

多模脊形光波导的制备及其耦合对准和损耗测量系统

温昌礼 季家镛 冯向华 宋艳生 窦文华

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 垂直腔面发射激光器,目前在光互连中有着越来越广泛的应用。是一种波长为 850 nm 的多模激光器,其光输出截面达 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,为了更好的匹配该器件,需要研制大截面多模脊形波导,并且为了满足芯片间光互连的需求,对互连波导长度具有较高的要求。通过改进制备工艺,研制了直线长度为 21 cm 的多模聚硅氧烷脊形波导,并成功完成了通光实验;搭建了一套对波导完全无损伤的测量系统,实现了对多模脊形光波导的无损测量,测得损耗平均值为约 0.18 dB/cm,并利用传统的截断法进行了验证。此外,该系统还可以用于不可见光波段的耦合对准。

关键词 光学制造;有机物光波导;模压;损耗测量

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0212005

Fabrication of the Muti-Mode Rib-Waveguide and Its Coupling and Wasting Measurement System

Wen Changli Ji Jiarong Feng Xianghua Song Yansheng Dou Wenhua

(College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Nowadays, an important device called vertical cavity surface emitting laser is applied into optical interconnection more and more widely, it works at 850 nm and its output cross section is $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$. In order to fit to this device, a muti-mode rib waveguide with a big cross section is needed. And the distance among chips needs longer the waveguide. A waveguide which is 21 cm long with a big section is fabricated through advancing the making technology and light can go through it successfully. A measurement system is also designed and the average wasting of the waveguide as 0.18 dB/cm is gotten which is verified through cutting-off method. Also, this system can be applied to adjusting the coupling of the waveguide input with invisible light.

Key words optical fabrication; organic optical waveguide; mould; wasting measurement

OCIS codes 120.1880; 060.4510; 060.6718; 130.0130

1 引 言

近年来,光互连的应用领域越来越广泛,而在光互连中有重要地位的垂直腔面发射激光器(VCSEL)是工作波长为 850 nm 的多模波导。为了更好地与之匹配,需要研究大截面的多模脊形波导。由于 VCSEL 输出截面达 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,而芯片间光互连的长度达几十厘米的量级。传统的刻蚀等工艺很难达到如此大的截面和长度。因此必须改进传统的制备工艺,才能制备课题要求的大截面大尺度

的多模脊形波导。并且,关于使用聚硅氧烷作为光波导,国内也少有公开文献发表,因此,需要探索该材料的制备相关工艺,如固化等。同时,损耗测量一直是本领域研究的难点和热点,前人已经做了大量的工作:1997年,蒋毅等^[1]提出了 CCD 摄像法测量有机聚合物光波导传输损耗。成功实现了对平板波导的无损测量。1999年,蒋毅等^[2]制备了低损耗有机物光波导并实现其数字化测量技术。2001年,吕增海等^[3]总结和比较了 4 种测量薄膜光波导传输损

收稿日期: 2010-05-27; 收到修改稿日期: 2010-06-14

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z2a5)资助课题。

作者简介: 温昌礼(1982—),男,博士研究生,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: wcl100@163.com

导师简介: 季家镛(1946—),男,教授,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: jijiarong@hotmail.com

耗的方法,并分别给出了典型的实验装置结构图。同年,吕增海等^[4]用视频摄像技术测量薄膜的传输损耗。2004年,贾振红^[5]测量了单模条形波导的其它损耗。2005年,黄重庆等^[6]设计了利用棱镜耦合和光电检测原理的双光路损耗测试系统。2006年,高宇等^[7]给出了测量非线性聚合物薄膜材料光波导传输损耗的三种新方法及原理。2007年,高怡等^[8]也采用视频摄像技术测量了聚合物复合膜的传输损耗。而国外很早就开始这方面的很多研究^[9~13]。综上所述,国内外普遍采用的无损测量是 CCD 测量法。但国内大多针对于 $1.55\ \mu\text{m}$ 和 $1.31\ \mu\text{m}$ 波段且针对平板波导。所以,也需要对 CCD 测量系统进行改进,才能成功实现对多模脊形波导损耗测量的研究。本文利用 CCD 测量原理。通过改进制备工艺,搭建了合适的测量系统,成功制备了截面积 $70\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,长度为 $21\ \text{cm}$ 的聚硅氧烷多模脊形波导,损耗达 $0.18\ \text{dB/cm}$ 。成功实现了对多模脊形波导的无损测量。

2 直线长度达 21 cm 的脊形波导的制备

选取聚硅氧烷^[14]为波导材料。通过大量的实验,采用芯层为聚甲基苯基硅氧烷,其折射率为 1.543 ,覆盖层和基底材料为另一种聚硅氧烷,折射率为 1.41 。由于 VCSEL 的输出端口尺寸为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,而脊形波导的作用是作为连接 VCSEL 和光的接收器之间的信息通道。为了实现和激光器的最佳匹配,最好其截面和 VCSEL 大小一样,即脊形波导的截面最好做成 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,而薄层厚度应该尽量薄。但是,由于在制备工艺上的限制,模具在表面粗糙度要求很高($\sigma < 0.1\ \mu\text{m}$)的情况下,直线长度要达 $21\ \text{cm}$,只能采用特殊工艺制造模具,而该工艺最高精度时候能达到的最小截面尺寸为 $70\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,所以最终脊形波导结构参数为:脊宽为 $70\ \mu\text{m}$,脊高为 $50\ \mu\text{m}$,薄层厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。

波导截面积为 $70\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,长度为 $21\ \text{cm}$,按照传统的涂膜工艺,比如旋涂等方式,其尺度最大只有 $10\ \text{cm}$ 左右,如此长的波导无法涂敷。采用自制刮刀机成功克服了此困难。按照半导体离子刻蚀的工艺,其刻蚀深度也无法达到 $50\sim 70\ \mu\text{m}$ 的量级。而如此长和如此大截面的波导也只有采用模压工艺才能实现。但普通的模具工艺,如半导体模具,无法达到如此长的长度,因此本文采用金属模具,而其制作工艺也比较特殊。

确定了材料和波导尺寸。波导制备过程如下:首先将聚硅氧烷底层材料以及固化剂按照一定的比例(1:1)混合,均匀搅拌。然后将清洗后的模具平放于全息台上,并利用流涎的原理以及使用刮刀机在模具上涂膜,静置 $10\ \text{min}$ 左右,抽真空,去气泡。然后将模具连同膜层一起放入温控箱中,在 $100\ ^\circ\text{C}$ 下放置 $30\ \text{min}$,再在 $150\ ^\circ\text{C}$ 下放置 $10\ \text{min}$ 。然后取出膜层,静置一段时间,待冷却后剥离膜层,就得到了波导的基底。然后用同样的固化工艺在底层上固化芯层和覆盖层。最后得到三层对称多模脊形波导。文中所使用的模具有 12 条平行长条,故一次可同时做出 12 条对称脊形波导。

在波导制备过程中,设计和制造了刮刀机和模具(制作工艺比较特殊),可通过电脑控制其移动的速度和方向,并通过千分尺观测膜厚。膜厚用中间的灰色旋钮调节,具有微调 and 粗调的功能。而模具实物放大图如图 1 所示。可见,模具是很规则的金属模具,而实际制作的波导形状也是比较规则的,另外,制作出的波导中能够通光的直线长度最长的达到 $21\ \text{cm}$ 。以上说明所述的制备方法是可行的。

综上所述,波导制备的关键技术在于:大尺度波导层的涂敷技术;长尺度模具的制造技术;聚硅氧烷新波导材料的固化技术;模压技术(包括脱模等关键难点技术)等。

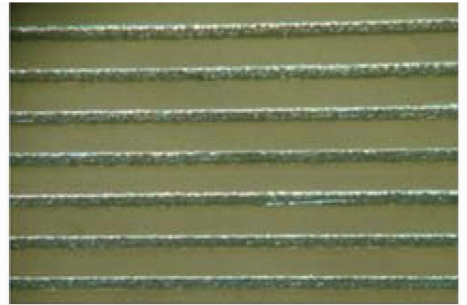


图 1 模具实物局部放大图

Fig. 1 Amplified picture of the mold

3 多模脊形波导耦合对准和损耗测量系统

如图 2 为测量系统的原理图。从激光器出来的光,通过光纤耦合入多模脊形波导。然后利用 CCD 拍摄其光场分布的照片,经过电脑软件处理,得出损耗值^[1,2,15]。其损耗测量的基本理论基础为波导杂散光的强度与波导内光场的强度成正比^[1,2,15],因此,只要测得杂散光的光强分布规律,就可以知道波导内光场的分布规律,从而推算出传输损耗值。整

个系统由激光器、光纤、调节装置、CCD、放大镜筒、CCD 防振装置、显微镜以及计算机等构成。对准和调节,主要靠波导底座的平移台,固定光纤末端的三维平移台以及激光器和光纤接口处的平移台还有其余部分的移动装置和配件等。整个系统的调节需从光的传输路径上,一步一步慢慢调节。可见,本系统的对准直接使用光纤末端和波导对接,最后成功实现通光,表明波导的端面 and 波导的导光性能以及对准系统的精度都是可靠的。

如果将 CCD 部分换成高倍显微镜,在对准可见光的时候便可以放大光纤和波导的端面,更容易实现对准。而对准非可见光(当光源为 850 nm 光时),必须采用图 2 所示的系统,通过 CCD 放大和实时观测整个对准过程,使其顺利完成。同时,移动 CCD,拍出不同距离处一定长度内的光场照片,利用测量软件(由上海交通大学曹庄琪教授提供)对其进行滤波(中值滤波等)和曲线模拟,最终得到吸收损耗的测量值^[1,2,15]。

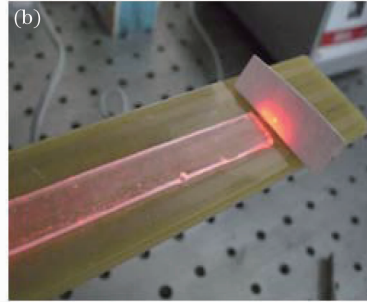
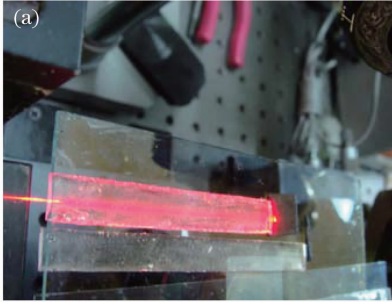


图 3 波导通光实验图

Fig. 3 Experiment photo of the light transmission in the waveguide

有损耗的导模功率随传输距离衰减可表示为^[1]

$$P_z = P_0 \exp(-\alpha z), \quad (1)$$

$$\alpha = (z_2 - z_1)^{-1} \ln(P_{z_1}/P_{z_2}), \quad (2)$$

$$L = -10\alpha \lg e, \quad (3)$$

式中 P_0 为入射光功率, P_z 为距离 z 处的输出光功率, α 为衰减系数, P_{z_1} 和 P_{z_2} 分别代表距离为 z_1 和 z_2 处的光功率, L 为传输损耗。可见,所需拟合的是一条指数衰减曲线,根据最小二乘法对曲线进行拟合并运算出传输衰减系数 α 。

图 4 为 CCD 测量系统所拍摄的通光波导的光场分布图。通过对该图的分析,得到如图 5 所示的曲线,从图中可以看出,此时损耗为 0.091 dB/cm。通过多次测量取平均值,最后得到该波导的平均损耗约为 0.18 dB/cm。同时,通过截断法估计损耗水

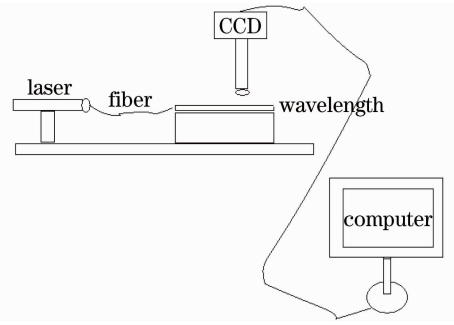


图 2 测量系统示意图

Fig. 2 Sketch map of the measurement system

4 波导通光和损耗测量实验

图 3 为通光实验照片。从图中可见,可见光从波导的一端输入,从另一端输出为一明显的亮点,充分说明通光实验比较成功,即实现了波导的通光;实验同时证明了光纤耦合输入的可行性和波导的导光性,并且该波导直线长度最长可达 21 cm,说明基本满足芯片间光互连的需求。

平约为 0.2 dB/cm,和测量值比较接近。从结果可以看出,本文制作的多模脊形波导,不论从损耗水平还是直线长度以及截面尺寸等指标看,都是比较理想的。

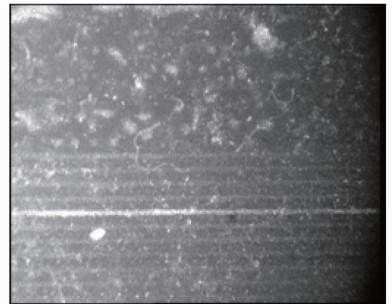


图 4 CCD 所拍光场分布图

Fig. 4 Distribution of the light field by CCD

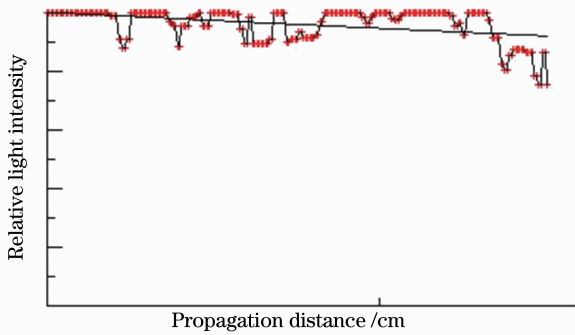


图 5 曲线拟合分析结果

Fig. 5 Results of the curve fitting

5 结 论

从材料聚硅氧烷入手,通过制备工艺的改进,成功制备了直线长度达 21 cm 的横截面为 $70\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的多模脊形波导,损耗达 0.18 dB/cm。成功实现了耦合和通光,完成了对波导的无损测量。此波导可以更好地匹配 VCSEL 器件^[16,17]。下一步的工作是研究 VCSEL 和波导之间的 90° 转向问题,涉及二元光学元件的设计,这里不再深入叙述。

致谢 感谢上海交通大学的曹庄琪教授的支持和指教。

参 考 文 献

- Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Chen Yingli. CCD camera photographing in detecting the propagation attenuate coefficient of polymer waveguides [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1997, **31**(10): 42~44
蒋毅,曹庄琪,陈英礼. CCD 摄像法测量有机聚合物光波导传输损耗[J]. 上海交通大学学报, 1997, **31**(10): 42~44
- Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Qiu Linlin *et al.*. Digital measurements and fabrication of low loss optical organic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1142~1145
蒋毅,曹庄琪,仇琳琳等. 低损耗有机聚合物光波导的制备及其数字化测量技术[J]. 光学学报, 1999, **19**(8): 1142~1145
- Lü Zenghai, Ren Quan, Ma Changbao. The methods for measuring the transmission loss of NLO polymer thin films[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(1): 101~104
吕增海,任 诠,马常宝. 测量 NLO 聚合物薄膜光波导传输损耗的方法[J]. 光电子激光, 2001, **12**(1): 101~104
- Lü Zenghai, Yang Xudong, Ren Quan *et al.*. Determination of the transmission loss of nano-crystal and polymer complex thin films using photographic technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(10): 945~948

- 吕增海,杨旭东,任 诠等. 用视频摄像技术测定纳米晶聚合物复合薄膜的传输损耗[J]. 中国激光, 2001, **28**(10): 945~948
- Jia Zhenhong. The measurement of propagation loss for polymer PMMA/ DR1 channel waveguides [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(6): 47~48
贾振红. 聚合物 PMMA/DR1 条型单模光波导传输损耗的测量[J]. 激光杂志, 2004, **25**(6): 47~48
- Huang Chongqing, Liu Jing. The design and implement of highly precise loss measurement system on optical waveguide [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, **18**(5): 48~50
黄重庆,刘 靖. 高精度光波导损耗测试系统的设计与实现[J]. 光电子技术与信息, 2005, **18**(5): 48~50
- Gao Yu, Liao Jinkun, Yang Yapei *et al.*. Measurement methods of optical waveguide propagation loss of polymer thin films[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(9): 844~846
高 宇,廖进昆,杨亚培等. 有机聚合物薄膜光波导传输损耗的测量方法[J]. 激光与红外, 2006, **36**(9): 844~846
- Gao Yi, Yang Hongliang, Zhang Fujun *et al.*. Preparation and optical characteristics of polymer DR13/PMMA composite films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 983~987
高 怡,杨洪亮,张福军等. 聚合物复合薄膜 DR13/PMMA 的制备及其光学特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 983~987
- P. K. Tien, R. U. lrich, R. J. Martin. Modes of propagating light waves in thin deposited semiconductors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**(1): 291~294
- Y. H. Won, P. C. Jaussaand, G. H. Chartier. Three-prism loss measurements of optical waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(3): 269~271
- E. A. Arutunyan, S. Kh Galoyan. New method for loss measurements in optical waveguides[J]. *Opt. Commun.*, 1986, **57**(6): 391~393
- M. Haruna, Y. Segawa, H. Nishihara. Nondestructive and simple method of optical-waveguides lossmeasurement with optimization of end-fire coupling [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(17): 1612~1613
- A. Boudrioua, J. C. Loulergue. New approach for loss measurements in optical planar waveguides[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(1): 37~40
- Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Polymer material for optical waveguide used in integrated circuit [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 36~40
温昌礼,季家谔,窦文华等. 集成电路用聚合物光波导材料[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7): 36~40
- Kapron F. P., Keck D. B., Maurer R. D.. Radiation losses glass optical waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**(10): 423~425
- Zhao Cezhou, Liu Enke, Zheng Yuxiang *et al.*. Fabrication of all-silicon ridge waveguide with rectangular cross-section and its loss analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10): 1054~1058
赵策洲,刘恩科,郑玉祥等. 全硅矩形截面脊形波导的研制及其损耗分析[J]. 光学学报, 1994, **14**(10): 1054~1058
- Liu Yuliang, Liu Enke. Mode characteristic and plasma dispersion effect of rib silicon waveguides with trapezoidal cross section[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(8): 727~732
刘育梁,刘恩科. 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子体色散效应[J]. 光学学报, 1991, **11**(8): 727~732