

Micro-Replication Techniques of Polymer Optical Grating Waveguides*

LIU Yueming^{1*}, ZHANG Shaojun²

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on Nano-imprint Lithography and micro-replication process, a kind of flexible polymer grating waveguides was fabricated successfully. This novel grating waveguides could be used in strain sensing of human medical catheter and related applications. Process of this grating waveguide was presented and several skills were discussed. Further process with coupled optical fiber was discussed for suitable sensing application. By using silicon mould and UV-replication method, polymer grating waveguides with core size $4\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ and pitch $0.75\ \mu\text{m}$ were fabricated successfully.

Key words: polymer; polymer grating waveguide; micro replication process; micro deflection measurement

EEACC: 7230M; 4145; 4145

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.10.009

聚合物光栅光波导器件的微复制技术*

刘月明^{1*}, 张少君²

(1. 中国计量学院光电学院; 杭州 310018;
2. 中国计量学院理学院; 杭州 310018)

摘要: 采用纳米压印微复制技术方法, 研制了一种新型的聚合物柔性光栅光波导敏感器件, 该器件可用于介入式医用导管的微弯挠曲监测或类似场合的微变形监测。重点阐述了聚合物柔性光栅光波导器件的微复制模具和器件微复制的工艺方法, 并对制备工艺技术中的关键技术问题进行了讨论, 讨论了测试光纤耦合一体化光栅波导器件的工艺方法。最后利用硅微模具和紫外固化介质材料, 成功制备出了截面尺寸为 $4\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 、光栅周期为 $0.75\ \mu\text{m}$ 的聚合物柔性光栅光波导器件。

关键词: 聚合物; 光栅光波导; 微复制工艺; 微挠曲监测

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)10-1408-04

现有介入式医用导管是利用操作人员的外力介入到人体病变部位的, 是一种被动方式, 柔性的医用导管在腔道组织上滑行时, 对腔道壁面产生压力, 有可能对人体内部软组织造成擦伤和拉伤, 一旦这个压力超过一定的阈值, 还可造成组织破损和穿孔, 鉴于这种情况, 有必要研制一种柔性的微弯曲检测敏感器件, 用以检测体内导管弯曲方向和弯曲程度, 实现对介入式导管进入人体后的主动控制, 使得治疗更具安全性、准确性和便利性^[1]。本文的柔性光栅光波导敏感器件采用聚合物材料制作, 具有优良的柔韧性和生物安全性, 同时继承了光纤光栅敏感器件高灵敏度的检测能力, 不仅可以应用于被检测微小系统而不附加机械刚度, 而且适合于任意形状的复杂表面, 是一种十分理想的微弯曲敏感检测器件^[2-3]。虽然目前光纤光栅技术已经很成熟, 但

是由于一方面石英材料光纤与体内导管相比不够柔软, 光纤光栅的引入会附加体内导管刚度, 从而降低体内导管的操纵灵活性, 第二方面是因为石英材料易断, 当用于介入式医用导管进入人体时, 它远不如聚合物材料的安全性高和生物相容性好, 故实际上光纤光栅波导并不能满足此时的需要。另外, 柔性光栅光波导敏感器件作为一种新型的微系统形变的敏感探测元件, 不但可用于介入式医用导管的微弯检测, 也可在其它类似技术领域得到广泛应用, 如: 微机器人手臂的动作测控、微系统表面智能检测蒙皮和人体智能内窥镜电子感测系统等^[4-6]。

平面光栅光波导通常采用半导体光刻工艺加工, 基于半导体材料进行制作, 但这种光刻工艺方法不仅价格昂贵、制作周期长, 而且不适合柔性平面光栅光波导的批量加工需要。在本文的研究中, 采用

项目来源: 浙江省自然科学基金项目资助(Y1091078)

收稿日期: 2010-03-24 修改日期: 2010-05-30

了基于纳米压印技术的微复制方法实现柔性光栅波导器件的制备,该方法借鉴了模具复制技术的思想,非常适合于柔性光栅平面光波导批量制备的技术要求,而且模具复制技术是一种低成本的工艺技术,因此较之传统的半导体光刻技术方法而言,纳米压印微复制技术制备柔性光栅光波导敏感器件是一种周期短、高产率、低成本的制备方法。

纳米光刻微复制技术于 1995 年由美国明尼苏达大学的教授 Zhou 提出,文献报道的微器件复制尺寸可以达到 10 nm,具有极高精度的加工能力,可以低成本批量生产纳米尺度的微器件,是未来超大规模集成光电子线路的潜在应用技术^[7-8]。本文在对光栅光波导微弯检测原理分析的基础上,重点研究了聚合物柔性光栅光波导器件的微复制技术方法,并对微复制工艺技术中的几个关键问题进行了讨论。

1 光栅光波导器件微弯检测的原理

如图 1 所示为光栅光波导用于微机械薄膜微挠曲检测的原理示意图。在图中的检测方案中,三种光栅结构的周期各不相同,特征光波长分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 ,光栅周期为 Λ_1 、 Λ_2 和 Λ_3 ,图中入射光为宽带光源 ASE,当入射光遇到光栅结构时,会出现特定波长光的反射,反射光的波长可表达为

$$\lambda = 2\Lambda \cdot n_{\text{eff}} \quad (1)$$

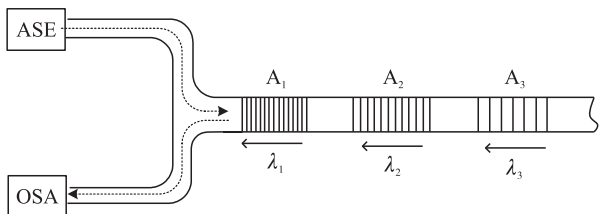


图 1 光栅光波导检测微机械薄膜挠曲的原理示意图
式中 Λ 为光栅周期, n_{eff} 为光波导的等效折射率。

将光栅光波导安装在待测微机械薄膜的表面,当微机械薄膜在外界待测参量作用下发生微弯挠曲时,其上的光栅光波导的光栅周期会发生相应变化,从而造成由光栅光波导反射回的光谱线发生移动,假设薄膜微挠曲导致的波导光栅周期变化为 $\Delta\Lambda$,则由式(1)可知,反射光谱线峰值的平移量 $\Delta\lambda$ 可以表达为

$$\Delta\lambda = 2 \cdot \Delta\Lambda \cdot n_{\text{eff}} \quad (2)$$

用光谱仪或波长解调电路测得此光谱线的平移量 $\Delta\lambda$,就可以确定待测薄膜挠曲量的大小。在微机械薄膜的不同位置使用不同周期的光栅光波导,可以测得相应位置的微弯挠曲状况。如果在薄膜弯曲的对称部位成对布置光栅光波导器件,不仅可以测得微机械薄膜的微弯挠曲量,而且还可以测得其微弯挠曲

的方向,这一点在体内医用导管应用中尤为重要。

2 柔性光栅光波导的微复制工艺

2.1 制备工艺

纳米压印微复制模具的微细加工技术,采用的工艺手段为电子束光刻(EB)结合快速原子束加工(FAB)和反应离子刻蚀技术加工(RIE),以满足纳米压印模具的加工精度要求,其工艺流程如图 2(a)所示,为保证微复制器件的脱模质量,必须保证成型微模具表面和侧壁的光滑。对于柔性光栅器件的微复制工艺,如选择热压印聚合物类材料,首先需要将聚合物材料通过加热转变为液态,该转变温度一般在 160 摄氏度以下,然后热压印后经自然降温固化成型^[9];如选用可紫外固化的介质液态材料,复制方法是:首先将紫外固化液态介质有效填充微模具,再对复制结构进行紫外辐照固化,然后将微器件脱模,从而形成光栅光波导的光栅结构^[10]。对比两种方法的特点,本文采用了紫外固化的器件复制方法。

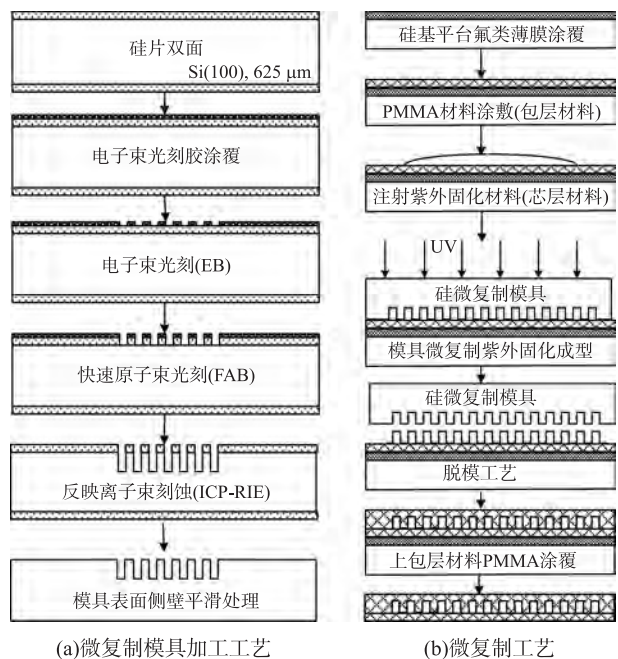


图 2 光栅光波导器件的纳米压印微复制模具及复制工艺流程

纳米压印形成的是光栅光波导器件的芯层部分,要形成光波导结构,必须将另一种相匹配的包层材料覆盖到已成型的波导光栅结构上,制备成相应的光栅光波导器件结构。将包层材料覆盖到波导光栅结构上可以采用光刻胶旋涂方法,并事先对硅基复制平台涂覆氟类材料以降低表面结合能,以有利于器件的脱模工艺。如选择硅片作为器件微复制工作平台,聚合物 PMMA 材料作为光栅波导包层材料,紫外固化液体介质材料作为光栅波导芯层材料,光栅光波导的整

个微复制成型工艺流程如图2(b)所示。

2.2 制备工艺的技术关键

该工艺流程的技术关键主要有两点,一是制作满足柔性光栅光波导器件复制要求的微复制模具。目前纳米压印微复制技术的加工精度已达5 nm,完全可以满足微复制模具的加工精度要求。实际加工时需要优化其关键工艺电子束光刻的精度,为此需要优化选择光刻胶及稀释浓度,并优化电子束的曝光强度和时间;二是器件微模具的有效填充和脱模工艺,为保证纳米压印微模具的有效填充,可以选择低粘度的液态介质材料,并在真空室里进行,同时施加必要的压力或超声振动,这样可以避免微模具由于填充过程中的气泡而无法有效填充。关于脱模工艺,选用与微模具材料具有低结合能并具有适合固化收缩率的介质材料,也可对微模具表面预处理以降低表面结合能^[11]。

光栅光波导的包层采用旋涂法工艺成型,旋涂法在半导体工业中常用于将聚合物制成大面积的薄膜,一般是将有机材料溶于有机溶剂中,根据所要求的膜层厚度配成相应的浓度,通过控制旋涂的速度和时间,使材料能均匀的覆盖在基底表面^[12]。光栅光波导包层的旋涂工艺关键是避免旋涂过程中混入气泡,为此必须实现对包层材料进行真空脱气处理。

2.3 制备结果

按照前述的工艺方法,加工制作的光栅光波导器件的纳米微模具及复制品效果的 SEM 照片如下,图3为纳米压印微模具的 SEM 图片,该模具通过电子束光刻结合反应离子束刻蚀工艺(ICP-RIE),在硅基上加工而成,其光栅周期为0.75 μm,光栅截面深度为4 μm,宽度为20 μm,对应的光栅反射波长峰值大致在1.5 μm左右。图4为聚合物介质材料复制品的 SEM 图,聚合物芯层选用在1.5 μm处光折射率为1.46的UV固化胶(牌号:ZPU12-460),包层选用1.5 μm处光折射率为1.445的UV固化胶(牌号:ZPU12-445),所制备的聚合物光栅光波导

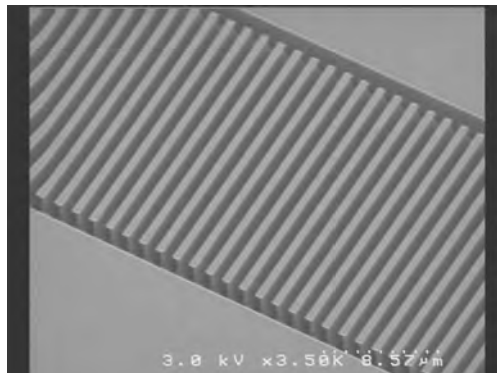


图3 纳米压印微模具的 SEM 图

薄膜器件具备较好的柔性。

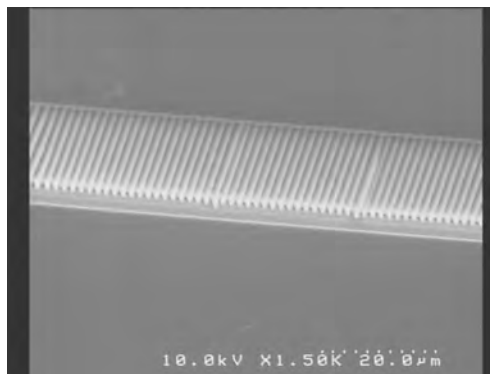


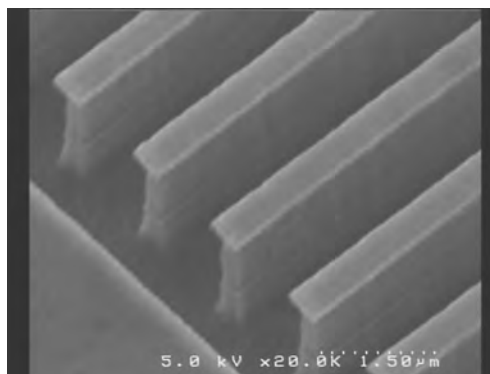
图4 聚合物材料复制品的 SEM 图

3 器件微复制工艺技术讨论

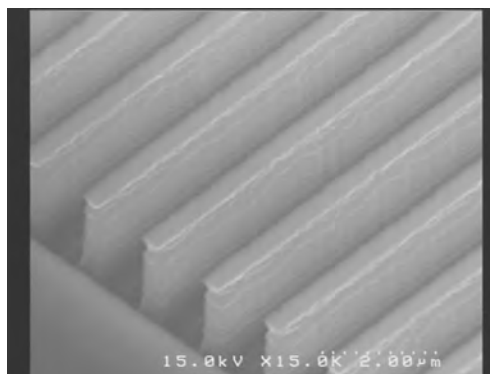
由于微机械模具的光栅结构尺寸已经达到纳米级别,因此其工艺设计和工艺加工具有相当的难度,实验中经过了反复的实验探索,最终才取得比较满意的结果。下面将对其中的几点关键工艺进行讨论和总结。

3.1 SiO₂ 热生长和 BHF 腐蚀平滑微模具侧壁的效果

为了保证器件的微复制效果和顺利脱模,有必要对微模具的侧壁进行平滑处理,实验中采用了先对微模具热氧化,然后再用缓冲氢氟酸进行腐蚀的方法,取得了较好的效果,图5(a)和(b)分别为平滑前后的微模具局部效果 SEM 图片。



(a)平滑前SEM图片



(b)平滑后SEM图片

图5 热氧化结合 BHF 腐蚀平滑方法的 SEM 效果图片

3.2 器件光纤耦合复制工艺

如图 2(b) 光栅波导微复制器件有效波导截面只有几个微米,目前复制器件有效长度受限于工艺条件也只能达到几个毫米长,因此无法对成型光栅波导器件的性能进行直接测试。下一步将考虑采用波导-光纤耦合成型方法,将测试光纤与光栅波导一体化耦合复制固定,耦合光纤采用经典的 V 型槽定位方法,为保证光纤与光栅波导截面尺寸和传输模场的匹配,需要进行相应的优化设计^[13]。光栅波导光纤耦合一体化复制工艺过程如图 6 所示,图 6 工艺与图 2(b) 工艺的不同之处在于复制时将测试光纤与波导一体化固定成型,这样成型后的光栅波导器件可以方便地进行测试。为了保证光纤与微复制光栅波导器件的耦合效率,除保证光纤与波导位置准确定位之外,还可以采用对光纤端面微细加工的方法提高耦合效率,如微加工光纤端面制作微耦合透镜或光纤端面配接自聚焦耦合透镜等。

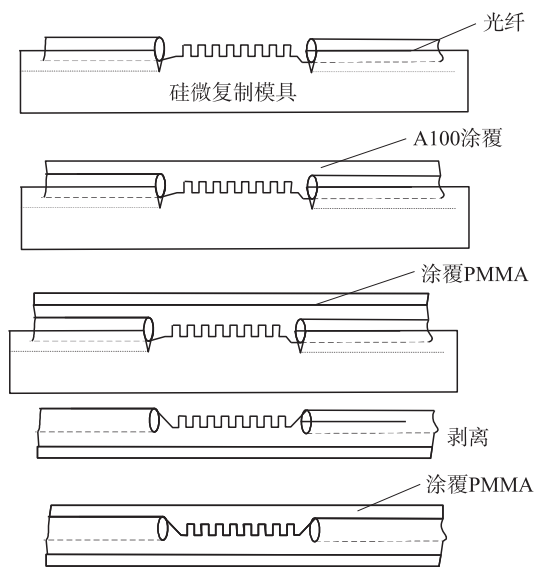


图 6 带有耦合光纤的模具微复制技术工艺

4 结束语

本文基于纳米压印微复制技术和硅模具微复制技术,对截面尺寸为 $4\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 、光栅周期为 $0.75\ \mu\text{m}$ 的聚合物柔性光栅光波导微器件成功进行了复制加工。该复制技术共分为两部分:一是微机

械硅复制模具的加工,二是利用加工好的微模具进行光栅光波导器件的复制。在硅微模具的工艺加工过程中,通过优化设计,运用 EB 光刻、FAB 腐蚀和 ICP-RIE 技术成功制作了满足要求的硅微机械模具,得到了侧壁光滑的微复制模具;在光栅光波导器件的微复制工艺工程中,采用了紫外介质材料的紫外固化成型技术,此过程中需要选择微复制介质材料使之满足光栅光波导的光学性能要求,同时需要兼顾微复制过程中的模具填充和有效脱模问题。最后对光纤耦合一体化测试器件工艺进行了讨论。

参考文献:

- [1] 刘道志. 微创介入医疗器械-国产化机会与挑战,中国医疗器械信息,2008,14(3):1-3.
- [2] Haga Y, Esashi M. Biomedical Microsystems for Minimally Invasive Diagnosis and Treatment. Proceedings of Biomedical Applications for MEMS and Microfluidics [J]. IEEE, January, 2004, 92(1): 98-114.
- [3] 张震,李冬松,张斌. 一种新的智能内窥镜导航系统[J]. 生命科学仪器,2007,5(8):52-55.
- [4] Dave A, Celik-butler, Z Bulter D P. Micromachined Infrared Sensors with Device-Level Encapsulation [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 1(5783): 460-469.
- [5] 刘伟庭,方向生,陈裕泉. 仿生“蚯蚓”机器人的 SMA 执行器实现[J]. 传感技术学报,2005,18(3):623-626.
- [6] 米智楠,樊智敏. 内窥镜检查机器人柔性移动机构设计[J]. 机械设计,2004,21(5):15-16.
- [7] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution [J]. Science, 1996, 272(5258): 85-87.
- [8] 兰红波,丁玉成,刘红忠,等. 纳米压印光刻模具制作技术研究进展及其发展趋[J]. 机械工程学报,2009,45(6):1-13.
- [9] Dutta R K, van Kan J A, Bettiol A A. Polymer Microlens Replication by Nanoimprint Lithography Using Proton Beam Fabricated Ni Stamp [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 260: 464-467.
- [10] 罗康,段志勇. 纳米压印技术进展及应用[J]. 电子工艺技术, 2009,30(5):253-257.
- [11] Pai I-Ting, Leu Ing-Chi, Hon Min Hsiung. Nanostructures Prepared on Polyimide Films by Nanoimprinting with the Assistance of Residual Solvent [J]. J. Micromech. Microeng, 2006, 16: 2192-2196.
- [12] 顾盼,刘景全,孙洪文,等. 基于旋涂的纳米压印技术的研究[J]. 微细加工技术,2005,4:21-24,36.
- [13] 杨笛,余金中,刘忠立. 光纤与波导器件的连接技术[J]. 激光与红外,2003,33(4):306-310.



刘月明(1965-),男,博士,中国计量学院光电学院教授,先后主持完成省部级基金等各类科研项目十余项,发表论文四十余篇,其中近二十篇被三大检索收录,主要研究方向为微光机电系统和光纤传感技术, liuyym@cjlu.edu.cn;



张少君(1962-),女,中国计量学院理学院高级实验师,参与省部及厅局级科研项目六项,发表学术论文十余篇,主要研究方向为光纤技术和物理实验技术, zhsj@cjl.u.edu.cn.