

玻璃基片上双层多模光波导的制备

郝寅雷¹, 曾福林², 王志坚², 胡文学¹, 陈斯聪¹, 杨建义¹, 王明华¹

(1. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027;
2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 在光学玻璃基片上制作了双层掩埋式多模光波导芯片, 这种芯片中的上、下两层光波导均通过熔盐离子交换和电场辅助离子迁移形成。对光波导的横截面以及输出光斑进行了观察, 并进行了损耗和串扰测试。研究结果表明: 双层多模光波导芯片中上、下两层光波导芯部横截面尺寸分别为 $29\ \mu\text{m}\times 19\ \mu\text{m}$ 和 $31\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$; 两层波导的输出光斑尺寸相互匹配; 两层波导传输损耗分别为 $1.00\pm 0.32\ \text{dB/cm}$ 和 $0.78\pm 0.35\ \text{dB/cm}$; 两层光波导之间的串扰在 17.7dB 左右。这种玻璃基片上的双层多模光波导可以使板级光互连的互连密度增大一倍, 提高 EOCB 的性能。

关键词: 玻璃; 离子交换; 多模光波导; 光互连

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3000-05

Manufacturing of double-layered multimode optical waveguides in glass substrate

Hao Yinlei¹, Zeng Fulin², Wang Zhijian², Hu Wenxue¹, Chen Sicong¹, Yang Jianyi¹, Wang Minghua¹

(1. College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Double-layered multimode waveguides were fabricated in optical glass substrate, each layer being formed by melt salt ion-exchange (IE), and subsequent field-assisted ion-migration (FAIM). Characterization of the double-layered waveguide chips were performed by microscopic observation of waveguide cross-section, output pattern observation, and insertion loss and crosstalk measurement. Results shows that dimensions of waveguides core at top layer and bottom layer core are respectively $29\ \mu\text{m}\times 19\ \mu\text{m}$ and $31\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, and output pattern of waveguide at different layers are of nearly the same dimensions. Waveguide loss characterization show that propagation loss of waveguide at top layer and bottom layer are $1.00\pm 0.32\ \text{dB/cm}$ and $0.78\pm 0.35\ \text{dB/cm}$, and crosstalk between neighbor waveguide at different layers is approximately 17.7 dB. Analysis demonstrate that interconnection density can be doubled by adopting double-layered waveguide, thus this kind of waveguide can be expected a promising prospect in improving EOCB performance.

Key words: glass; ion-exchange; multimode optical waveguide; optical interconnect

收稿日期: 2015-02-11; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61428502); 浙江省自然科学基金(Y1100665); 中兴通讯产学研合作项目

作者简介: 郝寅雷(1974-), 男, 副教授, 博士后, 主要从事玻璃基集成光学器件方面的研究。Email: haoyinlei@zju.edu.cn

0 引言

玻璃具有很高的光透过率和光学均匀性,制作和加工技术成熟而且成本相对较低,被认为是一类优质的光学材料。这类材料不仅是制作传统光学元件的首选,在集成光学领域也获得了日益广泛的应用。1972年,第一篇关于离子交换玻璃基光波导的研究论文^[1]发表,被认为是玻璃基集成光学器件研究开始的重要标志。自那时起,离子交换玻璃基光波导技术历经 40 余年的发展,已经从纯粹的实验室研究走向应用,逐步发展成为一种集成光学器件制作的主流技术。采用离子交换技术在玻璃基片上制作的光波导器件,在光通信和光传感领域得到了越来越多的应用^[2-5],并且在光互连领域的应用也表现出很强的竞争力^[6-7]。

受到板级光互连的需求牵引,玻璃基多模光波导器件的研究与发展受到前所未有的重视。近年来数据中心和高性能计算机板级互连面临着“电子瓶颈”,光在板级信号互连中的应用成为近年重点突破的目标。板级光互连可以采用自由空间连接、光纤连接和平面光波导连接等多种技术方案实现,其中基于平面光波导的光电印制电路板(Electro-optical Circuit Board, EOCB)被认为是板级光互连的发展方向。EOCB 通过在印制电路板(PCB)的基础上引入平面光波导实现,考虑到光波导之间以及光波导与光源(VCSSEL)之间的对准公差的要求,目前 EOCB 中都采用多模光波导。因此,从波导材料以及制作技术的角度,制作 EOCB 的光波导材料仅限于聚合物材料^[6-7]和玻璃材料^[8-9]。与聚合物材料相比,玻璃材料的优势体现在:更好的热稳定性和长期稳定性、更低的光吸收损耗、更大的带宽的数据传输(归因于玻璃基光波导芯部折射率分布的梯度特征)。

在玻璃基片制作多层多模光波导可以提高 EOCB 上互连密度,因此受到越来越多研究者的关注。德国弗劳恩霍夫协会的 Lars Brusberg 等采用离子交换法在玻璃板的两个表面分别制作一层条形光波导的方法来提高互连密度^[9]。但分析可知这种双面光波导存在两方面的不足:其一,受玻璃表面粗糙度等缺陷散射的影响,波导具有较高的传输损耗;其二,波导芯部的形状对称性不高,这使波导之间的耦合效率难以提高。郑斌等曾采用离子交换和电场辅

助离子迁移的方法在玻璃基片上进行了制作双层掩埋式单模光波导的尝试^[10]。与单模光波导相比,多模光波导制作面临着多方面的挑战:一方面是离子迁移深度的大幅度增加带来的材料和波导制作工艺上的难度,以及双层光波导中上、下两层光波导尺寸和折射率的匹配对性能一致性的影响。

文中作者对离子交换法在玻璃基片上制作的双层掩埋式多模光波导的制作技术进行了探索,文中报道了玻璃基片上双层多模光波导研究的结果。

1 实验

用于制作双层多模光波导的材料为集成光学专用玻璃材料,将玻璃加工成直径 76.2 mm、厚度 1.2 mm 圆片,双面研磨抛光后作用于光波导芯片的制作。制作光波导的掺杂离子选择 Ag^+ ,选择这种离子的原因是 Ag^+ 的价态为 1,且其半径和玻璃中的 Na^+ 半径相差相对较小,因此在玻璃材料内部迁移率更大,利于在合理的时间内获得较大的波导掩埋深度,利于双层多模光波导的制作。

玻璃基片上双层光波导通过顺次制作两层掩埋式多模光波导实现,其中每一层光波导的制作都采用熔盐离子交换(IE)和电场辅助离子迁移技术(FAIM)制作,分别包括 4 个主要步骤:光刻、熔盐离子交换、去除掩膜和电场辅助离子迁移,如图 1 所示。首先是光刻,采用热蒸发或者溅射技术在玻璃基片表面制作一层厚度为 100 nm 左右的铝膜,而后采用标准的微细加工技术经过涂胶、光刻、显影、腐蚀、去胶工序将制作在光刻板上的光波导图形转移到铝膜上,铝膜被腐蚀去除的部分形成离子交换的窗口(考虑到光波导多模光波导制作的要求,目前用于形成条形光波导的离子交换窗口的宽度为 20 μm)。其次是离子交换,将带有掩膜的玻璃基片置于熔融的离子交换的混合熔盐(混合熔盐为 AgNO_3 、 NaNO_3 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的混合物,在熔盐中引入 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的作用在于降低混合熔盐的熔点)中,熔盐中的 Ag^+ 进入玻璃基片并在玻璃基片表面形成离子扩散区。然后将玻璃基片表面的铝膜用化学腐蚀的方法去除。最后是电场辅助离子扩散,以 NaNO_3 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的混合熔盐作为电极,在直流电场的辅助下使玻璃基片表面的离子扩散区中的掺杂离子在直流电场的作用下迁移进入玻璃基片内部,形成掩埋式光波导。

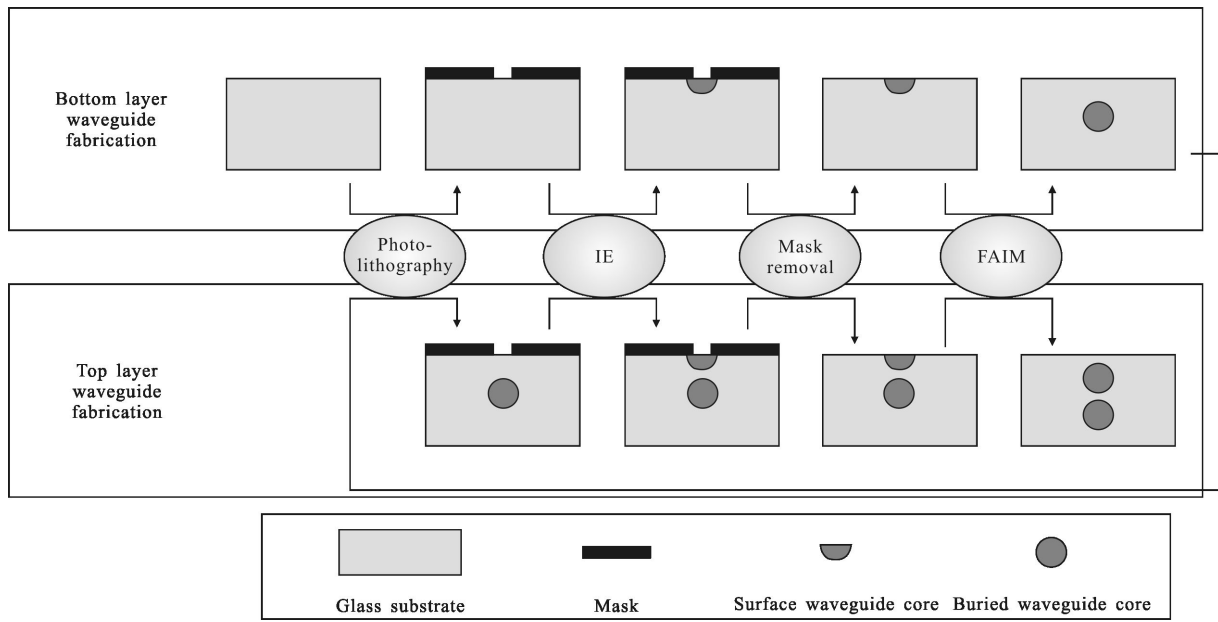


图 1 玻璃基片上双层光波导的制作流程

Fig.1 Flowchart of double-layered multimode optical waveguide stack manufacturing on glass substrate

该论文中玻璃基双层多模光波导制作过程中采用的主要技术参数在表 1 中给出。双层多模光波中的下层光波导的扩散深度达到 100 μm 或更深,考虑

表 1 制备双层掩埋多模光波导的工艺参数

Tab.1 Technological parameters for double-layered multimode waveguide manufacturing

Parameters	IE for bottom layer waveguide	FAIM for bottom layer waveguide	IE for top layer waveguide	FAIM for top layer waveguide
Melted salts (nAg:nNa:nCa)	30:500:500	-	20:500:500	-
Time/min	40	-	50	-
Temperature /°C	260	-	260	-
Melted salts (nNa:nCa)	-	1:1	-	1:1
Electric current/mA	-	50	-	50
Time/min	-	600	-	600
Temperature /°C	-	240	-	240

到电场辅助离子迁移过程中玻璃基片中的电流产生的热效应,电场辅助离子迁移过程中炉温控制在 240 °C。制作双层多模光波导过程中的一个关键在于上、下层波导之间相对位置的控制,以及上、下两层光波导芯部尺寸与形状的控制。两层波导之间横向相对位置的控制借助标准的套刻技术实现;纵向相对位置调节通过改变下层光波导制作过程中电场辅助离子迁移过程的相关工艺参数实现。为实现上、下层光波导芯部形状的匹配并减小两层光波导之间的耦合,为了光波导芯部的尺寸和形状的控制通过对离子交换窗口的宽度,离子交换和离子扩散时间的调节实现。制作双层波导中上、下层波导的过程中,采用相同宽度的离子交换窗口,这种情况下,制作下层光波导时的离子扩散熔盐中 Ag⁺浓度高于上层光波导制作的相应值,而离子扩散时间短于上层光波导制作的相应值。由于下层波导比上层光波导多经历一次高温扩散过程,采用表 1 中所示的参数可以补偿下层波导的展宽效应。

对制作完成的光波导芯片端面进行研磨抛光后,在 Nikon Eclipse LV100 光学显微镜下进行了光波导横截面结构的观察,并对双层光波导的性能进行了一系列观测:包括通光光斑观察,上、下两层光

波导的传输损耗测试,以及上、下层光波导之间串扰的测试。

2 结果与讨论

图 2 是光学显微镜在透光模式下观察到的双层多模光波导横截面的显微结构照片,图中上、下两层彗星状的高亮度区域是 Ag^+ 离子在玻璃基片中经过扩散和迁移形成的光波导芯部。其中上层光波导芯部尺寸约为 $29\ \mu\text{m}\times 19\ \mu\text{m}$, 下层光波导芯部尺寸约为 $31\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, 上层光波导掩埋深度平均值约为 $54\ \mu\text{m}$, 下层光波导掩埋深度平均值达到约 $110\ \mu\text{m}$ 。从图中也可以看出,双层光波导中上、下两层光波导的尺寸和形状基本一致,表明通过合理设计上、下两层光波导制作的技术参数,可以使上下两层光波导的几何形状实现匹配。从光学显微镜观测结果可以看出,采用离子交换技术和电场辅助离子迁移技术在玻璃基片上所制作光波导的掩埋深度可以满足双层多模光波导制作的要求,为玻璃基离子交换技术在制作大芯径光波导方面的优势提供了实验验证。

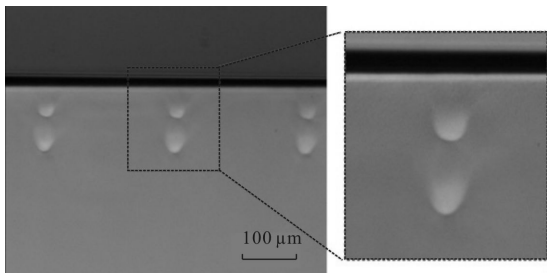


图 2 双层多模光波导横截面的显微结构

Fig.2 Microscopic structure of double-layered multimode optical waveguide cross section

通过对光波导芯片的通光测试,对双层光波导中上、下两层光波导尺寸的一致性进行了进一步验证。将波长为 $1550\ \text{nm}$ 的半导体激光光源通过多模光纤以端面耦合的方式与双层多模光波导芯片中的光波导端口对接,光波导芯片输出端口通过显微物镜成像并通过 CCD 输出到显示屏。调整输入光纤与双层多模光波导芯片之间的距离,使入射光同时输入上、下两层光波导,获得如图 3 所示的光波导输出光斑图像。从图中可以看出,上、下两层光波导输出光斑的大小基本一致,反映出两层光波导芯部几何形状的匹配程度。

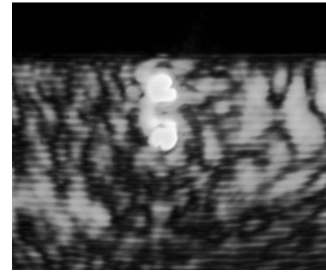


图 3 双层多模光波导的输出光斑图像

Fig.3 Output optical pattern of double multimode optical waveguide

双层光波导中上、下两层光波导传输损耗的一致性衡量双层光波导的重要指标,通过标准的光波导测试系统对双层光波导中各层光波导的损耗特性进行了测试。将双层光波导芯片置于样品架,波长为 $1550\ \text{nm}$ 的半导体激光光源通过芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 多模光纤以端面耦合的方式耦合进入光波导芯片的输入端;光波导芯片的输出端,用芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 的多模光纤接收并导入光功率计测试输出功率。用截断法对双层光波导中上、下两层光波导的传输损耗进行测量,即通过对长度分别为 a 和 b 的两条波导测得光功率计到探测器的功率 $P(a)$ 和 $P(b)$ (单位均为 dBm),则光波导单位长度的损耗由 $[P(b)-P(a)]/(b-a)$ 确定。图 4 给出了截断法测得的双层多模光波导中上、下两层光波导的传输损耗的测试结果。从图中可以看出:上、下两层光波导的传输损耗分别为 $1.00\pm 0.32\ \text{dB/cm}$ 和 $0.78\pm 0.35\ \text{dB/cm}$ 。

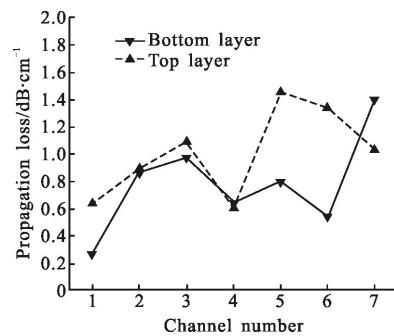


图 4 双层多模光波导上、下两层光波导的传输损耗

Fig.4 Propagation loss of top and bottom layer waveguide in double-layered multimode optical waveguide

图 5 给出了长度为 $2.0\ \text{cm}$ 的双层光波导中上、下两层波导之间串扰的测试结果。从图中可以看到,上层光波导到下层光波导的串扰 $17.8\pm 0.9\ \text{dB}$; 上层光波导到下层光波导的串扰 $17.7\pm 1.0\ \text{dB}$ 。而且,通

过改变波导之间的距离,可以进一步减小双层波导中上、下两层波导之间的串扰特性。

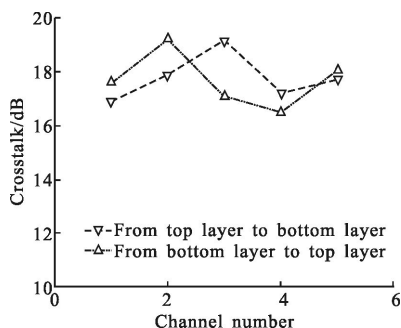


图 5 双层多模光波导的串扰测试结果

Fig.5 Crosstalk test of double multimode optical waveguide

上述研究结果表明,通过熔盐离子交换和电场辅助离子迁移技术,可以在玻璃基片上实现双层多模光波导的制作,通过对双层光波导制作工艺参数的调整,可以实现上、下两层光波导的尺寸和形状的匹配。将这种双层多模光波导应用于 EOCB 中的导光层,一方面使板级光互连的互连密度增加一倍,另一方面采用双层导光层的设计可以避免或者减少光波导之间的交叉,从而有效降低波导之间的串扰。

值得指出的是,通过进一步对离子交换工艺参数(包括离子交换熔盐的浓度、离子交换窗口的宽度、离子交换时间以及电场辅助离子迁移时间)的实验优化,双层光波导传输损耗的可望进一步降低,这些工作目前尚在进行中。

3 结论

采用离子交换技术在玻璃基片上制作了双层多模光波导。对双层波导的端面显微结构进行了观测,并对光波导进行了通光测试,对其传输损耗和串扰特性进行了表征。结果表明,通过离子交换技术可以制作双层多模光波导,双层光波导中上、下两层光波导芯部尺寸基本匹配,传输损耗相差约 0.22 dB/cm,且能保持独立传输。这种双层光波导使玻璃基片上光波导的集成度增大一倍,相应地使板级光互连领

域中互连密度大幅度提高。

参考文献:

- [1] Izawa T, Nakagome H. Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plates[J]. *Appl Phys Lett*, 1972, 21(12): 584-586.
- [2] Ramaswamy R V. Ion-exchanged glass waveguide: a review [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(6): 984-1002.
- [3] Hao Yinlei, Zheng Weiwei, Jiang Shuhang, et al. Engineering-oriented research of glass-based planar optical power splitter manufacturing technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 299-304. (in Chinese)
- [4] Wang Guoqiang, Hao Yinlei, Li Yubo, et al. Modeling of ion migration depth in field-assisted ion-migration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 818-822. (in Chinese)
- [5] Zheng J, Wang P F, Xu M, et al. Characterization of ion exchange erbium-doped silica glass amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1418-1423.
- [6] Hutt David A, Williams Karen, Conway Paul P, et al. Challenges in the manufacture of glass substrates for electrical and optical interconnect [J]. *Circuit World*, 2007, 33(1): 22-30.
- [7] Henning Schroder, Norbert Arndt-Staufenbiel. Electrical-optical circuit boards optical waveguides and coupling elements based on the thin glass layer concept [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(8): 6660-6663.
- [8] Takaaki Ishigure, Yusuke Takeyoshi. Polymer waveguide with 4-channel graded-index circular cores for parallel optical interconnects[J]. *Optical Express*, 2007, 15(9): 5843-5850.
- [9] Lars Brusberg, Henning Schröder, Robert Erxleben, et al. Glass carrier based packaging approach demonstrated on a parallel optoelectronic transceiver module for PCB assembling [C]//IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference, 2010: 269-274.
- [10] Zheng B, Hao Y L, Li Y B, et al. Manufacturing and characterization of buried optical waveguide stack in glass substrate [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(9): 906-910.