

引用本文: 邓冶, 李坚平, 张振荣. 基于 X 切薄膜铌酸锂的 4×4 MMI 耦合器的设计和制造[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 54–57.

基于 X 切薄膜铌酸锂的 4×4 MMI 耦合器的设计和制造

邓冶, 李坚平, 张振荣*

(广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

摘要: 针对多模干涉(MMI)耦合器存在尺寸大、插入损耗高、工艺复杂的问题, 在基于 X 切薄膜铌酸锂(X-cut TFLN)平台上设计了一种基于横电(TE)模式的 4×4 MMI 耦合器, 采用三维时域有限差分(FDTD)方法对 MMI 区域长度及宽度进行仿真优化, 最后根据优化结果并利用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀方法在该平台上制造 4×4 MMI 耦合器。仿真结果表明, 优化后的 4×4 MMI 耦合器总插入损耗为 0.36 dB, 实际测量插入损耗为 0.78 dB。

关键词: 薄膜铌酸锂; 多模干涉耦合器; 光子集成; 低插入损耗; 电感耦合等离子体刻蚀

中图分类号: TN432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0054-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and fabrication of a 4×4 MMI coupler based on X-cut thin-film lithium niobate

DENG Ye, LI Jianping, ZHANG Zhenrong*

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the problems of large size, high insertion loss, and complex process of multi-mode interference (MMI) coupler, a 4×4 MMI coupler based on transverse electric (TE) mode is designed on the platform of X-cut thin-film lithium niobate (X-cut TFLN). The length and width of the MMI region are simulated and optimized using the three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method. Finally, a 4×4 MMI coupler is manufactured on the platform using inductive coupled plasma (ICP) etching method according to the optimization results. The simulation results show that the total insertion loss of the optimized 4×4 MMI coupler is 0.36 dB, and the actual measured insertion loss is 0.78 dB.

Key words: thin-film lithium niobate, multi-mode interference couplers, photonic integration, low loss, inductive coupled plasma etching

0 引言

铌酸锂因其优异的特性和稳定的化学与物理性质, 在光子学领域有着极其广泛的应用。随着高质量的薄膜铌酸锂(TFLN)晶圆的制备技术日益成熟, 基于 TFLN 的光电子器件的设计与制造也越来越多^[1-3]。其

中, 多模干涉(MMI)耦合器^[4]作为集成光学中最基本的无源器件之一, 具有结构紧凑、插入损耗低、工艺容差好、制作工艺较为容易等特点, 被广泛应用于基于马赫-曾德尔结构的光电调制器、光学相控阵、相干接收机等器件和系统上。此外, 用作多路分支和混合的 4×4 MMI 也有非常良好的应用前景^[5-6]。文献[7]在 Z-cut TFLN 上利用铬作为掩膜制造了高性能的基于横磁(TM)模式的 1×2 MMI 耦合器和 4×4 MMI 耦合器, 其中 4×4 MMI 耦合器的仿真插入损耗约为 0.297 dB, 实际制造得到的插入损耗为 0.63 dB。文献[8]提到的 4×4 MMI 耦合器, 被用于实现 C 波段光学 90°均匀混合, 其插入损耗为 0.37 dB。虽然上述文献中基于铌酸锂平台所设计和制造的器件都有着较好的性能优异, 但仍然存在工艺复杂^[9]、无法兼顾紧凑尺寸^[10]和低损耗^[11]等

收稿日期: 2024-01-29。

基金项目: 广西自然科学基金重点项目(批准号: 2021GXNSFDA076001)资助; 广西创新驱动发展专项(批准号: 桂科 AA21077021)资助。

作者简介: 邓冶(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于广西大学计算机与电子信息学院计算机与科学技术专业, 主要从事基于 TFLN 的光电子器件的设计和制造、光学相控阵方面的研究工作。

* 通信作者: 张振荣(1976—), 男, 博士, 教授, 现就职于广西大学计算机与电子信息学院, 主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。



问题。因此,本文采用三维时域有限差分(FDTD)法研究关键参数对 MMI 性能的影响,并优化 TFLN 的刻蚀工艺,设计和制造一种基于 X-cut TFLN 的 4×4 MMI 耦合器。

1 4×4 MMI 耦合器设计及优化

本文设计了一款基于 4 英寸 X-cut TFLN 的 4×4 MMI 耦合器,其中铌酸锂薄膜层厚度 $H=600\text{ nm}$,氧化硅层和硅衬底的厚度分别为 $4.7\text{ }\mu\text{m}$ 和 5.3 mm 。利用这些参数,本文制造了 4×4 MMI 耦合器,其结构示意图如图 1 所示。该耦合器由 4 个锥形输入波导(对应图中输入端口)、MMI 区域和 4 个锥形输出波导(对应图中输出端口)构成。通过增加 MMI 区域波导的宽度,多模波导长度 L_{MMI} 也相应增长,这有助于激发更多的模式,从而产生更加清晰的自成像点和更低的插入损耗。为平衡器件尺寸与插入损耗,本文设定多模波导宽度 $W_{\text{MMI}}=16\text{ }\mu\text{m}$,同时保持 8 个锥形波导的总长度 $L_{\text{taper}}=20\text{ }\mu\text{m}$,并设定相邻输入/输出波导之间的距离 $W_i=4\text{ }\mu\text{m}$ 。这些锥形波导的宽度从 $W_s=1\text{ }\mu\text{m}$ 线性增加到 $W_{\text{taper}}=2.5\text{ }\mu\text{m}$,以降低波导和多模波导之间的耦合损耗。此外,本文还设置了脊波导的脊高 $h=300\text{ nm}$,这既保证了模式能够有效地限制在波导内部,又降低了器件的制造难度。

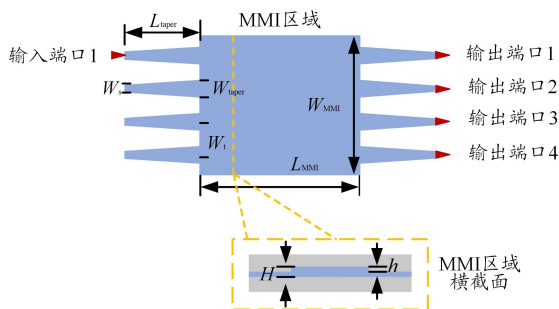
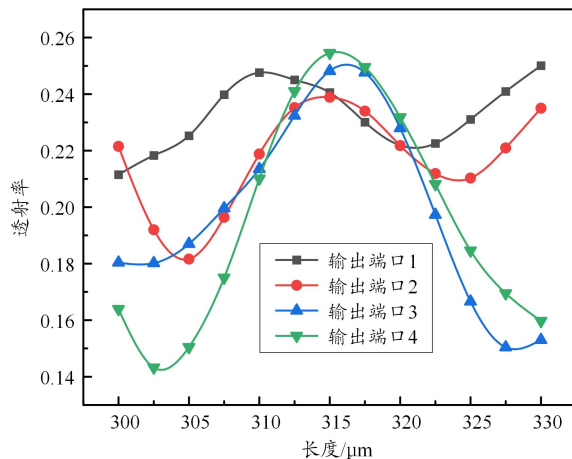


图 1 4×4 MMI 耦合器结构示意图

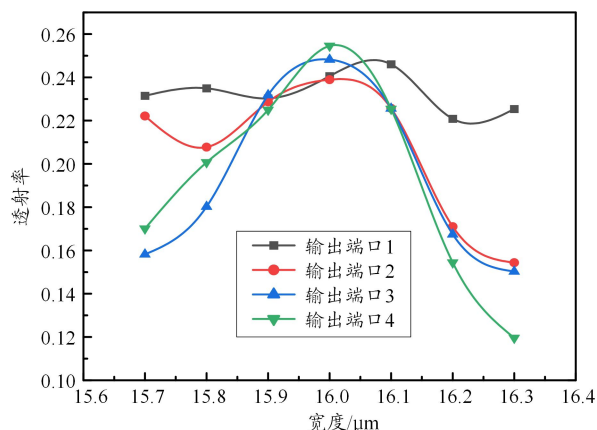
L_{MMI} 和 W_{MMI} 是 4×4 MMI 耦合器的关键参数,本文采用 FDTD 法针对不同的 L_{MMI} 、 W_{MMI} 值进行了仿真。当 TE 模式从输入端口 1 输入时,首先设定 L_{MMI} 的起始值为 $16\text{ }\mu\text{m}$,然后让 L_{MMI} 以一定间隔逐渐递增到 $330\text{ }\mu\text{m}$,同时观察 4×4 MMI 耦合器 4 个输出端口的透射谱,如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,当 L_{MMI} 为 $315\text{ }\mu\text{m}$ 时,4 个输出端口的总透射率最大;当 L_{MMI} 偏离该值时,总透射率会降低,同时每个输出端口的功率一致性也会发生变化。从图 2(b)可以看出,当 $W_{\text{MMI}}=16\text{ }\mu\text{m}$ 时,4 个输出端口的总透射率最大。因此,本文设计 4×4 MMI 耦合器时, L_{MMI} 和 W_{MMI} 分别选定为 $315\text{ }\mu\text{m}$ 和 $16\text{ }\mu\text{m}$ 。

根据上述优化参数进行仿真后,得出耦合器的总插入损耗为 0.36 dB 。

4×4 MMI 耦合器在最佳参数下的光场分布和透射光谱如图 3 所示。可以看出,TE 模式信号从输入端口 1 进入后,经过 MMI 区域的处理,在 4 个输出端口实现了模场的均匀分布,并且各端口的透射率相近。

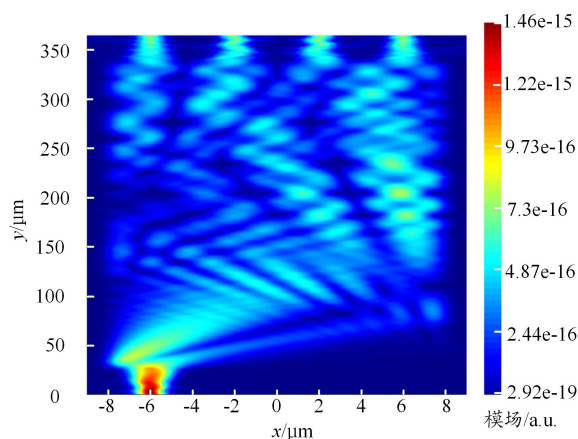


(a) 不同 L_{MMI} 时的透射谱



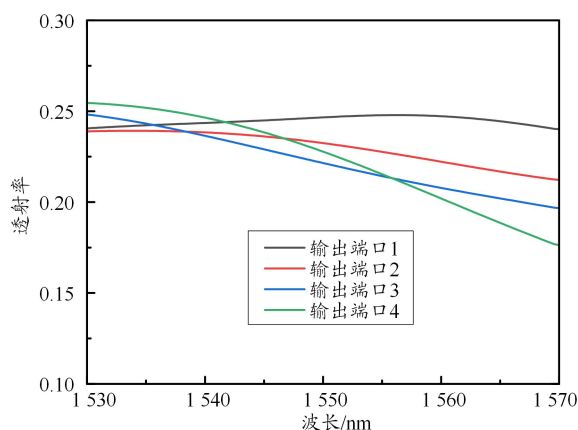
(b) 不同 W_{MMI} 时的透射谱

图 2 4×4 MMI 耦合器在不同 L_{MMI} 和 W_{MMI} 的透射谱



(a) 光场分布

邓冶,李坚平,张振荣: 基于 X 切薄膜铌酸锂的 4×4 MMI 耦合器的设计和制造



(b) 透射谱

图3 4×4 MMI 耦合器的光场分布和透射谱

2 4×4 MMI 耦合器的制造及测试

铌酸锂作为一种质地坚硬、性质稳定的材料,其刻蚀难度极大。在以往的研究中,研究者们一般采用离子注入辅助氢氟酸的湿法刻蚀方法^[14]和质子交换等离子体刻蚀方法刻蚀铌酸锂。然而,这些方法不仅工艺复杂,而且在刻蚀过程中会产生副产物氟化锂,从而影响了铌酸锂的刻蚀效果。为了消除氟化锂对刻蚀波导质量的影响,本文采用了氩气电感耦合等离子体(ICP)刻蚀设备,并结合氨水双氧水混合液进行多次清洗,以去除刻蚀后表面残留的光刻胶及沉淀物。在优化工艺流程和刻蚀参数后,分别测量了长度为1、1.75、2.5 cm 的螺旋线波导传输损耗,得到传输光谱如图4所示。可以看出,随着螺旋线波导长度增加,损耗等比例增加。根据光谱图计算得到对应的螺旋线波导的传输损耗约为0.7 dB/cm,侧壁倾斜角约为60°。刻蚀螺旋线波导的扫描电镜(SEM)图像如图5所示,可以观察到螺旋线波导表面和侧壁光滑且结构完整,证明本文实际刻蚀的波导质量良好。

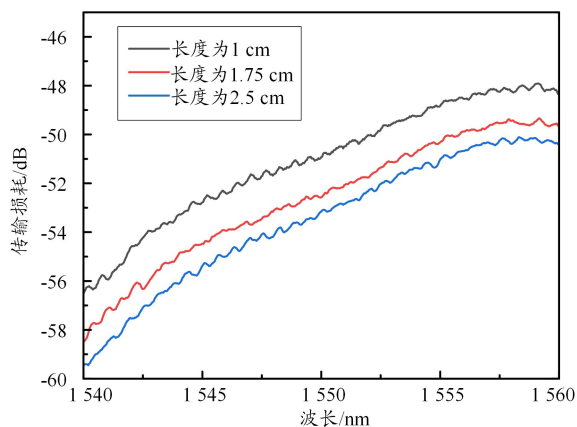


图4 不同长度螺旋线波导的传输光谱

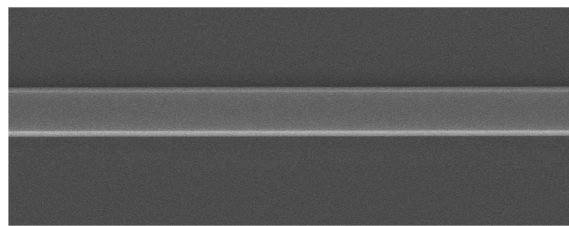


图5 刻蚀螺旋线波导的 SEM 图像

2.1 4×4 MMI 耦合器制造工艺流程

4×4 MMI 耦合器的制造工艺流程如图6所示。首先,使用丙酮溶液和无水乙醇溶液对晶圆进行超声清洗。接着,在晶圆表面旋涂一层厚度为500 nm 的ZEP-520A 光刻胶,作为掩膜。然后,通过电子束光刻(EBL)技术将器件图案绘制在光刻胶上,并使用显影液进行显影。之后,利用 ICP 刻蚀设备,采用氩气直接物理轰击的方式进行干法刻蚀。刻蚀完成后,使用氨水和双氧水的混合溶液清洗残留的光刻胶及其它杂质。最后,通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)设备,在晶圆表面生长一层厚度为1 μm 的氧化硅薄膜。至此,整个工艺流程完成。

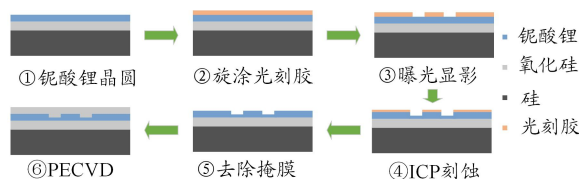


图6 4×4 MMI 耦合器的制造工艺流程

完成工艺流程后,使用显微镜观察4×4 MMI 耦合器,结果如图7所示。可以看出,刻蚀效果较好,MMI 及波导结构表面和侧壁较为光滑,结构之间分离度肉眼能够区分,初步证明所制造的器件达到了理想效果。

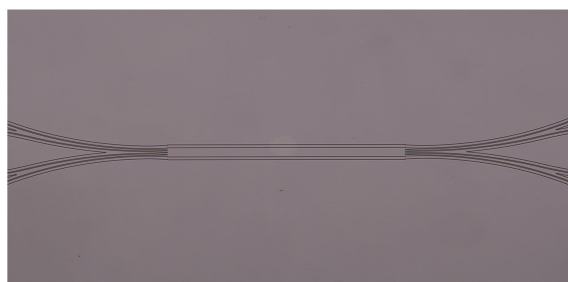


图7 4×4 MMI 耦合器显微镜图片

2.2 器件测试及结果

实验测试示意图如图8所示。具体测试过程如下:首先,使用C波段宽谱光源生成波长为1530~1570 nm 的光信号。接着,偏振分束器(PBS)将这些光信号分离成2种线性的偏振状态。然后,通过调整偏振控制器(PC),将光调整至TE模式,随后依次经过耦

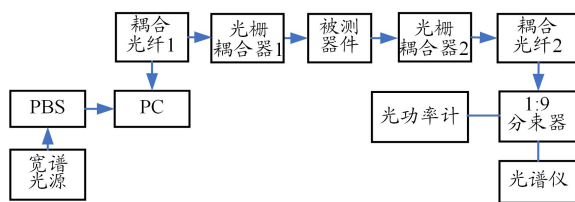


图 8 实验测试示意图

合光纤 1、光栅耦合器 1、被测器件、光栅耦合器 2 和耦合光纤 2, 最终导入 1:9 分束器。在此之后, 光信号分别接入光功率计和光谱仪, 用以测量光的强度和光谱信息。

本文通过将光栅的传输光谱与经过被测器件后的传输光谱进行相减, 得出了所制造器件的损耗。测试结果显示, 单个光栅耦合器的损耗为 12 dB, 波导的传输损耗为 0.7 dB/cm。鉴于波导的传输损耗相对较低, 因此可以忽略光栅耦合器和 MMI 区域之间弯曲波导传输所产生的损耗。

实验测量得到的各输出端口插入损耗随波长的变化关系如图 9 所示。可以看出, 在波长为 1 530~1 570 nm 内, 4 个输出端口的插入损耗相对均匀。其中, 当波长为 1 550 nm 时, 4 个输出端口的插入损耗分别测得为 6.27、6.26、7.40、7.41 dB。将这些实验数据转换为透射率之后, 得到这 4 个输出端口的透射率分别为 0.235、0.237、0.182、0.182。最终, 本文通过进一步计算, 得出所制造的 4×4 MMI 耦合器的总插入损耗为 0.78 dB, 这与仿真结果略有出入, 可能源于工艺误差。

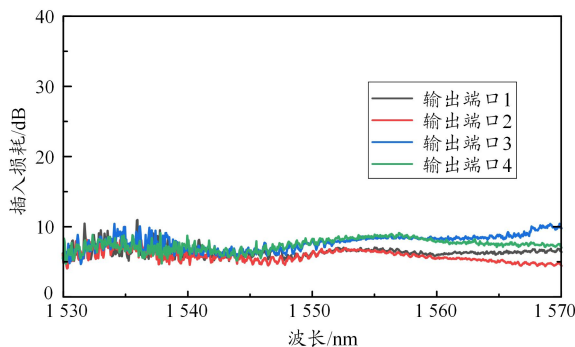


图 9 实验测量到的各输出端口插入损耗随波长的变化关系

3 结束语

本文通过采用 FDTD 法进行仿真优化, 确定了关键参数。随后, 基于这些优化后的参数, 在 600 nm X-

cut TFLN 平台上, 利用 ICP 刻蚀方法成功制造出了 4×4 MMI 耦合器。实验结果表明: 在波长为 1 530~1 570 nm 内, 尺寸为 315 μm ×16 μm 的 4×4 MMI 耦合器的总插入损耗为 0.78 dB。这一实验结果充分证明了本文设计和制造的 4×4 MMI 耦合器具有优异的性能, 有望推动未来 TFLN 平台上的相干接收机系统的发展。

参考文献:

- [1] WANG C, ZHANG M, CHEN X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562: 101–104.
- [2] MENGYUAN L, LAN R, XIAOYING H, et al. Low-loss, broadband MMI coupler based on thin lithium niobate platform[J]. Physica Scripta, 2023, 98(3): 035506-1–035506-9.
- [3] KRASNOKUTSKA I, CHAPMAN R J, TAMBASCO J J, et al. High coupling efficiency grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17681–17685.
- [4] SOLDANO L B, PENNING S E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(4): 615–627.
- [5] FARWELL S, AIVALIOTIS PYAHONG Q, et al. InP coherent receiver chip with high performance and manufacturability for CFP₂ modules[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 9–13, 2014, San Francisco, USA. San Francisco: IEEE, 2014: W1L.6-1–W1L.6-3.
- [6] SEIMETZ M, WEINERT C M. Options, feasibility, and availability of 2×4 90° hybrids for coherent optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1317–1322.
- [7] GUANYU C, JUN D N, HONGLIN L, et al. Design and fabrication of high-performance multimode interferometer in lithium niobate thin film[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15689–15698.
- [8] HEYUN T, JING W, WEI K, et al. C-band optical 90-degree hybrid using thin film lithium niobate[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1946–1949.
- [9] KRASNOKUTSKA I, TAMBASCO J J, XIJUN L, et al. Ultra-low loss photonic circuits in lithium niobate on insulator [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 897–904.
- [10] YICUN Y, WENJUN W, BINGYUAN Z. Designing MMI structured beam-splitter in LiNbO₃ crystal based on a combination of ion implantation and femtosecond laser ablation[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19648–19656.
- [11] PROST M G L, YOO S J. A compact thin-film lithium niobate platform with arrayed waveguide gratings and MMIs [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11–15, 2018, San Diego, USA. San Diego: IEEE, 2018: Tu3A.3-1–Tu3A.3-3.
- [14] REN Z, HEARD P J, MARSHALL J M, et al. Etching characteristics of LiNbO₃ in reactive ion etching and inductively coupled plasma [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(3): 103–109.