

文章编号:1002-2082(2007)02-0236-04

微细笔直写聚合物条形光波导的研究

李金洪, 董林红, 王泽敏, 许德胜, 朱大庆, 曾晓雁

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 提出一种采用微细笔直写技术直写聚合物光波导的简便方法,利用该技术成功直写出了氟化聚酰胺条形光波导,并着重研究了气体压力和直写速度对波导宽度的影响规律。实验结果表明:直写获得的条形波导的边缘整齐、表面光滑,而且不存在小孔等缺陷或杂质。当其他工艺参数不变的情况下,波导宽度随着气体压力的增加而增大,随着直写速度的增大而减小。微细笔直写获得的条形光波导成功地实现了通光,在波长为1 550 nm处的最小传输损耗为0.59 dB/cm。

关键词: 集成光学;聚合物光波导;直写技术;微细笔

中图分类号:TN256

文献标志码:A

Direct writing of polymer optical waveguides by micro-pen

LI Jin-hong, DONG Lin-hong, WANG Ze-min,
XU De-sheng, ZHU Da-qing, ZENG Xiao-yan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A simple method of direct-writing polymer waveguides by micro-pen is reported. The fluorinated polyamide strip waveguide were fabricated successfully by this technology, and the relationship of the gas pressure and writing speed with the waveguide width were established. Experimental results show that the direct-writing method can fabricate high quality waveguides. The waveguides have the merits of straight edge, smooth surface, no ventage and impurity. Keeping other parameters unchanged, the waveguide width increases with the increase of the gas pressure, but decreases with the increase of the direct-writing speed. The waveguides successfully achieve the function of guiding the light. The minimum propagation loss measured is 0.59 dB/cm at 1 550 nm.

Key words: integrated optics; polymer optical waveguide; direct writing technology; micro-pen

引言

聚合物光波导的传统制作方法很多,如反应离子刻蚀、光漂白法、离子注入法和模压成型工艺等。这些方法具有工艺流程复杂、制作周期长、效率低等缺点,而且所设计的波导一经定型,就难以进行修正,如果出现设计或加工错误,就需要重新制作新的掩模板,按照标准的工艺过程重新加工,从而

额外增加了成本。因此近年来,人们在不断探索柔性化制造光波导的新方法和新工艺^[1-5]。

直写技术(direct writing)是近年来在加工制造领域里倍受人们关注的一种快速制造技术。与传统方法相比,它具有以下一些特点:无需任何掩模,柔性化程度高;加工精度高,速度快;可靠性程度高;成本低;适用材料的范围广泛。利用直写技术,

收稿日期:2006-11-22; 修回日期:2006-12-11

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”(2005AA311030);国家自然科学基金(50575086)

作者简介:李金洪(1976—),男,四川汉源人,硕士研究生,主要从事激光微制造微电子器件的研究。

联系人曾晓雁 E-mail:xyzeng@mail.hust.edu.cn

设计人员足不出户,就可以在数小时内将软件设计的图形加工成实际的产品,从而大大缩短了产品的制作周期^[6]。因此,直写技术特别适合于产品的研究与开发阶段,在小规模生产和实验研发中发挥传统方法难以发挥的作用。同时,也在大规模的生产上向传统工艺提出了挑战。正因为上述优点,直写技术无模具成形、微机械和微器件的制造、生物芯片、材料合成等领域得到了广泛的应用^[7]。

根据能量源和作用方式不同,直写技术可分为激光直写、极化诱导直写、电子束直写和质子束直写技术等,它们都具有直写技术独有的工艺简单和柔性化程度高的优点。目前许多学者对上述直写技术制备光波导进行了大量研究,取得了许多有价值的研究成果^[8-11]。尽管如此,目前的直写技术所用的设备都较为昂贵,制造成本较高。本文提出了一种低成本、短周期、高效率的微细笔直写光波导的新技术,通过控制微细笔直写的工艺参数实现了氟化聚酰亚胺(PI)条形光波导的制作;同时对条形波导的外形尺寸、表面形貌和传输损耗进行了研究。

1 实验方法与设备

1.1 微细笔直写装置及原理

本实验的条形波导芯层由微细笔直写系统完成。该系统由气源、压力控制器、微机控制器、微细笔、数控机床等主要部件构成。其中,微细笔和LMS II型数控工作平台均由本实验室自行设计研发而成。微细笔的直写原理如图1所示。图1中,气源用来提供微细笔工作所需要的气体压力,以保证微细笔能将材料从笔尖正常写出;压力控制器主要

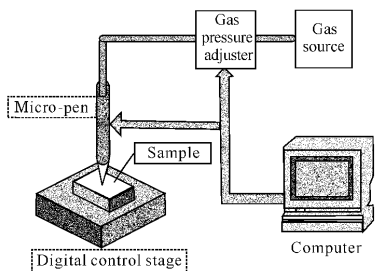


图1 直写聚合物光波导的系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of polymer optical waveguide direct-writing system

是控制气流的通断和调节工作气体的压力,以控制波导的成型宽度和高度。微细笔的运动和起停,以及气体压力的通断均由计算机控制。直写前,制

作波导用的氟化聚酰亚胺预置于微细笔的料腔内。直写时,打开工作气源,启动机床和微机控制器,微细笔就可以根据软件设计的图案,在基片表面直写出条形波导。

1.2 实验方法

实验中采用表面生长了一层 SiO_2 的单晶硅作为直写条形光波导的基片。 SiO_2 层采用热氧化的方法进行生长,厚度约为 $15\ \mu\text{m}$ 。直写前,先将基片在浓硫酸中煮沸 $10\ \text{min}$,然后用去离子水清洗数遍,以便彻底去除基片表面的污染物。波导芯层材料为氟化聚酰亚胺(PI),在 $1\ 550\ \text{nm}$ 通讯波长处该材料的折射率 $n=1.56$ 。条形波导直写完毕后用电阻炉对波导进行热处理,使材料发生聚合反应,形成较稳定的波导材料。为此,先在 $120\ \text{C}$ 的温度下保温 $2\ \text{h}$,然后升温到 $350\ \text{C}$ 保温 $20\ \text{h}$,整个热处理过程中的升温速度均控制在 $1\ \text{C}/\text{min}$ 。热处理完毕后,关闭电阻炉让样品随炉冷却。实验中,所有的条形波导均利用空气作为上包层,整个波导的制备过程均在 100 级的超净间内完成。

波导制作完毕,用Nikon Epiphot 300金相显微镜和SIRION 200扫描电镜观察条形波导的显微形貌;用DEKTAK II A型探针式轮廓仪测量条形波导的轮廓;用Newport自动无源六维对准设备和Agilent 8164A波导测试系统对条形波导的传输损耗进行测试。

2 实验结果与讨论

2.1 微细笔直写工艺对波导宽度的影响

用微细笔直写聚合物光波导的制作工艺中,笔尖与基片的间距 d 、气体压力 P 和直写速度 V 是3个非常关键的工艺参数,它们的变化对波导的尺寸和形貌有较大影响。笔尖与基片的间距 d 直接决定着波导的高度。根据微细笔的设计特点,实验中笔尖与基片的间距 d 均为 $6\ \mu\text{m}$ 。因此,本文将着重研究气压 P 和直写速度 V 对波导宽度的影响。图2是直写速度为 $2\ \text{mm}/\text{s}$,其他实验条件相同时,条形波导的宽度随气体压力的变化规律。很明显,随着气体压力的不断增大,条形波导的宽度也随着变宽。当压力 $P=6\ \text{kPa}$,其他实验条件相同时,直写速度 V 对波导宽度的影响规律如图3所示。从图中曲线可以明显看出波导的宽度随着直写速度的变快而不断减小。

由于微细笔的出口孔径一定,单位时间内从笔尖流出的浆料的量只与气压相关。当直写速度、笔

尖与基片的间距 d 等工艺参数不变时,直写用的气体压力越大,作用在笔筒内浆料上的压力也越大,单位时间内从笔尖流出的浆料越多,所成型的波导越宽;同样,当压力一定和笔尖与基片的间距 d 等工艺参数不变时,单位时间内从笔尖流出的浆料一定,直写速度越大,单位时间所写的波导越长,根据质量守恒原理,则此时成型的波导越窄。

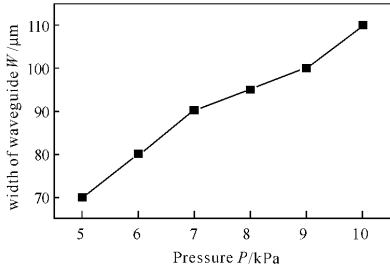


图2 气体压力对波导宽度的影响曲线

Fig. 2 The effect of gas pressure on waveguide width by direct writing

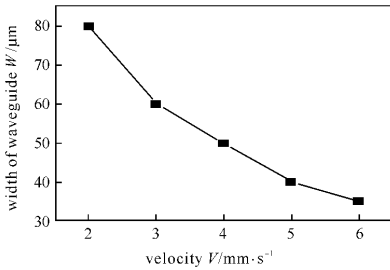


图3 直写速度对波导宽度的影响曲线

Fig. 3 The effect of writing velocity on waveguide width by direct writing

同时,我们在实验中对比不同速度参数下的波导显微形貌发现,当在较低速度直写波导时其成型质量比较好,波导连续性比较好,不但边沿整齐,而且表面也比较平滑,表明氟化聚酰亚胺材料适合在低速状态下成型。波导在成型时,由于高分子聚合物材料较大的表面张力的作用,使其表面轮廓成平滑的弧形,这有利于光在波导内传输。同时波导芯层和下包层的结合面比较紧密和牢固,结合力比较大,这也有利于在集成器件中应用。在本实验条件下,经多次实验发现采用速度 $V = 2 \text{ mm/s}$ 直写时比较适合波导成型。

2.2 条形波导的形貌和传输损耗

图4(a)是用微细笔直写的多条条形波导的显微照片,所写的波导都非常连续,未出现任何断点;

整个波导沿长度方向的宽度非常均匀,质量良好。图4(b)为单根波导在1000倍下的微观形貌,可以看出,即使在高放大倍数下,波导的表面都很光滑,不存在小孔等缺陷或杂质。而且波导侧壁无明显起伏,准直性很好,有利于光的传输。

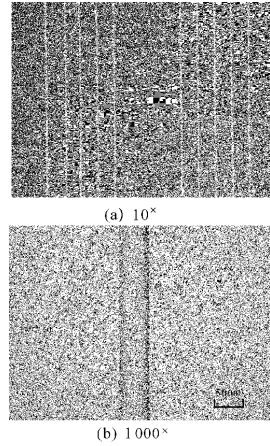


图4 微细笔直写的PI条形光波导的显微照片

Fig. 4 Micrographs of the PI waveguides with 10 times magnification and 1000 times magnification

图5是微细笔直写的条形波导的典型轮廓曲线,测试显示波导的高度为 $6.3 \mu\text{m}$,宽度为 $100 \mu\text{m}$ 。从图5可以看出,轮廓曲线无明显的峰值和波动,说明所成型的聚合物波导表面比较平滑。

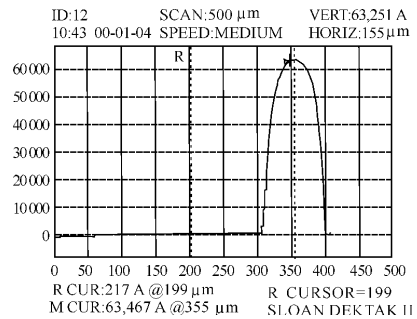


图5 波导的横向轮廓曲线

Fig. 5 Waveguide cross-sectional profile curve

氟化聚酰亚胺光波导的SEM照片如图6所示,从图6可以看出聚合物波导质量比较好,表面无凹坑、凸起和气孔等明显缺陷。

利用 Newport 自动无源六维对准设备和 Agilent 8164A 波导测试系统测试波导的传输损耗。解理后的波导样品通光远场光场照片如图7所示。由通光图片可以看出,光波导对光场限制得比

较好。采用截断法测试了样品的传输损耗,在波长为 1 550 nm 处的损耗为 0.59 dB/cm。

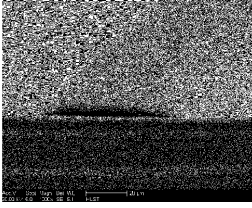


图 6 聚合物波导 SEM 照片

Fig. 6 SEM image of the polymer waveguide

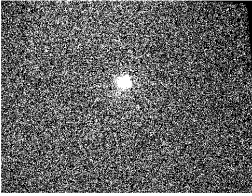


图 7 波导光场远场照片

Fig. 7 The far field photo of the waveguide light field

3 结论

1) 通过微细笔直写系统在 Si 基 SiO₂ 下包层上可以直写出质量良好的聚合物条形光波导。证明了此种工艺方法可以用于聚合物波导的制作。

2) 在直写工艺参数中,着重研究了气体压力和直写速度对波导宽度和形貌的影响。在其他条件不变的情况下,波导宽度随压力的增加而增大,随直写速度的增大而减小。通过对不同直写参数下得到的波导的微观形貌进行分析,本实验条件下聚合物材料适合在低速下直写成型。在综合考虑制作效率和波导质量的情况下, $V=2$ mm/s 是最佳的工艺直写速度。

3) 用微细笔直写系统直写得到的聚合物光波导成功地实现了通光,并且在波长为 1 550 nm 处的波导损耗为 0.59 dB/cm,在通讯波段其较小的损耗能满足光集成器件的使用要求。

参考文献:

- [1] 韩晓星,朱大庆,宁娜,等.用于光波导的高性能聚合物薄膜制备工艺研究[J].激光技术,2004,28(3):315-318.
HAN Xiao-xing, ZHU Da-qing, NING Na, et al. Investigation on the preparation of advanced polymer thin film for waveguides [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 315-318. (in Chinese)
- [2] WONG W H, ZHOU J, PUN E Y B. Low-loss

polymeric optical waveguides using electron-beam direct writing [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78 (15): 2110-2112.

- [3] WONG W H, PUN E Y B. Polymeric waveguide wavelength filters using electron-beam direct writing [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79 (22): 3576-3578.
- [4] CHOI Choon-Gi. Fabrication of optical waveguides in thermosetting polymers using hot embossing [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(7): 945-949.
- [5] 王建忠,张萍,刘永智.一种新型光交叉连接器的设计[J].应用光学,2006,27(1):28-31.
WANG Jian-zhong, ZHANG Ping, LIU Yong-zhi. The design of a novel OXC [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1): 28-31. (in Chinese)
- [6] 刘建静,郝伟,刘锴,等.光折变聚合物材料在光电子技术中的应用[J].应用光学,2006,27(3):239-241.
LIU Jian-jing, HAO Wei, LIU Kai, et al. Application of photorefractive polymer in electrooptics [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27 (3): 239-241. (in Chinese)
- [7] 王浩敏,李佐宜,林更琪,等.光波导用玻璃薄膜的制备及其性能研究[J].光电子技术与信息,2002,15(1):28-31.
WANG Hao-min, LI Zuo-yi, LIN Geng-qi, et al. Preparation and characteristics of glass thin-film for optical waveguides deposited by the magnetron sputtering [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(1): 28-31. (in Chinese)
- [8] 祁小敬,刘敬伟,李祥友,等.一种激光微细熔覆直写布线的新技术[J].中国激光,2004,31(7):883-887.
QI Xiao-jing, LIU Jing-wei, LI Xiang-you, et al. A new technology of conductive line preparation by laser micro-cladding metal-organic pastes on PCB board [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31 (7): 883-887. (in Chinese)
- [9] 严清峰,余金中,陈少武.从OFC 2003看平面光波导器件的发展动向[J].光电子·激光,2003,14(10):1124-1128.
YAN Qing-feng, YU Jin-zhong, CHEN Shao-wu. Recent progress on planar optical waveguide devices in OFC 2003 [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(10): 1124-1128. (in Chinese)
- [10] 虞瑛英.平面集成光波导器件概况及市场分析[J].激光与红外,2003,33(5):390-391.
YU Ying-ying. General situation and market analysis of integrated planar optical waveguide device [J]. Laser & Infrared, 2003, 33(5): 390-391. (in Chinese)
- [11] SHIODA T. Fluorinated polyimide waveguide film fabricated by replication process and its application to optical interconnection [J]. SPIE, 2003, 5246: 131-142.