

文章编号 1674-2915(2012)01-0064-07

## 感应耦合等离子体刻蚀在聚合物 光波导制作中的应用

张 琨, 岳远斌, 李 彤, 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 长春 130012)

**摘要:**提出了利用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术提高聚合物光波导器件性能的方法,介绍了 ICP 刻蚀技术的原理和优点。选取聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸环氧丙酯(P(MMA-GMA))作为波导材料,采用氧气作为刻蚀气体,研究了 ICP 参数变化对刻蚀效果的影响。介绍了倒脊形光波导的制备过程,采用改变单一工艺参数的方法,分析了刻蚀效果随时间、功率、压强、气体流量等参数的变化,对参数优化后刻蚀得到的凹槽和平板结构进行了表征。实验结果表明:在天线射频功率为 300 W,偏置射频功率为 30 W,气体压强为 0.5 Pa,氧气流速为 50 cm<sup>3</sup>/min 的条件下,可获得侧壁陡直、底面平整的 P(MMA-GMA)凹槽结构。

**关键词:**聚合物光波导;倒脊形光波导;感应耦合等离子体(ICP)刻蚀

**中图分类号:** TN252; TN405.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120501.0064

## Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide

ZHANG Kun, YUE Yuan-bin, LI Tong, SUN Xiao-qiang\*, ZHANG Da-ming

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

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

**Abstract:** A method to improve the performance of polymer waveguide devices by Inductively Coupled Plasma (ICP) etching is proposed and the principle and advantages of ICP etching technology are introduced. Polymethyl Methacrylate-glycidyl Methacrylate (P(MMA-GMA)) is chosen as the waveguide material to study the influence of various ICP parameters on the etching results when oxygen is selected to be the process gas. Firstly, the fabrication process of an inverted ridge waveguide device is introduced in detail. Then the variations of etching results with time, powers, pressures, gas flow parameters are analyzed by changing a single process parameter. Finally, the optimized groove and the slab structures are characterized. Experimental results indicate that the waveguide surface morphology can be improved effectively and a good shape of P(MMA-GMA)

收稿日期:2011-10-12;修订日期:2011-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077041, 60807029);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20090352, 20070522);吉林大学基本科研业务费专项资金资助项目(No. 200810028, 200905005);吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(No. 201100253)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

groove structure can be achieved by using the optimized IPC etching parameters in an antenna RF of 300 W, a bias RF power of 30 W, a gas pressure of 0.5 Pa and a oxygen flow velocity of  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

**Key words:** polymer optical waveguide; inverted ridge optical waveguide; Inductively Coupled Plasma (ICP) etching

## 1 引言

刻蚀是聚合物光波导制作过程中重要的工艺步骤之一,它分为湿法刻蚀和干法刻蚀。湿法刻蚀主要采用化学方法,由于化学反应各向异性较差,所以很难通过湿法刻蚀得到高精度的小尺寸图形。随着微细加工技术的特征尺寸减小到微米、亚微米量级,干法刻蚀逐渐占据了主导地位。

目前最常用的干法刻蚀有反应离子刻蚀(RIE)、电子回旋共振等离子体刻蚀(ECR)、感应耦合等离子体刻蚀(ICP)等。RIE刻蚀系统中等离子体能量和等离子体密度均由同一个射频源控制,因此在低损伤、高速率刻蚀的要求下,等离子体的密度受到严重限制。与RIE不同,ICP刻蚀系统中有两套射频源,天线射频源控制等离子体密度,偏置射频源控制等离子体能量,两套电源相互独立,在控制等离子体能量的同时能够生成高密度的等离子体,保证了刻蚀的均匀性和离子轰击的方向性<sup>[1]</sup>。与ECR刻蚀设备相比,ICP刻蚀设备具有更小的体积,且其设备结构相对简单、操作简便,具有更高的性价比。此外,ICP刻蚀技术还具有刻蚀速度快、大面积刻蚀均匀性好、表面损伤小、垂直度高等优点<sup>[2-5]</sup>,能够满足制作光电子器件的要求。因此,ICP刻蚀技术被广泛应用于光子器件的制备工艺中。

在某些光波导器件(如光波导放大器)的制作过程中,由于波导芯层材料刚性较强,不易刻蚀,需要采用先刻蚀出凹槽,再填充芯层材料的方法制作器件,即倒脊形光波导器件。在倒脊形光波导器件中,凹槽底部的粗糙度和侧壁的垂直度是影响波导性能的重要因素,因此优化刻蚀条件以便得到较好的凹槽形貌是减小波导传输损耗、提高波导性能的有效途径。

本文详细介绍了ICP刻蚀技术的参数优化过程,研究了ICP刻蚀技术的天线射频功率、偏置射

频率、反应气体流速及腔室内气体压强等参数对刻蚀效果的影响,并应用优化后的参数成功制作出底面粗糙度较小、侧壁垂直度较高的凹槽结构。

## 2 材料选取和刻蚀原理

### 2.1 材料选取

聚甲基丙烯酸甲酯(P(MMA))是一种高度透明的热塑性材料,该材料光学性能好,成本低廉,成膜性好,被广泛应用于光波导制作中。但是,线性P(MMA)玻璃态转变温度较低,且多层涂覆会引起层间互溶。

在甲基丙烯酸甲酯(MMA)中共聚甲基丙烯酸环氧丙酯(GMA)可以得到甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸环氧丙酯共聚物(P(MMA-GMA))材料,P(MMA-GMA)在加热固化后可以形成交联网状结构,较P(MMA)有更好的热稳定性,且能有效解决多层涂覆引起的层间互溶问题,其反应方程式<sup>[6]</sup>如图1所示。

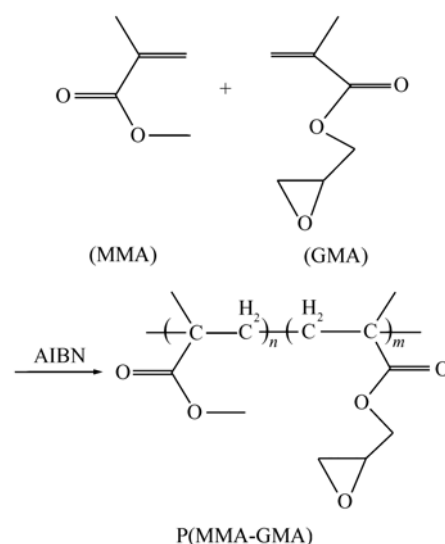


图1 合成P(MMA-GMA)的反应方程式

Fig. 1 Reaction equation of synthesizing P(MMA-GMA)

## 2.2 ICP 刻蚀原理

ICP 刻蚀过程包括物理刻蚀和化学刻蚀。物理刻蚀是通过电感耦合的方式使刻蚀气体辉光放电,产生高密度的等离子体,直接对基片表面进行物理轰击,将聚合物表面的原子溅射出来,此过程是各向异性的。化学刻蚀是反应等离子体在放电过程中产生许多离子和化学活性中性物质,即自由基,离子在电场作用下与聚合物在沿电场方向上发生化学反应,这种化学反应为各向异性的。另一种化学反应是可自由运动的自由基与聚合物的相互作用,这种反应是各向同性的<sup>[7-8]</sup>。

## 3 实验

以 P(MMA-GMA) 作为下包层,用铝掩模法结合 ICP 刻蚀技术制备倒脊形光波导器件,主要工艺流程为:(a)清洗硅衬底:将硅片置于干净滤纸上,先用丙酮棉球擦拭,再用乙醇棉球擦拭,然后用去离子水反复冲洗,吹干样品表面水迹。(b)旋涂下包层:在清洗后的样品上用匀胶机旋涂 P(MMA-GMA) 薄膜作为下包层,匀胶机参数设定为:前转 6 s,600 r/min;后转 20 s,3 000 r/min,涂完下包层后,将样品放入烘箱中缓慢升温至 120 °C,烘焙固化 2 h,自然降至室温。(c)蒸镀铝掩模:在下包层上真空蒸镀一层铝掩模。(d)旋涂光刻胶:在蒸镀铝掩模后的样品上用匀胶机旋涂一层 BP-212 正型光刻胶,烘焙 20 min,烘焙温度 80 °C,自然降至室温。(e)光刻显影:选用负板作为掩模板紫外曝光 4 s,以 0.5 g/mL 的 NaOH

蚀:使用仪器为 CE300I 型号的 ICP 刻蚀机,在 P(MMA-GMA) 聚合物下包层上刻出凹槽。(g)去除铝掩模,填充芯层,旋涂上包层:用 NaOH 溶液除去剩余的铝掩模和光刻胶,将芯层材料填充到凹槽结构中,固化后旋涂上包层,完成器件的制备。图 2 为利用铝掩模结合 ICP 刻蚀制作聚合物凹槽的示意图。

以氧气作为刻蚀气体,通过改变单一刻蚀条件以对比刻蚀效果的差异,研究各参数变化对 P(MMA-GMA) 凹槽结构形貌的影响。实验中,分别研究刻蚀时间、天线射频功率、偏置射频功率、气体压强及氧气流速等参数对凹槽底部粗糙度的影响,用扫描电子显微镜(SEM)观察凹槽结构的侧壁形状和表面形貌,用原子力显微镜(AFM)表征凹槽底面的均方根粗糙度(RMS)<sup>[9]</sup>。在综合考虑凹槽侧壁垂直度的基础上,通过刻蚀表面 RMS 随各参数的变化规律确定 ICP 刻蚀 P(MMA-GMA) 的最佳工艺参数,在最佳工艺参数下制作凹槽结构,并计算最佳工艺参数下的刻蚀速率。

光波导器件的尺寸往往在制作前已设计好,实际制作器件时,刻蚀深度是一定的,所以应该在刻蚀深度相同的情况下讨论各参数对凹槽底部粗糙度的影响。本文讨论各参数(除刻蚀时间参数)对波导形貌的影响时,刻蚀深度均为 2.5 ~ 2.8 μm。

## 4 结果与分析

刻蚀过程是导致聚合物倒脊形光波导器件凹

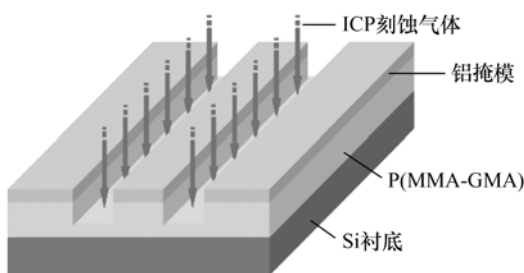


图2 聚合物凹槽示意图

Fig.2 Diagram of polymer groove

溶液作为显影液,曝光部位的光刻胶和铝掩模将溶于 NaOH 溶液中,形成掩模图形。(f) ICP 刻

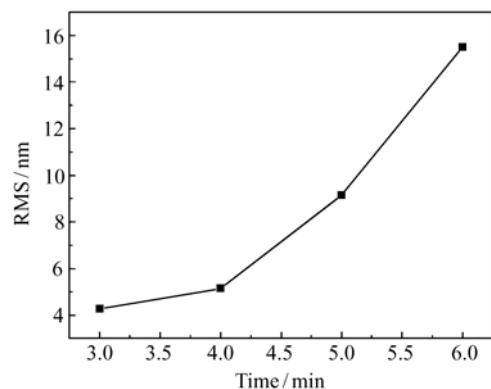


图3 刻蚀时间对刻蚀表面粗糙度的影响

Fig.3 Effect of etch time on etching surface roughness

槽底面不平整的主要原因,刻蚀时间的长短直接影响凹槽底面粗糙度。选择不同的刻蚀时间对 P(MMA-GMA) 进行刻蚀,天线射频功率为 200 W,偏置射频功率为 30 W,压强为 1 Pa,氧气流速为  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,图 3 为刻蚀表面 RMS 随刻蚀时间的变化曲线。从图中可以看出,刻蚀时间越长,底面粗糙度越大。图 4 为用不同刻蚀时间刻蚀凹槽得到的底面形貌 SEM 图像,放大倍数为 40 000 倍。

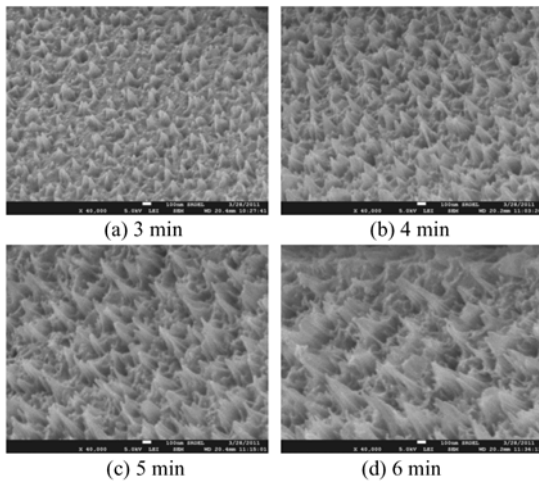


图 4 不同时间刻蚀凹槽得到的底面形貌 SEM 照片  
Fig.4 Subface SEM images of grooves under different etch time

在 ICP 刻蚀系统中,用天线射频源控制等离子体密度。选择不同的天线射频功率对 P(MMA-GMA) 进行了刻蚀,偏置射频功率为 30 W,压强为 0.5 Pa,氧气流速为  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,图 5 为刻蚀表面 RMS 随天线射频功率变化的曲线。从图中可以看出,当天线射频功率增加时,底面的 RMS 减小;当天线射频功率  $> 300 \text{ W}$  时,底面的 RMS 趋于稳定。这是因为天线射频功率的增大使刻蚀腔内等离子体密度变大,等离子体碰撞机率也随之增加,气体平均自由程变小,离子轰击作用减弱,所以刻蚀表面的 RMS 减小<sup>[10]</sup>。凹槽侧壁的垂直度也是影响波导性能的重要因素,刻蚀过程各向异性越强,凹槽侧壁的垂直度越好;各向同性越强,侧蚀现象越严重,凹槽侧壁的垂直度越差。等离子体密度过大会引起各向同性刻蚀,所以天线射频功率最好控制在 300 W 以内。

偏置射频源控制等离子体能量,决定离子轰

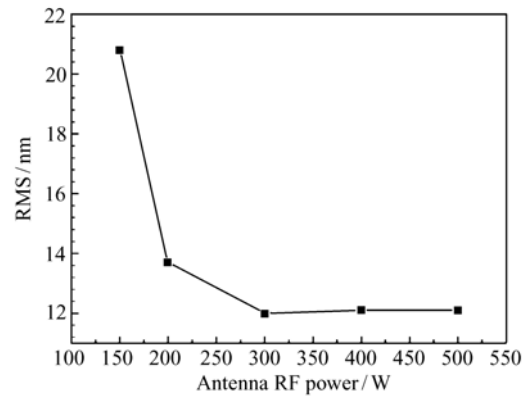


图 5 天线射频功率对刻蚀表面粗糙度的影响  
Fig.5 Effect of antenna RF power on etching surface roughness

击聚合物的速度<sup>[11]</sup>,是影响物理刻蚀的主要因素。选择不同的偏置射频功率对 P(MMA-GMA) 进行了刻蚀,天线射频功率为 150 W,气体压强为 1 Pa,氧气流速为  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,图 6 为偏置射频功率分别为 50,40,30 W 时凹槽底面的 SEM 图像。从图中可以看出,当偏置射频功率减小时,底面的粗糙度随之降低。偏置射频功率的减小不仅对降低底面的粗糙度有利,对侧壁粗糙度的降低也是有利的,因为侧壁粗糙度主要来源于掩模的纵向传递,随着偏置功率的变大,侧壁粗糙度对掩模边缘粗糙度的依赖性会变强<sup>[12]</sup>。需要注意的是,偏置射频功率过小会减弱离子轰击的方向性,导致各向同性刻蚀增强,所以偏置射频功率不宜选择过小<sup>[13]</sup>。

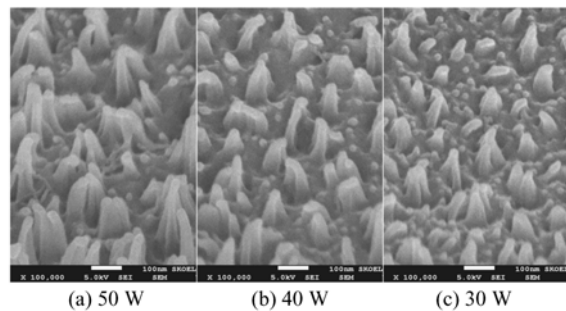


图 6 不同偏置射频功率下刻蚀凹槽底面粗糙度的 SEM 图像  
Fig.6 SEM images of a groove subface roughness etched under different bias RF powers

气体压力的主要作用是影响离子的能量和离

子对聚合物的撞击方向<sup>[3]</sup>。选择不同的气体压力对 P(MMA-GMA) 进行刻蚀, 天线射频功率为 300 W, 偏置射频功率为 30 W, 氧气流速为 40 cm<sup>3</sup>/min, 图 7 为刻蚀后样品表面 RMS 随气体压力的变化曲线。从图中可以看出, 随着气体压力增加, 底面的 RMS 会增大, 所以降低气体压力可以有效降低底面粗糙度。

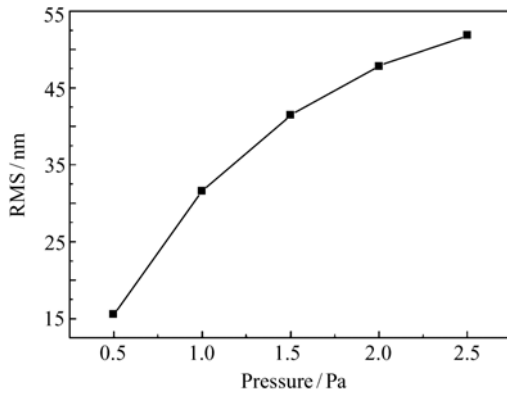


图 7 气体压力对刻蚀表面粗糙度的影响

Fig. 7 Effect of pressure on etching surface roughness

氧气流速影响刻蚀腔内反应气体的浓度, 从而影响等离子体密度<sup>[3]</sup>。选择不同的氧气流速对 P(MMA-GMA) 进行了刻蚀, 天线射频功率为 300 W, 偏置射频功率为 30 W, 压强为 0.5 Pa。实验结果表明: 随着氧气流速的增加, 凹槽底面粗糙度先增大后减小。这是因为随着氧气流速的增加, 等离子体密度变大, 离子撞击聚合物的几率增大, 所以刻蚀表面粗糙度变大; 然而, 当等离子体密度继续增大时, 气体平均自由程大大减小, 致使离子轰击作用减弱, 所以随着氧气流速的进一步增大, 凹槽底面粗糙度降低。同时, 与增加天线射频功率和减小偏置射频功率的情况相似, 氧气流速过大也会引起各向同性, 所以氧气流速也不宜选择过大。

在考虑凹槽侧壁垂直度的基础上, 依据上述各参数的讨论结果, 将 ICP 刻蚀 P(MMA-GMA) 的最佳参数取为: 天线射频功率 300 W, 偏置射频功率 30 W, 气体压强 0.5 Pa, 氧气流速 50 cm<sup>3</sup>/min。图 8 为扫描电镜下观察到的刻蚀凹槽形貌, 图 8(a) 为优化工艺参数前凹槽的形貌(天线射频功率为 200 W, 偏置射频功率为 30 W, 气体压强为 1 Pa, 氧气流速为 40 cm<sup>3</sup>/min), 图 8(c) 为优化工

艺参数后凹槽的形貌(最佳参数), 图 8(b) 和(d) 分别是(a) 和(c) 底面的局部放大图像。从图中可以看出, 优化工艺参数可以有效改善凹槽的形貌, 大大降低了凹槽底面的粗糙度。如图 8(c) 所示, 用 ICP 刻蚀 P(MMA-GMA) 的最佳参数, 可以得到垂直度较高、粗糙度较小的 P(MMA-GMA) 凹槽结构。

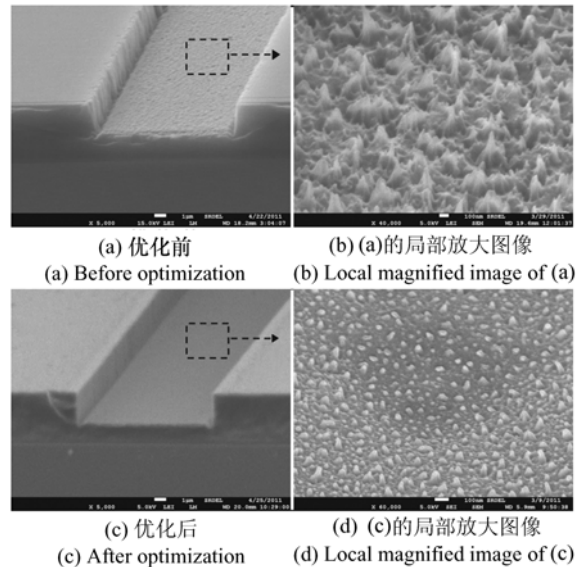


图 8 优化参数前后凹槽的 SEM 图像

Fig. 8 SEM images of groove before and after optimizations

由于刻蚀深度需要严格遵照设计的波导尺寸, 因此必须明确刻蚀速率, 才能通过控制刻蚀时间来实现刻蚀深度的控制。在不同的时间参数下

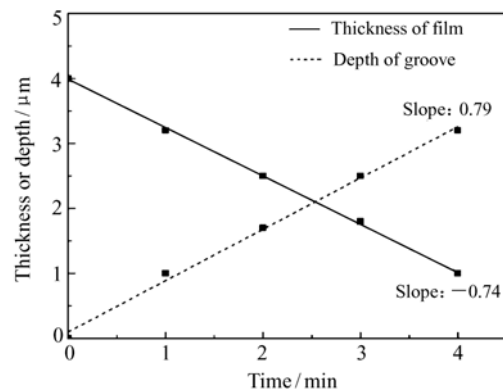


图 9 薄膜厚度和凹槽深度与刻蚀时间的变化关系

Fig. 9 Variation of film thickness and groove depth with etch time

对 P(MMA-GMA) 凹槽和平板结构进行刻蚀, 刻蚀结束后在光学显微镜下读取不同时间参数对应的凹槽刻蚀深度和平板剩余薄膜厚度, 在 Origin 软件中输入各点坐标自动拟合直线, 直线的斜率就是相应刻蚀速率。如图 9 所示, 图中虚直线为凹槽刻蚀深度随刻蚀时间的变化曲线, 实直线为平板剩余薄膜厚度随刻蚀时间的变化曲线, 两条直线的斜率分别为 0.79 和 -0.74, 即凹槽刻蚀速率为 0.79  $\mu\text{m}/\text{min}$ , 平板刻蚀速度为 0.74  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

## 5 结论

本文介绍了以 P(MMA-GMA) 作为下包层的

倒脊形光波导器件的制作过程, 并结合倒脊形光波导器件的结构特点, 通过大量实验研究了刻蚀时间、天线射频功率、偏置射频功率、气体压强、气体流速等参数对凹槽形貌的影响, 确定 ICP 刻蚀 P(MMA-GMA) 的最佳工艺参数为: 天线射频功率 300 W, 偏置射频功率 30 W, 气体压强 0.5 Pa, 氧气流速 50  $\text{cm}^3/\text{min}$ , 并利用最佳参数刻蚀得到了侧壁陡直、底面平整的 P(MMA-GMA) 凹槽结构。在不同的时间参数下, 对 P(MMA-GMA) 凹槽和平板结构进行刻蚀, 计算出 ICP 刻蚀 P(MMA-GMA) 凹槽和平板的速率分别为 0.79 和 0.74  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。ICP 工艺参数的优化有效改善了刻蚀表面的形貌, 有利于减小波导的传输损耗、提高波导器件的性能。

## 参考文献:

- [1] 樊中朝, 余金中, 陈少武. ICP 刻蚀技术及其在光电子器件制作中的应用[J]. 微细加工技术, 2003, 6(2): 21-27.  
FAN ZH CH, YU J ZH, CHEN SH W. Inductively coupled plasma etching technology and its application in optoelectronic devices fabrication[J]. *Microfabrication Technology*, 2003, 6(2): 21-27. (in Chinese)
- [2] 李伟东, 张建辉, 吴学忠, 等. ICP 刻蚀技术在 MEMS 器件制作中的应用[J]. 微纳电子技术, 2005, 10(1): 473-476.  
LI W D, ZHANG J H, WU X ZH, et al.. Application of ICP etching technology in MEMS field[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2005, 10(1): 473-476. (in Chinese)
- [3] 郑志霞, 冯勇建, 张春权. ICP 刻蚀技术研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(8): 365-368.  
ZHENG ZH X, FENG Y J, ZHANG CH Q. Etching technique of inductive couple plasmas[J]. *J. Xiamen University(Natural Science)*, 2004, 43(8): 365-368. (in Chinese)
- [4] FU L, MIAO J M, LI X X. Study of deep silicon etching for micro-gyroscope fabrication[J]. *Appl. Surface Sci.*, 2001, 177(1-2): 78-84.
- [5] ILIESCU C, MIAO J. One-mask process for silicon accelerometers on pyrex glass utilising notching effect in inductively coupled plasma DRIE[J]. *Electron. Lett.*, 2003, 39(8): 658-659.
- [6] 陈长鸣. 硅基聚合物平面光波导器件的基础研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 57-58.  
CHEN CH M. The basic research on polymer/Si planar optical waveguide devices[D]. Changchun: Jilin University, 2010: 57-58. (in Chinese)
- [7] 姚刚, 石文兰. ICP 技术在化合物半导体器件制备中的应用[J]. 半导体技术, 2007, 32(6): 474-477.  
YAO G, SHI W L. Application of ICP etching in the fabrication of compound semiconductor device[J]. *Semiconductor Technology*, 2007, 32(6): 474-477. (in Chinese)
- [8] 张鉴, 黄庆安. ICP 刻蚀技术与模型[J]. 微纳电子技术, 2005(6): 288-296.  
ZHANG J, HUANG Q A. Technology and models of ICP etching[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2005(6): 288-296. (in Chinese)
- [9] 刘洪兴, 张巍, 巩岩. 光栅参数测量技术研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 103-110.  
LIU H X, ZHANG W, GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 103-110. (in Chinese)
- [10] KIM B, LEE B T, HAN J G. Surface roughness of silicon oxynitride etching in  $\text{C}_2\text{F}_6$  inductively coupled plasma[J]. *Solid-State Electronics*, 2007, 51(3): 366-370.
- [11] 吕焱, 李宝霞, 万里兮. 硅深槽 ICP 刻蚀中刻蚀条件对形貌的影响[J]. 微电子学, 2009, 39(5): 729-732.

- LÜ Y, LI B X, WAN L X. Effects of technical parameters on etching rate and selectivity of Si deep trench using ICP etching[J]. *Microelectronics*, 2009, 39(5): 729-732. (in Chinese)
- [12] 樊中朝, 余金中, 陈少武, 等. ICP 刻蚀参数对 SOI 脊形波导侧壁粗糙度的影响[J]. *半导体学报*, 2004, 25(11): 1500-1504.
- FAN ZH CH, YU J ZH, CHEN SH W, *et al.* Influence of etching parameters on sidewall roughness of silicon based waveguide etched by inductively coupled plasma [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, 25(11): 1500-1504. (in Chinese)
- [13] HAN K, KIM J, JANG W H. Evaluation of halogenated polyimide etching for optical waveguide fabrication by using inductively coupled plasma[J]. *J. Appl. Polymer Sci.*, 2001, 79(1): 176-182.

**作者简介:** 张 琨(1986—), 女, 吉林白山人, 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: zhangkun-zr@163.com

岳远斌(1988—), 男, 山东聊城人, 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

李 彤(1984—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事聚合物平面光波导放大器方面的研究。

E-mail: litong1001@sina.com

孙小强(1977—), 男, 吉林长春人, 博士, 讲师, 主要从事有机集成光子器件方面的研究。

E-mail: sunxq@jlu.edu.cn

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