



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210175

湿法刻蚀制备铌酸锂锥形脊波导

谷珍杰¹, 温旭杰², 张维佳¹, 华平壤³, 饶前程¹, 黄颖³

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2. 中电科技德清华莹电子有限公司, 湖州 313000;
3. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 采用由质子交换辅助湿法刻蚀技术, 在 Z 切铌酸锂晶体上成功制备锥形脊波导. 该波导脊高为 1.2 μm 、脊宽从 4 μm 增大至 8 μm , 插入损耗 4.4 dB. 波导表面光滑, 表面粗糙度为 0.84 nm, 没有出现塌边或横向刻蚀的现象. 波导宽度从 4 μm 增大至 8 μm , 模式尺寸在水平方向上从 4.3 μm 增大至 6.8 μm , 在垂直方向上从 3.2 μm 增大至 5.6 μm . 当波导宽度增大时模场尺寸也增大, 实现小模场与大模场之间的转换.

关键词: 质子交换; 铌酸锂; 锥形结构; 湿法刻蚀; 脊波导

中图分类号: TN252 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2022)02-0057-04

Preparation of Lithium Niobate Taper Ridge Waveguide by Wet Etching

GU Zhenjie¹, WEN Xujie², ZHANG Weijia¹, HUA Pingrang³, RAO Qiancheng¹, HUANG Ying³

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2. CETC Deqing Huaying Electronics Co., Ltd., Huzhou 313000, China;
3. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The tapered ridge waveguide was successfully fabricated by proton exchange-assisted wet etching on Z-cut lithium niobate crystal. The ridge height of the waveguide is 1.2 μm , and the width of the cone increases from 4 μm to 8 μm . The insertion loss of the waveguide is 4.4 dB. The surface of the waveguide is smooth with a surface roughness of 0.836 nm, and there is no edge collapse or transverse etching. The waveguide width increases from 4 μm to 8 μm . The model size increases from 4.3 μm to 6.8 μm in the horizontal direction and from 3.2 μm to 5.6 μm in the vertical direction. When the width of waveguide increases, the size of mode field also increases, realizing the conversion between the small mode and the large mode field.

Key words: proton exchange; lithium niobate; tapered structure; wet etching; ridge waveguide

随着“集成光学”^[1]概念的提出和发展, 人类正式进入光通信^[2]时代. 集成光学器件的性能主要依赖于核心光波导的传输性能和调制性能, 以及波导光纤互连时耦合损耗对性能的影响. 铌酸锂晶体具有优良的声光、压电以及非线性光学特性, 利用薄膜结构可以更好地限制声表面波的传输. 因此, 在铌酸锂薄膜材料上制作波导, 不仅可以充分利用材料的性能, 还能利用其结构上的优势进一步提高器件的调制效率. 人们通常采用刻蚀工艺在铌酸锂薄膜上制作脊波导^[3-4], 与传统的扩散型沟槽波导相比较, 脊波导

有效地减小了弯曲损耗^[5], 提高了光学器件的集成度. 脊波导的引入不仅减小了光学模式的尺寸, 提高晶体非线性效应的效率, 还有效地降低铌酸锂电光调制器的半波电压^[6]. 尽管铌酸锂脊波导有上述很多优点, 但由于波导尺寸减小, 模场直径也随之减小, 与普通单模光纤的模场直径存在严重的失配, 最终导致集成光波导器件的插入损耗过大. 此时, 锥形结构^[7-9]可将尺寸不匹配的波导和光纤进行高效地连接, 因此, 锥形脊波导可降低波导和光纤的耦合损耗.

现有脊波导的刻蚀工艺只能实现水平方向波导

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-12-30

基金项目: 2020年天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202026); 天津市重点研发计划科技支撑项目(19YFZCGX00140)

作者简介: 谷珍杰(1996—), 女, 沈丘人, 硕士研究生; 通信作者: 张维佳, 讲师, zwj@tust.edu.cn

尺寸的调节,深度方向的波导尺寸是由薄膜的厚度决定的,因此,很难同时在两个方向同时增大或减小波导的模场尺寸.本文选择在Z切铌酸锂基底上采用质子交换技术^[10-12]辅助湿法刻蚀方法制备锥形脊波导.该锥形脊波导不仅在水平方向实现了模场调节,同时可在深度方向改变模场直径^[13].在同一波导通道内,实现了模场压缩或扩展,可用于解决集成光学器件中光波导与单模光纤直接连接时模式不匹配的问题,可以有效地降低器件的耦合损耗,有力推动基于脊波导的集成光波导器件的商业化应用.

1 波导的制作

实验使用直径 7.62 cm、厚度 0.35 mm 的同成分 Z 切铌酸锂圆晶作为初始材料,将其分切为 20 mm × 10 mm × 0.35 mm 的矩形晶片.波导的结构制作过程有:晶片的清洗、溅射铬(Cr)薄膜、光刻、刻蚀铬、去胶、质子交换、湿法刻蚀、去除铬、退火以及端面抛光,如图 1 所示.该工艺流程采用 H⁺的横向扩散进入脊形区域来形成高折射率区域进而形成波导;为了保证有足够的 H⁺进入波导区域,在质子交换阶段使用纯苯甲酸(纯苯甲酸内 H⁺浓度高)作为质子交换源.质子交换过程会改变铌酸锂晶体的晶向,需要在质子交换过程之后对晶体进行退火处理,退火能大幅度恢复铌酸锂晶体的电光系数^[14-16]和非线性系数^[17].

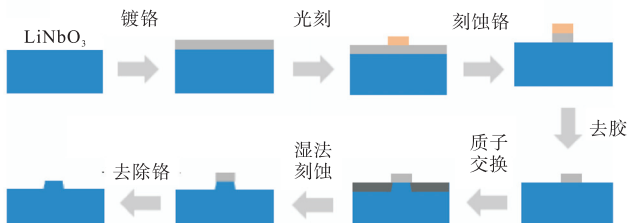


图 1 侧向扩散型脊波导制作的主要工艺

Fig. 1 Main technology of making lateral diffused ridge waveguide

具体制作步骤:

① 清洗:通过碱溶液煮片、超声振荡以及擦拭等工艺流程清洗晶片,保证晶体表面的洁净度.

② 镀铬:采用磁控直流溅射铬,在晶片表面沉积厚度约 150 nm 的铬薄膜.

③ 光刻:使用锥形结构的掩模版和负性光刻胶 AZ5214E,将匀胶后的晶片放入烘箱烘烤 20 min 后取出冷却,第一次曝光时间设置为 4 s,第二次曝光时间设置为 40 s.显影液用氢氧化钠溶液(将 1 g 氢氧化钠与 100 mL 去离子水混合后所得溶液),将曝光

后的晶片放入显影液中浸泡 40 s,将晶片表面铬薄膜制作成条;条宽从 4 μm 增大到 8 μm,图 2 为光刻后的铬条局部镜检图.

④ 刻蚀铬:将晶片表面的铬用铬腐蚀液去除.

⑤ 去胶:用丙酮洗去光刻胶曝光后生成的不可溶性物质.

⑥ 质子交换:将纯苯甲酸为质子源的交换液加热至 245 °C,然后放入刻蚀后的晶体,在 245 °C 的恒温条件下交换 5 h.

⑦ 湿法刻蚀:将清洗后的晶片置于由质量分数 40% 的 HF 溶液与质量分数 68% 的 HNO₃ 溶液按体积比 1 : 3 混合后所得刻蚀液中,常温下刻蚀处理 6 h,每隔 0.5 h 取出擦拭化学反应的中间产物(铬膜作为阻挡层,不会与刻蚀液发生反应,且能保证刻蚀的脊波导的完整,不会发生脊面的崩坍).

⑧ 去除铬:将晶片表面的铬用铬腐蚀液去除.

⑨ 退火:将清洗干净后的晶片放入退火炉中,370 °C 退火处理 4 h.

⑩ 端面抛光:使用抛光机将晶片两端面进行抛光处理.

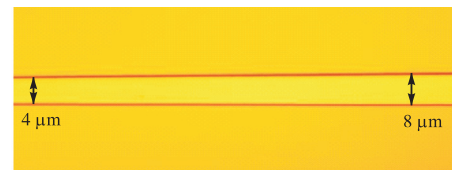


图 2 光刻后铬条局部镜检图

Fig. 2 Local microscopic view of Cr strip after photolithography

2 波导的表征与模场

2.1 波导的表征

由于铌酸锂晶体在低温 122 °C 时交换过程就已经开始,所以在波导制备工艺中的质子交换环节,预热会导致纯苯甲酸处理晶体的晶相被破坏,在后期湿法刻蚀后,晶体表面会较为粗糙^[18].1992 年,Jackel 等提出质子交换制作铌酸锂波导的方法,此后,经 Nutt 等完善后提出一个较为完整的质子交换法.因此,在实际制备波导的过程中不进行预热.图 3 是台阶仪测得的波导结构图.从图 3 可以看到脊波导的表面和侧壁均很光滑、平整,在波导宽度为 6.8 μm 的位置处,表面粗糙度为 0.84 nm.交换区域刻蚀后的表面都很光滑.

在刻蚀环节中,刻蚀溶剂和基底材料充分接触,

且长时间的浸泡会出现掩膜底部刻蚀和横向刻蚀等现象. 所以, 在波导的制作过程中通过镀膜工艺和退火来增加掩膜与基底的结合力, 保证刻蚀后的脊宽. 对制作完成的脊波导进行观测, 结果如图 4 所示.

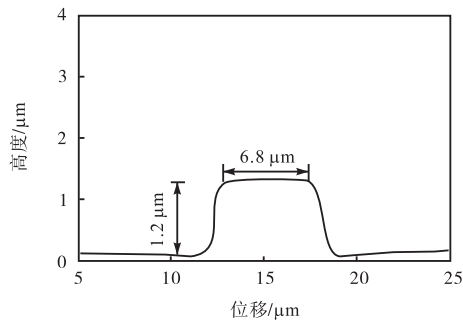
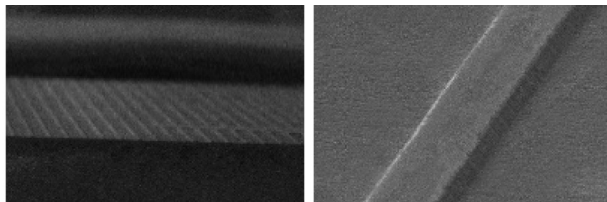


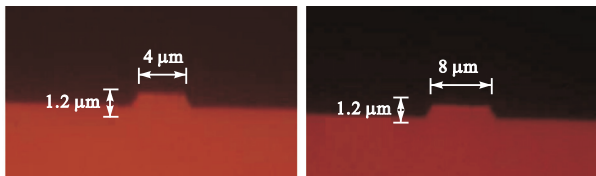
图 3 侧向扩散锥形脊波导的结构

Fig. 3 Structure of the laterally diffused conical ridge waveguide



(a) 菱形片侧视图

(b) 波导 SEM 俯视图



(c) 波导输入端

(d) 波导输出端

4 脊波导电镜扫描图和端面

Fig. 4 Scanning and end view of cone-shaped ridge wave conductive mirror

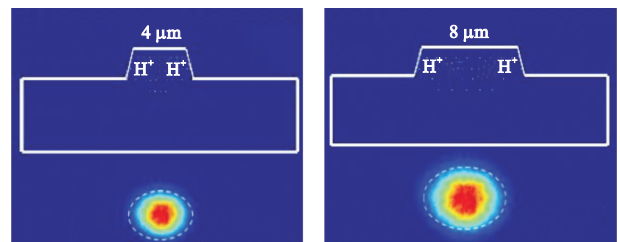
通过电镜扫描图 4(a)、4(b)和制作完成抛光后的波导端面图 4(c)、4(d)可以看出, 波导的边缘十分平整, 表面非常干净. 脊高约为 $1.2 \mu\text{m}$, 脊波导的输入端宽度为 $4 \mu\text{m}$ 、输出端宽度为 $8 \mu\text{m}$. 通过台阶仪和电镜扫描图可以明显地观察到纯苯甲酸交换区域刻蚀处理后的效果非常理想, 没有出现塌边或横向刻蚀的现象.

2.2 波导的模式分析

湿法刻蚀制作的锥形脊波导, 与传统的退火质子交换不同, 其波导形成区域是: 通过后期的退火处理将质子交换时由横向扩散进入锥形区域的 H^+ 进一步向内部均匀扩散, 从而形成高折射率的波导区.

经湿法刻蚀后, 留在脊侧壁附近的 H^+ 数量是相

等的. 随着脊宽从 $4 \mu\text{m}$ 逐渐增大到 $8 \mu\text{m}$, 退火后 H^+ 均匀分布的区域也逐渐增大. 在脊宽为 $4 \mu\text{m}$ 的区域, 通过退火后 H^+ 均匀分布到更小区域, H^+ 浓度增加, 与基底折射率的对比度大, 对光场的约束能力增强, 垂直模场尺寸小, 如图 5(a) 所示; 反之, 在脊宽为 $8 \mu\text{m}$ 的区域, 退火后 H^+ 均匀分布在很大区域, H^+ 浓度变得很低, 与基底折射率的对比度小, 对光场的约束能力下降, 垂直模场尺寸大, 如图 5(b) 所示. 此外, 在水平方向上, 由于锥形结构引入的阶跃折射率对光场的束缚, 随着脊宽度的增加, 模场尺寸也增大. 由以上分析可知, 本文制作的锥形脊波导, 其传输的模式尺寸随着脊宽的增大而增大, 随着脊宽的减小而减小. 使用锥形结构时, 可实现不同尺寸模场的转换和匹配.



(a) 小模场

(b) 大模场

图 5 锥形脊波导不同脊宽下的模场

Fig. 5 Mode fields of tapered ridge waveguide with different ridge widths

2.3 波导的损耗测试

测试光纤采用的是包层为 $80 \mu\text{m}$ 的保偏光纤, 模场尺寸约 $6.5 \mu\text{m}$, 1550 nm 的光源接入, 波导的输出端通过物镜聚焦成像在红外电荷耦合器件 (CCD) 上, 通过计算机进行计算并输出完整的模斑图案, 如图 5 所示. 模场直径的意思是指在单模光纤的纤芯区域基模光的分布状态, 主要通过光强降低到轴线最大光强的 $1/e^2$ 处两点之间的最大距离. 图 5(a) 小模场: 波导脊宽为 $4 \mu\text{m}$ 的模场图. 模式尺寸在水平方向上 $4.3 \mu\text{m}$, 在垂直方向上 $3.2 \mu\text{m}$. 图 5(b) 大模场: 波导脊宽为 $8 \mu\text{m}$ 的模场图. 模式尺寸在水平方向上 $6.8 \mu\text{m}$, 在垂直方向上 $5.6 \mu\text{m}$.

对波导进行近场模式采集发现, 制作出随着脊宽的增大, 模式尺寸在横向和纵向上均增大的波导. 对制作的锥形脊波导进行传输损耗的测试. 通过对测量的数据进行计算得到插入损耗 L 为 4.4 dB , 损耗较大. 原因主要有: 波导与光纤之间的耦合损耗较大, 光纤的端面是圆柱形, 没有进行锥形的设计; 波导的尺寸与入射光波长之间不匹配, 1550 nm 的光不能很

好地耦合进入波导区域. 下一步计划对锥形脊波导的尺寸进行优化, 设计制作输入端为 $6\ \mu\text{m}$ 的波导, 并在此基础上不断优化; 制作出输入端模场为 $6.5\ \mu\text{m}$ 的波导, 使其完成与光纤的模场匹配, 从而有效降低器件的耦合损耗, 推动脊波导商业化应用.

3 结 语

采用质子交换技术辅助湿法刻蚀方法, 在 Z 切铌酸锂基底上制备了锥形脊波导. 使用直流溅射在基底正面制作光刻锥形铬条掩膜, 在 $245\ ^\circ\text{C}$ 条件下使用纯苯甲酸质子交换 $5\ \text{h}$, 然后进行湿法刻蚀 $6\ \text{h}$, 最后在 $370\ ^\circ\text{C}$ 条件下退火 $4\ \text{h}$ 完成锥形脊波导的制作. 该波导脊高为 $1.2\ \mu\text{m}$. 波导输入端 $4\ \mu\text{m}$ 、输出端 $8\ \mu\text{m}$, 宽度沿着一侧呈线性变化. 插入损耗 L 为 $4.4\ \text{dB}$. 交换区域刻蚀后波导表面光滑, 粗糙度为 $0.84\ \text{nm}$, 没有出现塌边或横向刻蚀的现象. 波导宽度从 $4\ \mu\text{m}$ 增大至 $8\ \mu\text{m}$, 模式尺寸在水平方向上从 $4.3\ \mu\text{m}$ 增大至 $6.8\ \mu\text{m}$, 在垂直方向上从 $3.2\ \mu\text{m}$ 增大至 $5.6\ \mu\text{m}$. 波导宽度增大, 同时模场尺寸也增大, 实现小模场与大模场之间的转换. 后续进行波导尺寸优化, 可以实现普通单模光纤与集成光波导器件的模式匹配和转换, 可以解决目前集成光电子平台面临的插入损耗过大的问题, 推动该类器件的商业化应用.

参考文献:

- [1] SCARMOZZINO R, OSGOOD, R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications[J]. Journal of the optical society of America A, 1991, 8(5): 724-731.
- [2] PERSONICK S D. Receiver design for digital fiber optic communication systems, I[J]. Bell system technical journal, 1973, 52(6): 843-874.
- [3] PAZ-PUJALT G R, TUSCHEL D D, BRAUNSTEIN G, et al. Characterization of proton exchange lithium niobate waveguides[J]. Journal of applied physics, 1994, 76(7): 3981-3987.
- [4] GEISS R, SARAVI S, SERGEYEV A, et al. Fabrication of nanoscale lithium niobate waveguides for second-harmonic generation[J]. Optics letters, 2015, 40(12): 2715-2718.
- [5] DABBY F W. Optical waveguides having reduced bending loss and method of making the same:US5175785 [P]. 1992-12-29.
- [6] SHI Y Q, ZHANG C, ZHANG H, et al. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape[J]. Science, 2000, 288(5463): 119-122.
- [7] HADLEY G R. Design of tapered waveguides for improved output coupling[J]. IEEE Photonics technology letters, 1993, 5(9): 1068-1070.
- [8] COURJAL N, DEVAUX F, GERTHOFFER A, et al. Low-loss LiNbO_3 tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing[J]. Optics express, 2015, 23(11): 13983-13990.
- [9] GERTHOFFER A, GUYOT C, QIU W, et al. Strong reduction of propagation losses in LiNbO_3 ridge waveguides[J]. Optical materials, 2014, 38: 37-41.
- [10] JACKEL J L, RICE C E, VESELKA J J. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO_3 [J]. Applied physics letters, 1982, 41(7): 607-608.
- [11] CASTALDINI D, BASSI P, TASCU S, et al. Soft-proton-exchange tapers for low insertion-loss LiNbO_3 devices[J]. Journal of lightwave technology, 2007, 25(6): 1588-1593.
- [12] WEIXING H, WANGXIANG H, YANGXING Z, et al. Investigation of strains of proton-exchanged waveguides in $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ [J]. Ferroelectrics, 1991, 119(1): 1-7.
- [13] 胡越, 项华中, 涂建坤, 等. 基于远场可变孔径的高斯函数拟合测量模场直径[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 123-127.
- [14] KORKISHKO Y N, FEDOROV V A. Structural and optical characterization of annealed proton exchanged LiNbO_3 optical waveguides[J]. Optical materials, 1996, 5(3): 175-185.
- [15] SAVATINOVA I, TONCHEV S, TODOROV R, et al. Electro-optic effect in proton exchanged LiNbO_3 and LiTaO_3 waveguides[J]. Journal of lightwave technology, 1996, 14(3): 403-409.
- [16] ROBERTSON E E, EASON R W, YOKOO Y, et al. Photorefractive damage removal in annealed-proton-exchanged LiNbO_3 channel waveguides[J]. Applied physics letters, 1997, 70(16): 2094-2096.
- [17] KORKISHKO Y N, FEDOROV V A, KOSTRITSKII S M, et al. Proton-exchanged waveguides in MgO -doped LiNbO_3 : optical and structural properties[J]. Journal of applied physics, 2003, 94(2): 1163-1170.
- [18] HU H, RICKEN R, SOHLER W, et al. Lithium niobate ridge waveguides fabricated by wet etching[J]. IEEE Photonics technology letters, 2007, 19(6): 417-419.

责任编辑: 周建军