

紫外胶在聚合物准矩形电光波导中的应用

岳远斌 王希斌 孙 健 张 琨 孙小强* 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大学实验区, 吉林 长春 130012)

摘要 基于聚合物材料的波导型电光器件对提升光通信网络的带宽容量具有重要的意义。设计并制备了一种基于有机/无机杂化非线性材料的准矩形聚合物电光波导,采用 SiO₂ 作为下包层,紫外胶 SU-8 作为引导芯层,掺有生色团 DR1 的有机/无机杂化非线性材料 DR1/SiO₂-TiO₂ 作为电光层,通过优化感应耦合等离子体刻蚀工艺的天线功率、偏置功率和氧气流量,将 SU-8 同时作为引导芯层和刻蚀工艺的掩模,制备了准矩形电光波导。实验测得波导传输损耗为 -3.5 dB/cm。

关键词 非线性光学;准矩形波导;感应耦合等离子体刻蚀;SU-8

中图分类号 TN405.98⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1225001

Application of Ultraviolet Photo-Resist in Polymeric Quasi-Rectangle Electro-Optical Waveguide

Yue Yuanbin Wang Xibin Sun Jian Zhang Kun Sun Xiaoqiang Zhang Daming

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

Abstract The polymer waveguide electro-optic (EO) devices play a key role in improving the optical network bandwidth and capacity. A quasi-rectangle EO waveguide based on organic/inorganic hybrid material (OIHM) is designed and fabricated. SiO₂ is adopted as the lower cladding. The ultraviolet photo-resist SU-8 is used as the guiding core. The chromophore of dispersed red 1 (DR1) doped OIHM is used as the EO active layer. Through optimizing the parameters including antenna power, biasing power and O₂ flow rate of inductively coupled plasma (ICP) etching, SU-8 can be applied as the guide core and etching mask at the same time. By the traditional semiconductor processes, the quasi-rectangle EO waveguide device is successfully fabricated. Under this condition, the transmission loss is -3.5 dB/cm.

Key words nonlinear optics; quasi-rectangle waveguide; inductively coupled plasma etching; SU-8

OCIS codes 190.4360; 250.5460; 230.2090

1 引 言

有机/无机杂化材料(OIHM)兼具有机材料与无机材料的优点,在波导型光器件中具有折射率可调、光热稳定性好的特点。利用溶胶-凝胶法合成的有机/无机杂化电光材料,经电晕极化后电光系数

(γ_{33})高于 20 pm/V,时间稳定性较好,且在 SiO₂ 基底上具有良好的成膜性^[1]。溶胶-凝胶法合成的有机/无机杂化电光材料存在的问题是薄膜厚度较小(小于 1 μm),无法直接用于制备满足单模传输条件的电光波导^[2]。此外,利用这种材料单独作为波导

收稿日期: 2012-06-13; **收到修改稿日期**: 2012-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61077041,6117027,61107019)、吉林省科技发展计划(20110315)、吉林省青年科研基金(20100174)、吉林大学基本科研业务费专项(201100253,201103071)、中国博士后基金(2011M500597,2012M510900)和集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(IOSKL-KFKT-11)资助课题。

作者简介: 岳远斌(1988—),男,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: yyb0712@163.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@jlu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: sunxq@jlu.edu.cn

的芯层,插入损耗较高,无法满足器件要求^[3]。为了解决这一问题,设计了一种以紫外胶 SU-8 为引导芯层,有机/无机杂化电光材料为芯层的加载条形波导结构^[3]。

经过测量,杂化电光材料的折射率 $n=1.626(\lambda=1550\text{ nm})$,引导芯层 SU-8 的折射率 $n=1.572(\lambda=1550\text{ nm})$,由于加载条形波导结构对光场模式限制较弱,易出现较明显的平板现象,因此平板形电光层的存在会引起光场能量的泄漏。为解决上述问题,针对有机/无机杂化电光材料膜厚比较薄的特点,本文提出利用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术对引导芯层两侧的电光层进行刻蚀,制备了一种准矩形电光波导。这种准矩形结构能更好地将光场限制在电光层中,避免平板现象的发生,同时减小光纤-端面的耦合损耗。ICP 刻蚀中,采用 O_2 、 SF_6 、 CF_4 作为反应气体,以 1:6:17 的体积比混合,在 0.5 Pa 的腔室压强和射频功率下对电光材料进行刻蚀^[4]。利用 SU-8 同时作为引导芯层和刻蚀工艺的掩模,制备准矩形光波导,成功地解决了刻蚀掩模的问题^[5]。

本文详细介绍了 DR1/SiO₂-TiO₂ 有机/无机杂化电光材料的制备方法及其薄膜特性表征;利用 Rsoft 光学软件对准矩形波导进行了理论模拟及优化;通过紫外光刻、电晕极化、ICP 刻蚀等工艺制备了准矩形电光波导,并对波导的光损耗进行了测试。

2 材料配制和表征

所采用的有机/无机杂化电光材料是利用溶胶-凝胶法合成的硅基杂化材料。以正硅酸乙酯(TEOS)为 Si 源,钛酸四丁酯(TBOT)为 Ti 源,二者共同作为反应的前驱物。由于 TEOS 和 TBOT 反应活性相差很大,为了得到稳定均一的溶胶体系,需控制 TBOT 的水解速率。实验中,利用乙醇作为共溶剂,通过控制混合溶液中乙醇的比例,控制凝胶的反应时间,同时利用浓盐酸作为负性催化剂来抑制水解速率^[6],提供反应所需要的水。由于温度对溶胶-凝胶反应有重要影响,温度越高凝胶的反应时间越短,因此经反复实验摸索,选择反应温度为 20 °C^[7]。

具体的杂化材料合成步骤为:首先按 DR1, TEOS, TBOT, C₂H₅OH, HCl 物质的量比 0.04:1:0.8:18:5.6 向锥形瓶中依次加入 DR1、TEOS、TBOT、C₂H₅OH 及 36% 浓盐酸;然后将锥形瓶放在温控磁力搅拌器上在 20 °C 下均匀搅拌 20 min,制得溶胶溶液,经过 0.22 μm 的有机滤膜过滤,以 1500 r/min 的转速在 SiO₂ 衬底上旋涂成膜,样品在烘箱中 80 °C 下

固化 2 h。在这个过程中溶剂以及反应生成的水和醇会从薄膜中挥发,生色团极性分子被束缚在 SiO₂ 三维网格中^[8]。

利用椭偏仪对电光薄膜折射率随波长的变化进行表征,如图 1 所示。薄膜厚度约为 0.5 μm,折射率约为 1.626($\lambda=1550\text{ nm}$),简单反射法测得电光系数为 20.5 pm/V^[8]。

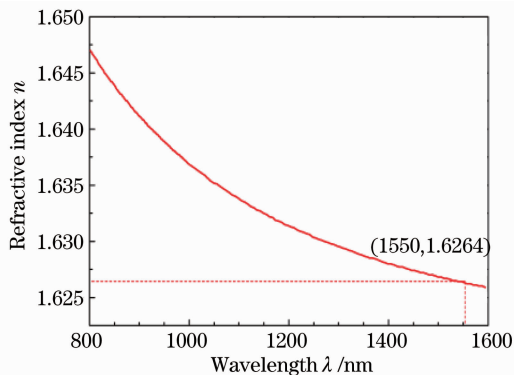


图 1 杂化材料折射率随波长的变化

Fig. 1 Refractive index of the OIHM versus optical wavelength

3 理论模拟分析

为分析波导结构对传输光场的影响,利用 Rsoft 软件对加载条形和准矩形波导内的光场分布进行了模拟分析。两种结构均采用 SiO₂ 作为下包层,紫外胶 SU-8 作为引导芯层,高度 4 μm,折射率 $n=1.572(\lambda=1550\text{ nm})$,杂化电光材料的折射率 $n=1.626(\lambda=1550\text{ nm})$,以自主合成的聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸环氧丙酯[P(MMA-GMA)]作为包层材料(在 1550 nm $n=1.483$)^[9]。波导结构分别如图 2 和图 3 所示。

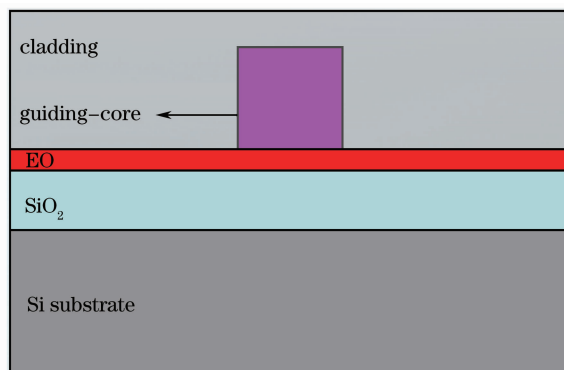


图 2 加载条形波导截面示意图

Fig. 2 Cross section of the strip-load waveguide

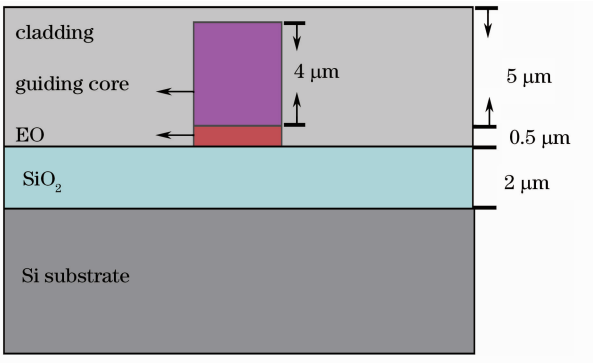


图 3 准矩形波导截面

Fig. 3 Cross section of the quasi-rectangle waveguide

4 实验过程和结果分析

4.1 实验过程

以长有 SiO₂ 的 Si 片为衬底,利用 ICP 刻蚀技术制备准矩形光波导器件。具体工艺步骤为:在 SiO₂ 上旋涂杂化电光材料,80 ℃下烘焙固化 2 h,降至室温后在电光薄膜上旋涂一层 SU-8 胶,紫外光刻后采用湿法方式显影,形成作为刻蚀掩模和引导层的 SU-8 波导;采用 O₂、SF₆、CF₄ 按照 17:6:1 的体积比,根据杂化材料的 ICP 刻蚀速率对平板部分的有机/无机杂化材料进行刻蚀;最后,旋涂 P(MMA-GMA) 上包层并固化,形成准矩形电光波导。实验中经反复摸索,得到优化后的刻蚀参数为天线射频功率 400 W,偏置射频功率 50 W,气体压强 2.5 Pa。

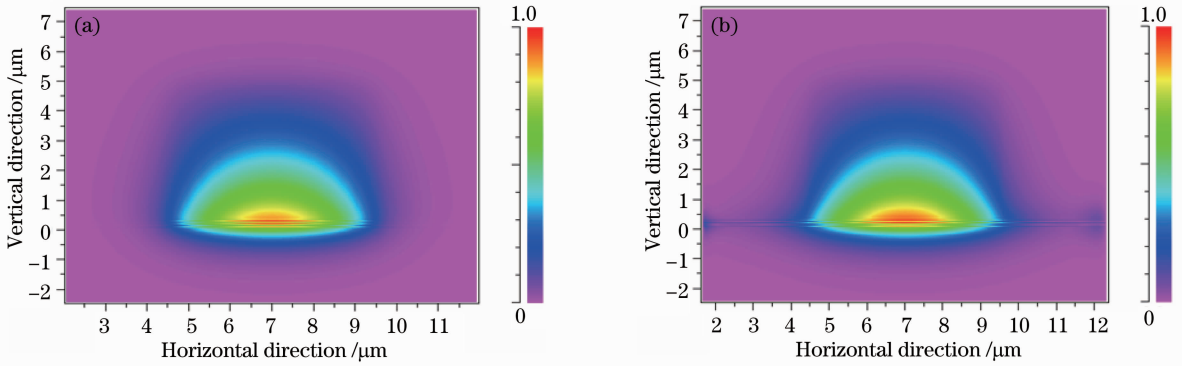


图 4 截面光场示意图。(a)准矩形波导;(b)加载条形波导

Fig. 4 Sectional optical field distribution. (a) quasi-rectangle waveguide; (b) strip-load waveguide

4.2 结果分析

对刻蚀完成的样片利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察其波导端面和表面形貌。图 5 所示为波导端面的 SEM 照片,波导高 5 μm,宽 6 μm,与厂家提供的薄膜厚度及掩模波导尺寸一致。由图 5 可见,利用 ICP 刻蚀后的端面垂直度较好,界面清晰,

有利于制备光传输损耗低的波导器件。

刻蚀后旋涂 P(MMA-GMA) 上包层,图 6 是旋涂上包层后的波导界面显微镜照片,从图中可以看出各层之间界面清晰,无明显的互溶现象。这样,既有利于降低包层溶剂侵蚀对芯层波导结构的破坏和对材料电光稳定性的影响,也有利于增强波导对光

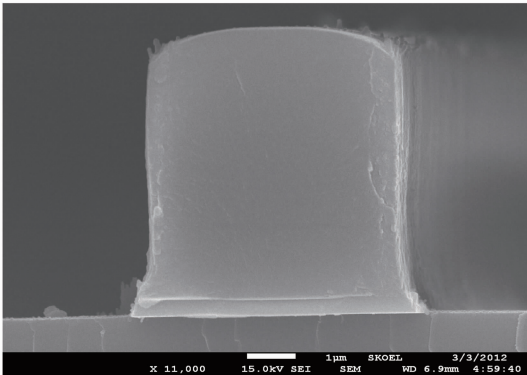


图 5 ICP 刻蚀后准矩形波导的 SEM 照片
Fig. 5 SEM image of the quasi-rectangle waveguide after ICP etching

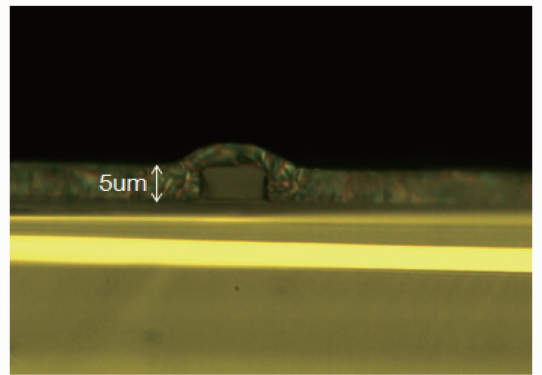


图 6 旋涂上包层后的准矩形波导截面显微镜照片
Fig. 6 Microscope image of the quasi-rectangle waveguide after spin-coating the upper cladding

场模式的限制作用,降低光的传输损耗。

对准矩形直波导器件进行通光测试,并将其与未对平板部分电光材料进行刻蚀的加载条形波导对比,近场输出光斑变化如图7所示。由图7可见,加

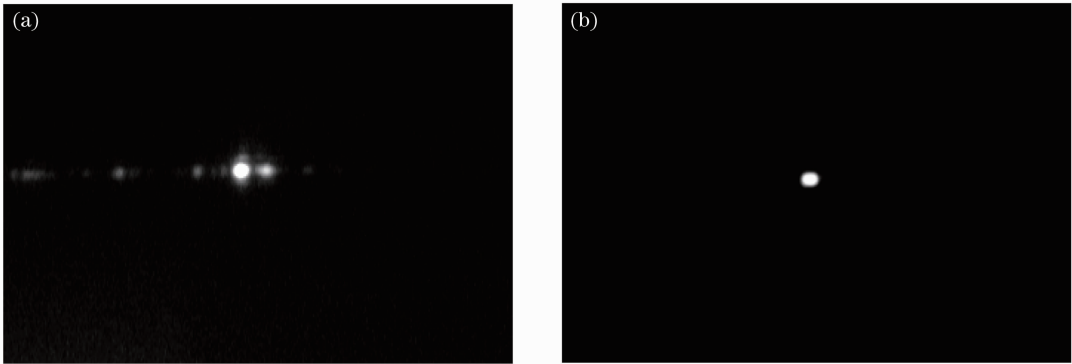


图7 刻蚀前后近场输出光斑。(a)加载条形波导;(b)准矩形波导

Fig. 7 Output spot of the near-field before and after etching. (a) Strip-load waveguide; (b) quasi-rectangle waveguide

5 结 论

利用ICP刻蚀技术对引导芯层两侧的电光层进行刻蚀,形成一种准矩形波导结构,克服了有机/无机杂化电光材料本身成膜较薄,无法采用通常的矩形或脊形波导结构的问题。该结构能更好地将光场限制在电光层中,避免平板现象的发生,提高了电光重叠积分因子,同时也有利于降低光纤与波导端面的耦合损耗。在输入光功率为0.3 mW,工作波长为1550 nm的条件下,实验测得3 cm长直波导器件的光传输损耗为-3.5 dB/cm。通过优化溶胶-凝胶工艺,还可进一步降低电光材料的吸收损耗,提高波导的电光性能,为制备类似波导型电光器件创造有利条件。

参 考 文 献

- Liao Jinkun, Li Heping, Tang Xiongwei *et al.*. Operator expansion analysis of Mach-Zehnder waveguide in polymeric electro-optic modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1597~1602
- 廖进昆, 李和平, 唐雄贵等. 聚合物电光调制器中马赫-曾德尔波导的算子展开法分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1597~1602
- Gao Lei, Gao Weinan, Deng Ling *et al.*. Organic-inorganic hybrid modulator with coplanar waveguide electrode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3511~3514
- 高磊, 高伟男, 邓玲等. 有机无机杂化型共面波导行波电极

载条形结构中存在的平板现象,在ICP刻蚀后形成的准矩形波导中已经不存在,并且由光斑形状可以发现,光场能量更加集中在电光层内,有效地降低了由于光场能量泄漏导致的光传输损耗。

电光调制器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3511~3514

- Gao Lei, Sun Jie, Gao Weinan *et al.*. Design and fabrication of organic-inorganic hybrid quasi-rectangle waveguide [J]. *J. Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, **40**(3): 826~829
- 高磊, 孙杰, 高伟男等. 有机无机杂化材料准矩形波导的设计与制备[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, **40**(3): 826~829
- Dongwook Shin, Jae-Ho Eo. Plasma etching characteristics of Ge-B-P doped SiO₂ film for waveguide fabrication [J]. *J. Ceramic Processing Research*, 2005, **6**(4): 345~350
- Gang Zhao, Qiong Shu, Yao Tian *et al.*. Wafer level bulk titanium ICP etching using SU8 as an etching mask [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2009, **19**(9): 095006
- Wang Xibin, Cao Zijian, Jin Lin *et al.*. Preparation of electro-optic waveguide based on KH560 modified organic/inorganic hybrid materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 561~564
- 王希斌, 曹子谏, 靳琳等. 基于KH560修饰的有机/无机杂化材料电光波导制备[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 561~564
- Gao Weinan, Sun Jie, Sun Xiaoqiang *et al.*. Design and fabrication of an organic/inorganic hybrid co-planar waveguide electro-optic modulator [J]. *Optica Applicata*, 2009, **39**(3): 467~472
- Sun Jie. Investigation on Poled Polymer Electro-Optic Modulator Based on Strip-Loaded Waveguide [D]. Changchun: Jilin University, 2009. 34~37
- 孙杰. 基于加载条形光波导的极化聚合物电光调制器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009. 34~37
- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Study of polymer-based electro-optic modulators using contact poling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 422~425
- 杨建义, 江晓清, 王明华. 采用接触式极化法研制有机聚合物电光波导调制器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 422~425

栏目编辑: 韩峰