

# 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制

王雷 李然 牛小艳 王菲 孙小强 陈长鸣\* 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** 利用自主合成的非线性有机-无机复合材料作为包层, 紫外光敏型 SU-8 负胶为芯层, 通过直接光写入技术成功研制了双有源包层结构聚合物  $41 \times 41$  信道阵列波导光栅(AWG)器件。器件在设计中采用矩形的波导结构。经计算, 当包层厚度为  $5 \mu\text{m}$ , 芯径尺寸为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$  时, 可实现单模传输。器件波长间隔定为  $0.8 \text{ nm}$ , 中心波长为  $1550 \text{ nm}$ 。经测试, 该器件传输损耗为  $1.2 \text{ dB/cm}$ , 中心信道衍射损耗为  $6.2 \text{ dB}$ , 实测波长间隔为  $0.793 \text{ nm}$ , 器件的温度漂移量为  $-0.08 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

**关键词** 光通信; 光学器件; 阵列波导光栅; 平面光波回路; 聚合物波导

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0805002

## Research and Fabrication of a Ultraviolet Curable Polymeric Arrayed Waveguide Grating with Nonlinear Cladding

Wang Lei Li Ran Niu Xiaoyan Wang Fei Sun Xiaoqiang  
Chen Changming Zhang Daming

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

**Abstract** A compact  $41 \times 41$  arrayed waveguide grating (AWG) device with double active layers is fabricated by using SU-8 minus negative core whose type is ultraviolet (UV) light-sensitive type and organic-inorganic hybrid material cladding. A rectangular waveguide structure is selected in the calculation of AWG and the single mode can be achieved with cladding thickness of  $5 \mu\text{m}$  and the core cross sectional area of  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ . For the AWG device, the channel space is set as  $0.8 \text{ nm}$  with the central wavelength of  $1550 \text{ nm}$ . After testing, the transmission loss is  $1.2 \text{ dB/cm}$ , the diffraction loss of the central channel is  $6.2 \text{ dB}$ , the tested channel space is  $0.793 \text{ nm}$  and the central wavelength shift is  $-0.08 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ .

**Key words** optical communications; optical devices; arrayed waveguide grating; planer lightwave circuit; polymer waveguide

**OCIS codes** 060.1155; 0601810; 060.3735; 070.6020

## 1 引言

随着人类社会的信息化, 全球通信业务飞速增长, 高速大容量的宽带综合业务网已成为现代通信网络发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。密集波分复用技术

(DWDM)<sup>[2-4]</sup>可以实现大容量、高速传输等功能, 满足了光纤通信对数据传输的需求<sup>[5]</sup>, 成为光纤通信领域的研究热点和首选技术。而基于平面光波回路(PLC)技术<sup>[6]</sup>的阵列波导光栅(AWG)以低插入

**收稿日期**: 2013-01-28; **收到修改稿日期**: 2013-03-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(61107019, 61077041, 61177027)、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)、吉林省科技发展计划项目(20110315)、吉林省青年科学基金(20100174)、吉林大学大学生创新创业训练计划项目(2012A51136, 2012B51124)

**作者简介**: 王雷(1989-), 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: ray.wangcn@hotmail.com

**导师简介**: 王菲(1978-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事聚合物光子学材料与器件方面的研究。

E-mail: wang\_fei@jlu.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: chencm@jlu.edu.cn

损耗、高稳定性、易于大规模制作、潜在的低制造成本和易于与有源器件集成等优点<sup>[7-10]</sup>,成为构建 DWDM 系统的核心器件之一,是近年来光纤通信技术的一个重要研究领域<sup>[11]</sup>。与无机材料相比,有机聚合物材料具有优良的光学特性、简单的制备工艺<sup>[12-14]</sup>、优良的衬底兼容性等特点,并且通过控制材料的组分比可以调节其折射率<sup>[15]</sup>,通过分子设计可优化材料特性<sup>[16]</sup>,因而有机聚合物材料成为了光子器件领域中很好的功能材料,成为近几年的研究热点<sup>[17]</sup>。而非线性有机无机复合材料具有有机物和无机物的双重优点,既有良好的化学稳定性,又有优良的光学性能<sup>[18]</sup>。

本文介绍了利用自主合成的有机-无机复合材料为包层及 SU-8 光刻胶为芯层制备而成的矩形波导 AWG 器件。所制备的器件传输损耗为 1.2 dB/cm,中心信道衍射损耗为 6.2 dB,实测波长间隔为 0.793 nm。可以很好地实现器件波分复用

与解复用特性。目前这项新技术适用于制备大面积有源集成 PLC。

## 2 材料的选择

包层材料选择实验室中利用溶胶-凝胶技术自主合成的有机-无机复合材料,其分子结构如图 1 所示,该材料拥有坚固的 SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 网络结构,在分子结构上限制了生色团,从而提高了材料的化学稳定性<sup>[19]</sup>。通过控制材料的组分比及 Ti 含量可以调节其折射率,实现对光场很好的限制,通过分子设计可优化材料特性,同时可有效地防止芯、包之间的材料互溶。此材料结合了无机玻璃和有机聚合物的双重优点,具有优良的衬底兼容性、成膜性和可加工性,制备工艺简单灵活。另外,它还有很好的电光特性。图 1(a) 给出了 DR-19 以及 KH560 的单体分子结构,及分散橙(ASD)的合成过程,图 1(b) 给出了水解 ASD 后得到的该非线性复合材料的分子结构。

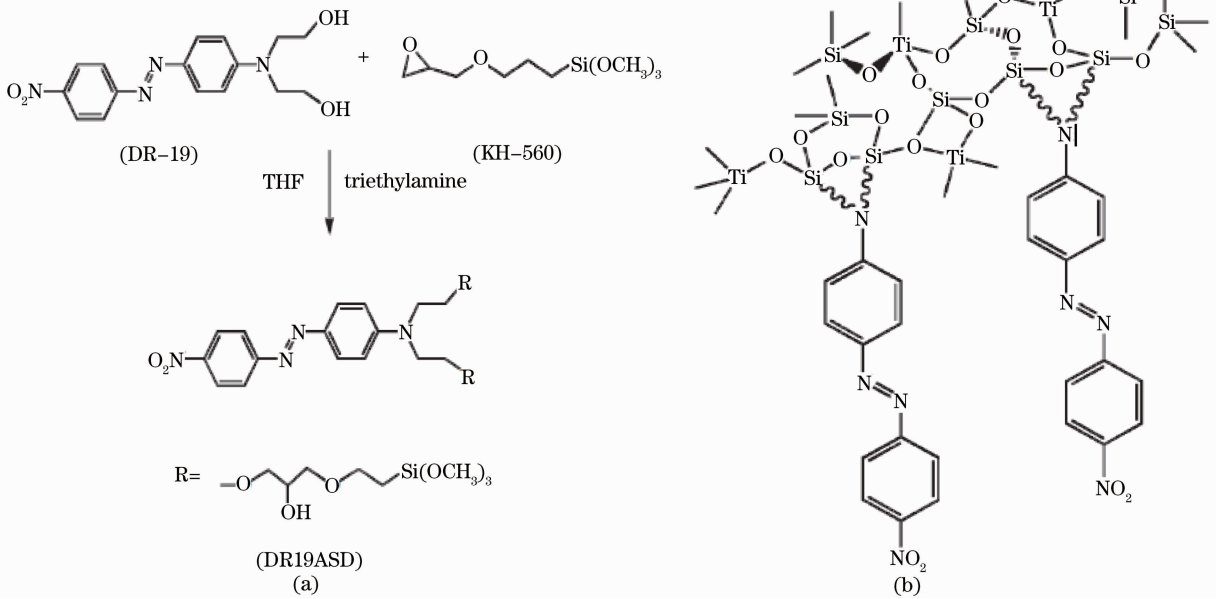


图 1 (a) ASD 合成过程; (b) 非线性有机-无机复合材料分子结构

Fig. 1 (a) Chemical synthesis process of ASD; (b) molecular structure of nonlinear hybrid material

芯层材料选择 SU-8。SU-8 光刻胶工艺简单,具有良好的光学性能、化学稳定性和热稳定性,并且具有超强的自平整能力。SU-8 光刻胶层曝光均匀,所得到的波导具有垂直侧壁和高深宽比<sup>[20]</sup>。

## 3 波导结构设计

由于 SU-8 工艺简单,光学性能良好,采用矩形波导可以对光信号进行很好的限制。有机-无机复

合材料成膜性良好,刚性较大,耐磨损耐腐蚀,是良好的包层材料。在中心波长 1550 nm 处,SU-8 芯层折射率为 1.571,复合材料包层折射率为 1.560。经计算,有效折射率为 1.564,当矩形波导的宽高均为 4 μm 时,可实现单模传输<sup>[21]</sup>。

利用 OptiBPM 软件对 SU-8 加载复合材料薄膜波导结构进行模拟仿真,得到如图 2 所示波导传输光场图,由于中心波长 1550nm 处复合材料层折射

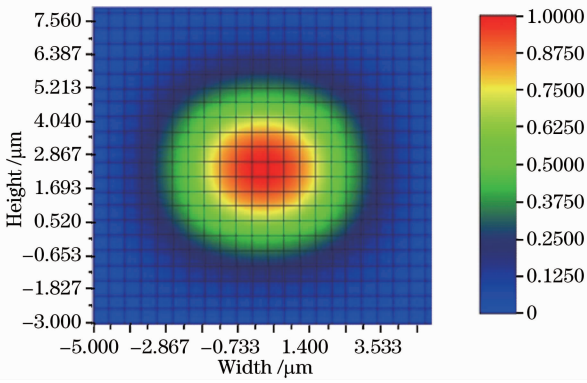


图 2 波导传输光场图

Fig. 2 Transmission optical field distribution in waveguide

表 1 AWG 结构参数

Table 1 AWG structure parameters

Central wavelength $\lambda_0$ /nm	1550.918
Channel space $\Delta\lambda$ /nm	0.8
Waveguide thickness $b$ / $\mu\text{m}$	4
Waveguide width $a$ / $\mu\text{m}$	4
Effective index $n_{\text{eff}}$	1.564
Diffraction order $m$	45
Separation between adjacent waveguide $d$ / $\mu\text{m}$	14
Length increment / $\mu\text{m}$	44.657293
Slab waveguide focal length $f$ / $\mu\text{m}$	8482.517469
Free spectral range (FSR) / $\mu\text{m}$	34.269401
Number of input/output waveguides	41
Number of arrayed waveguides	201

率(1.560)小于 SU-8 折射率(1.571),光场强度主要集中于 SU-8 材料层中,可以对光信号实现较好的限制。

为兼顾弯曲损耗和器件尺寸,选取 AWG 器件的弯曲半径在 3350~4450  $\mu\text{m}$  范围内。AWG 的具体结构参数如表 1 所示。

#### 4 AWG 器件的制备

制备器件的工艺流程(如图 3 所示)为:清洗硅片表面;旋涂有机-无机复合材料下包层,并在 100  $^{\circ}\text{C}$  下固化 1 h;对复合材料表面进行反应离子刻蚀(RIE)(这是由于复合材料刚性较强并且表面十分光滑,因此,如果直接旋涂 SU-8 光刻胶会使芯层附着力很小,很可能造成波导漂移,而 RIE 既不会减少下包层厚度,又能增大表面粗糙度,可有效防止波导漂移);旋涂 SU-8 芯层,60  $^{\circ}\text{C}$  下烘 10 min,90  $^{\circ}\text{C}$  下烘 20 min;光刻,65  $^{\circ}\text{C}$  下烘 10 min,95  $^{\circ}\text{C}$  烘 20 min;显影,120  $^{\circ}\text{C}$  后烘 30 min;旋涂复合上包层,100  $^{\circ}\text{C}$  下固化 1 h。

图 4 为器件制备完成之后波导端面 4500 倍扫描电子显微镜(SEM)下的照片。由图 4 可以看出,波导 SU-8 芯层与复合材料包层之间界面清晰可见,无互溶的现象,波导形貌良好。图 5 为 AWG 器件制备完成的实物照片。

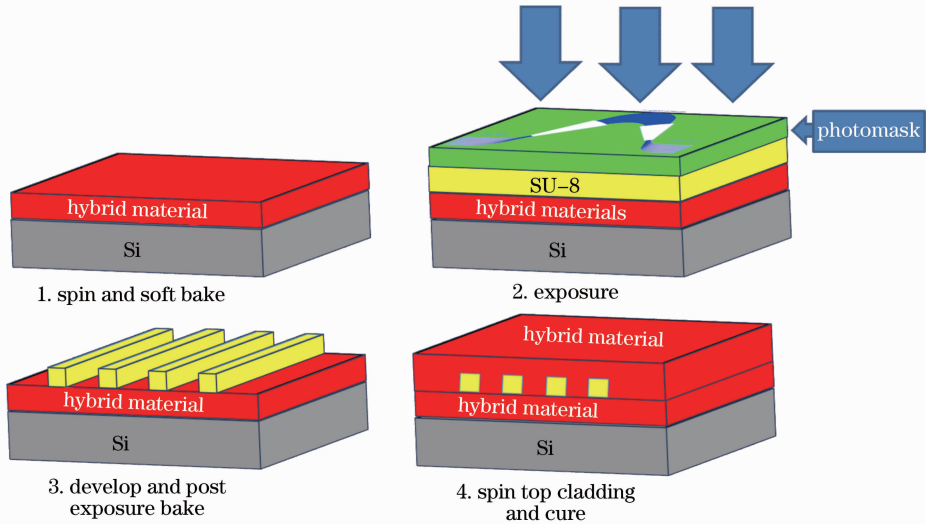


图 3 制备器件工艺流程简图

Fig. 3 Process flow diagram of preparing device

#### 5 器件测试结果

对制备完成的 AWG 器件输入输出端口用划片机进行切割解理,图 6 为 1550 nm 波段可调谐激光器在输入波长为 1550 nm,输入光功率为 1.0 mW 时

AWG 器件中心信道的近场输出光斑,器件插入损耗为 15 dB。图 7 为放大自发辐射(ASE)光源的输入光耦合入 AWG 后的近场输出光斑。

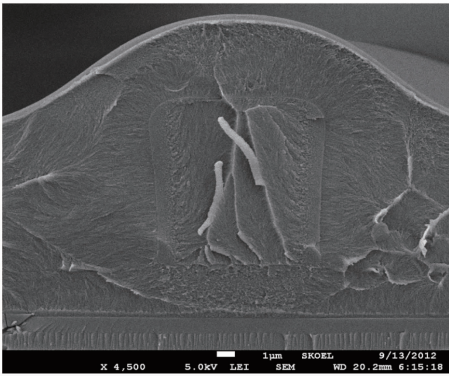


图 4 波导截面 SEM 照片(×4500)

Fig. 4 SEM photograph of waveguide cross section (×4500)

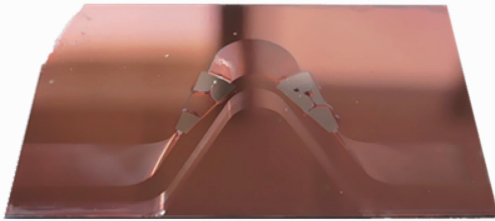


图 5 AWG 器件实物图

Fig. 5 Actual device of AWG

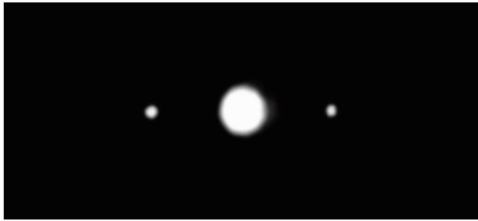


图 6 中心信道输出光信号

Fig. 6 Output optical signal of central channel



图 7 ASE 光源下的 AWG 输出波分光信号

Fig. 7 Output wavelength division optical signal of AWG by ASE light source

将输出信道光导入光谱仪,测得如图 8 所示输出光谱。利用恒温仪,测得 AWG 器件在不同温度下的中心波长,可得到器件的温度特性曲线图,如图 9 所示。

经测试(如图 8 所示),器件的插入损耗为 15 dB~20 dB;串扰为 20 dB;利用截断法,测得器件传输损耗为 1.2 dB/cm;光纤与器件的耦合损耗为 6 dB;器件中心波长为 1548.01 nm;中心信道衍

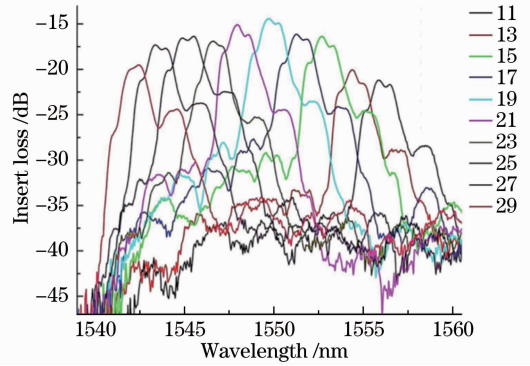


图 8 AWG 器件输出光谱图

Fig. 8 Output spectra of AWG device

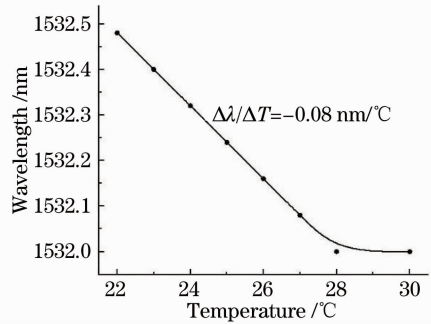


图 9 AWG 器件温度特性曲线

Fig. 9 Temperature property curve of AWG device

射损耗为 6.2 dB;实测波长间隔为 0.793 nm。测试时通过对器件端面进行抛光处理,以及使用单模拉锥光纤来减小器件的耦合损耗。中心波长及波长间隔与设计参数稍有偏差,原因可能来源于实验所采用的有机无机复合材料与 SU-8 在实际工艺影响下使其折射率产生一定偏移。由图 9 测得 AWG 器件的中心波长温度漂移量为  $-0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,相比于硅基 AWG 器件,温度稳定性较好。

## 6 结 论

利用实验室自主合成的有机无机复合材料以及 SU-8 光刻胶制备了 Si 基 100 GHz 矩形波导 AWG 器件。经测试,器件相邻信道串扰小于  $-10 \text{ dB}$ ,同时测试了器件的温度特性,结果显示在  $22^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$  温度范围内,AWG 中心波长变化量为 0.48 nm,器件中心波长随温度漂移量为  $-0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。另外,由于器件包层复合材料有良好的电光特性,为 AWG 集成器件的后续研究打下了良好的基础。目前正通过加入条形电极结构实现双层电光调制,探索 AWG 的波长选择开关功能。所研制的新型芯片可广泛地应用于通信、传感、军事等多方面领域,具备很大的研发潜力与市场应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Fei. The Research on Polymer/Si Arrayed Waveguide Grating Multiplexer[D]. Changchun: Jilin University, 2005. 8-12.  
王 菲. 硅基聚合物阵列波导光栅波分复用器的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2005. 8-12.
- 2 Jia Jiang, C L Callender, C. Blanchetière, *et al.*. Arrayed waveguide gratings based on perfluorocyclobutane polymers for CWDM applications [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(2): 370-372.
- 3 Yu Kuanglu, Wu Chongqing, Guo Xuan, *et al.*. A novel multi-point fiber optics acetylene sensing system based on dense wavelength division multiplexers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506003.  
余凯球, 吴重庆, 郭 旋, 等. 基于波分复用的多点光纤乙炔传感系统[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506003.
- 4 Cai Yanmin, Wang Xin'ge, Zhao Ling, *et al.*. Principle of birefringence crystal type interleaver applied in DWDM fiber system[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(11): 1017-1020.  
蔡燕民, 王昕歌, 赵 岭, 等. 用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析[J]. *中国激光*, 2001, 28(11): 1017-1020.
- 5 K Shakibaei, S Golmohammadi, K Abbasian. Optical DWDM filters using optical multilayer structures [C]. *International Conference of Photonics*, 2010. 1-5.
- 6 I Molina-Fernández, J G Wangüemert-Pérez, A Ortega-Moñux, *et al.*. Planar lightwave circuit six-port technique for optical measurements and characterizations[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(6): 2148-2157.
- 7 D M Zhang, C M Chen, H M Zhang, *et al.*. 41-channel arrayed waveguide grating multiplexer using UV curable polymer operating around 1550 nm[C]. *Information, Communications & Signal Processing*, 2007 6th International Conference, 2007. 1-4.
- 8 Zhu Daqing, Lu Dongsheng, Xu Zhen'e. Impact of phase error on crosstalk of AWGs[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(7): 639-642.  
朱大庆, 陆冬生, 许振鄂. 相位误差对阵列波导光栅传输特性的影响[J]. *中国激光*, 2002, 29(7): 639-642.
- 9 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.
- 10 Bo Yang, Yunpeng Zhu, Yuqing Jiao, *et al.*. Compact arrayed waveguide grating devices based on small SU-8 strip waveguides [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(13): 2009-2014.
- 11 Zhang Xiaolin. The Study of Box-Like Spectral Response of Polymer AWG[D]. Changchun: Jilin University, 2006. 1-3.  
张晓琳. 波谱平坦型聚合物 AWG 器件的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006. 1-3.
- 12 L Eldada, S Member, L W Shacklette, *et al.*. Advances in polymer integrated optics [J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2000, 6(1): 54-68.
- 13 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis and optimization of organic polymer asymmetric bent waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0213002.  
高 原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称弯波导分析与优化[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0213002.
- 14 Yue Yuanbin, Wang Xibin, Sun Jian, *et al.*. Application of ultraviolet photo-resist in polymeric quasi-rectangle electro-optical waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1225001.  
岳远斌, 王希斌, 孙 健, 等. 紫外胶在聚合物准矩形电光波导中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1225001.
- 15 Li Feng, Chen Sihai, Lai Jianjun, *et al.*. Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0310003.  
李 风, 陈四海, 赖建军, 等. 自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0310003.
- 16 Wang Hui, Zhang Feng, Liu Tianji, *et al.*. Embedded waveguide thermo-optic switch based on novel organic-inorganic hybrid material [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1303-1306.  
王 辉, 张 峰, 刘天际, 等. 有机/无机复合功能材料倒脊型波导热光开关[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1303-1306.
- 17 H Mah, A K Y Jen, L R Dalton. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices[J]. *Adv Mater*, 2002, 14(19): 1339-1365.
- 18 S Shibata, T Yano, H Segawa. Organic-inorganic hybrid materials for photonic applications [J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2008, 14(5): 1361-1369.
- 19 Changming Chen, Xiaoqiang Sun, Fei Wang, *et al.*. Electro-optic modulator based on novel organic-inorganic hybrid nonlinear optical materials[J]. *J Quantum Electron*, 2012, 48(1): 61-66.
- 20 Li Feng, Chen Sihai, Luo Huan, *et al.*. Finite-difference time-domain simulation of polymer self-written waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1023002.  
李 风, 陈四海, 罗 欢, 等. 聚合物自写入光波导的时域有限差分模拟[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1023002.
- 21 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Optical Waveguide Mode Theory [M]. Changchun: Jilin University Press, 2006. 384-395.  
马春生, 刘式塘. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006. 384-395.

栏目编辑: 王晓球