导光栅器件的制备过程中,选用了反应离子刻蚀(RIE)工艺和蒸汽回溶技术,形成的梯形截面波导芯,使 AWG 传输的光产生相位移,导致传输光谱移动,引起串扰的变化.为此我们运用等效能流分析方法对矩形截面 AWG 器件的参数进一步修正,通过优化设计弥补了工艺的不足.实验测试结果表明:AWG 中心波长约为 1550.865 nm,3-dB 带宽约为 0.478 nm,中心波长插入损耗约为 10.5dB,串扰约为 -21.5dB.

关键词: 集成光学; 阵列波导光栅; 光谱漂移; 梯型截面; 等效能流; 串扰

中图分类号: TN252; TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0609-04

Optimum Design and Fabrication of a Fluoropolymer Arrayed Waveguide Grating with Flat Spectral Response

QIN Zheng-kun^{1,2}, MA Chun-sheng²

(1. College of Information Technology, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China;

2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: In terms of the transmission theory of the arrayed waveguide grating, by using Fluoropolymer(PFS-co-GMA), the parameter optimization is performed for a 17×17 AWG multiplexer. In the fabrication of the polymeric arrayed waveguide grating (AWG) device, the cores of the channels and the arrayed waveguides exhibit trapezoid cross-sections instead of originally designed rectangular ones after the reactive ion etching and the steam-redissolution, causes the phase shift of the light propagating in the AWG, results in the shift of the transmission spectrum, and bring about the variation of the crosstalk. In this paper, by employing the equivalent energy flow method, the AWG parameters have been fixed, and a polymer AWG multiplexer with flat have been designed and fabricated. Measured results show that the central wavelength is 1550.865nm, 3-dB bandwidth is about 0.478 nm, insertion loss is 10.5 dB, crosstalk is about -21.5dB.

Key words: integrated optics; arrayed waveguide grating; phase shift; trapezoid cross-sections; equivalent energy flow; crosstalk

1 引言

由于 AWG 波分复用器在光通讯密集波分复用 (DWDM) 领域的广泛应用,促使 AWG 波分复用器的研究在波分复用、解复用方面取得了很大进展.由于传统的光谱响应波形尖锐,对波长的精度要求很高,所以具有平坦光谱的 AWG 波分复用器成为了研究的一个热点,国内外的研究者利用不同聚合物已经设计和制作了很多光波导器件^[1~8].

AWG 器件的性能依赖于精确的结构设计和精细的制作工艺,即使一个 AWG 器件设计得非常精确,工艺本

身的不足仍然会影响 AWG 器件的性能,引起 AWG 中传输光的相位移,导致串扰的变化.所以,为保证设计的器件能在实际中应用,结构设计的优化与制作工艺特点的有机结合显得尤为重要.

2 优化设计

聚合物 PFS-co-GMA 光谱响应平坦化 AWG 波分复用器的结构示意图见图 1.由图可以看出,器件由两个聚焦平板波导,17 个输入信道,17 个输出信道和阵列波导光栅组成,阵列波导光栅共有 151 条矩形阵列波导.

我们选择的中心波长为 $\lambda_0 = 1550.918\text{nm}$, 为国际电信联盟推荐的标准波长. 为减少串绕, 波长间隔为 $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$, 相邻波导的间距为 $d = 15\mu\text{m}$. 根据实验室具体条件, 当给定波导芯层和包层的折射率分别为 $n_1 = 1.4975$ 和 $n_2 = 1.49$, 输入输出信道波导数为 17 和阵列波导数 151 时, 则对传统聚合物的阵列波导光栅复用器的参数进行优化设计. 令 $a = b$ 时, 由矩形波导 E_{pq}^y 导模的特征方程, 可以得出芯层厚度 b 与对应中心波长 λ_0 阵列波导的有效折射率 n_c 和平板波导的有效折射率 n_s 的关系曲线如图 2 所示.

由图 2 可以看出, a, b 在 $3.7 \sim 5.3\mu\text{m}$ 范围内取值时, 可实现矩形波导中 E_{00}^y 主模和平板波导中 TM_0 基模的单模传播. 选取光波导基准尺寸为 $a = b = 5\mu\text{m}$, 则相邻阵列波导间的长度差 ΔL 、平板波导焦距 f 就可以由下列关系式确定^[9].

$$\Delta L = \frac{m\lambda_0}{n_c}, f = \frac{n_c n_c d^2}{m n_g \Delta\lambda}, FSR = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g}, N_{\max} = \text{int}\left(\frac{FSR}{\Delta\lambda}\right) \quad (1)$$

式中 $n_g = n_c - \lambda dn_c/d\lambda$ 为阵列波导的群折射率.

为使上述 AWG 结构设计光谱响应平坦, 我们对 AWG 的结构参数进行了改进. 其基本原理就是: 把奇数阵列波导宽度缩短为 $a - \Delta a$, 偶数阵列波导宽度增加为 $a + \Delta a$, 即把阵列波导光栅分为两个下一级亚光栅. 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. 这

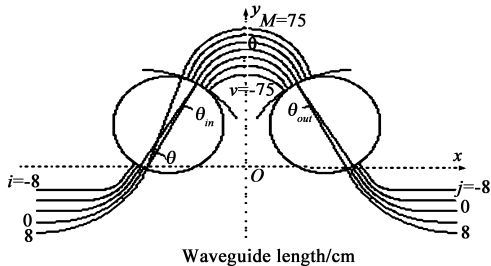


图1 AWG波分复用器的结构示意图

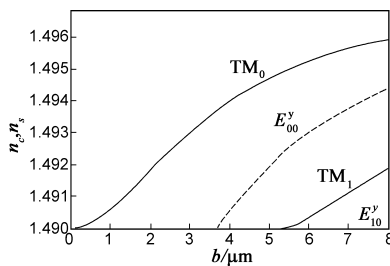


图2 波导芯厚度 b 与有效折射率 n_c, n_s 的关系曲线

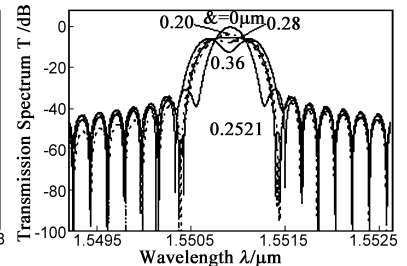


图3 长度差 δa 增量对波谱响应的影响

样, AWG 的衍射远场由这两个亚 AWG 衍射远场叠加而成. 适当地选择增量 Δa 的值, 可使改进型 AWG 的光谱响应平坦化, 形成箱形光谱响应. 利用光栅衍射理论, 可以得到 AWG 的归一化远场表达式为^[10]:

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

式中

$$E_0(\theta) = k_x^2 q_x \cos\theta \frac{q_x \cos(\frac{1}{2} k_s a \sin\theta) - k_s \sin\theta \sin(\frac{1}{2} k_s a \sin\theta)}{(k_x^2 - k_s^2 \sin^2\theta)(q_x^2 + k_s^2 \sin^2\theta)} \quad (3)$$

其中, θ 为衍射角, $\Delta\theta = (m n_g \Delta\lambda)/(n_c n_c d)$ 为相邻波导的角距离, $E_0(\theta)$ 为 $E_0(\theta_{\text{out}})$ 的包层能量. $a_v = a - \Delta a$, 其中 $v = 1, 3, 5, \dots$. $a_v = a + \Delta a$, 其中 $v = 2, 4, 6, \dots$. 图 2 给出了长度差 Δa 增量对波谱响应的影响.

从图 3 中可以看出, 当 $\Delta a = 0$ 时, 光谱响应为传统 AWG 器件光谱的高斯型; $\Delta a = 0.36$ 时, 光谱响应转化为典型的马鞍型; 而当 $\Delta a = 0.2421$ 时, 衍射峰叠加形成了理想的平坦化光谱^[11]. 利用光栅方程和式(1), 即可得到优化的光谱响应平坦化 AWG 器件的结构参数优化结果如表 1 所示.

表 1 光谱响应平坦化聚合物 AWG 的参数优化值

中心波长	$\lambda_0 = 1550.918\text{nm}$
波长间隔	$\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$
信道波导芯的宽度和厚度	$a = b = 5\mu\text{m}$
阵列波导的芯厚度	$b = 5\mu\text{m}$
奇数阵列波导的芯宽度	$a_1 = 5.2421\mu\text{m}$
偶数阵列波导的芯宽度	$a_2 = 4.7579\mu\text{m}$
相邻波导间距	$d = 1.5\mu\text{m}$
聚合物波导芯区的折射率	$n_1 = 1.4975$
聚合物波导包层的折射率	$n_2 = 1.49$
衍射级数	$m = 56$
相邻阵列波导的长度差	$\Delta L = 57.645\mu\text{m}$
平板波导焦距	$f = 7565.268\mu\text{m}$
自由光谱区	$FSR = 13.77\text{nm}$
输入/输出信道波导数	$2N + 1 = 17$
阵列波导数	$2M + 1 = 151$

3 参数的修正

在波导的工艺制备中, 经过 RIE 和蒸汽回溶后得到的波导截面一般都是梯形的^[12]. 使用高纯氧气作为刻蚀气体, 流量控制在 40SCCM 左右, 射频功率为 40W, 刻蚀时间为 40min. 选用四氢呋喃 (THF) 被用来作为蒸汽回溶实验的溶剂, 回溶温度为 68°C , 蒸汽回溶时间为 27 分钟, 得到的 AWG 的信道波导扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 4(a) 所示, 其横截面示意图如图 4(b) 所示. 其中 n_1, n_2 分别为梯形波导芯和四周包层的折射率, 并有 $n_1 > n_2$, b 为芯厚度, a_m, a_n 分别为梯形的下底和上底的宽度.

对梯形截面波导采用等效能流分析的思路是: 把芯厚度为 b 、下底和上底的宽度为 a_m, a_n 的梯形波导

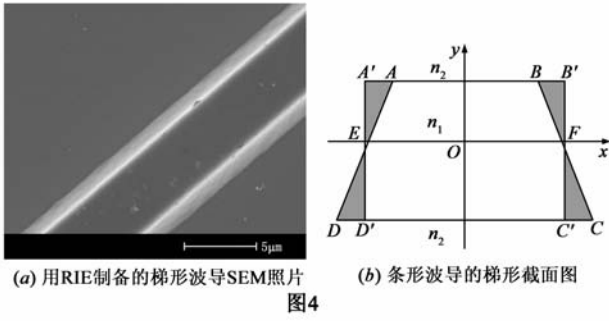


图4

ABCD 等效成矩形波导 A'B'C'D'。由图 4(b) 可以看出, 矩形 A'B'C'D' 四角的阴影部分构成了四个三角形 $\Delta AA'E$ 、 $\Delta BB'F$ 、 $\Delta CC'F$ 、 $\Delta DD'E$ 。从矩形波导 A'B'C'D' 中能流传输的角度看, 三角形 $\Delta AA'E$ 、 $\Delta BB'F$ 区域阻碍了能量的传输, 其能流的大小用 $2p^-$ 表示; 而三角形 $\Delta CC'F$ 、 $\Delta DD'E$ 有助于能量传输, 其能流的大小用 $2p^+$ 表示。其表达式可分别写为:

$$2p^- = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} \iint_{\Delta AA'E} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy - \frac{\beta}{\omega\mu_0} \iint_{\Delta BB'F} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy \quad (4)$$

$$2p^+ = +\frac{\beta}{\omega\mu_0} \iint_{\Delta DD'E} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy + \frac{\beta}{\omega\mu_0} \iint_{\Delta CC'F} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy \quad (5)$$

当 $2p^-$ 和 $2p^+$ 相加为零时, 我们就认为梯形截面的波导在能流传输性能上等效于该矩形波导, 此时矩形波导的芯宽度 a_e 称为等效芯宽度。因为图形的对称性, 可得确定 a_e 的条件可以写为:

$$\iint_{\Delta BB'F} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy = \iint_{\Delta CC'F} \phi_0(x, y) \phi_0^*(x, y) dx dy \quad (6)$$

式中 $\phi_0(x, y)$ 为矩形 A'B'C'D' 导模的场分布函数。可以依次改变等效波导芯宽度 a 而使条件式(6)成立, 运用数值的解法求得值, 即相当于波导的宽度由初始设计的 a 减少到 a_e 。波导宽度的变化, 使得条形波导的有效折射率产生变化, 因此对 AWG 器件进行重新设计是非常必要的。结合具体 RIE 工艺条件, 主要是利用式(1)对器件的参量相邻阵列波导的长度差、平板波导的焦距、和自由光谱区进行修正, 其修正值由表 2 给出。由其归一化衍射远场表达式(2), 可以得到 AWG 器件的 17

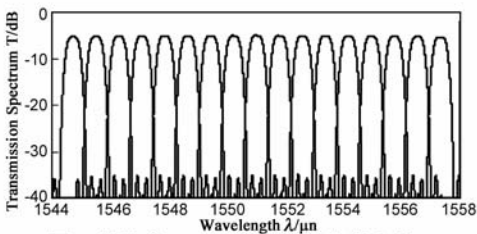


图5 设计的AWG的理论模拟传输光谱

条输出信道的解复用光谱如图 5 所示。

表 2 光谱响应平坦化聚合物 AWG 的参数修正值

相邻阵列波导的长度差	$\Delta L = 57.786 \mu\text{m}$
平板波导焦距	$f = 7524.652 \mu\text{m}$
自由光谱区	$FSR = 13.786 \text{nm}$

由图 5 可以看出理论模拟的结果, 每条信道的传输光谱均呈现平坦的箱型波谱响应, 3-dB 带宽约为 0.492nm, 插入损耗为 5dB, 串扰约为 -28dB。

4 样品制备与测试分析

由于本文中对 AWG 器件参量的优化是基于具体的实验条件, 在旋转涂覆、铝掩膜、光刻、反应离子刻蚀、蒸汽回溶等工艺过程中, 各个主要工艺环节都必须遵循测定的技术指标。否则会改变梯形截面结构, 影响器件精确设计的结果。各主要环节技术指标为: 下包层厚度为 $15 \mu\text{m}$; 芯层厚度为 $5 \mu\text{m}$; 铝膜厚度为 25nm; 薄型 BP-212 正性光刻胶膜厚为 $1.5 \mu\text{m}$, 光刻时间为 38s; 显影时间 28s, 使用高纯氧气作为刻蚀气体, 流量控制在 40SCCM 左右, 射频功率为 40W, 刻蚀时间为 40min。

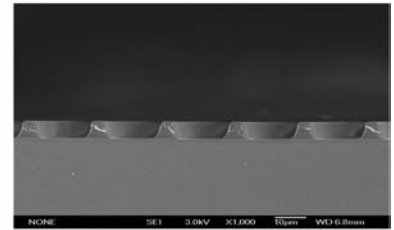


图6 回溶后AWG信道波导的扫描电镜(SEM)照片

选用四氢呋喃(THF)被用来作为蒸汽回溶实验的溶剂, 回溶温度为 68°C , 蒸汽回溶时间为 27 分钟, 然后去铝后旋涂上包层, 形成掩埋式波导结构的 AWG。经过蒸汽回溶后, 得到的阵列波导如图 6 所示。

首先, 利用截断法(cut-back method)对条形波导的传输损耗进行测试分析^[13]。将制作的直波导截成不同的长度, 经过抛光工艺处理后, 用单模光纤与输入波导紧密耦合, 得到的插入损耗值如图 7 所示。

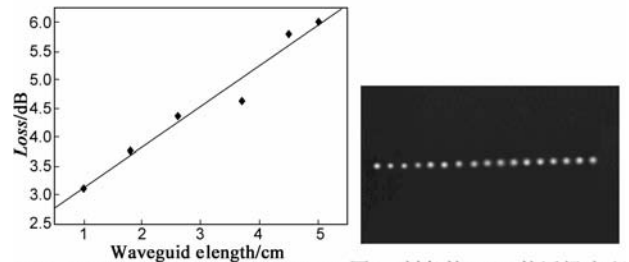


图7 FPE聚合物直波导的传输损耗 图8 制备的AWG的近场光斑

含氟聚合物 PFS-co-GMA, 以大量的 F 原子代替了传统聚合物中的 C 原子。C-F 键伸缩振动波长是 C-H 键的 2.8 倍, 使振动吸收向长波方向产生红移, 从而减少了近红外区的吸收衰减。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长附近具有较低的吸收峰, 其理论传输损耗小于 0.35dB/cm。从图 7 中可知, 光纤与输入/输出信道波导端面的耦合损耗为 2.7dB, 直波导的传输损耗为 0.45dB/cm, 与理论传输损

耗比较,工艺传输损耗仅为 0.1 dB/cm,结果比较理想.

接下来将对器件的整体性能进行测试分析.在上述工艺条件下,我们制备出了聚合物光谱响应平坦化的 AWG 器件,器件尺寸为 $2 \times 3 \text{ cm}^2$.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 8 所示.其实验测试光谱如图 9 所示.

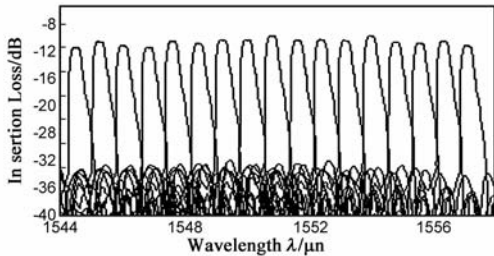


图9 AWG实验传输光谱

将图 5 与图 9 进行比较分析,可以明确看出出理论模拟与实验结果的差异.实验测试结果为:AWG 中心波长约为 1550.865 nm,3-dB 带宽约为 0.478 nm,中心波长插入损耗约为 10.5 dB,串扰约为 -21.5 dB.理论模拟结果中心波长约为 1550.918 nm,3-dB 带宽约为 0.492 nm,串扰约为 -28 dB.比较结果:中心波长漂移约为 0.045 nm,3-dB 带宽减少约为 0.014 nm,插入损耗的差距为 5~6 dB,串扰差距约为 -6.5 dB.

5 结论

AWG 的结构设计和制作工艺决定了器件的整体性能,本文结合具体的工艺过程,进一步利用等效能流分析方法进行了精确的设计,得到了比较理想的效果.样品器件的中心波长为 AWG 中心波长约为 1550.865 nm,光谱漂移为 0.053 nm.3-dB 带宽约为 0.478 nm,中心波长插入损耗约为 10.5 dB,串扰约为 -21.5 dB.与理论模拟分析结果比较,因为工艺精度不够,还存很多不足,如信道间隔(0.76~0.84 nm)不均匀,插入损耗和串扰较大等.下一步的研究工作是进一步改进工艺水平,减少公差,研制出性能更加优良的聚合物 AWG 器件.

参考文献

- [1] Amersfoort M R, de Boer C R, van Ham F P G, et al. Phased-array wavelength demultiplexer with flattened wavelength response [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(4): 300 - 302.
- [2] Okamoto K, Yamada H. Arrayed waveguide grating multiplexer with flat response [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(1): 43 - 45.
- [3] Amersfoort M R, Soole J B D, et al. Passband broadening of integrated arrayed waveguide filters using multimode interference couplers [J]. *Electron Lett*, 1996, 32(5): 449 - 451.
- [4] 武锦, 欧阳四华, 等. 一种新型波导基 C 波段空间功率合成器的设计与实现 [J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 1686 - 1689. Wu J, Ouyang S H, et al. Design and realization of a novel C-

band spatial power combiner in waveguide [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(8): 1686 - 1689. (in Chinese)

- [5] 杨虎, 姜永金, 等. 矩形波导宽边辐射纵缝的 MPSTD 算法分析 [J]. *电子学报*, 2008, 36(6): 1169 - 1173. Yang H, Jiang Y J, et al. MPSTD algorithm simulations of radiating longitudinal slot in the broad face of rectangular waveguide [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1169 - 1173. (in Chinese)
- [6] 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 - 1725.
- [7] 吴振华, 张开春, 刘盛纲. 折叠波导结构的 THz 振荡辐射源研究 [J]. *电子学报*, 2009, 37(12): 2677 - 2680. Wu Z H, Zhang K C, Liu S G. Research of THz folded waveguide oscillator radiation source [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(12): 2677 - 2680. (in Chinese)
- [8] Ma C S, Qin Z K, Zhang H M, et al. Arrayed waveguide grating multiplexer with boxlike spectral response [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, 48(5): 916 - 919.
- [9] Marcatili E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. *Bell System Tech*, 1969, 48(7): 2071 - 2102.
- [10] Guo W B, Ma C S, Zhang D M, et al. Parameter optimization and structural design of polymer arrayed waveguide grating multiplexer [J]. *Opt Commun*, 2002, 201(1-3): 45 - 53.
- [11] Ma C S, Zhang H M, Zhang D M, et al. Box-like spectral response of arrayed waveguide grating multiplexers [J]. *Opt Commun*, 2005, 249(1-3): 209 - 216.
- [12] Zhang H M, Ma C S, Qin Z K, et al. Reduction of sidewall roughness, insertion loss and crosstalk of polymer arrayed waveguide grating using vapor-redissolution technique [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(18): 7313 - 7317.
- [13] Zhang H M, Ma C S, Wang F, et al. 33×33 arrayed waveguide grating multiplexer using fluoropolymer PFS-co-GMA [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 47(5): 470 - 472.

作者简介



秦政坤 男, 1968 年生, 吉林师范大学信息技术学院教授, 微电子与固体电子学博士, 硕士生导师. 多年来一直从事导波光学和光波导器件的教学和研究工作. 曾参与和负责完成国家及省部级科研项目多项, 在国内外刊物上发表学术论文 50 余篇, 其中有 20 余篇被 SCI 和 EI 检索. E-mail: Qin_zhengkun@126.com

马春生 男, 1945 年生, 吉林大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 多年来一直从事集成光电子学和导波光学的理论和光电子器件的研究工作. 曾负责完成国家级和省部级科研项目多项, 曾两次获得国家教委和教育部科技进步奖, 已在国内外刊物上发表学术论文 130 余篇, 其中有 70 余篇被 SCI 检索.