

文章编号 1674-2915(2012)01-0071-06

650 nm 聚合物阵列波导光栅波分复用器设计

谭震宇, 张峰, 陈长鸣, 孙小强, 王菲*, 张大明

(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 长春 130012)

摘要:选择在可见光波段具有较低吸收损耗的聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸环氧丙酯[P(MMA-GMA)]共聚物作为波导包层材料,使用双酚A型环氧树脂作为折射率调节剂,根据材料的折射率设计了单模波导截面尺寸;然后,采用束传播法优化设计出16信道阵列波导光栅(AWG)器件的版图结构。利用Optiwave软件模拟了AWG器件的光传输特性,结果显示,器件的信道间隔为0.845 01 nm,插入损耗小于14 dB,串扰小于-25 dB。

关键词:聚合物;阵列波导光栅;波分复用器

中图分类号: TN252; TN915.05 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120501.0071

Design of wavelength division multiplexer of polymer arrayed waveguide grating at 650 nm

TAN Zhen-yu, ZHANG Feng, CHEN Chang-ming, SUN Xiao-qiang, WANG Fei*, ZHANG Da-ming

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

* *Corresponding author, E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn*

Abstract: By choosing Polymethyl Methacrylate-glycidyl Methacrylate [P(MMA-GMA)] with a low absorption loss at 650 nm as the cladding material of a waveguide, and taking the bisphenol A epoxy resin as the refractive index modifier, the cross section size of a single mode waveguide was designed according to the refractive index of the cladding and core material. Then the layout of a 16-channel Arrayed Waveguide Grating (AWG) was designed and optimized using beam propagation method. The Optiwave software was used to simulate the optical propagation characteristics of the AWG, and results show that the channel spacing is 0.845 01 nm, the device insertion loss is less than 14 dB, and the crosstalk is less than -25 dB.

Key words: polymer; Arrayed Waveguide Grating (AWG); wavelength division multiplexer

收稿日期: 2011-09-11; 修订日期: 2011-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61077041、60807029); 吉林省青年科研基金资助项目 (No. 20100174); 吉林大学基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 200810028、200905005) 和集成光电子学国家重点联合实验室开放课题 (IOSKL-KFKT-11) 联合资助项目

1 引言

在三网融合和光纤入户的推进过程中,工作在 650 nm 波段的塑料光纤传输系统是很有希望的解决方案之一。此外,在飞机、舰艇等短距离通信环境中,650 nm 的塑料光纤传输系统也有很强的竞争力。与石英光纤相比,塑料光纤有很多优点,如制造简单、价格低廉、接续方便和力学性能良好等^[1]。作为波分复用系统核心器件的 650 nm 聚合物阵列波导光栅(AWG)波分复用器,可实现光交叉互连、光分插复用等多项功能,由于具有集成度高的特点,易于实现多通道数、窄带间隔的波分复用。此外其低成本、高性能的优势,有利于实现规模生产。目前,该器件已成为通信领域的研究热点^[2-5],这些器件大多集中在 1 550 nm 红外波段^[6],有关红光波段的 4 信道、波长间隔为 1 nm 的聚合物 AWG 器件^[7]已于 2010 年见报。

本文定位于短距离塑料光纤通信这一新兴领域,基于塑料光纤系统常用的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料体系,对 650 nm AWG 的各个结构参数进行优化,设计出了 650 nm AWG 波分复用/解复用器结构,给出了 16 信道的 AWG 版图。

2 波导结构设计

2.1 材料性能表征

大多数聚合物材料在红光波段损耗极小,具有易于制作,便于集成,价格低廉等优点,极低损耗的红光波段单模波导已有报道^[8]。聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸环氧丙酯[P(MMA-GMA)]聚合物材料与塑料光纤兼容,对 650 nm 波段的光吸收小,成膜均匀性好。采用自主合成的 P(MMA-GMA)共聚物作为波导包层材料,以双酚 A 型环氧树脂作为高折射率调节剂,采用二者在共聚物中的不同配比来调节芯层材料和包层材料的折射率的相关工作也有报导^[9-10]。P(MMA-GMA)共聚物的化学结构式及其合成路线以及高折射率调整剂的化学结构式如图 1 所示。

由于 AWG 器件工作在高阶衍射状态,对材

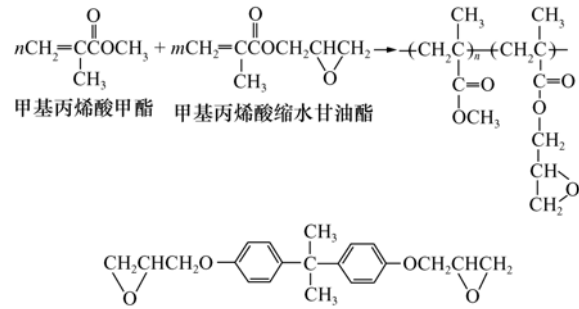


图 1 P(MMA-GMA)和折射率调节剂的化学结构式图
Fig. 1 Chemical structure diagram of P(MMA-GMA) and refractive index modifier

料的折射率非常敏感,因而材料折射率的精确测量将直接影响器件的性能,目前,多采用椭偏法对聚合物薄膜的折射率进行精确测量。图 2 为椭偏仪(J. A. Woollam Co. Inc., M-2000 UI)测得的芯层和包层聚合物材料折射率随波长变化的曲线,图中显示,在 650 nm 波长下,芯层材料折射率为 1.547,包层材料折射率为 1.530。

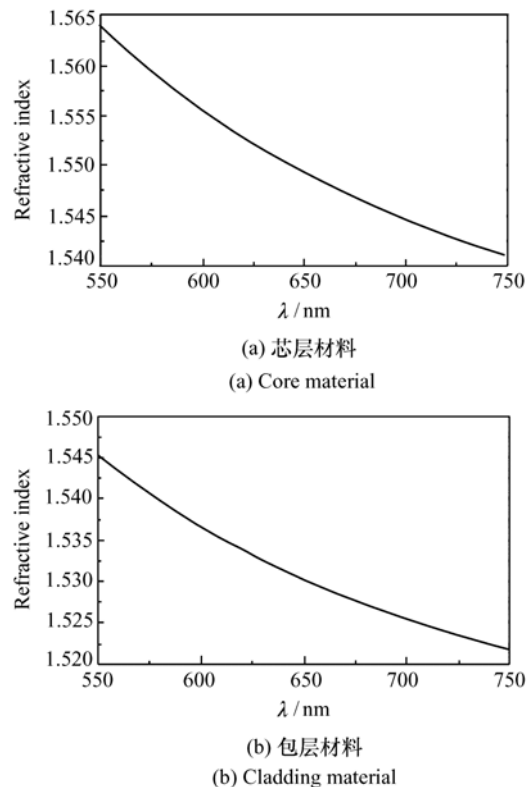


图 2 材料折射率随波长变化的曲线
Fig. 2 Dependence of wavelength on refractive index

2.2 波导尺寸设计

由于大部分光功率集中在波导芯中传输,此时电磁场的主要分量集中在波导的横截面上,采用马卡梯里近似法,在 650 nm 波长下,针对 P(MMA-GMA)材料体系对矩形波导进行求解。特征方程和传播常数为:

$$k_x a = m\pi + \arctan\left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3}\right)^{s_x} \frac{k'_{3x}}{k_x}\right] + \arctan\left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_5}\right)^{s_x} \frac{k'_{5x}}{k_x}\right], \quad (1)$$

$$k_y b = n\pi + \arctan\left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)^{s_y} \frac{k'_{4y}}{k_y}\right] + \arctan\left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_4}\right)^{s_y} \frac{k'_{4y}}{k_y}\right], \quad (2)$$

$$k^2 z = k_0^2 \varepsilon_1 - kx^2 - ky^2, \quad (3)$$

式中:对于 E_{mn}^y 导模, $s_x = 0, s_y = 1$; 对于 E_{mn}^x 导模, $s_x = 1, s_y = 0$ 。 $k'_{3x}, k'_{5x}, k'_{2y}, k'_{4y}$ 分别为:

$$k'_{3x}{}^2 = -k_{3x}^2 = k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) - k_x^2, \quad (4)$$

$$k'_{5x}{}^2 = -k_{5x}^2 = k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_5) - k_x^2, \quad (5)$$

$$k'_{2y}{}^2 = -k_{2y}^2 = k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - k_y^2, \quad (6)$$

$$k'_{4y}{}^2 = -k_{4y}^2 = k_0^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_4) - k_y^2. \quad (7)$$

取 $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$, $n_1 = 1.547$, $n_2 = n_3 = n_4 = n_5 = 1.53$, $a = b$, 得到波导尺寸与波导有效折射率 n_e 的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,为实现波导的单模传输,选取波导芯宽度和厚度 $a = b = 2 \mu\text{m}$ 。

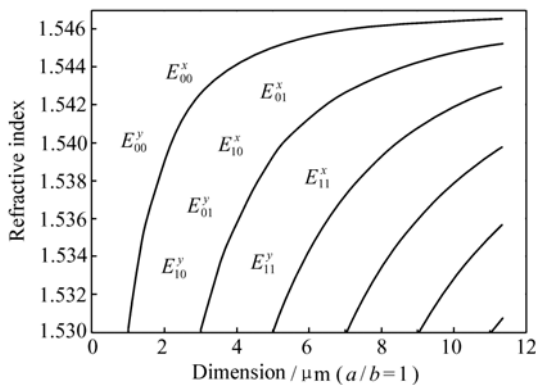


图 3 有效折射率与波导尺寸的关系

Fig. 3 Relation between rectangle waveguide dimension and effective refractive index

图 4 为波导结构示意图,利用光束传播法 (Beam Propagation Method, BPM) 对 650 nm 波长

下波导的传输光场进行仿真,得到如图 5 所示的光场分布,图中显示该波导结构可以对 650 nm 波长光实现单模传输,并且大部分光场能量被束缚在波导芯层中。

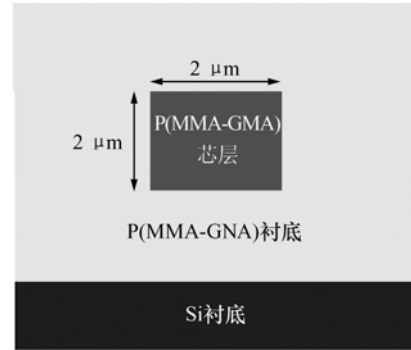


图 4 波导截面示意图

Fig. 4 Schematic of waveguide cross-section

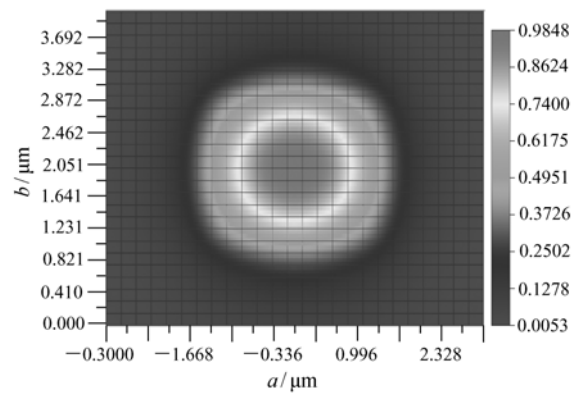


图 5 理论模拟的波导截面光场能量分布

Fig. 5 Simulated optical field energy distribution of waveguide profile

3 AWG 结构参数设计及优化

AWG 器件利用凹面光栅原理来实现对波长的解复用和复用,即分波和合波功能。AWG 解复用器的工作原理如图 6 所示:当含有多个波长的复信号光经中心输入信道波导输入,在输入平板波导内会发生衍射,到达输入凹面光栅上进行功率分配,并以同样的相位耦合进入阵列波导区。经阵列波导传输后,因相邻的阵列波导保持有相同的长度差 ΔL ,相邻阵列波导的某一波长的输出光就具有相同的相位差,不同波长的光此相位差

不同,因此可以设计合适的输出波导的位置,以便不同波长的光在输出平板波导中发生衍射并聚焦到不同的输出信道波导位置,经输出信道波导输出后完成了波长分配即解复用功能。这一过程的逆过程,即如果信号光反向输入,则完成复用功

能。AWG 波分复用器设计优化的参数有:波导芯的厚度 b 和宽度 a ,波导的有效折射率 n_c ,衍射级数 m ,相邻波导间距 d ,相邻阵列波导的长度差 ΔL ,平板波导的焦距 f ,自由光谱区(Free Spectrum Region, FSR)等。

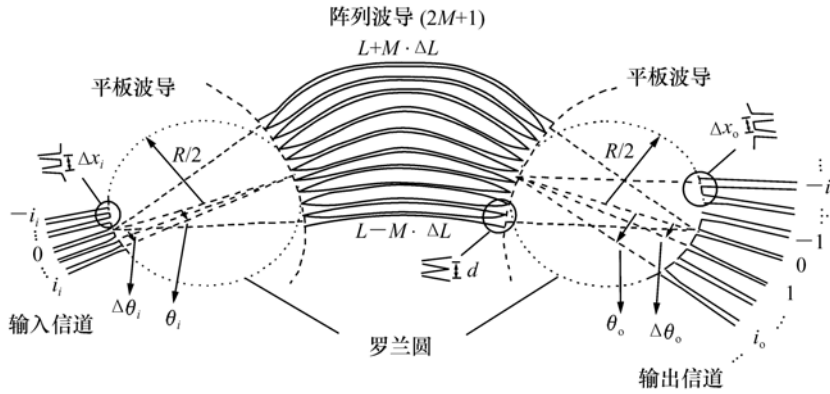


图6 AWG原理图

Fig. 6 Schematic diagram of AWG multiplexer

(1)首先完成 650 nm 波段单模波导结构参数的设计,选择 $a = b = 2 \mu\text{m}$ 。

(2)输入输出波导的个数选为 16,满足实际要求。

(3)信道间波长间隔参考 ITU-T(国际电信联盟)在红外通信波段规定的参考间隔 100 GHz 的倍数来选定,选为 600 GHz(0.845 nm)。

(4)衍射级数 m 与相邻阵列波导长度差 ΔL 、平板波导焦距 f 和自由光谱区 FSR 之间的关系如式(8)~(10)所示,相邻波导间距 d 越小,整体器件尺寸越小,但是当 d 接近波导宽度时,会使串扰增大。综合考虑,取 d 为 $12 \mu\text{m}$,由以下公式可得如图 7 所示曲线。

$$f = \frac{d}{\Delta\theta} = \frac{m_s n_c d^2}{m n_g \Delta\lambda}, \quad (8)$$

$$FSR = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g}, \quad (9)$$

$$\Delta L = \frac{m \lambda_0}{n_c}. \quad (10)$$

从图 7 可以看出,当衍射级数增大时,阵列波导长度差 ΔL 增大,而平板波导焦距 f 和衍射级数 FSR 则减小。 m 在选取时,应保证自由光谱区 FSR 大于 $N\Delta\lambda$,考虑到实际器件工作时存在光源波长漂移等因素,选 FSR 为 $(N+2)\Delta\lambda$ 左右。取

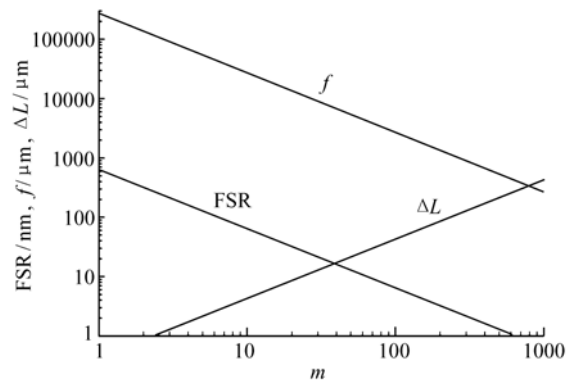


图7 衍射级数 m 与 FSR, f 和 ΔL 的关系

Fig. 7 Relations between the FSR, f , ΔL and m

FSR = 15.21 时,由输出平板波导衍射级数公式 $m = \text{integer}(\lambda_0/\text{FSR})^{[7]}$ 计算出 $m = 43$ 。此时相邻阵列波导长度差 $\Delta L = 18.047 \mu\text{m}$,平板波导焦距 $f = 6128.93 \mu\text{m}$ 。阵列波导越多,AWG 的远场衍射条纹就越窄越亮,背景光就越弱,衍射效率就越高,输出信道间的串扰就越小。所以在工艺条件允许的条件下,阵列波导线数 $2M+1$ 取值应尽可能大。但考虑到实际制作工艺的难度,选择阵列波导线数 $2M+1 = 71$ 。表 1 列出了 650 nm 波段聚合物 AWG 波分复用器的参数优化结果。

表 1 650 nm 聚合物 AWG 波分复用器的参数优化值

Table 1 Optimized parameters of polymer AWG wavelength division multiplexer at 650 nm

参数名称	参数值
中心波长 λ_0	650 nm
波长间隔 $\Delta\lambda$	0.845 nm
I/O 及阵列波导厚度 b	2 μm
I/O 及阵列波导宽度 a	2 μm
芯区折射率 n_1	1.547
包层折射率 n_2	1.530
阵列波导有效折射率 n_c	1.541
衍射级数 m	43
I/O 及阵列波导间距 d	12 μm
相邻阵列波导长 ΔL	18.047 μm
平板波导焦距 f	6 128.93 μm
自由光谱区 FSR	15.12 nm
I/O 通道波导数 N	16
阵列波导数 $2M + 1$	71

通过对 AWG 中输入/输出(I/O)波导和阵列波导的几何参数,如弯曲半径、波导长度和每条波导在版图中的坐标等进行具体的模拟计算,得到 AWG 的版图结构,如图 8 所示。

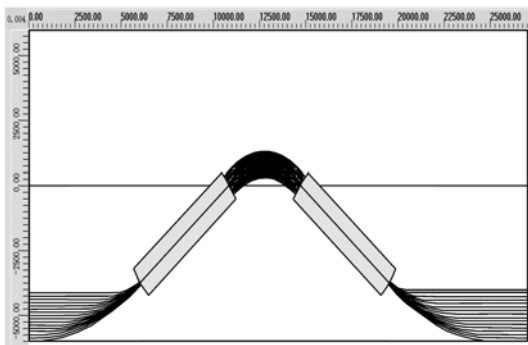


图 8 AWG 设计版图

Fig. 8 Schematic layout of designed AWG device

4 性能模拟

综合上述优化参数,利用 Optiwave (BPM-WDM) 软件对设计的 AWG 器件的光传输特性进行模拟,得到如图 9 所示的传输光谱。由模拟结果可以看出,器件的 16 个信道光传输性能良好,插入损耗小于 14 dB,串扰小于 -25 dB,信道间隔平均值为 0.845 01 nm/channel。

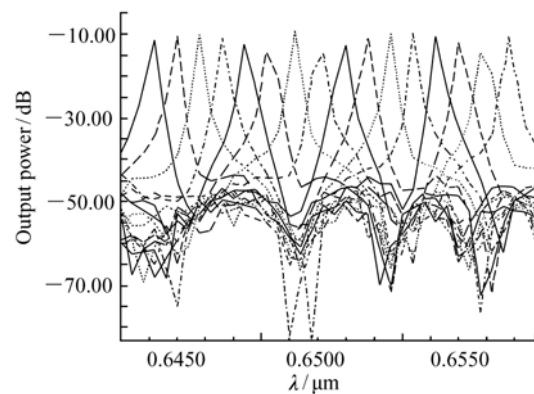


图 9 理论模拟的 AWG 传输光谱图

Fig. 9 Simulated transmission spectrum of AWG

5 结论

本文对中心波长为 650 nm 的 16 信道 AWG 器件进行了理论设计。选择自主合成的 P(MMA-GMA) 共聚物作为波导材料,使用双酚 A 型环氧树脂作为折射率调节剂,根据材料的折射率设计出单模波导截面尺寸,然后优化设计出 AWG 器件的结构参数并绘制了版图。模拟结果显示:器件插入损耗小于 14 dB,串扰小于 -25 dB,信道间隔平均值为 0.845 01 nm/channel。

参考文献:

- [1] HONG M, ALEX K Y J, LARRY R D. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices[J]. *Adv. Mater.*, 2002, 14(9): 1339-1365.
- [2] YASUMOTO M, SUZUKI T, TSUDA H, et al.. Fabrication of (Pb, La)(Zr, Ti)O₃ thin-film arrayed waveguide grating[J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(1): 24-25.
- [3] LIM J G, LEE S S, LEE K D. Polymeric arrayed waveguide grating using imprint method incorporating a flexible PDMS stamp[J]. *Opt. Commun.*, 2007, 272(1): 97-101.

- [4] HU G H, CUI Y P, YUN B F, *et al.*. A polymeric optical switch array based on arrayed waveguide grating structure[J]. *Opt. Commun.*, 2007, 279(1):79-82.
- [5] 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[J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(1):26-27.
- [6] BEN P C, SCHMID J H, DELÂGE A, *et al.*. A high-resolution silicon-on-insulator arrayed waveguide grating microspectrometer with sub-micrometer aperture waveguides[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(5):2299-2306.
- [7] JACK S K, DANIEL P P, PAVEL N, *et al.*. Design and fabrication of poly(dimethylsiloxane) arrayed waveguide grating[J]. *Opt. Express*, 2010, 21(18):21732-21742.
- [8] JACK S K, DANIEL P P, PAVEL N, *et al.*. Design and fabrication of poly(dimethylsiloxane) single-mode rib waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, 14(17):11739-11746.
- [9] WANG F, SUN W, LI A Z, *et al.*. Polymeric 32-channel arrayed waveguide grating multiplexer using fluorinated poly(ether ether ketone)[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2004, 2(10):568-570.
- [10] ZHAO Y, WANG F, LI A Z, *et al.*. Crosslinkable fluorinated poly(ether ether ketone) polymers for optical waveguide devices[J]. *Mate. Lett.*, 2004, 19(58):2365-2368.

作者简介:谭震宇(1986—),男,山西朔州人,学士,硕士研究生,主要从事聚合物阵列波导光栅器件方面的研究。

E-mail: zhenyutan@qq.com

张峰(1987—),男,河南南阳人,学士,硕士研究生,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: zhfzone@foxmail.com

陈长鸣(1981—),男,吉林长春人,博士,讲师,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: Chenchangming6@yahoo.com.cn

孙小强(1977—),男,吉林长春人,博士,讲师,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: sunxq@jlu.edu.cn

王菲(1978—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn

张大明(1970—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。

E-mail: zhangdm@jlu.edu.cn