

4 通道交叉型二氧化硅光波导 延迟线阵列的设计与制备

李浩^{1,2}, 宋玲玲³, 张立钧^{1,2}, 王焕然^{1,2},
李亮^{1,2}, 王菲^{1,2}, 衣云骥^{1,2*}, 张大明^{1,2}

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院

集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区, 吉林 长春 130012;

2. 吉林省光通信用聚合物波导器件工程实验室, 吉林 长春 130012;

3. 中国电子科技集团公司 第四十七研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要: 设计并制备了一种高集成度、低成本、低损耗 4 通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列。利用 BPM 软件对交叉结构光波导延迟线的 Y 分支的损耗、弯曲损耗进行数值模拟。综合考虑器件尺寸和损耗参数, 设计交叉型延迟线结构的弯曲半径最小为 1 500 μm , 引入优化的锥口 Y 分支结构和垂直相交波导结构。采用标准半导体制作工艺制备器件, 测试得到了器件的红外输出光斑, 延迟线延迟时间分别为 0、113、226 和 339 ps。4 通道二氧化硅延迟线阵列能实现相邻通道相等的延迟时间间隔, 且可通过集成实现延迟时间的增加, 同时输出端可以与光纤阵列集成。

关键词: 光波导延迟线; 二氧化硅; Y 分束器

中图分类号: TN252 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20140703.0435

Design and fabrication of 4 channels silica cross optical waveguide delay line array

LI Hao^{1,2}, SONG Ling-ling³, ZHANG Li-jun^{1,2}, WANG Huan-ran^{1,2},
LI Liang^{1,2}, WANG Fei^{1,2}, YI Yun-ji^{1,2*}, ZHANG Da-ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic
Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Jilin Provincial Engineering Laboratory on Polymer Planar Lightwave Circuits, Changchun 130012, China;

3. The 47th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shenyang 110032, China)

* Corresponding author, E-mail: yiyj@jlu.edu.cn

Abstract: In this paper, an integrated 4-channels silica optical waveguide delay line array with low cost and low propagation loss was designed and manufactured. BPM software was selected to simulate the associated pa-

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61177027, No. 61077041, No. 61261130586); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20110315); 吉林省青年科研基金资助项目 (No. 20100174); 吉林大学科研启动基金资助项目 (No. 450060491403); 吉林大学创新训练资助项目 (No. 2013C51103)

rameters, including Y splitter and bend loss. In order to reduce the device size and insertion loss, the smallest bending radius of the delay line was selected to be 1 500 μm . And the structure of optimizing gradient Y splitter and right angle intersecting waveguide were optimized. The cross waveguide delay line device was manufactured by standard semiconductor manufacturing processes. The output infrared pattern was obtained. The delay time of each channel was 0 ps, 113 ps, 226 ps and 339 ps, respectively. The 4-channels silica waveguide delay line device can achieve an equal interval of delay time between the adjacent channels. It can be integrated with itself for several times to increase delay time. The output waveguide of the device can be integrated with the optical fiber array at the same time.

Key words: optical waveguide delay line; silica; Y splitter

1 引言

光电子产业被誉为 21 世纪第一主导产业。随着发达国家对光电子产业的大量投入,近二十年,我国相继加强了对各光电子产业链的投入。光电子技术在军事领域的应用推动了光电子产业的发展,同时高科技武器系统也对光电子产业提出了更高的要求。开发先进的雷达系统是光电子产业在军事领域的重要发展目标,高性能雷达在提升信息化部队的作战能力方面至关重要,例如:直升机机载雷达^[1]、激光成像雷达^[2]、舰载雷达等。雷达天线的延时系统是雷达的重要组成部分。光延迟线是实现抗电磁干扰、无波束偏斜、高性能、便携化雷达延迟系统的关键部件,是提升雷达性能,保障雷达部队安全作战不可或缺的利器。

光延迟线主要包括光纤延迟线和光波导延迟线。光纤延迟线应用较为广泛,具有时间带宽大、信号频率高、线性好、损耗小、结构简单等优点,但其存在延时不易调节,集成度差,很难精确控制等缺点^[3-6]。随着对雷达性能要求的提高,尤其是工作频率和步长精度的提高,光纤延迟线已经难以满足高性能雷达系统的要求。光波导延迟线由于采用了光刻技术,其延时精度可以达到皮秒量级,能够满足雷达工作频率越来越高的要求。在相控阵雷达中应用平面光波导延迟线阵列,可使雷达实现高性能、高频宽和结构紧凑^[7-9]。

上个世纪 80 年代以来,随着光控相控阵雷达系统对延迟线性能的需求,人们分别采用有机材料和无机材料制备光波导延迟线器件。有机材

料制备的器件具有工艺简单、价格低廉、易集成等特点。虽然近年来部分有机材料在损耗方面取得重要进展,但是其实用化仍受损耗和稳定性等问题制约^[10]。无机材料光波导延迟线具有低损耗、稳定性好等优势。1997 年, S. Yegnanarayanan 等制备了 3 bit 弯曲型延时线,波导结构为脊型,弯曲半径最小为 5 000 μm ,以硅绝缘体(SOI)技术替代二氧化硅波导技术,降低损耗与成本,提高参数性能,易于集成,阵列间延时间隔为 12.3 ps,这种器件应用到高频相控阵天线,与交叉型结构相比,阵列间延迟时间差小^[11]。1999 年, ShiZhuo Yin 等人利用铈酸锂材料,制备了 13 bit 光延时线,可调谐范围为 2 000 nm,采用啁啾光纤布拉格光栅和光波导的结构,对工艺精度要求高^[12]。2002 年, Yihong chen 等人采用光学真延时(TTD)模块来控制 K 波段相控阵天线(PAAS),在全息光栅耦合器基础上制备了延时范围为 0 ~ 443.03 ps 的 6 bit 延时模块,工艺复杂,模块尺寸大^[8]。2012 年, Hansuek Lee 制备了损耗为 0.08 dB/m 螺旋型结构超长光延迟线,波导为硅柱支撑热氧化物结构,器件尺寸 9.5 cm \times 9.5 cm^[13]。综上所述,损耗、阵列延迟时间间隔、封装等特性是延迟线实用化的关键。本文设计制备了二氧化硅交叉型光波导延迟线阵列。二氧化硅光波导器件具备低损耗特性,交叉型结构提高了器件集成度和相邻阵列的延迟时间,阵列输出可与光纤阵列封装耦合,该器件具备实用化前景。

2 延迟线设计

延迟时间 T 与波导长度 l 成正比。要得到较

长的延迟时间,可以通过增加波导长度来实现,长度的增加带来损耗的增加,所以需要对结构进行优化。延迟线的延迟时间可以用式(1)进行计算:

$$T = \frac{n \cdot l}{c}, \quad (1)$$

式中, T 是延迟线的延迟时间, n 是波导芯层的有效折射率, l 为波导总长度, c 为光在真空中的传播速率。

现有的光波导延迟线结构主要分为弯曲波导延迟线、螺旋型光波导延迟线和交叉型光波导延迟线。螺旋型延迟线结构具有较长的整体延迟时间,但相邻通道间的延迟时间较短;交叉型延迟线具有结构紧凑,延迟线相邻通道延迟间隔长的特点。对于延迟线,其真正有作用的部分为相邻通道的延迟时间,所以本文设计4通道交叉型二氧化硅光波导延迟线,延迟线器件结构图如图1所示,输出端从上到下共4个输出端口,依次为1,2,3,4。交叉型延迟线结构包括:Y分支波导,交叉波导,圆弧波导。器件输入端经过3个Y分支,分成4条不同长度的通道,最短的通道由直波导进入输出端,其余通道由不同长度的圆弧波导和直波导连接,其相邻通道间的长度差呈倍数增加,可以实现满足实际应用的等延迟,这一特点对实现2 bit光波导延迟线具有重要意义。

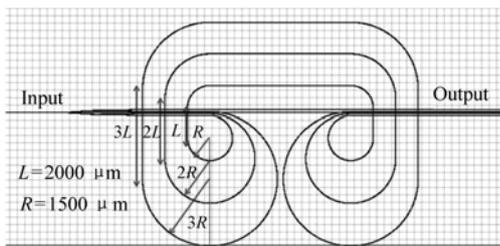


图1 交叉型延迟线器件的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of cross optical waveguide delay line

为了减小工艺难度,降低损耗,采用渐变Y分支结构和反余弦型弯曲波导,其结构如图2所示。渐变区域长度为680 μm,波导宽度从6.7 μm过渡到14.9 μm。两条Y分支间距为1 μm,采用反余弦型连接,横向距离为2 320 μm,纵向距离为123 μm。单分支臂归一化输出功率

模拟结果为0.465,Y分支的损耗值为0.315。图3为Y分支光场分布,图4为Y分支的功率与传输距离关系示意图。由功率的变化可以看出,这种结构附加损耗为0.02 dB。

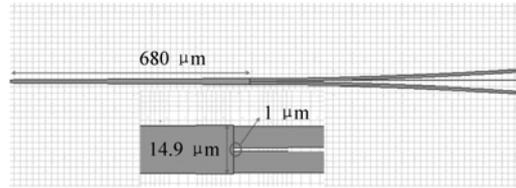


图2 Y分支结构设计图

Fig. 2 Schematic diagram of Y splitter structure

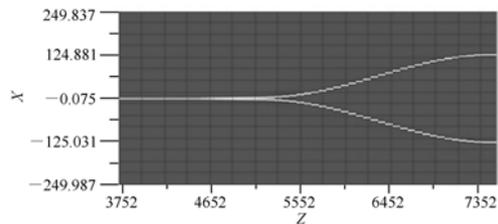


图3 Y分支光场分布

Fig. 3 Optical field distribution of Y splitter

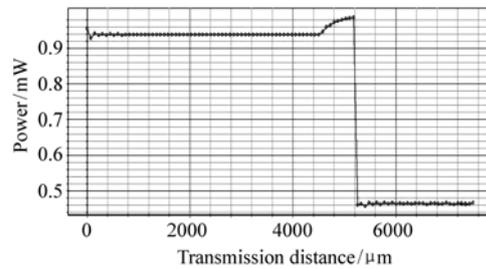


图4 Y分支的功率与传输距离关系

Fig. 4 Relationship between input power and transmission distance of Y splitter

为了减小器件的弯曲损耗,利用BPM软件模拟弯曲半径和弯曲损耗之间的函数关系,当弯曲半径大于1 500 μm时,损耗低于1 dB,所以设计弯曲半径最小值为1 500 μm(在弯曲损耗较低的前提下,可使得器件结构更加紧凑)。图5为波导弯曲损耗与弯曲半径的关系曲线,波导的截面尺寸为6.7 μm × 6.7 μm,能够满足交叉型延迟线器件的设计要求。

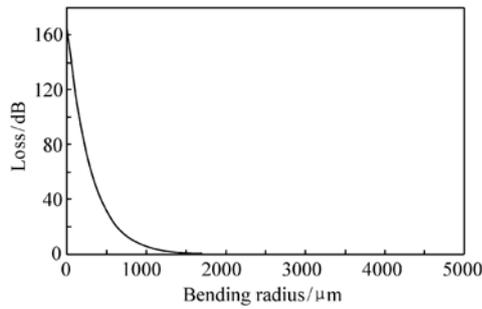


图5 波导弯曲损耗与弯曲半径的关系曲线(波导截面尺寸为 $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$)

Fig.5 Relationship between bending loss and the bending radius(the cross section of waveguide is $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$)

3 延迟线制备

采用标准的半导体工艺流程制备延迟线,如图6所示。

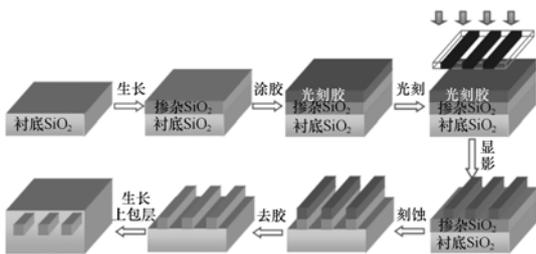


图6 工艺流程

Fig.6 Technological process

选择二氧化硅作衬底。首先,在二氧化硅上生长掺杂的二氧化硅作为芯层材料,然后涂胶,盖掩模板,光刻,显影,刻蚀^[14],去胶,制备完成掺杂的二氧化硅芯层波导;在芯层波导上生长二氧化硅上包层,此上包层材料与衬底二氧化硅材料完全相同;最后,对器件进行退火处理,以减小器件的损耗。这样,延迟线阵列制备完成。

图7为交叉型光波导延迟线阵列实物图。制备器件的实际尺寸为 $3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$,完全为二氧化硅结构。波导清晰可见,结构紧凑,且端面经过切割抛光处理,抛光角度为 8° 。

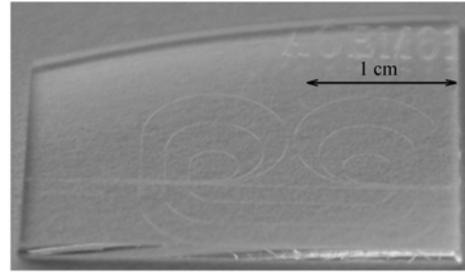


图7 交叉型光波导延迟线阵列

Fig.7 Cross optical waveguide delay line array

4 延迟线测试与分析

利用矢量网络分析仪(Vector network analyzer)的扫频特性来测量延迟时间,搭建了精度较高的测试系统。由于条件有限,测试系统难免存在误差,只有通过分析不确定因素,尽量使误差降到最低。

用静态测量法^[15]测量并计算系统的绝对延时可用式(2)表示:

$$t_g(f) = \frac{d\phi(f)}{df} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\phi(f + \Delta f) - \phi(f)}{\Delta f} \approx \frac{\Delta\phi}{\Delta f} \quad (2)$$

式中, $t_g(f)$ 表示绝对延时, $\phi(f)$ 表示相位特性函数, Δf 表示频率差, $\Delta\phi$ 表示相位差,当频率差较小时,延迟时间可认为是相位差 $\Delta\phi$ 和频率差 Δf 的比值。

图8为搭建的测试系统^[16], 1550 nm 波长的信号光输入到铌酸锂调制器,来自 HP37269C 矢量网络分析仪的射频信号输入电光调制器(调制器的工作点为正弦),将射频信号加载到光信号中,通过偏振控制器,掺铒光纤放大器(EDFA) A 输出放大的光信号,经滤波器 A 滤波整形,传输到分束器,利用单模光纤将分束器的光信号耦合进待测器件。通过掺铒光纤放大器 B 将收集到的光信号放大,经过滤波器 B 整形,送到光探测器实现光电转换,电信号再输入矢量网络分析仪进行处理。最后测量得到传输信号

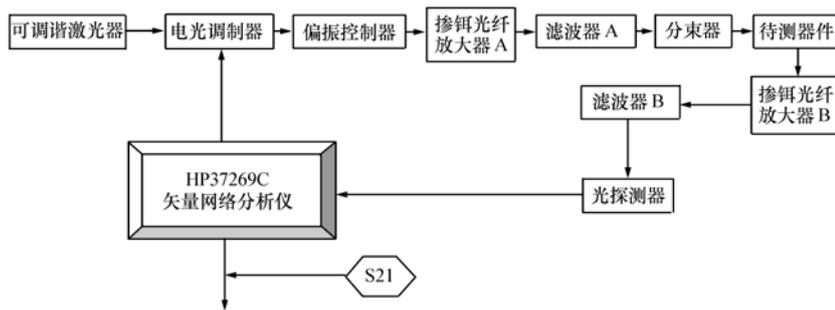


图 8 实验测试系统原理图

Fig. 8 Diagram of experiment measuring system

(S21)的相位^[15,17-18]。对矢量网络分析仪得出的数据进行运算分析,得到待测延迟线器件的延迟时间,分别为 0、113、226 和 339 ps(误差为 3 ps)。

本文设计的 4 通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列,采用可调谐激光器在 1 550 nm 波长光下进行测试,测试系统照片如图 9 所示,图 10 为红外 CCD 收集到的输出光斑,其插入损耗分别为 7、8、9 和 20 dB(从左到右,依次为 1 端

口,2 端口,3 端口,4 端口)。考虑制备工艺的误差带来的损耗、端面耦合损耗以及测试仪器的误差,得到的结果符合设计要求。

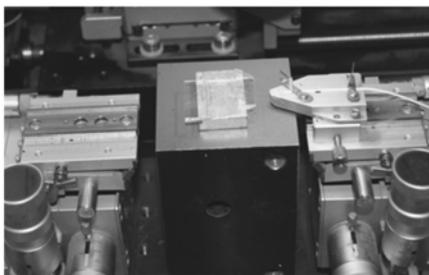


图 9 测试系统照片

Fig. 9 Photograph of measuring system



图 10 延迟线红外输出光斑(输入信号光 1 550 nm, 0.25 mW)

Fig. 10 Optical output patterns of delay line device with the input power 0.25 mW@1550 nm

图 11 为 4 通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列个数集成版图。集成之后,可进一步增加阵列通道间的延迟时间,从而实现光波导延迟线的性能优化。

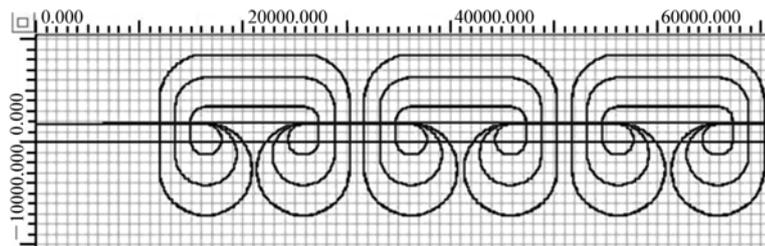


图 11 交叉型延迟线个数集成示意图

Fig. 11 Self-integration of cross optical delay lines

5 结 论

本文设计了4通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列,并利用BPM软件完成了对Y分支,弯曲损耗等参数的模拟,为了降低工艺容差,引入优化锥口Y分支结构和垂直相交波导结构。利用

半导体标准工艺制备了4通道交叉型延迟线阵列,得到延迟时间分别为0、113、226和339 ps;插入损耗分别为7、8、9和20 dB。最后,将4通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列进行个数集成,进一步实现了延迟时间倍增,提高了集成器件性能。

参考文献:

- [1] 张清源,李丽,李全熙,等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学,2013,6(1):80-82.
ZHANG Q Y, LI L, LI Q X, *et al.*. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):80-82. (in Chinese)
- [2] 屈恒阔,张清源,阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学,2012,5(3):242-243.
QU H K, ZHANG Q Y, RUAN Y T. Laser radar based on scanning image tracking[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):242-243. (in Chinese)
- [3] RONALD D E, MICHAEL Y F, DEXTER J L, *et al.*. Fiber-optic prism true time-delay antenna feed[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(11):1347-1349.
- [4] KAMAN V, ZHENG X Z, HELKEY R J, *et al.*. A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a 288 288 3-D MEMS optical switch[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(6):849-851.
- [5] SHIN J D, LEE B S, KIM B G. . Optical true time-delay feeder for x-band phased array antennas composed of 2 2 optical mems switches and fiber delay lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(5):1364-1366.
- [6] JOHN E H, VINCENT W, AARON S, *et al.*. Optical transmission characteristics of fiber ring resonators[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2004, 40(6):726-730.
- [7] CHEN Y H, ZHANG X P, CHEN R T. Substrate-guided-wave hologram-based continuously variable true-time-delay module for microwave phased-array antennas[J]. *SPIE*, 2002, 4652:249.
- [8] CHEN Y H, CHEN R T. A fully packaged true time delay module for a K-band phased array antenna system demonstration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(8):1175-1177.
- [9] CHEN Y H, CHEN R T. K-band phased-array antenna system demonstration using substrate guided wave true-time delay [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(7):2000-2005.
- [10] YENIAY A, GAO R F. True time delay photonic circuit based on perfluoropolymer waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(21):1565-1567.
- [11] YEGNANARAYANAN S, TRINH P D, COPPINGER F, *et al.*. Compact silicon-based integrated optic time delays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(5):634-635.
- [12] YIN S Z. Lithium niobate fibers and waveguides fabrications and applications[J]. *Proceedings IEEE*, 1999, 87(11):1962-1974.
- [13] LEE H, CHEN T, LI J, *et al.*. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(867):1-7.
- [14] 张琨,岳远斌,李彤,等. 感应耦合等离子体刻蚀在聚合物光波导制作中的应用[J]. 中国光学,2012,5(1):64-66.
ZHANG K, YUE Y B, LI T, *et al.*. Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):64-66. (in Chinese)
- [15] 徐磊. 光控相控阵天线光纤实时延时线设计与测试[D]. 大连:大连理工大学,2009.
XU L. Design and measurement of fiber true time delay line in optically controlled phased array antenna[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] CHEN C M, YI Y J, WANG F, *et al.*. Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices

[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 754-760.

[17] YEGNANARAYANAN S, TRINH P D, COPPINGER F, *et al.*. Compact silicon-based integrated optical time-based integrated optical time-delay network[J]. *SPIE*, 1997, 3160: 2-10.

[18] TONG J, WADE J K, MACFARLANE D L, *et al.*. Active integrated photonic true time delay device[J]. *IEEE Photon. Technol. Letter*, 2006, 18(16): 1720-1722.

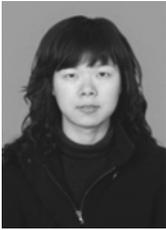
作者简介:



李浩(1981—),男,吉林四平人,硕士研究生,主要从事高速光电子和平面光波导器件方面的研究。E-mail: 25414758@qq.com



李亮(1992—),男,河北新乐人,本科生,主要从事聚合物光波导器件方面的研究。E-mail: 184223886@qq.com



宋玲玲(1982—),女,陕西渭南人,硕士,工程师,主要从事半导体集成器件方面的研究。E-mail: 50113553@qq.com



王菲(1978—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,主要从事聚合物平面光子学器件方面的研究。E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn



张立钧(1989—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事聚合物电光波导器件方面的研究。E-mail: zlj12@mails.jlu.edu.cn



衣云骥(1984—),男,博士,讲师,主要从事聚合物平面光波导集成器件方面的研究。E-mail: yiyj@jlu.edu.cn



王焕然(1990—),男,吉林省吉林市人,硕士研究生,主要从事微流控光波导器件方面的研究。E-mail: 814273000@qq.com



张大明(1970—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光电子器件、有机光电子器件及其集成技术方面的研究。E-mail: zhangdm@jlu.edu.cn