

引用格式: LÜ Huan-lin, LIANG Yu-xin, HAN Xiu-you, *et al.* Simulation and Fabrication of Polymeric Slot Waveguide for Refractive Index Sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2):0213001

吕桓林,梁宇鑫,韩秀友,等. 用于折射率传感的聚合物基狭缝波导的模拟与制备[J].光子学报,2020,**49**(2):0213001

用于折射率传感的聚合物基狭缝波导的模拟与制备

吕桓林^{1,2},梁宇鑫¹,韩秀友¹,武震林¹,谷一英¹,赵明山¹

(1 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院,辽宁 大连 116024)

(2 大连工业大学 基础教学部,辽宁 大连 116034)

摘要:设计了在极近红外波段(890 nm)的聚合物基狭缝波导微环折射率传感器.分析了波导高度、宽度及狭缝宽度对灵敏度的影响,以找到最佳的设计标准用于折射率传感.采用电子束光刻工艺制备了硅母版模,并用独特的氟化聚合物 PFPE 从硅母版模上成功制备了柔性软模具.采用紫外软压印工艺制备了聚合物基狭缝波导.波导的宽度和高度以及狭缝波导的宽度分别约为 510 nm、830 nm 和 234 nm,聚合物狭缝波导残留层的厚度约为 350 nm.制备的狭缝波导具有高的高宽比并与低成本批量生产工艺相兼容.

关键词:集成光学;狭缝波导;聚合物;光学传感

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0213001

Simulation and Fabrication of Polymeric Slot Waveguide for Refractive Index Sensing

LÜ Huan-lin^{1,2}, LIANG Yu-xin¹, HAN Xiu-you¹, WU Zhen-lin¹, GU Yi-ying¹, ZHAO Ming-shan¹

(1 School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024 China)

(2 Department of General Education, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract: A polymer-based microring refractive index sensor based on slot waveguide was studied at very-near-infrared region (around 890 nm). The relationships between the sensitivity and the waveguide height, width and gap width were analyzed to find optimum design criteria for refractive index sensing. A silicon master mold was fabricated using electron-beam lithography. A unique class of fluorinated polymer, perfluoropolyether, was used to fabricate the flexible soft mold, which was replicated from the silicon mold successfully. The slot waveguide was fabricated on the polymer platform by using UV-based soft nanoimprint technique. The width and the height of the waveguide, and the width of the slot in the slot waveguide, are approximately 510 nm, 830 nm, and 234 nm, respectively. The thickness of the residual layer of polymeric slot waveguide is approximately 350 nm. The fabricated slot walls with a high aspect ratio are shown compatible with low cost mass production processes.

Key words: Integrated optics; Slot waveguide; Polymer; Optical sensing

OCIS Codes: 130.5460; 130.6010; 350.5730

基金项目:科技部国际科技合作专项项目(No.2014DFG32590),国家自然科学基金(Nos.61875028,61704017),"十三五"装备预研领域基金重点项目(No.61404130403),大连市科技创新基金项目(No.2018J11CY006)

第一作者:吕桓林(1980—),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为聚合物光子学. Email:lvhl@dlpu.edu.cn

导师(通讯作者):赵明山(1960—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光子技术与器件和微波光子技术与应用. Email:mszhao@dlut.edu.cn

收稿日期:2019-09-09; **录用日期:**2019-10-26

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,集成光波导传感器在临床诊断、化学与传感监测等方面显示出了巨大的应用价值与发展潜力,具有高灵敏度、免标记和实时监控等优点^[1].传统的传感基于消逝波原理,当外部环境发生改变时,波导传输模式的有效折射率也随之改变,进而实现对外界特定参数的传感,然而,包层部分的光-物质相互作用比较弱.2004年,Cornell大学的研究团队提出了一种新型的狭缝(Slot)波导结构^[2],光场会在狭缝中增强,极大地增加了光与低折射率部分环境的相互作用,从而提高传感灵敏度.用于传感的狭缝波导结构有马赫-增德尔结构^[3]、微环谐振器^[4-5]、微盘谐振器^[6]等.

狭缝波导的研究较多集中在绝缘体硅(Silicon-On-Insulator, SOI)材料上^[7-8],该材料折射率差大,光场在狭缝中得到很大的增强,制备狭缝的宽度约100 nm,工作波长在通讯波段1310 nm与1550 nm.但是,如此小的狭缝宽度限制了其应用范围,如,当狭缝区域必须由非线性材料或流体分析物填充时,会出现一些浸润困难^[9];当应用狭缝波导结构进行生物或折射率传感时,水溶液在通讯波段范围内具有较强的吸收损耗,这使得光的传输损耗很大.而聚合物光子材料能够有效避免此问题,由于折射率较低,狭缝波导间隙更宽,流体可以更好地浸润到狭缝区域,且聚合物材料在可见光及极近红外波段具有较低的吸收损耗,此波段在水溶液中的吸收损耗远低于通讯波段的吸收损耗^[10].聚合物还具有成本低、可旋涂成膜、折射率易调控等优势^[11-12].因此,聚合物基狭缝波导结构的微纳器件成为光学传感领域的研究热点.BETTOTTI P等^[13]研究了聚合物基狭缝波导参数对传感灵敏度的影响,并论证了聚合物狭缝波导可以实现高灵敏度传感.HILTUNEN M等^[14]设计和制备了工作于633 nm波段聚合物基狭缝波导杨氏干涉传感器,并进行了葡萄糖溶液浓度的传感检测.

在聚合物基光波导器件的制备中,根据材料特性有多种加工工艺,如激光直写^[15]、直接光刻^[16]、纳米压印技术^[17]等.其中,纳米压印技术不需要任何复杂的设备,可以克服光刻带来的衍射极限问题,有利于规模化生产.聚合物材料具有热塑性,早期的压印模具采用硅基等硬模具,但在多次压印后,主模具会产生损伤并受到污染.为了克服此类问题,人们研究出使用软模具的紫外软压印工艺^[18](UV-based softimprint lithography, UV soft NIL),这极大地增加了母版模的使用寿命,还具有快速、高效、低成本等明显优势.

本文设计和制备了聚合物基Ormocore的狭缝波导的微环谐振器,工作波长选择在水溶液环境中具有较低吸收损耗的890 nm波段.计算了狭缝波导的单模条件,并根据波导结构对传感灵敏度的影响,进一步优化了狭缝波导的结构参数.利用电子刻蚀工艺制备了硅母版模,然后利用一种新型的氟化聚合物全氟聚醚(Perfluoropolyether, PFPE)从硅母版模上成功制备了软模具,最后利用紫外软压印工艺制备了聚合物基狭缝波导.

1 Slot波导的模拟与优化

1.1 狭缝波导的单模条件

基于狭缝波导的微环谐振器结构如图1所示.结构上由微环和输入输出的直波导组成,直波导和环形波导部分采用常规的对称性狭缝波导结构,狭缝波导横截面结构如图2所示.芯层材料选择聚合物光子材料Ormocore,该材料由德国Micro Resist Technology公司生产,其在890 nm波段的折射率为1.543^[19],材料的吸收损耗小于0.1 dB/cm,可以制备出集成度较高的光波导器件.下包层为SiO₂材料,在此波长下的折射率为1.453,上包层设定为传感常用的水溶液,折射率为1.333.

首先,使用Lumerical软件计算Slot波导的单模条件.图2中 W 、 H 、 W_s 与 W_g 分别表示狭缝波导总宽度、单波导的高度与宽度、两个单波导之间狭缝的狭缝宽度, H_s 为残留层厚度.对于不同的狭缝宽度 W_g ,单模条件也不相同.因此,首先选取狭缝宽度 W_g ,设定单波导高度 H 为1 μm ,下包层SiO₂的厚度为3 μm ,可以保证无光场能量泄露到硅衬底层.改变波导宽度 W ,计算对应的单模条件.在 W_g 取50 nm时,狭缝波导内两模式TE₀与TE₁的有效折射率随波导宽度的变化关系如图3所示.从图中可以看出,此时狭缝波导的单模条件为 $0.8 \leq W \leq 1.6 \mu\text{m}$.当波导宽度 W 小于0.8 μm 时,波导内无稳定传输的模式.当波导宽度 W 大于1.6 μm 时,波导内存在稳定传输的一阶高阶模式TE₁.图3展示了波导宽度 W 为1 μm 和2 μm 时TE₀与TE₁的模场分布,从图中可以看出,当满足单模条件时,波导狭缝区域具有较强的光场.当波导宽度较大时,

产生的一阶高阶模式 TE_1 光场主要分布于狭缝两侧光波导中,而狭缝区域光场很弱。

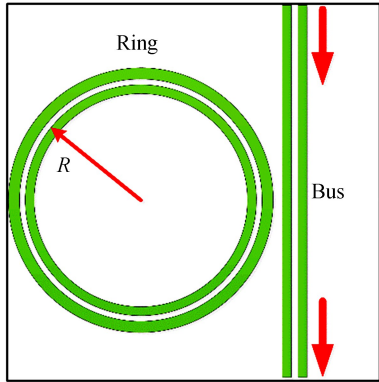


图1 基于狭缝波导的微环谐振器俯视图
Fig.1 Top view of the microring resonator based on slot waveguide

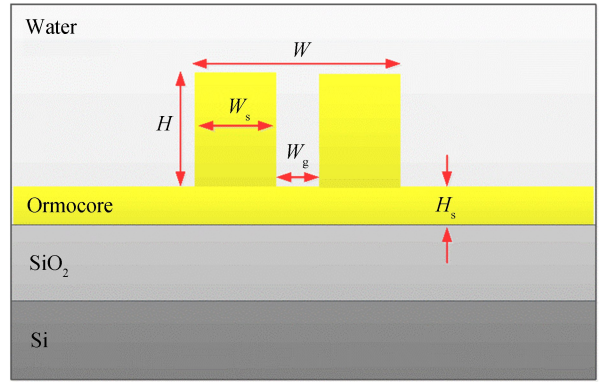


图2 聚合物狭缝波导结构横截面
Fig.2 Schematic view of polymer slot waveguide cross-section

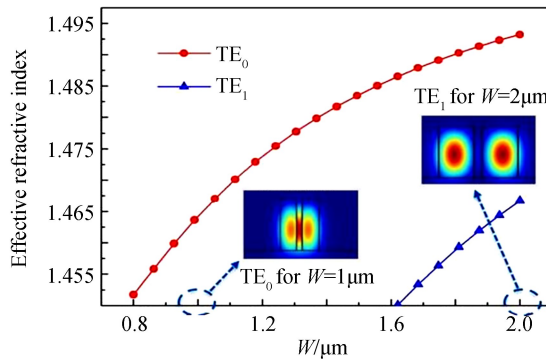


图3 TE_0 与 TE_1 模式的有效折射率随狭缝波导宽度 W 的变化关系
Fig.3 The dependence of the effective refractive index of TE_0 and TE_1 on the slot waveguide width

采用上述计算方法计算狭缝波导在不同狭缝宽度 W_g 的单模条件,结果如表 1 所示.从表中可以看出,随着狭缝宽度从 50 nm 增加至 250 nm,满足单模条件的波导总宽度 W 范围越来越小.这是因为随着狭缝宽度的增加,两个波导更接近平行放置,易产生如图 3(b)所示的光场主要分布于狭缝两侧波导结构内的一阶高阶模式。

表 1 不同狭缝宽度下波导的单模条件
Table 1 The single mode conditions for different slot widths

W_g /nm	Single mode condition/ μm
50	$0.8 \leq W \leq 1.6$
100	$0.9 \leq W \leq 1.5$
150	$1.0 \leq W \leq 1.46$
200	$1.1 \leq W \leq 1.4$
250	$1.1 \leq W \leq 1.36$

1.2 传感灵敏度的计算

狭缝波导的单模条件已经计算得出,但为了确定狭缝波导结构参数,还需要进一步计算波导结构对传感灵敏度的影响.灵敏度越高,表明波导感知待测溶液折射率变化的能力越强.用于传感的微环谐振器,对外界环境的监测是通过对谐振波长漂移的追踪来实现的,其传感灵敏度定义为谐振波长随外界环境的折射率变化,表示为

$$S = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_{en}} = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{en}} = \frac{\lambda_m}{n_g} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{en}} \quad (1)$$

式中, λ_m 是微环谐振器的谐振波长, n_{en} 、 n_{eff} 和 n_g 分别表示外界环境的折射率、模场的有效折射率及在波导中传输的群折射率.波导总宽度 W 、单波导高度 H 、宽度 W_s 及狭缝宽度 W_g 是影响传感灵敏度的重要参数.从

图 4(a)可以看出,随着单波导宽度 W_s 的减小,传感灵敏度增加;单波导高度越高,传感灵敏度越高,但波导高度的增加,使得单波导高宽比随之增大,将进一步增大聚合物波导制备的难度,根据课题组使用聚合物 Ormocore 制备光波导的相关实验基础^[20],选定单波导高度 $H=1\ \mu\text{m}$.4(b)给出了对于不同狭缝宽度 W_g 条件下,传感灵敏度随波导宽度 W_s 的变化关系.从图中可以看出,在特定的狭缝宽度 W_g 条件下,灵敏度随着波导宽度 W_s 的增加而减小.而对于相同的波导宽度 W_s ,狭缝宽度 W_g 在 $0.05\sim 0.25$ 范围内越宽,传感灵敏度越高.这是因为狭缝越宽,越多的光场能量与狭缝中的待测物质相互作用越多.

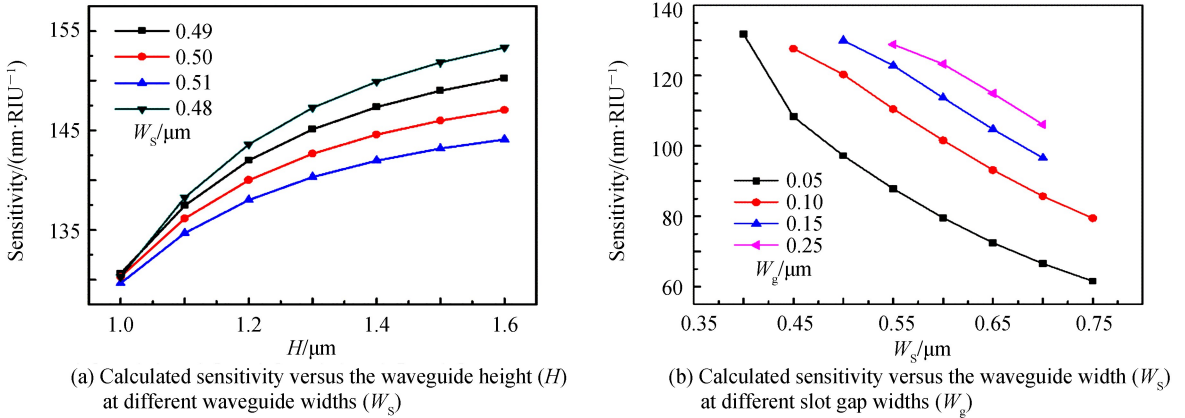


图 4 传感灵敏度与波导高度、宽度及狭缝宽度的关系

Fig.4 The relationships between the sensitivity and the waveguide height, widths and gap widths

仿真分析得到横电模 (TE) 偏振状态下波导有效折射率随待测溶液折射率的变化,如图 5 所示.波导上包层溶液的浓度越高代表折射率越大,因而波导有效折射率也越大.

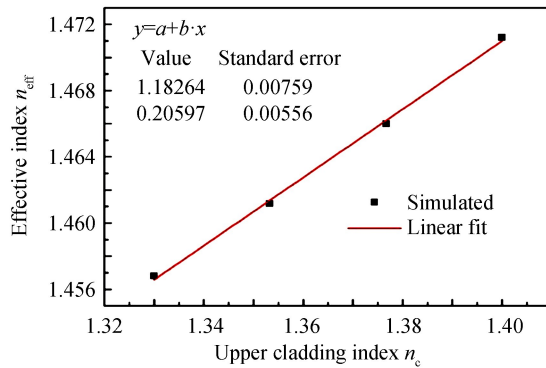


图 5 波导有效折射率随上包层折射率的变化

Fig.5 Effective index of waveguide versus index of upper cladding

根据传感灵敏度仿真优化的结果,并基于聚合物波导的制备工艺经验^[21]可知,狭缝宽度 W_g 太小会增加制备的难度,且不利于狭缝波导中的光场与周围环境的相互作用,选择 $W_g=250\ \text{nm}$,单波导高度 $H=1\ \mu\text{m}$,宽度 $W_s=550\ \text{nm}$,狭缝总宽度 $W=1.35\ \mu\text{m}$,满足波导单模传输的条件,此时传感具有较高的灵敏度 $130\ \text{nm}/\text{RIU}$.

2 狭缝波导的实验制备

聚合物波导可以使用多种加工工艺进行制备,传统半导体光刻-刻蚀制备工艺会使波导表面粗糙度较高而精度有限,使得直接光刻达不到狭缝波导的制备要求.课题组基于聚合物 Ormocore,使用紫外软压印工艺成功制备多类光波导器件^[20-21],继续使用此工艺制备狭缝波导.聚合物基狭缝波导制备工艺的相关研究,将为下一步狭缝波导结构微环谐振器的研究奠定基础.

2.1 母版模的制备

母版模的制备是纳米压印技术中非常重要的步骤,纳米压印是将母版模的结构复制到压印胶的过程.母

版模的材料选择硬质材料硅衬底,具有耐用性高、热膨胀系数小、抗黏性较好的特点.制备过程如图 6 所示,分为曝光、剥离及刻蚀三个重要过程.首先,将衬底清洗后,在 150℃ 的温度下烘烤 2 min.将电子束抗蚀剂 (Arp6200.13) 以 3000 r/min 的转速旋涂在硅片上 60 s, 然后进行曝光、显影,在抗蚀剂上得到设计的狭缝结构.然后,在电子束抗蚀剂上,沉积了一层金属掩膜(10nm Ti 和 80nm Cr),随后进行剥离过程.最后,在硅基片上刻蚀狭缝波导结构,形成母版模.获得的母版模电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图如图 7 所示.

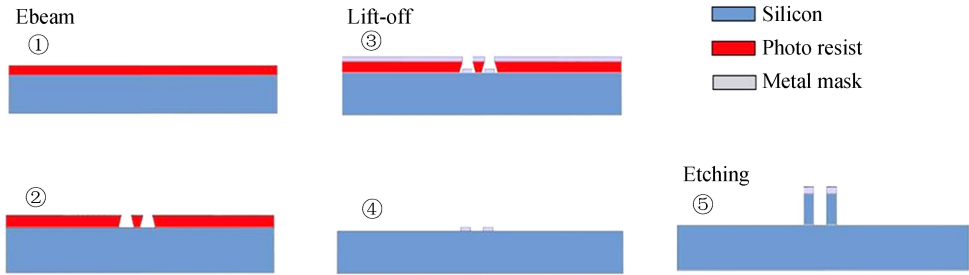


图 6 硅母版模的制备流程

Fig.6 Schematic of the fabrication process of silicon master mold

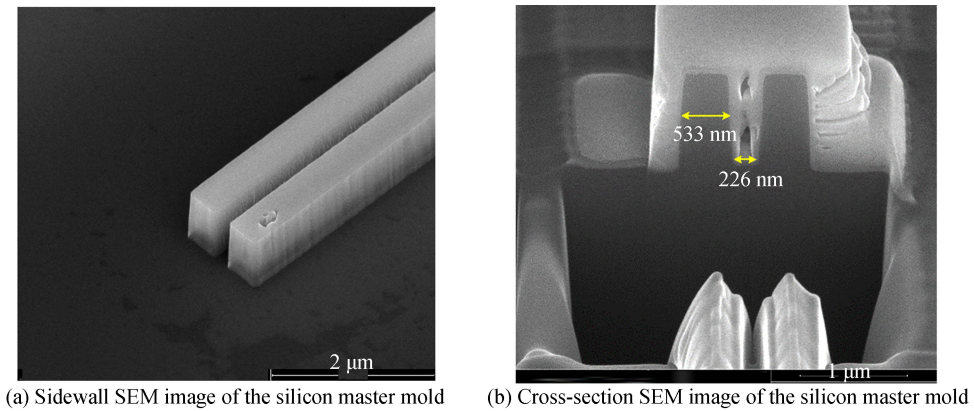


图 7 硅母版模电镜图

Fig.7 The SEM images of the silicon master mold

2.2 PFPE 软模具的制备

波导制备工艺采用紫外软压印技术,在压印过程中常采用的软模具材料是聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 和全氟聚醚 PFPE. PDMS 材料具有紫外透过性、稳定的化学性能及较低的表面自由能^[22],在紫外软压印软模具的制备过程中有很好的表现,但会带来主模具以及波导结构的损害,并且

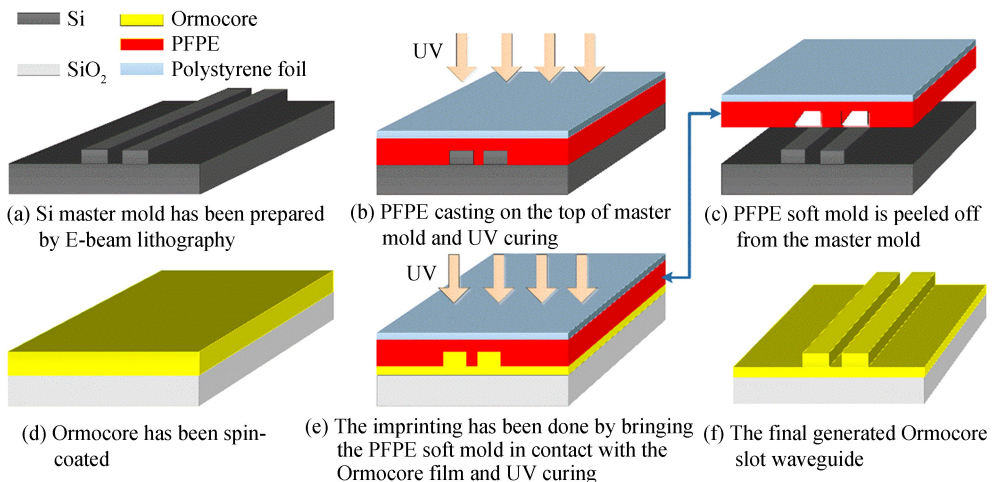


图 8 制备流程图

Fig.8 Schematic of the fabrication process

PDMS 材料污染性较强,易污染同一环境下的其他结构.PFPE 是一种新型的材料,具有更低的表面自由能,更加容易实现压印与脱模,具有更低的污染性,更适应软模具的制备^[23].另外此材料可以采用紫外固化,拥有简单高效的制备工艺.其制备工艺流程如图 8 所示.

首先将 PFPE 单体 MD 700 (Solvay Solexis)和光引发剂 Irgacure 2022 photoinitiator (BASF)以 1 : 20 的比例混合并充分搅拌,然后静置 30 min 使搅拌过程中产生的气泡自然排出.接下来将 PFPE 溶液均匀地倾倒在 Si 母版模上并将其完全覆盖.因为 PFPE 溶液比较软,需要借助机械硬度较高的聚苯乙烯薄膜 (Polystyrene foil)缓慢放置于 PFPE 溶液上面,使用滚筒(roller)在样品上方均匀滚动,使 PFPE 溶液完全填充在母版模里面,且软模具 PFPE 可以精确复制母版模的结构.另外,滚筒所施加的压力也会使 PFPE 溶液与 Si 主模具充分粘连.接下来对含有 PFPE 软模具的样品进行紫外曝光,紫外光强度参数为 35 mW/cm^2 ,曝光时长 50 s,这个过程会使软模具充分固化,然后脱模可获得理想的 PFPE 软模具.

2.3 狭缝波导的制备

首先,将厚度为 $3 \mu\text{m}$ 二氧化硅层的硅片放入 piranha 溶液(浓硫酸与 30%过氧化氢的混合比例为 7 : 3)中放置 30 min,以彻底清除衬底上的有机物,取出硅片后,使用丙酮和异丙酮清洗,然后使用去离子水清洗并用氮气吹干,最后加热蒸发掉残余的去离子水以获得彻底干净的硅片.在旋涂前,将稀释材料 maT 与 Ormocore 以 2.3 : 1 比例混合,使得 Ormocore 材料的粘稠度降低.旋涂具有增加表面附着能力的溶液 OrmoPrime,以达到提高薄膜均匀性的目的.旋涂过程中的转速为 4 500 rpm,时间持续 50 s,保持 180°C 的温度加热以使 OrmoPrime 固化.然后将 Ormocore 溶液倾倒在衬底的表面,以转速 1 000 rpm 旋涂 5 s,然后将转速提高至 3 500 rpm 旋涂 25 s.接下来,将软模具 PFPE 轻轻放置在样品上,过程中无需额外的压力,因为模具的液体表面毛细力及重力产生的吸力使得软模具 PFPE 与薄膜 Ormocore 充分地接触,将 PFPE 上的结构完全压印到薄膜 Ormocore 上面.然后,使用紫外曝光的方式进行固化,整个曝光过程在氮气的环境中进行.曝光的强度为 40 mW/cm^2 ,持续 90 s.最后,将软模具 PFPE 轻轻剥离,并将样品放到加热炉中固化,加热炉的温度为 180°C ,持续 120 min,最终获得良好的聚合物基狭缝光波导器件.

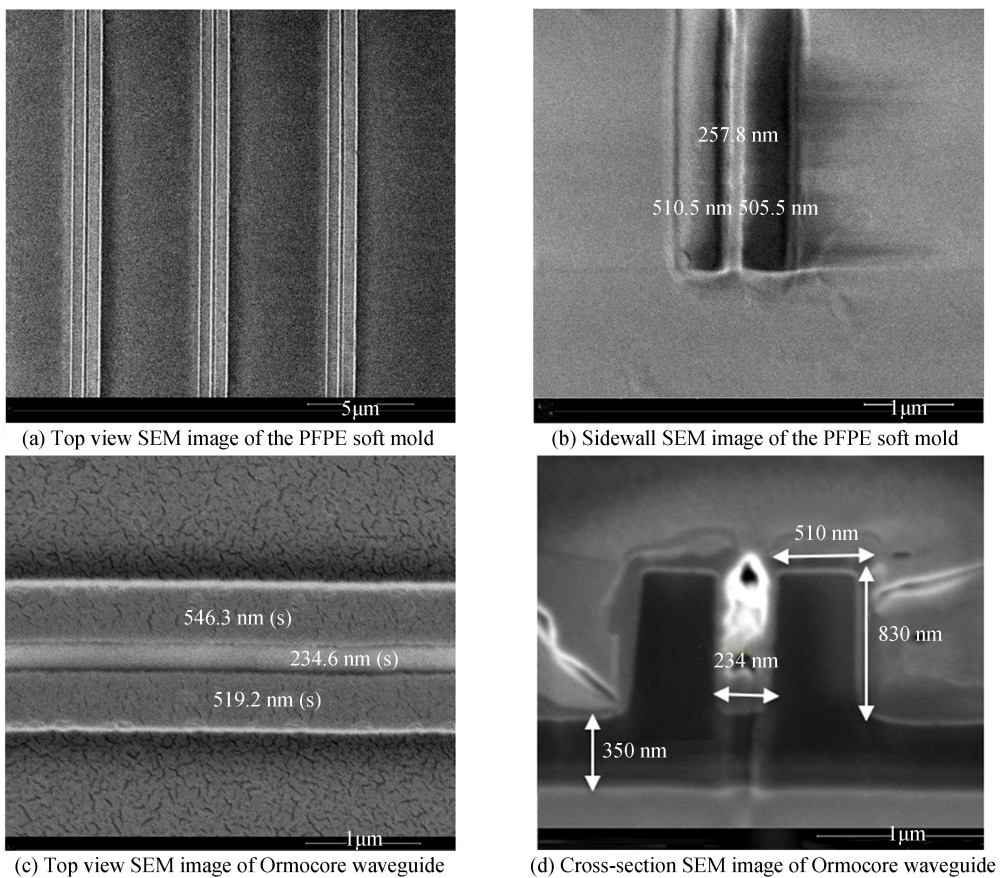


图 9 PFPE 软模具和 Ormocore 波导电镜图

Fig.9 The SEM images of the PFPE soft mold and Ormocore waveguide

图 9(a)和(b)是 PFPE 软模具的电镜图,从图中可以看出,软模具制备良好,对于精度要求较高的狭缝区域能够较为准确地按照设计制备.图 9(c)为 Ormocore 基狭缝波导的整体俯视图,图 9(d)为 Ormocore 基狭缝波导的截面图,在波导上覆盖了材料铂,以达到导出 SEM 中过量的电子的目的,防止电子囤积而影响成像效果.整体而言,通过紫外软压印技术制备出的聚合物基狭缝波导具有较好的效果.波导高度 H 为 830 nm,波导宽度 W_s 为 510 nm,狭缝宽度 W_g 为 234 nm,残留层厚度 H_s 为 350 nm,制备的狭缝波导具有较大的高宽比.

3 结论

对聚合物基狭缝波导的微环谐振器进行了仿真设计,对狭缝波导的制备进行了实验研究.为降低水溶液的吸收损耗,工作波长选择为 890 nm 近红外波段.计算了狭缝波导单模满足的条件,以提高传感灵敏度为目标,优化了狭缝波导高度、宽度和狭缝宽度的结构参数.引入了新型的 PFPE 材料制备软模具,提高了光波导器件制备的成品率,采用紫外软压印工艺制备了聚合物 Ormocore 基狭缝波导,制备的波导基于较高的高宽比及较低的残留层.本文的研究工作可对聚合物基狭缝光波导器件的设计和制备提供有益的参考,下一步将在此基础上制备基于狭缝结构的微环谐振器.

参考文献

- [1] HAN Xiu-you, WU Zhen-lin, YANG Si-cheng, *et al.* Recent progress of imprinted polymer photonic waveguide devices and applications[J]. *Polymers*, 2018, **10**(6): 603.
- [2] XU Q, ALMEIDA V R, PANEPUCCI R R, *et al.* Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(14):1626-1628.
- [3] ZHOU Ying-wu. Experimentally study on high-sensitivity fiber-optic refractometers based on Mach-Zehnder interference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 841-844.
周赢武.基于光纤 M-Z 干涉的高灵敏度液体折射率传感器的实验研究[J].光子学报, 2012, **41**(7):841-844.
- [4] HAN Xiao-nan, HAN Xiu-you, SHAO Yu-chen, *et al.* Study on polymer microring optical biosensor based on slot waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4):196-203.
韩笑男,韩秀友,邵宇辰,等. Slot 结构聚合物波导微环光学生物传感器研究[J].光学学报,2016, **36**(4):196-203.
- [5] XIE Kai-he, ZHANG Xin, ZHANG Xiao-wei, *et al.* A slot microring sensor with feedback spiral waveguide for trace gas CH₄ sensing in mid-infrared region[J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, **15**(1):1-5.
- [6] LEE S, EOM S C, CHANG J S, *et al.* Label-free optical biosensing using a horizontal air-slot SiNx microdisk resonator [J].*Optics Express*, 2010, **18**(20): 20638-20644.
- [7] KA L, XUE F, KAIYU C, *et al.* Integrated refractive index sensor using silicon slot waveguides[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(11):3096-3103.
- [8] DONG Wen, ZOU Yu, DU Ying, *et al.* Ultra-compact bandwidth-tunable microring resonator [J].*Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0823001.
董文,邹雨,杜颖,等.超小型带宽可调谐微环谐振腔[J].光子学报,2018, **47**(8):0823001.
- [9] BARRIOS A, SÁNCHEZ B, GYLFASSON B, *et al.* Demonstration of slot-waveguide structures on silicon nitride / silicon oxide platform[J].*Optics Express*, 2007,**15**(11): 6846-6856.
- [10] AHMADI L, HILTUNEN M, STENBERG P, *et al.* Hybrid layered polymer slot waveguide young interferometer[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10): 10275-10285.
- [11] REZEM M, GÜNTHER A, ROTH B, *et al.* Low-cost fabrication of all-polymer components for integrated photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(2): 299-308.
- [12] SHI F, BAMIEDAKIS N, VASIL'EV P P, *et al.* Flexible multimode polymer waveguide arrays for versatile high-speed short-reach communication links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(13): 2685-2693.
- [13] BETTOTTI P, PITANTI A, RIGO E, *et al.* Modeling of slot waveguide sensors based on polymeric materials[J]. *Sensors*, 2011, **11**(8): 7327-7340.
- [14] HILTUNEN M, HILTUNEN J, STENBERG P, *et al.* Polymeric slot waveguide at visible wavelength[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(21): 4449-4451.
- [15] PÄTZOLD W M, DEMIRCAN A, MORGNER U. Low-loss curved waveguides in polymers written with a femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(1): 263-270.
- [16] HERVÁS J, SUÁREZ I, PÉREZ J, *et al.* Mwp phase shifters integrated in pbs-su8 waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(11): 14351-14359.
- [17] VIPHAVAKIT C, PATCHOO W, BOONRUANG S, *et al.* Demonstration of polarization-independent surface plasmon resonance polymer waveguide for refractive index sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**

(14): 3012-3019.

- [18] BHINGARDIVE V, MENAHEM L, SCHVARTZMAN M. Soft thermal nanoimprint lithography using a nanocomposite mold[J]. *Nano Research*, 2018, **11**(5):2705-2714.
- [19] Datasheet for Ormocore, Microresist Technology.[Online]. Available: <http://www.microresist.de/products/ormocers/pdf/>
- [20] LV Huan-lin, LIANG Yu-xin, WU Zhen-lin, *et al.* Polymer-based microring resonator with the multimode interference coupler operating at very-near-infrared wavelengths[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(13) :2715.
- [21] LIANG Yu-xin, LIU Q, WU Zhen-lin, *et al.* Cascaded-microrings biosensors fabricated on a polymer platform[J]. *Sensors*, 2019, **19**(1) :181.
- [22] HILTUNEN J, LIEDERT C, HILTUNEN M, *et al.* Roll-to-roll fabrication of integrated PDMS-paper microfluidics for nucleic acid amplification[J]. *Lab on A Chip*, 2018, **18**(11):1552-1559.
- [23] MASCIULLO C, SONATO A, ROMANATO F, *et al.* Perfluoropolyether (PFPE) intermediate molds for high-resolution thermal nanoimprint lithography[J]. *Nanomaterials*, 2018, **8**(8):609.