

文章编号:1004-4213(2011)04-0533-4

基于 PDMS 的倒脊形波导电光调制器的设计与制备

李晓东, 谭震宇, 王菲, 郑红丽, 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, 长春 130012)

摘 要: 选用价格低廉、介电性能良好、低传输损耗的聚二甲基硅氧烷作为波导的包层材料, 旁链型分散红 1 键合聚甲基丙烯酸甲酯作为芯层, 设计并制备了一种倒脊形聚合物波导马赫-曾德尔电光调制器及共面波导行波电极, 获得了调制器的调制信号响应. 针对 SF₆ 气体刻蚀聚二甲基硅氧烷的再淀积现象, 提出了采用 SF₆ 和 O₂ 的混合气体对聚二甲基硅氧烷进行反应离子刻蚀的方法, 发现当 SF₆:O₂ 流量比为 50 sccm:10 sccm 时, 刻蚀形成的凹槽侧壁陡直, 底部平坦; 实验制备的倒脊形马赫-曾德尔波导在 1 550 nm 波长下透光良好.

关键词: 聚二甲基硅氧烷; 旁链型分散红 1 键合聚甲基丙烯酸甲酯; 反应离子刻蚀; 聚合物电光调制器

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114004.0533

0 引言

随着 Internet 的迅速普及和发展, 以及三网融合(电信网、计算机网和有线电视网)的要求, 具有速度快、信息量高、抗干扰能力强等特点的光网络成为今后发展的重点^[1]. 随着光通信网络对光信号处理速度的要求不断提高, 具有高速度、高带宽和低功耗的极化聚合物电光调制器成为极具发展潜力的光子器件. 近年来聚合物电光调制器的研究取得了重要进展; 在半波电压方面, 2007 年, 亚利桑那大学的 Y. Enami 等人成功研制出带宽 110 GHz, 半波电压仅为 0.65 V 的聚合物电光调制器; 在调制带宽方面, 2002 年, Bell 实验室的 M. Lee 等人在 Science 上报了带宽在 150 GHz 以上的聚合物电光调制器, 并在 1.6 THz 下观测到了调制现象^[2-3]. 国内也有关于聚合物电光调制器的报道^[4-5]. 在商用化方面, 美国的 Lumera 公司已经推出了带宽为 100 GHz 的高速聚合物电光调制器.

选用聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 作为波导的包层材料, 旁链型分散红 1 键合聚甲基丙烯酸甲酯 (Poly[(methyl methacrylate)-co-(Disperse Red 1 methacrylate)], Aldrich, DR1-PMMA) ($n=1.550@1.550\text{ nm}$, $\gamma_{33}=9\text{ pm/V}$) 作为

芯层, 设计并制备了一种倒脊形聚合物波导马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 电光调制器. 提出了采用 SF₆ 和 O₂ 的混合气体对 PDMS 进行凹槽刻蚀的方法, 解决了单独采用 SF₆ 气体刻蚀 PDMS 的再淀积现象. 制作了共面波导 (Co-Planar Waveguide, CPW) 行波电极, 获得了调制器的调制信号响应.

1 波导的设计

本文采用的电光材料是 DR1-PMMA, 它具有良好的光学特性和极化稳定性^[6]. 利用反射法测得 DR1-PMMA 薄膜的电光系数 $\gamma_{33}=9\text{ pm/V}$, 在 1 550 nm 波长下的折射率为 1.550. 由于 PDMS 价格低廉, 具有良好的光学特性、化学稳定性和热稳定性, 在通信波段具有较低的传输损耗^[7]. PDMS 在 1 550 nm 波长下的折射率为 1.399, 作为包层材料, 其折射率与芯层的 DR1-PMMA 介电性能匹配, 无层间互溶现象. 为防止出现 DR1-PMMA 有源材料与下包层之间互容, 导致界面不清晰, 影响光传输和调制功能, 选择 PDMS 作为下包层. 包层电导率较高, 电场极化时, 极化电压将主要施加在有源层, 有利于提高聚合物电光器件中生色团的取向性, 增强非线性材料在电场极化时的极化效率, 从而降低调制器的半波电压.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61077041, No. 60807029)、吉林省科技发展计划项目 (No. 20090352, 20070522)、吉林大学基本科研业务费专项资金项目 (No. 200810028, No. 200905005) 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

第一作者: 李晓东 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为聚合物电光调制器. Email: 563446977@qq.com

导师 (通讯作者): 张大明 (1970-), 男, 教授, 主要研究方向为光开关, 高速率激光器及 PLC. Email: zhangdm@jlu.edu.cn

收稿日期: 2010-08-25; **修回日期:** 2010-10-30

针对 DR1-PMMA 旋涂成膜厚度较薄的特点,采用了一种倒脊形波导结构,如图 1,通过调整脊高和脊宽,能够实现单模传输,并降低双折射对调制效果的影响.

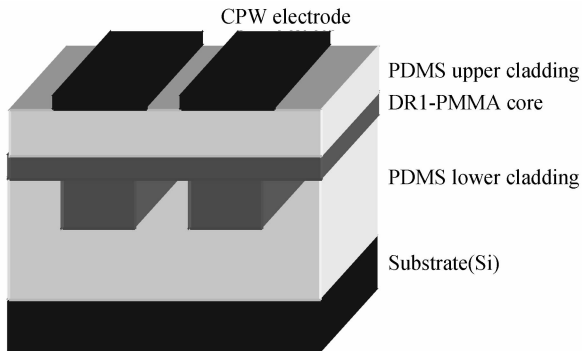


图 1 波导端面结构
Fig. 1 Cross section of waveguide

2 基于 PDMS 包层的波导制备

首先利用旋涂方法在硅片上形成 PDMS 薄膜,在 120 °C 下固化 2 h,蒸发溶剂,显微镜下观察薄膜厚度为 6 μm . 利用原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 表征 PDMS 表面形貌,如图 2,其表面均方根粗糙度 R_{ms} 值为 3.08 nm,成膜效果良好;利用椭圆偏振仪测得材料在 1 550 nm 波长下的折射率为 1.399,可以作为包层,折射率与芯层 DR1-PMMA ($n=1.550@1\ 550\ \text{nm}$, $\gamma_{33}=9\ \text{pm/V}$) 匹配.

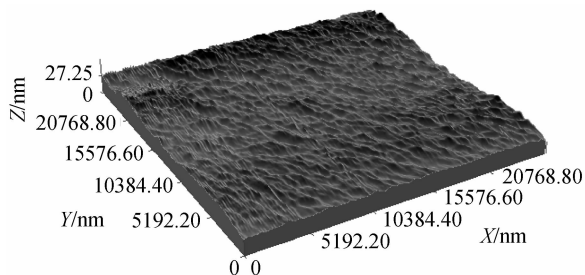


图 2 PDMS 薄膜表面 3D 形貌
Fig. 2 3D surface topography of PDMS

根据 PDMS 的性质,采用反应离子刻蚀 (Reactive Ion Etching, RIE) 技术对 PDMS 薄膜进行刻蚀,形成矩形凹槽,作为光波导下包层,如图 1. 实验中首先采用 SF_6 对 PDMS 进行刻蚀,但通过显微镜观察,被刻蚀表面很不平整,还会导致凹槽底部出现裂纹,如图 3. 图中侧壁与底面之间的局部凹陷主要是由于溅射离子流在台阶处反射,引起拐角处的离子流密度增大,使边缘处的衬底受到更多的腐蚀,形成再淀积现象.

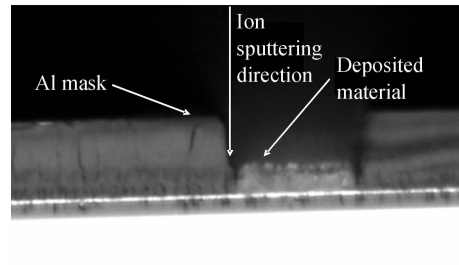


图 3 仅用 SF_6 气体刻蚀有机硅材料的效果
Fig. 3 Effect of glass resin etched only with SF_6

针对再淀积现象,提出了采用 SF_6 和 O_2 的混合气体对 PDMS 进行刻蚀的方法,并通过调整两种气体的流量比,有效抑制了再淀积现象的发生,改善了刻蚀效果,获得了平整的底部形貌,定向刻蚀特性明显. 通过对各种流量比下 PDMS 下包层扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图像的观察,发现当 $\text{SF}_6 : \text{O}_2$ 流量比为 50 sccm : 10 sccm 时,刻蚀速率适中,凹槽底部形貌平整,侧壁陡直,刻蚀效果最佳,如图 4.

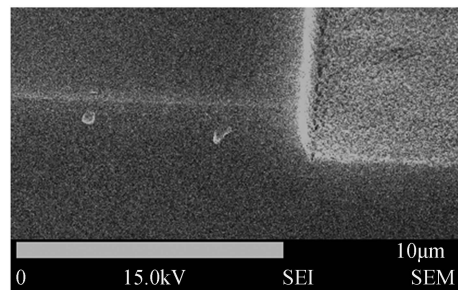


图 4 利用 SF_6/O_2 刻蚀 PDMS 的扫描电镜照片
Fig. 4 SEM picture of the groove etched by the mixture of SF_6 and O_2

将 DR1-PMMA 电光材料利用旋涂方法填充进深度为 3.5 μm 的 PDMS 凹槽中,90 °C 固化 12 h,形成的倒脊形波导截面如图 5. 芯层平板部分厚度约为 1 μm ,波导形貌良好,且无层间互溶现象. 然后旋涂 PDMS 上包层,120 °C 固化 2 h,形成厚度约 1.5 μm 的缓冲层.

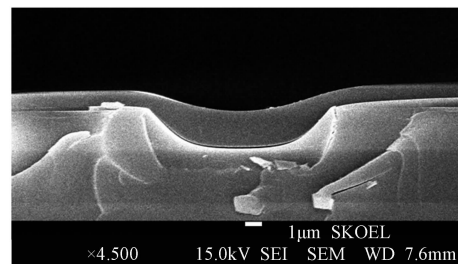


图 5 倒脊形波导截面扫描电镜照片
Fig. 5 SEM picture of the cross section of the inverted ridge waveguide

选择电晕极化的方法使材料获得非线性功能,

并利用金属铝制作调制器的 CPW 行波电极,通过真空蒸镀、光刻、显影和湿法刻蚀,形成电极图形^[8].

3 测试

利用光纤与波导直接耦合的方法对波导进行了透光测试.波导的输入/输出端面为自然解理面,将波长为 1 550 nm 的红外激光束经由单模光纤直接耦合进输入波导,输出端经 90 倍透镜放大成像于红外 CCD 探测器的接收端,在显示器上得到的近场输出光斑如图 6,波导透光情况良好,截断法测量倒脊形 M-Z 波导光传输损耗小于 2 dB/cm.

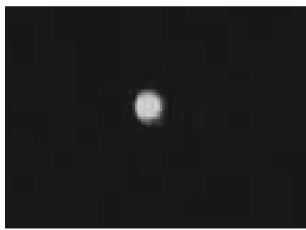


图 6 波导近场输出光斑(放大 90 倍)

Fig. 6 Output of the near-field spot of waveguide

通过 CPW 行波电极加载调制信号,获得了器件在 100 KHz 下的正弦响应,如图 7.通过优化波导尺寸和极化条件,相信可以获得更高的调制带宽^[9-10].

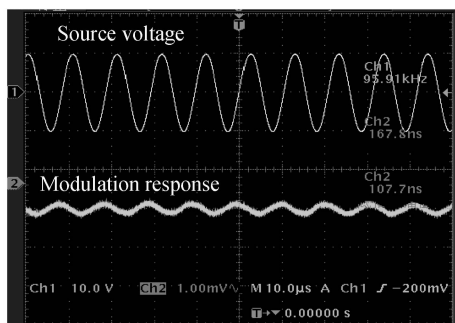


图 7 信号响应特性曲线

Fig. 7 Signal response characteristic curve

4 总结

提出了采用 SF₆ 和 O₂ 的混合气体对 PDMS 进行凹槽刻蚀并作为光波导的下包层结构,获得了 SF₆ 和 O₂ 刻蚀 PDMS 的最佳流量比,将价格低廉、介电性能良好,传输损耗低的 PDMS 引入电光调制

器波导的制备中.成功设计并制备了基于 PDMS 包层的倒脊型波导 M-Z 电光调制器.最后通过 CPW 行波电极加载调制信号,获得了调制器的调制信号响应.

参考文献

- [1] WU Ai-hua. Applied research on poled polymer electro-optic switches[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
吴爱华. 极化聚合物电光开关的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [2] ENAMI Y, MATHINE D, DEROSE C T, *et al.* Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550nm [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(9): 093505.
- [3] LEE M, KATZ H E, ERBEN C, *et al.* Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. *Science*, 2002, **298**(15): 1401-1403.
- [4] GAO Fu-bin, DU Guo-tong, ZHANG Ping, *et al.* Study on Mach-Zehnder intensity modulators of poled DANS polymer electro-optic waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 646-649.
高福斌, 杜国同, 张平年, 等. M-Z 型极化 DANS 聚合物电光波导强度调制器研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 646-649.
- [5] SUN Jie, ZHANG Da-ming, SUN Xiao-qiang, *et al.* Strip-loaded waveguide electrooptic Modulator based on organic/inorganic hybrid material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup2): 122-125.
孙杰, 张大明, 孙小强, 等. 基于有机/无机杂化材料的加载条形波导电光调制器[J]. 光子学报, 2008, **37**(Sup2): 122-125.
- [6] ELDADA L, SHACKLETTE L W. Advances in polymer integrated optics [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(1): 54-68.
- [7] CAI D K, NEYER A, KUCKUK R, *et al.* Optical absorption in transparent PDMS materials applied for multimode waveguides fabrication [J]. *Optical Materials*, 2008, **30**: 1157-1161.
- [8] SUN Xiao-qiang, GAO Wei-nan, SUN Jie, *et al.* Polymer 2×2 directional coupler electro-optic switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3085-3086.
孙小强, 高伟男, 孙杰, 等. 聚合物 2×2 定向耦合型电光开关[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3085-3086.
- [9] MA Chun-sheng, LIU Shi-yong. Modes theory of waveguide [M]. 1st ed. Changchun: Jilin University Press, 2006.
马春生, 刘式庸. 光波导模式理论[M]. 1 版. 长春: 吉林大学出版社, 2006.
- [10] MCKENNA E M, LIN A S, MICKELSON A R, *et al.* Comparison of r₃₃ values for AJ404 films prepared with parallel plate and corona poling[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, **24**(11): 2888-2892.

Design and Fabrication of Inverted Ridge Waveguide Electro-Optic Modulator Based on PDMS Material

LI Xiao-dong, TAN Zhen-yu, WANG Fei, ZHENG Hong-li, SUN Xiao-qiang, ZHANG Da-ming

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

Abstract: Polydimethylsiloxane is a kind of silicone which has merits of cost effective, good dielectric properties, and lower optical transmission loss in infrared range. Since the Poly[(methyl methacrylate)-co-(Disperse Red 1 methacrylate)] is applied as the active layer, in order to avoid the passive influence between the core and claddings, polydimethylsiloxane was chosen to be the cladding layer. An inverted ridge polymer waveguide Mach-Zehnder Electro-Optic modulator was designed and fabricated. Aiming at the deposition phenomena which arises when only using SF₆ in polydimethylsiloxane reactive ion etching, a method of utilizing the mixture of SF₆ and O₂ was proposed for polydimethylsiloxane reactive ion etching process. It was found that when the flux ratio of SF₆ : O₂ is 50 sccm : 10 sccm, the groove has the best shape. Through the optical test, the fabricated inverted ridge Mach-Zehnder waveguide has a good near-infrared light output. Co-planar waveguide electrodes based on Aluminum material were designed and fabricated, and signal response of electro-optic modulator was observed.

Key words: Polydimethylsiloxane; Poly[(methyl methacrylate)-co-(Disperse Red 1 methacrylate)]; Reactive ion etching; Polymer electro-optic modulator