

49 信道绝热低偏振相关全聚合物阵列波导光栅

李 浩 谷云龙 郑 洋 陈长鸣* 王希斌 衣云骥 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, 吉林省光通信用聚合物波导器件工程实验室,
吉林 长春 130012

摘要 研制了一种新型全聚合物 49 信道绝热低偏振相关阵列波导光栅(AWG)芯片。利用直接紫外光写入技术,实现了波导芯片的设计与制备。利用 Matlab 软件对 AWG 的传输特性进行了优化模拟,通过对聚合物衬底的热膨胀系数和聚合物波导的热光系数进行调控,得到了器件良好的绝热低偏振相关特性。测得 AWG 的中心波长为 1550.918 nm,波长间隔为 0.8 nm,插入损耗的信道变化范围是 5.51 dB~10.62 dB,串扰大于 20 dB,偏振漂移和温度变化分别是 0.08 nm 和 0.03 nm/K。这种新技术十分适用于高性能多功能集成光路中,具有广阔的应用前景。

关键词 集成光学;阵列波导光栅;紫外固化聚合物;绝热化光学器件;低偏振相关

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0423001

All-Polymer Athermal Low Polarization-Independent 49-Channel Arrayed Waveguide Grating

Li Hao Gu Yunlong Zheng Yang Chen Changming Wang Xibin Yi Yunji
Sun Xiaoqiang Wang Fei Zhang Daming

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,

Jilin Provincial Engineering Laboratory on Polymer Planar Lightwave Circuits, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract An athermal low polarization-independent 49-channel arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer relying on a ultraviolet (UV) curable all-polymer approach is designed and fabricated by simple direct ultraviolet photolithography process. The transmission properties of the AWG around the central wavelength of 1550.918 nm with the wavelength spacing of 0.8 nm are optimized by Matlab programming. By properly adjusting the positive coefficient of thermal expansion of the polymer substrate and the negative thermo-optic coefficient of the polymer waveguide, athermal and low polarization-independent characteristics of AWG device are realized. The actual fiber-fiber insertion loss at each channel is from 5.51 dB to 10.62 dB, and the crosstalk of the 49 channels is larger than 20 dB. Both polarization drifts and temperature shifts of the AWG are 0.08 nm and 0.03 nm/K, respectively. The new technique can be well suited for realizing optical integrated circuits with excellent performances.

Key words integrated optics; arrayed waveguide grating; ultraviolet curable polymer; athermal optical device; low polarization independence

OCIS codes 230.3120; 230.7380; 080.1238; 160.5335; 160.5470

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61107019,61077041,61107027)、教育部高等学校博士点专项科研基金(20110061120054)、中国博士后科学基金面上项目(2011M500597)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50277)、集成光电子学国家重点联合实验室自主研究课题(IOSKL2012ZZ06)、吉林省发改委高技术产业专项资金项目(JF2012G048)、吉林省科技发展计划项目(20130522151JH,20140519006JH)

作者简介: 李 浩(1981—),男,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: 25414758@qq.com

导师简介: 张大明(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光电子器件、有机光子器件及其集成技术等方面的研究。E-mail: zhangdm@mail.jlu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: chenm@jlu.edu.cn

1 引 言

近年来,光电子产业在互联网服务和数据通信的快速发展,促使密集型波分复用(DWDM)系统不断地升级提高^[1-2]。光通信、光互联的发展与完善是当今高速光信息业务的迫切需求,阵列波导光栅(AWG)作为其中重要功能器件越来越受到人们的关注^[3-6]。目前40信道,波长间隔为100 GHz的AWG模块,商业化产品性能正逐步提升^[7-8]。为保证芯片工作中的热稳定性,传统芯片上需加载一个可以升/降温的装置,这增加了功耗和额外的电路控制。为使芯片结构更加紧凑,设计上更加节能,无热化的全聚合物AWG已经成为研究热点^[9-11]。这项技术将适用于集成光网络的塑料光纤系统。

本文提出了一种绝热化低偏振相关的全聚合物49信道AWG芯片。波导、包层和衬底都选用聚合物材料。使用Matlab软件对AWG芯片的性能参数进行了优化。通过对聚合物衬底的热膨胀系数(CTE)和聚合物波导的热光系数进行匹配,得到了芯片良好的绝热低偏振相关特性。芯片的中心波长为1550.918 nm,信道间隔为0.8 nm。并给出了芯片的制备方法,分析了波导形貌。通过测试装置获得了芯片的波长的偏振漂移值和随温度的变化量,为功能集成化光波导芯片的研制奠定了基础。

2 模拟、实验与测试

在实验中,49信道聚合物AWG芯片选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为衬底,SU-8 2005为芯层材料,苯并环丁烯(BCB) 3022-35为包层材料。这些聚合物材料具有低双折射率、良好的热稳定性和低波长色散等优点^[12-15]。在1550 nm波长下,利用椭偏仪测得芯层折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 分别是1.571和1.560。有效折射率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 = 0.7\%$ 。

图1给出了基于有效折射率法^[16]中芯层厚度 b 和芯层波导有效折射率 n_c 和平板波导有效折射率 n_s 的关系。为了实现单模传输和偏振无关的波导结构,设计芯层截面为($a=b=4 \mu\text{m}$)矩形结构。根据AWG的衍射理论^[17],图2为器件输出平板区的 $P(\theta_{\text{out}})$ 功率曲线,其中包络曲线(虚线)为器件输入平板区的 $P_0(\theta)$ 功率曲线。

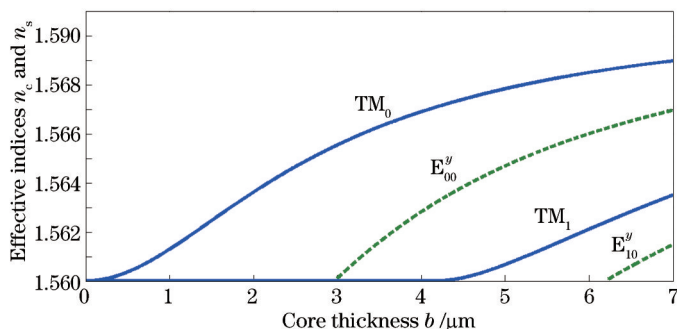


图1 芯层厚度 b 与芯层波导有效折射率 n_c (绿色虚线)和平板波导有效折射率 n_s (蓝色实线)的关系曲线($a=b$)

Fig.1 Relations between the core thickness b and the effective refractive indices n_c (green dashed lines) and n_s (blue solid lines) with $a=b$

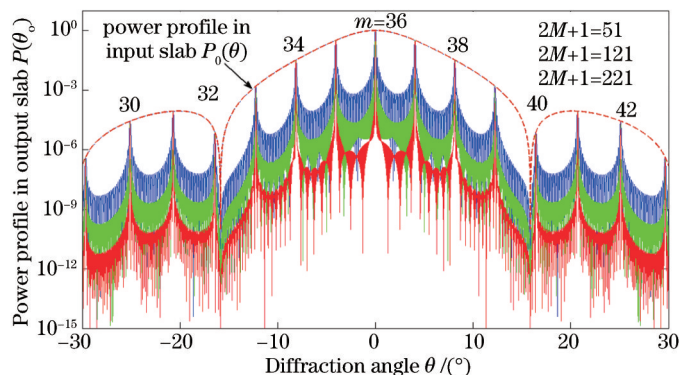


图2 当阵列波导数增加时,输出平板波导的功率变化曲线(虚线为中心信道的输入平板波导功率曲线,也为输出平板功率曲线的包络线)

Fig.2 Power profiles in output slab with increasing numbers of array waveguides, where the dashed lines are the power profiles of the central input channel in the input slab, and the envelope curves in the output slab

图中给出了阵列波导数目对器件衍射效率的影响。为了提高输入平板的衍射效率 η_i 和降低衍射损耗 L_i^{diff} ,将阵列波导与输入平板波导连接处优化设计为锥形波导结构。基于锥形波导宽度 ω_g 的参数变化对衍射效率和衍射损耗的影响,通过计算,分析了锥形波导口的宽度 ω_g ,当 $\omega_g=a=4.0\ \mu\text{m}$, η_i 的值仅是35%,衍射损耗高于5.21 dB。当 $\omega_g=d=14\ \mu\text{m}$, η_i 的值是99.5%,衍射损耗仅为 1.35×10^{-2} dB。表1为优化后的49×49全聚合物阵列波导光栅芯片的设计参数。图3是聚合物AWG芯片的示意图。

表1 聚合物49×49信道AWG芯片设计参数

Table 1 Design parameters of the polymeric 49×49 AWG devices

Parameter	Value
Number of channels	49
Central wavelength /nm	1550.918
Channel spacing /nm	0.8(100 GHz)
Core size / μm^2	4×4
Free spectral range /nm	42.836913
Diffraction order	36
Spacing of arrayed and input/output waveguides / μm	14
Path length difference / μm	35.725994
Number of arrayed waveguide	221

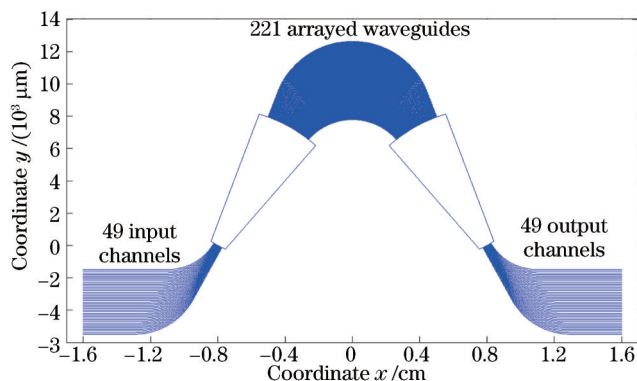


图3 AWG芯片的设计版图

Fig.3 Schematic layout of the designed AWG chip

芯片的制备过程如图4所示,将苯并环丁烯(BCB)材料旋涂在PMMA基片上,在150℃下经过2 h固化形成下包层。将4 μm厚的SU-8 2005旋涂在BCB包层上形成波导层。样片前65℃烘10 min和90℃烘20 min,

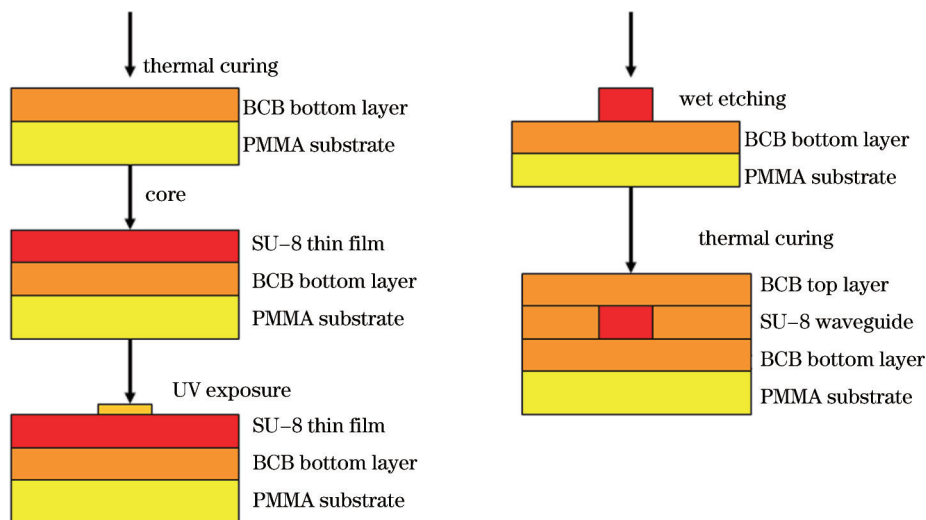


图4 以BCB为包层,SU-8为波导结构的制备过程

Fig.4 Fabrication process for the SU-8 polymeric waveguide structure with polymeric BCB cladding

去除芯层材料中的溶剂,之后通过光刻版紫外光刻 30 s,接着再 65 °C 烘 10 min 和 90 °C 烘 10 min,使光照区实现紫外交联,在 PGMEA(propyleneglycol-monomethylether-acetate)显影液中除胶 40 s 后,先后通过异丙醇与去离子水冲洗,形成波导。并在 150 °C 下坚膜 30 min 提高芯、包层之间的附着力,之后旋涂 BCB 上包层固化后形成器件。图 5 显示了芯径为 4 μm×4 μm 的波导端面扫描电镜(SEM)照片,从图中可以看到波导侧壁光滑陡直,形貌良好,波导尺寸得到了很好的控制。

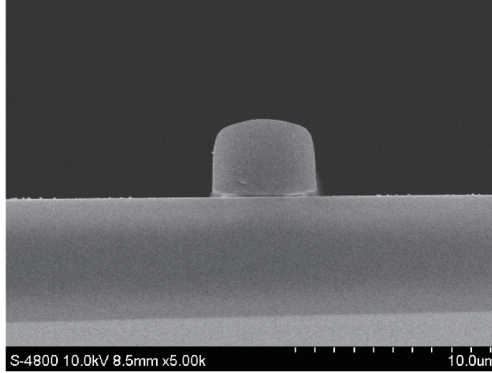


图 5 波导端面照片

Fig.5 Cross-sectional view of a waveguide

利用截断法,在 1550 nm 波长下,测得 4 μm 宽的直波导传输损耗为 1.51 dB/cm。图 6(a)和(b)分别为芯片的测试照片和解复用光信号输出图像。来自于宽带掺铒光纤放大器(EDFA)的信号光通过单模光纤(SMF)耦合进 AWG 的中心信道,输出解复用光信号模场由 CCD 摄像机接收。将输出光信号耦合进入光功率计,得到芯片各信道插入损耗范围在 5.51 dB~10.6 dB。信道间平均串扰大于 20 dB。实测信道波长间隔为 0.811 nm。

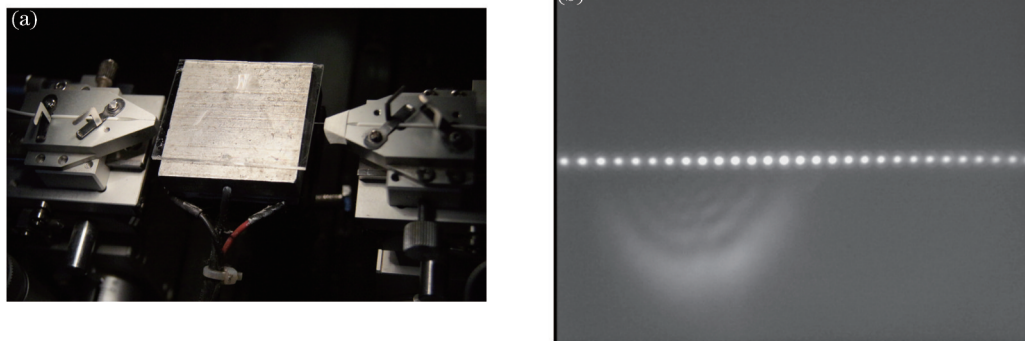


图 6 芯片测试图。(a)全聚合物 49 信道 AWG 芯片实物测试图;(b)AWG 芯片的输出信号光斑(输入信号光来自掺铒光纤放大器)

Fig.6 Photograph of the measuring chip. (a) Schematic photograph of the proposed all-polymer 49-channel AWG chip measured; (b) near-field guided-mode patterns of the AWG chip (signal light from a wide-band EDFA)

分析了波导芯径尺寸变化对波长漂移量 $\Delta\lambda_0$ 的影响关系曲线如图 7(a)所示,芯片的信号波长传输谱模式偏移量 $\Delta\lambda_0$ (在模式 E_{pq}^x 和 E_{pq}^y 之间)如图 7(b)所示,图 7(c)为模式偏移量的局部放大图。当波导宽高比趋近于 1 时,波长漂移量 $\Delta\lambda_0$ 和模式双折射偏移量 B 值最小,可表示为

$$\lambda_{0,TE} = \frac{n(E_{pq}^x)\Delta L}{m}, \lambda_{0,TM} = \frac{n(E_{pq}^y)\Delta L}{m}, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{0,E_{pq}^x \leftrightarrow E_{pq}^y} = \left| \lambda_{E_{pq}^x} - \lambda_{E_{pq}^y} \right| = \frac{\Delta L}{m} \left| n_{E_{pq}^x} - n_{E_{pq}^y} \right| = \frac{\Delta L}{m} B, \quad (2)$$

$$B = n_c(E_{pq}^x) - n_c(E_{pq}^y), \quad (3)$$

$$T(\lambda) = 10 \lg P(\lambda). \quad (4)$$

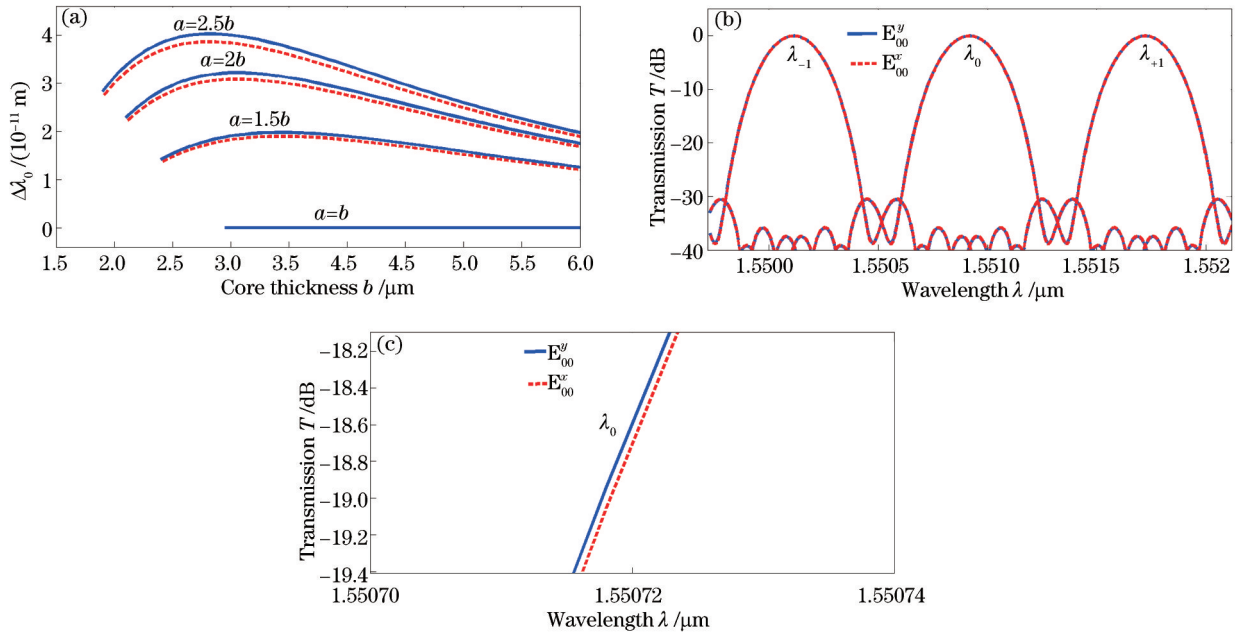


图7 模式低偏振相关性分析。(a)波导芯径尺寸变化对波长漂移量 $\Delta\lambda_0$ 和模式双折射偏移量 B 的影响;(b)信号波长传输谱模式偏移量 $\Delta\lambda_0$ 模拟(在模式 E_{pq}^x 和 E_{pq}^y 之间);(c)传输谱模式偏移量 $\Delta\lambda_0$ 的局部放大图

Fig.7 Analysis of guide-mode low polarization dependence. (a) Calculated the wavelength shift $\Delta\lambda_0$ and model birefringence B from waveguide core size; (b) spectral wavelength shift $\Delta\lambda_0$ between E_{pq}^x and E_{pq}^y modes from the AWG chip; (c) local enlarged view of spectral wavelength shift $\Delta\lambda_0$

AWG 芯片的中心波长热控制方程可以表示为

$$\frac{d\lambda_0}{dT} = \left(\frac{dn_c}{dT} + n_c \alpha_{\text{sub}} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{n_c} \right), \quad (5)$$

式中 λ_0 是中心波长, n_c 为波导的有效折射率差, α_{sub} 为聚合物基片的热膨胀系数, $d\lambda_0/dT$ 是热膨胀系数 α_{sub} 的一个线性函数^[18]。基片材料热膨胀系数的值满足

$$n_c \alpha_{\text{sub}} = -\frac{dn_c}{dT}. \quad (6)$$

聚合物波导的热光系数为负值, 聚合物衬底的热膨胀系数 α_{sub} 为正值, 实测紫外固化聚合物波导的热光系数是 $-1.87 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。图8(a)中给出了20℃到65℃的关系曲线, 发现衬底的热膨胀系数(CTE)在 $(1.1555 \sim 1.1615) \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 区间内可实现无热条件。如图8(b)中, 中心波长漂移量对应的温度衬底热膨胀系数在 $1.155 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 附近。可以发现热膨胀系数是 $1.1585 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 温度在20℃~65℃范围变化, 中心波长漂移量在 $-0.002 \sim 0.003 \text{ nm}$ 之间。从中可以发现, 选用的PMMA衬底的热膨胀系数是 $1.158 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 芯片可以满足芯片的无热条件^[19]。

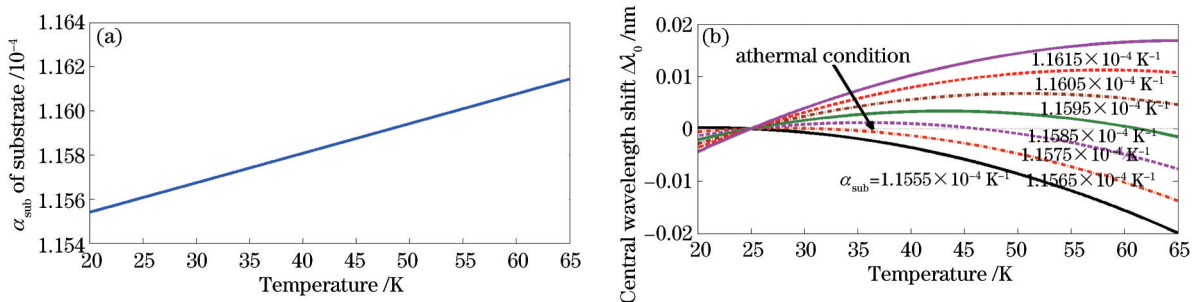


图8 热敏特性分析。(a)在不同温度下, 实现绝热条件的衬底热膨胀系数变化曲线;(b)在不同衬底热膨胀系数下, 中心波长漂移量随温度变化曲线

Fig.8 Analysis of heat-sensitive characteristic. (a) Required CTE of substrate for athermallization at different temperatures; (b) central wavelength shift versus temperature with different substrate TECs

利用可调谐激光器和光谱仪,测试了实际芯片的光谱传输特性。图9(a)显示了全聚合物49信道AWG的传输谱线及横电模(TE mode)与横磁模(TM mode)的偏振漂移量。测试得到器件的串扰大于20 dB,中心信道插入损耗为5.51 dB,偏振漂移量小于0.08 nm。从中可以发现全聚合物AWG表现出了很好的偏振不灵敏特性。图9(b)给出了在16 °C~65 °C的温度范围内,波长随温度的漂移特性。PMMA基底上的聚合物AWG的热漂移率仅有-0.03 nm/K。可以看出器件很好地实现了绝热低偏振相关功能。

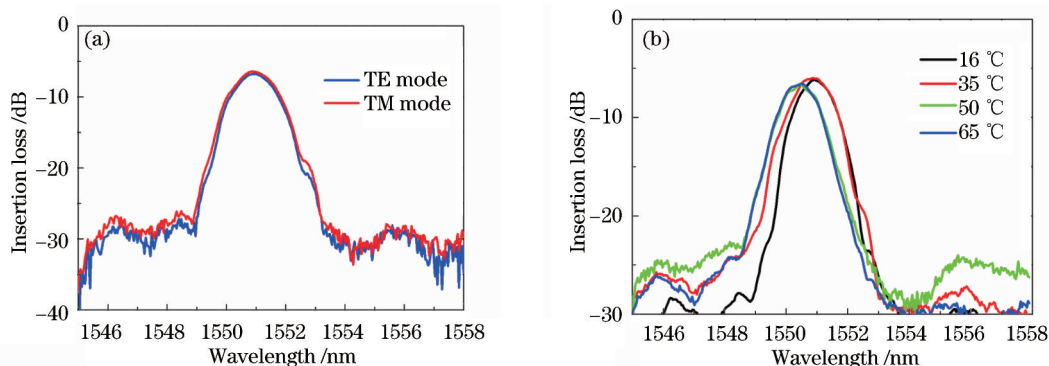


图9 芯片低偏振相关与绝热特性测试。(a)全聚合物100 GHz AWG芯片TE与TM模式的中心波长偏振漂移量测试曲线;(b)在16 °C~65 °C的温度变化范围内,全聚合物AWG芯片中心波长温度漂移量测试曲线

Fig.9 Low polarization dependent and athermal characteristics of the chip measured. (a) TE/TM polarization shift of an all-polymer AWG (100 GHz) chip; (b) measured temperature shift of the center port (channel 25) of polymer-based AWGs (100 GHz) in the temperature range from 16 °C to 65 °C

3 结 论

成功研制了新型的紫外写入全聚合物49×49信道AWG芯片,芯片具有插入损耗低、串扰小和偏振无关等良好的光学性能。通过匹配聚合物衬底的热膨胀系数(正值)和聚合物波导热光系数(负值),实现了绝热低偏振相关型的全聚合物AWG芯片。芯片每个信道的插入损耗变化范围是5.51 dB~10.62 dB,串扰大于20 dB,波长的模式漂移量和温度漂移量分别是0.08 nm和0.03 nm/K。这种新的技术非常适合在搭建高性能的光集成网络中应用,在光通信领域有很好的应用前景,在生物传感方面也有好的应用环境。

参 考 文 献

- 1 Cheng-Mu Tsai, Hidenori Taga, Cheng-Hao Yang, *et al.*. Demonstration of a ROADM using cyclic AWGs [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2011, 29(18): 2780-2784.
- 2 Jang-Uk Shin, Young-Tak Han, Sang-Pil Han, *et al.*. Reconfigurable optical add-drop multiplexer using a polymer integrated photonic lightwave circuit [J]. ETRI, 2009, 31(6): 770-777.
- 3 Zhou Yumeng, Qiu Kun, Xu Bo, *et al.*. Path design of Clos network based on device constraint in large capacity optical switches [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806003.
周宇萌, 邱 昆, 许 渤, 等. 超大容量光交换机中器件约束的Clos网络路径设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806003.
- 4 Toru Segawa, Shinji Matsuo, Takaaki Kakitsuka, *et al.*. All-optical wavelength-routing switch with monolithically integrated filter-free tunable wavelength converters and an AWG [J]. Opt Express, 2010, 18(5): 4340-4346.
- 5 Lang Tingting, Lin Xufeng, He Jianjun. Fabrication of silica-on-silicon arrayed waveguide gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0213003.
郎婷婷, 林旭峰, 何建军. 硅基二氧化硅阵列波导光栅制作工艺的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0213003.
- 6 Zhao Jianyi, Chen Xin, Qian Kun, *et al.*. Design and fabrication of 16 channel 200 GHz InP based arrayed waveguide gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0605002.
赵建宜, 陈 鑫, 钱 坤, 等. InP基16通道200 GHz的设计和制备[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0605002.
- 7 M Weidong, L Wen, W Wang, *et al.*. A novel athermal 40-channel DWDM multi/demultiplexer based on the combination of AWGs and interleaver [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19: 1115-1117.
- 8 B Yang, Y Zhu, Y Jiao, *et al.*. Compact arrayed waveguide grating devices based on small SU-8 strip waveguides [J]. J Lightwave

- Technol, 2011, 29(13): 2009–20141.
- 9 M M Milosevic, N G Emerson, F Y Gardes, *et al.*. Athermal waveguides for optical communication wavelengths [J]. Opt Lett, 2011, 36(23): 4659–4661.
- 10 F Qiu, F Yu, A M Spring, *et al.*. A thermal silicon nitride ring resonator by photobleaching of disperse red 1-doped poly(methyl methacrylate) polymer [J]. Opt Lett, 2012, 37(19): 4086–4088.
- 11 L Wang, W Bogaerts, P Dumon, *et al.*. Athermal arrayed waveguide gratings in silicon-on-insulator by overlaying a polymer cladding on narrowed arrayed waveguides [J]. Appl Opt, 2012, 51(9): 1251–1256.
- 12 A Kocabas, A Aydinli. Polymeric waveguide Bragg grating filter using soft lithography [J]. Opt Express, 2006, 14(22): 10228–10232.
- 13 I Adam, M H Ibrahim, N M Kassim, *et al.*. Design of arrayed waveguide grating (AWG) for DWDM/CWDM applications based on BCB polymer [J]. ElektriKa, 2008, 10(2): 18–21.
- 14 You Jingjing, Wang Ming, Rong Hua, *et al.*. Fiber Fabry-Perot accelerometer based on SU-8 photoresist [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806002.
- 尤晶晶, 王 鸣, 戎 华, 等. 基于SU-8光刻胶光纤法布里-珀罗加速度传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806002.
- 15 Wang Lei, Li Ran, Niu Xiaoyan, *et al.*. Research and fabrication of ultraviolet curable polymeric arrayed waveguide grating with nonlinear cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0805002.
- 王 雷, 李 然, 牛小艳, 等. 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0805002.
- 16 C S Ma, H M Zhang, D M Zhang, *et al.*. Effects of trapezoid core cross-sections on transmission characteristics of polymer arrayed waveguide grating multiplexers [J]. Opt Commun, 2004, 241(4–6): 321–331.
- 17 C S Ma, X Y Wang, H M Zhang, *et al.*. An efficient technique for analyzing transmission characteristics of arrayed waveguide grating multiplexers [J]. Opt Quant Electron, 2004, 36(8): 759–771.
- 18 S H Nam, J W Kang, J J Kim. Temperature-insensitive flexible polymer wavelength filter fabricated on polymer substrates [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(23): 233504.
- 19 J S Kee, D P Poenar, P Neuzil, *et al.*. Design and fabrication of poly(dimethylsiloxane) arrayed waveguide grating [J]. Opt Express, 2010, 18(21): 21732–21742.

栏目编辑: 王晓琰