

钛扩散铌酸锂脊形波导理论分析与初步制备

李金洋 要彦清 吴建杰 祁志美

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 铌酸锂脊形波导最近引起了广泛研究兴趣,它通常采用刻蚀钛扩散或质子交换铌酸锂条形波导或平板波导的方法制作而成。对由这两种方法制备的钛扩散铌酸锂脊形波导在 1550 nm 波长处的横电基模光场分布进行了仿真分析。结果指出,当钛扩散条件相同时,通过刻蚀钛扩散铌酸锂平板波导得到的脊形结构在横向和纵向上对导模均具有更好的束缚能力。这种脊形波导的制作工艺相对简单,它对导模的强束缚有利于减小铌酸锂电光调制器尺寸和提高光电重叠积分因子。实验制备了钛扩散铌酸锂平板波导,并基于微机电系统(MEMS)工艺在其表面制作出 Cr 膜马赫-曾德尔干涉计(MZI)阵列图案,然后在 SF₆ 气氛中对平板波导进行反应离子刻蚀,初步得到了铌酸锂脊形波导 MZI 阵列。扫描电镜分析结果显示制得的脊形波导横截面呈梯形状,两侧面较粗糙,脊高约 670 nm。

关键词 光学器件;铌酸锂;反应离子刻蚀;脊形波导

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0223001

Theoretical Analysis and Preliminary Fabrication of Ti-Diffused LiNbO₃ Ridge Waveguides

Li Jinyang Yao Yanqing Wu Jianjie Qi Zhimei

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Lithium niobate (LN) ridge waveguides have recently attracted considerable attention, and they are usually fabricated by etching LN channel or slab waveguides prepared by Ti indiffusion or proton exchange. The field profile of the fundamental transverse electric (TE) mode guided in each of the two LN ridge waveguides converted from the Ti-indiffused channel and slab waveguides is simulated at 1550 nm wavelength. The simulation results indicate that the LN slab waveguide can offer the resulting ridge structure a stronger confinement of the TE mode as compared with the channel waveguide made under the same Ti-indiffusing conditions. The strong confinement of the guided mode allows for miniaturizing the LN-based photonic devices and for enhancing the electro-optical overlapping factor. It is also simple to fabricate the ridge structure from LN slab waveguides. On the other hand, Ti-indiffused LN slab waveguides are prepared, on which a chromium layer with a pattern of Mach-Zehnder interferometer (MZI) array is fabricated by the micro electro mechanical systems (MEMS) process. The ridge waveguide MZI array is realized by reactive ion etching of the slab LN waveguide in the SF₆ atmosphere. Investigations by scanning electron microscopy reveal that the prepared LN ridge waveguides have a ridge height of 670 nm and an isosceles trapezoid cross section and their sidefaces are rather coarse.

Key words optical devices; lithium niobate; reactive ion etching; ridge waveguide

OCIS codes 130.3730; 230.2090; 230.3120; 230.4000; 230.7370

1 引 言

铌酸锂(LN)晶体集压电、电光、声光、非线性光

学和光折变等物理效应于一身,是迄今人们所发现的透射窗口最宽(0.37~5 μm)、功能最多、综合指

收稿日期: 2012-09-04; 收到修改稿日期: 2012-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61078039)资助课题。

作者简介: 李金洋(1988—),男,博士研究生,主要从事导波光学传感技术及其应用方面的研究。

E-mail: ljyabc1@163.com

导师简介: 祁志美(1967—),男,博士,研究员,主要从事集成光学传感器、纳米敏感材料及 MOEMS 技术等方面的研究。

E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn(通信联系人)

标最好的高折射率人工晶体之一,常被制作成三维光波导用于光通信、光放大、光存储、光调制和光传感等领域^[1~6]。最常用的 LN 三维光波导是由高温钛内扩散制作而成的埋入式条形波导。渐变折射率波导层使得这种光波导对导波光的束缚较弱,不适合形成曲率半径较小的弯曲结构,从而不利于制作体积小、集成度高的光子器件。这种埋入式条形 LN 波导的另一个缺点是其导模的光电重叠积分因子较小,因此电光调制效率较低,常需要较高的调制电压和较大的波导长度来实现实际应用需要的电光调制效果。为了减小 LN 集成光波导器件尺寸,提高器件集成度,增大光电重叠积分因子,降低调制电压,近年来国内外科研工作者们广泛开展了 LN 脊形波导的研究工作^[7],因为 LN 脊形波导在导模约束能力、电光调制效率等方面优于埋入式条形波导。

常见的 LN 脊形波导的制作方法有三种:1)制作钛扩散或质子交换 LN 平面波导,然后进行刻蚀实现脊形结构^[8~10];2)先采用钛扩散或质子交换方法在 LN 衬底表面形成埋入式条形波导,再对条形波导进行刻蚀形成脊形结构^[11~13];3)先刻蚀 LN 衬底得到脊形结构,再进行局部钛扩散或质子交换获得脊形波导^[14,15]。方法 2)是制作 LN 脊形波导的传统方法,需要在 LN 衬底上掩膜光刻出条形图案,接着进行钛扩散或质子交换得到埋入式条形波导,最后通过套刻和刻蚀工艺制作出脊形波导。方法 3)与方法 2)类似,需要经过第一次掩膜光刻在 LN 衬底上刻蚀出脊形结构,再经过套刻工艺结合钛扩散或质子交换方法形成脊形波导。而方法 1)仅需要在 LN 基底上简单制作钛扩散或质子交换平面波导,然后经过一次掩膜光刻就可把平面波导刻蚀为

脊形波导,不涉及套刻工艺,因此较其他两种方法最为简便,同时有利于提高器件精度。

在前期工作中^[16]已经利用高温钛扩散方法在 x -切割、 y -传输的 LN 晶片上制作出埋入式条形波导马赫-曾德尔干涉仪(MZI)及推挽调制电极。在此基础上,本文基于方法 1),先在 x -切割、 y -传输的 LN 衬底上通过钛扩散制作平板波导,再利用反应离子刻蚀(RIE)直接刻蚀平板波导实现了脊形结构。通过基于有限差分法(FDM)和有限元法(FEM)的仿真计算,对方法 1)制作的脊形波导(Ridge-OWG1)和由方法 2)通过刻蚀埋入式条形波导制得的脊形波导(Ridge-OWG2)进行了对比。两种钛扩散 LN 脊形单模光波导在 1550 nm 波长处的光场分布和电场分布表明,Ridge-OWG1 具有更强的光场束缚能力和更高的光电重叠积分因子,并对基于 Ridge-OWG1 的 MZI 阵列进行了初步实验制作与形貌表征。

2 两种钛扩散 LN 脊形光波导的仿真分析

制备钛扩散光波导通常是先在 LN 晶体上溅射一定厚度和宽度的 Ti 金属薄膜,然后在 900 °C ~ 1150 °C 范围内的 Ar、O₂ 或者空气氛围中扩散 0.5~30 h 不等,从而形成渐变折射率光波导。由钛扩散引起的折射率增量在纵向上服从高斯分布,在横向上则服从余误差函数分布, x -切割、 y -传输的 LN 波导在 TE 模式下折射率分布可表示为^[17,18]

$$n(x, z) = n_e + \Delta n g(z) f(x), \quad (1)$$

式中

$$g(z) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{w/2 + z}{h_z} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{w/2 - z}{h_z} \right) \right], \quad (2)$$

$$f(x) = \exp \left(-\frac{x^2}{h_x^2} \right), \quad (3)$$

$$n_e = \sqrt{2.9804 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02047} + 0.5981 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0666} + 8.9543 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 416.08} + 1}, \quad (4)$$

$$\Delta n(\lambda) = \left[B_0(\lambda) + B_1(\lambda) \frac{\tau}{h_z} \right] \left[\frac{\tau}{h_z} \right]^{0.83} \left(\frac{h_z}{h_x} \right), \quad (5)$$

式中 n_e 为 LN 基底的非寻常光折射率, Δn 为钛扩散引入的最大表面折射率变化, $g(z)$ 为 z 向折射率分布系数, $f(x)$ 为 x 向折射率分布系数, w 为钛膜的横向宽度; λ 为波长, $B_0 = 0.385 - 0.430\lambda +$

$0.171\lambda^2$, $B_1 = 9.13 + 3.85\lambda - 2.49\lambda^2$, τ 为初始钛膜厚度, h_z 和 h_x 分别为 z 方向和 x 方向的扩散深度。在任一方向的扩散深度 h 可表示为扩散时间 t 和该方向上扩散系数 D 的函数:

$$h = 2 \sqrt{DT}, \quad (6)$$

式中 $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_0}{\kappa T}\right)$, T 为扩散温度, κ 为波尔兹曼常数。对于钛在 LN 晶体 z 方向和 x 方向的扩散, 有 $D_{0z} = 5 \times 10^9 \mu\text{m}^2/\text{h}$, $E_{0z} = 4.016 \times 10^{-19} \text{ J}$, $D_{0x} = 1.35 \times 10^8 \mu\text{m}^2/\text{h}$, $E_{0x} = 3.552 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

在制备钛扩散 LN 平面或条形波导时, 只要钛扩散工艺参数给定, 就可以利用上述关系确定扩散层的折射率分布曲线。

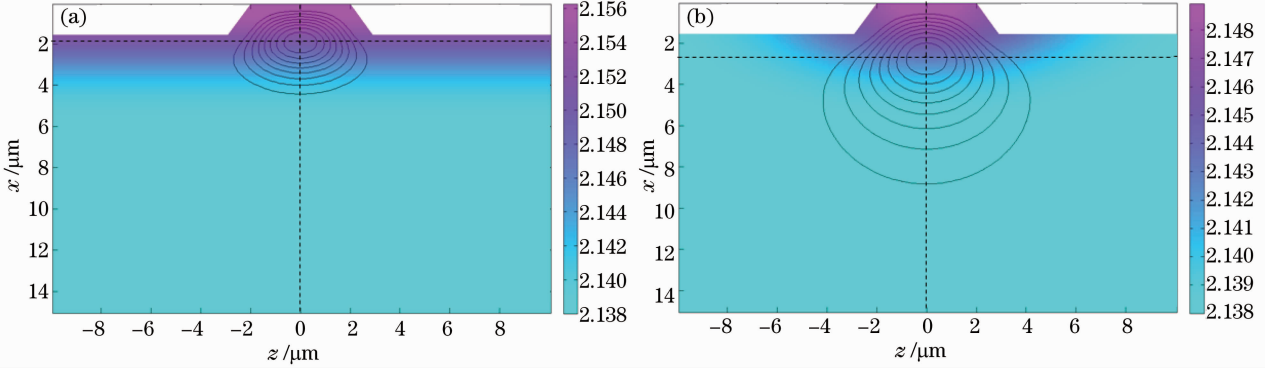


图 1 两种钛扩散 LN 脊形波导的折射率分布及在 1550 nm 波长下各波导的 TE 基模场强轮廓。(a) Ridge-OWG1; (b) Ridge-OWG2, 图中两条虚线的交点代表导模场中心

Fig. 1 Refractive index distributions of the two Ti-diffused LN ridge waveguides and the field intensity profiles when $\lambda = 1550 \text{ nm}$ for the fundamental TE modes guided in the corresponding waveguides. (a) Ridge-OWG1; (b) Ridge-OWG2. The crosspoint of the two dotted lines represents the maximum of the optical field

图 1(b) 为在相同工艺条件下, 基于方法 2), 由 $6 \mu\text{m}$ 宽、 105 nm 厚 Ti 条扩散形成埋入式条形波导, 再进行相同刻蚀得到的 Ridge-OWG2。

根据 Marcatili 近似解析法^[19], 矩形介质波导可分解为横向和纵向两个等效介质平板波导。基于这一思想, Ridge-OWG1 中导模在纵向上受到由钛扩散引入的渐变折射率的限制, 在横向上受到由脊形结构内外不同物质构成的阶跃折射率的限制。Ridge-OWG2 中导模在纵向上同样受到渐变折射率的限制, 但在横向上同时受到渐变折射率和阶跃折射率的限制。

从图 1 中可以看出, Ridge-OWG1 较 Ridge-OWG2 具有更大的折射率和更高的纵向折射率梯度。这是由于在相同的工艺条件下, 平板钛扩散中 Ti^{4+} 在纵向上单维扩散, 在衬底中具有更高的浓度, 从而使 Ridge-OWG1 具有更大的折射率改变量。因此, Ridge-OWG1 在纵向上具有更强的光场束缚能力。

横向上, 脊形结构引入的阶跃折射率对导模的限制, 受到纵向上光场分布和阶跃折射率差的影响。脊内光场所占总光场比例越大, 阶跃折射率差越大,

所设计的 Ridge-OWG1 基于的平板波导是由厚 105 nm 的钛膜在 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 的湿氧氛围中扩散 11 h 所形成的。在此平板波导的基础上, 采用 RIE^[7], 形成脊高 $1.5 \mu\text{m}$, 脊宽 $4 \mu\text{m}$, 倾角 60° 的脊形波导。Ridge-OWG1 的折射率分布及基于 FDM 得到的在 1550 nm 波长下 TE 基模场强的等高线分布, 如图 1(a) 所示, 其中场强等高线从场强最大值以 10% 的梯度下降至场强最大值的 $1/5$ 。

横向上阶跃折射率对光场的束缚能力越强。Ridge-OWG1 中导模在纵向上受到了更强的约束, 光场中心上移, 脊内光场占总光场的 19.35% , 而 Ridge-OWG2 中, 脊内光场仅占总光场的 2.81% ; 同时从图 1 中两种波导的折射率分布可以看出, Ridge-OWG1 具有较 Ridge-OWG2 更大的脊内外折射率差。因此, 虽然在横向上 Ridge-OWG1 仅受阶跃折射率限制, 却具有比 Ridge-OWG2 更强的光场束缚能力。

光电重叠积分因子 (Γ) 作为偏振光场与对应取向的电场分量在截面上的重叠积分, 是衡量电光调制器件调制效率的重要参数, 可表示为^[20]

$$\Gamma = \frac{G}{V} \frac{\iint E_{\text{op}}^2(x, z) E_z(x, z) dx dz}{\iint E_{\text{op}}^2(x, z) dx dz}, \quad (7)$$

式中 G 为制作在脊形波导两侧面的调制电极的间距, V 为施加在调制电极上的电压, $E_{\text{op}}(x, z)$ 为 TE 导模的场分布函数, $E_z(x, z)$ 为调制电极之间的 z 向电场分量分布函数, 可表示为

$$E_z(x, z) = (V/G) f_z(x, z), \quad (8)$$

式中 $f_z(x, z)$ 无量纲。脊侧电极结构可以有效提高

光场和电场的重合面积,进而提高光电重叠积分因子^[20~22]。基于FEM的电场仿真表明,用于调制的 z 向电场分量主要集中在脊侧电极之间,如图2(a)所示,使得脊内光场得到了很好的调制,这也是脊侧电极结构能够有效提高光电重叠积分因子的主要原因。但是需要指出的是,如图1所示,波导中仍有部分光场位于脊形结构下方衬底中。同时,脊内衬底部分的 z 向电场分量强度随深度增加而显著降低。因此,将光场更多地束缚在脊内和衬底表面,可以进一步提高光电重叠积分因子。图2(b)显示了在Ridge-OWG1和Ridge-OWG2中的TE基模在 $z=0$ 处的归一化光场分布 $[E_{op}(x,0)]$ 和调制电极在波导

内 $z=0$ 处产生的归一化横向电场强度分布 $[f_z(x,0)]$ 。可以看出,Ridge-OWG1中导模光场中心位于脊端下方 $1.9\ \mu\text{m}$ 处,相对于Ridge-OWG2($2.7\ \mu\text{m}$)更偏向脊端,光场更多地被束缚在强电场区域,从而能获得比Ridge-OWG2更大的光电重叠积分因子。基于(4)式,利用图2(b)中的数据计算得到在Ridge-OWG1和Ridge-OWG2中的TE基模在 $z=0$ 处的光电重叠积分因子分别为0.875和0.745。对比两数据可知由LN平面波导代替条形波导制作脊形波导可使在 $z=0$ 处的光电重叠积分因子提高17.5%。

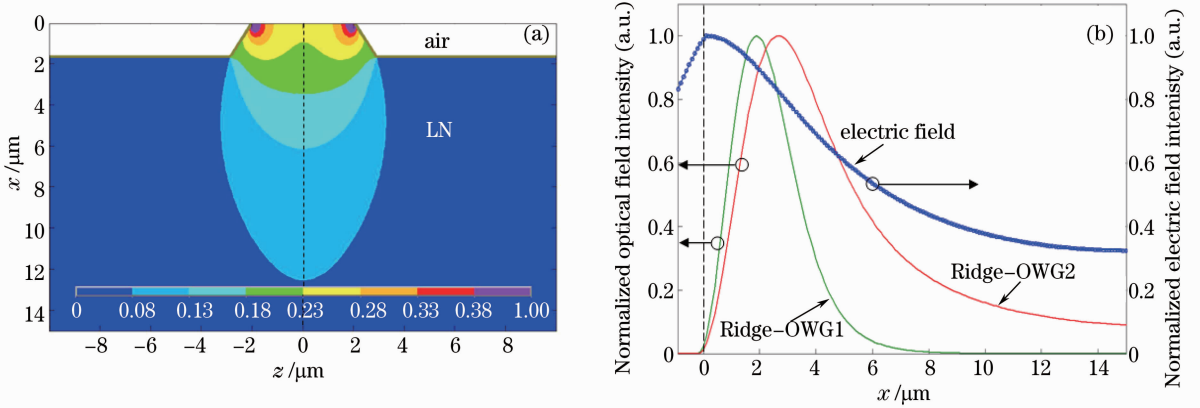


图2 (a) LN脊形波导内的 z 向电场分量分布;(b) $z=0$ 处两种LN脊形波导的纵向光场分布和对应的 z 向电场分量纵向分布(垂直虚线表示脊形波导上表面)

Fig.2 (a) Distribution of the z -component of the electric field in the LN ridge waveguide; (b) vertical distribution of the optical fields and corresponding distribution of z -component of the electric field at $z=0$ for the fundamental TE modes guided in the two LN ridge waveguides (vertical dotted line denotes top surface of the ridge waveguide)

另外,Ridge-OWG1横向上对导模良好的束缚能力,使其能更好地对Y分支进行改良。Y分支是MZI调制器的关键组成部分,传统Y分支波导的分支角一般很小,为 $1^\circ\sim 1.5^\circ$,以尽可能降低光输出损耗^[23]。然而,这种小分支角将会使得器件长度过长,这不仅对级联式Y分支构成的器件的微型化十分不利,而且将增加其工艺制作难度和波导光的传输损耗^[24]。采用Ridge-OWG1则可更好地改善这一点:波导在横向上增强了对导模的束缚,限制了倏逝波的传播范围,从而可增大Y分支角度,减小弯曲波导曲率半径,进一步实现器件微型化,并在一定程度上降低制备Y分支的工艺要求。

综上所述,在相同的钛扩散条件下,方法1)制作的Ridge-OWG1在横向和纵向上对光场的束缚能力均优于Ridge-OWG2,可用于制作曲率半径较

小的弯曲结构,易于获得更大的光电重叠积分因子,同时,其制备工序也最简单,是一种具有研究和应用潜力的波导结构。

3 LN脊形波导MZI的初步研制

在基于 x -切割LN基底的MZI中,导波光以TE基模沿单模波导传播,经光束分裂器(Y分支)后被均分为两支。在Y分支后的两个波导臂两侧分布有调制电极,利用LN晶体的电光效应,通过对微电极施加调制电压,分别改变两臂中导模的有效折射率,控制两臂导模相位差 $\Delta\Phi$,对输出干涉信号进行调制,其结构如图3所示。

选用尺寸为 $50\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 的 x -切割 y -传输LN晶体作为基底,采用标准微光机电系统(MOEMS)工艺,使用ME-3A型多功能磁增强反应

离子刻蚀机, SF_6 作为刻蚀气体, 刻蚀 Ti:LN 平板波导, 制作了基于 Ridge-OWG1 的 MZI 阵列芯片, 取得了一定的初步结果, 但是尚未对器件的性能进行测试。其制备工艺流程如图 4 所示。

利用金属内扩散法制作一维钛扩散 LN 平板光波导[图 4(a)~(c)]。在进行 Ti 热扩散时, 通过持续通入湿氧的方法对 LiO_2 的外扩散现象进行有效抑制。具体做法为将表面溅射有厚度为 105 nm Ti 膜的 LN 基底放入高温石英炉, 在热扩散的同时通入湿度为 80% 的氧气。扩散温度为 1050 $^\circ\text{C}$, 扩散时间为 11 h。接着使用标准光刻工艺和磁控溅射技术在平板波导上制备 MZI 图样的 Cr 掩模[图 4(d)~(h)], 其厚度为 300 nm。接着使用 ME-3A 多功能磁增强反应离子刻蚀机刻蚀 Ti:LN 平板波导[图 4(i)], 采用 SF_6 作为刻蚀气体, 固定气体流速为 30 mL/min。调节射频功率为 100、150、200、250、300 W, 分别刻蚀 10 min, 每次刻蚀之后用 Alpha-StepIQ KLA-Tencor 型台阶仪测试光刻标记处的台阶形貌, 测试结果如图 5(a) 所示。测试光刻标记的形貌而不直接测试波导, 首先是为了避免台阶仪探针划伤波导, 其次因为波导宽度太小, 台阶仪无法测量宽度过窄的结构。最后使用 CeSO_4 溶液去除 Cr 掩模[图 4(j)], 得到单片集成脊形 MZI 阵列芯片, 该芯片 MZI 波导宽度为 4 μm , 光束分束器分裂角为 1.1° , 两臂间距为 50 μm , 去除 Cr 之后的扫描电镜(SEM)的扫描结果如图 6 所示。

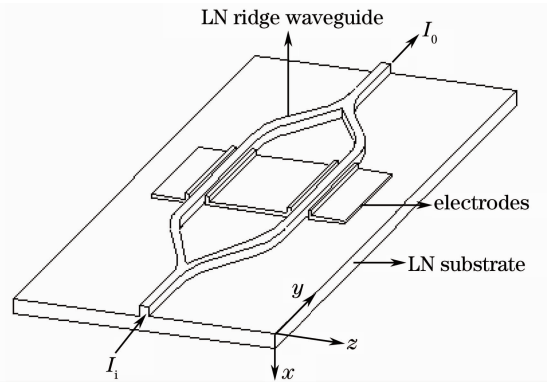


图 3 具有调制电极的 LN 脊形波导 MZI 结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of a LN ridge waveguide MZI with modulation electrodes

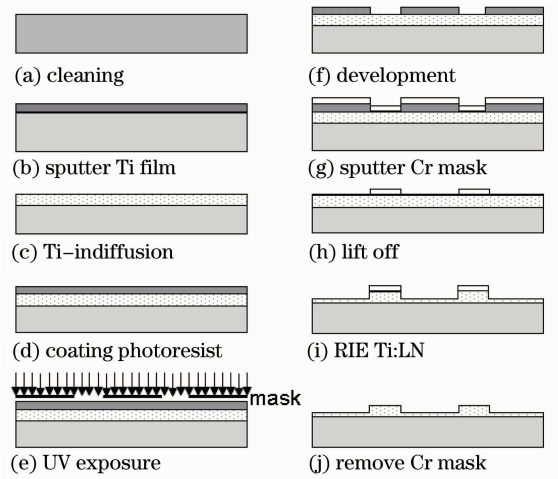


图 4 钛扩散 LN 基脊形波导 MZI 芯片的制作工艺流程
Fig. 4 Microfabrication process of Ti-indiffused LN ridge waveguides MZI

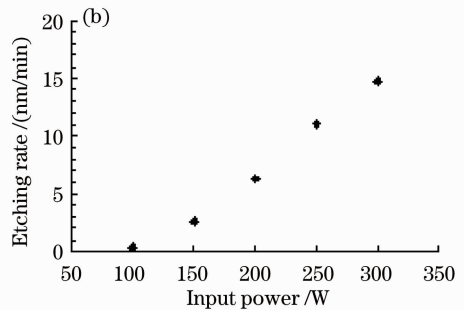
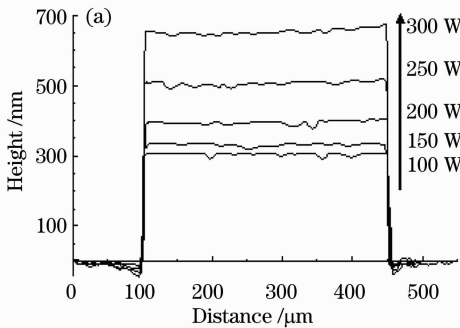


图 5 (a)不同输入功率下刻蚀 10 min 后 LN 脊形结构的台阶仪测试结果; (b)刻蚀速率与输入功率的关系
Fig. 5 (a) Height profiles of the LN ridge waveguide measured after 10 min etching at different given input powers; (b) etching rate versus the input power

根据图 5(a)的结果计算得到各功率下的刻蚀速率分别为 0.41、2.57、6.33、11.03、14.74 nm/min, 如图 5(b)所示, 当功率低于 100 W 时, 刻蚀速率几乎为零, 随着射频功率的升高, 刻蚀速度逐渐提高。由图 6 可知, 所制得的脊形 MZI 阵列芯片刻蚀高度约为

670 nm, 侧壁倾角约为 60° , 同时波导侧壁的底部出现了与用 CF_4 等离子体刻蚀 LN^[25] 时类似的 V 形沟槽。侧壁倾斜和槽底开沟主要是由等离子体刻蚀过程的二次效应, 即再沉积、再溅射效应造成的^[26~28]。由于出射离子存在一定的角度分布, 在侧壁与底面的

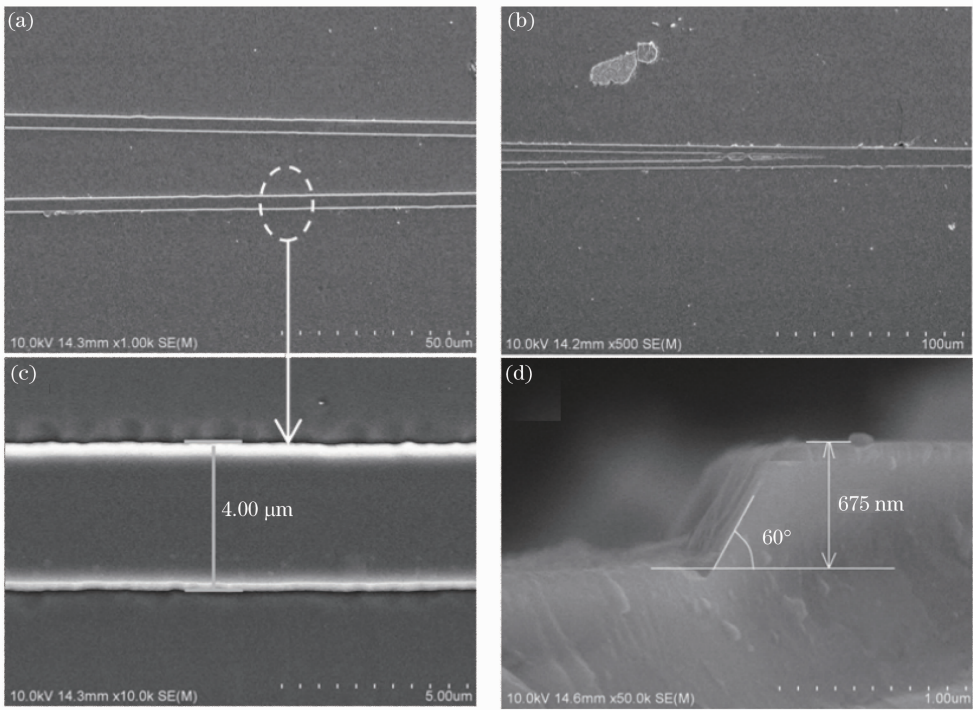


图6 钛扩散LN脊形波导的SEM照片图。(a) MZI双通道的俯视图；(b) Y分支的俯视图；(c)脊形波导的放大俯视图；(d)脊形波导结构的侧壁形貌

Fig. 6 SEM images of the Ti-indiffused LN ridge waveguide. (a) Top view of the MZI dual channel waveguides; (b) top view of the Y-branch structure; (c) enlarged top view of the ridge waveguide; (d) sidewall of the ridge waveguide

交界处,出射粒子不能全部飞出槽外,一部分大角度飞出的粒子重新打到已刻出的槽壁上,从而形成再沉积过程,再沉积的材料还会受到粒子的溅射形成再溅射。再沉积和再溅射两种效应相互制约,其平衡过程成为决定侧壁的形状和倾角的演变因素。当侧壁较为陡直时,入射等离子体对侧壁的入射角度成掠射状态,离子束对侧壁的刻蚀速率低,所以再沉积效应大于再溅射效应,从而形成倾斜的侧壁。倾斜的侧壁使入射离子具有高反射率,反射离子大部分到达侧壁底部,这部分离子与正常入射的离子共同刻蚀衬底,进而使侧壁底部的刻蚀速率大于平面上的刻蚀速率,从而在侧壁与平面的交界处形成V形沟槽。

提高刻蚀机的射频功率可提高刻蚀速率,使用均匀性更好、密度更高的等离子体刻蚀机,如ICP-RIE刻蚀机或NLD-RIE刻蚀机刻蚀LN,或者在刻蚀气体中加入 $H_2/Ar/O_2$ 等辅助气体,刻蚀速率和刻蚀的表面质量均会进一步提高^[29]。在较高的刻蚀速率下,通过增大Cr掩膜的厚度和刻蚀时间,脊形LN波导的刻蚀深度也会进一步增加。

4 结 论

近年来,基于LN的电光调制技术愈发成熟,作为目前发展的主要方向之一,脊形波导可以更好地束缚横向光场,降低波导的弯曲损耗,减小器件尺寸,提高光电重叠积分因子,降低调制器半波电压。在相关理论逐步完善的同时,脊形波导的制备也得到了更多的关注。先在LN衬底上通过钛扩散制作平板波导,再利用RIE直接刻蚀平板波导实现脊形结构,并通过仿真分析,与传统方法制作的脊形波导进行了对比。通过对两种脊形波导内光场分布和电场分布的仿真,发现在相同的工艺参数下,制作的Ridge-OWG1具有更好的光场束缚能力和更高的光电重叠积分因子,并可用于构建大角度Y分支。同时,该脊形波导的制备工序也最简单,是一种具有研究价值的脊形结构。对RIE刻蚀钛扩散LN制备Ridge-OWG1的工艺进行了探索,使用 SF_6 刻蚀气体,Cr做掩模,得到高为670 nm,侧壁倾角为 60° 的脊形波导,实验结果表明,钛扩散LN的刻蚀速率随着射频功率的增加而增加,当射频功率为300 W时,刻蚀速率为15 nm/min。试制了脊形波导结构Ti:LN-MZI阵列,为制备低损耗的弯曲脊形波导结

构奠定了基础。同时,提高脊形刻蚀深度,增大脊侧倾角和获得更好的刻蚀表面质量,可以改善脊形波导的性能,使其具有更低的传播损耗和更高的光电重叠积分因子。相关工作仍在进一步深入研究中。

参 考 文 献

- H. Hu, R. Ricken, W. Sohler. Low-loss ridge waveguides on lithium niobate fabricated by local diffusion doping with titanium [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2010, **98**(4): 677~679
- Rafael Salas-Montiel, Mehmet E. Solmaz, Ohannes Eknoyan *et al.*. Er-doped optical waveguide amplifiers in X-cut lithium niobate by selective codiffusion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(6): 362~364
- Tang Donglin, Guo Feng, Liu Zenian *et al.*. Three-component photoelastic waveguide accelerometer based on photoelastic effect [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 985~989
唐东林, 郭峰, 刘泽年等. 光弹效应的三分量光弹波导加速度传感器[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 985~989
- F. S. Chen, J. T. Lamacchia, D. B. Francer. Holographic storage in lithium niobate [J]. *Appl. Phys.*, 1968, **13**(7): 223~224
- Chen Youhua, Zhang Jilong, Wang Yanchao *et al.*. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoelectric and photo-elastic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1116002
陈友华, 张记龙, 王艳超等. 基于铌酸锂电弹光双效应的单晶体弹光调制器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 1116002
- Wan Lingyu, Zhou Yu, Liu Liren *et al.*. A free-space 2×4 90° optical hybrid with electro-optic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0723002
万玲玉, 周煜, 刘立人等. 电光调制 2×4 90° 相移空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0723002
- Yao Yanqing, Li Jinyang, Wu Jianjie *et al.*. Research development on LiNbO₃ dry etching [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2012, **49**(3): 197~207
要彦清, 李金洋, 吴建杰等. 铌酸锂干法刻蚀的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2012, **49**(3): 197~207
- H. Hu, R. Ricken, W. Sohler *et al.*. Lithium niobate ridge waveguides fabricated by wet etching [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 417~419
- Nadège Courjal, Blandine Guichardaz, Gwenn Ulliac *et al.*. High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, **44**(30): 305101
- Shaomei Zhang, Keming Wang, Xiangzhi Liu *et al.*. Planar and ridge waveguides formed in LiNbO₃ by proton exchange combined with oxygen ion implantation [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15609~15617
- K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa *et al.*. A broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with a ridge structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(6): 1164~1168
- Kazuto Noguchi, Osamu Mitomi, Hiroshi Miyazawa. Millimeter-wave Ti:LiNbO₃ optical modulators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 615~619
- Vijay Sivan, Arnan Mitchell, Lam Bui *et al.*. Etching of lithium niobate using standard Ti indiffusion technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(23): 231921
- L. Gui, H. Hu, M. Garcia-Granda. Local periodic poling of ridges and ridge waveguides on X- and Y-Cut LiNbO₃ and its application for second harmonic generation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3923~3928
- H. J. Lee, S. Y. Shin. Lithium niobate ridge waveguides fabricated by wet etching [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(4): 268~269
- Chen Fang, Liu Ruipeng, Qi Zhimei. Design, fabrication and characterization of LiNbO₃-based integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0513001
陈方, 刘瑞鹏, 祁志美. 铌酸锂基集成光波导马赫-曾德尔干涉仪的设计、制备及其特性的初步测试 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0513001
- Cui Jianmin, Feng Lihui, Cui Fang *et al.*. Calculation and measurement of the refractive index of Ti:LiNbO₃ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(Z2): 211~216
崔建民, 冯立辉, 崔芳等. Ti:LiNbO₃ 波导的折射率计算与测量 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(Z2): 211~216
- David E. Zelmon, David L. Small. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide-doped lithium niobate [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(12): 3319~3322
- E. A. J. Marcantili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. *Bell System Technology Journal*, 1969, **48**(21): 2071~2102
- Yi-Kuei Wu, Way-Seen Wang. Design and fabrication of sidewalls-extended electrode configuration for ridged lithium niobate electrooptical modulator [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(2): 286~290
- R.-S. Cheng, W.-L. Chen, W.-S. Wang. Mach-Zehnder modulators with lithium niobate ridge waveguides fabricated by proton-exchange wet etch and nickel indiffusion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(11): 1282~1284
- Miguel Garcia-Granda, Hui Hu, J. Rodriguez-Garcia *et al.*. Design and fabrication of novel ridge guide modulators in lithium niobate [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(24): 5690~5697
- Hanbin Lin, Reishin Cheng, Waysen Wang. Wide-angle low loss single-mode symmetric Y-junctions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7): 825~827
- Dong Miao, Tang Xionggu, Nuermainaiti *et al.*. Design and analysis for wide-angle low-loss Y-branch waveguide with graded-index profiles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 97~100
董淼, 唐雄贵, 努尔买买提等. 大角度、低损耗渐变折射率型 Y 分支波导设计与分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 97~100
- Naoki Mitsugi, Kaori Shima, Masumi Ishizuka *et al.*. Analyses of LiNbO₃ wafer surface etched by ECR plasma of CHF₃ & CF₄ [J]. *Procedure Symposium of Dry Process*, 1998, **20**: 129~133
- P. G. Glöersen. Ion beam etching [J]. *J. Vacuum Sci. Technol.*, 1975, **12**(1): 28~35
- Hu Xinning, Liu Gang, Tian Yangchao. Influence of ion-beam etching incidence angle on slope of pattern sidewall [J]. *Microfabrication Technology*, 2003, (4): 14~17
胡新宁, 刘刚, 田扬超. 离子束刻蚀入射角对图形侧壁陡度影响的研究 [J]. *微细加工技术*, 2003, (4): 14~17
- G. Carter. The physics and applications of ion beam erosion [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**(3): R1~R2
- Zhou Yujie, Feng Liqun, Sun Junqiang. Etching characteristics of MgO doped lithium niobate in inductively coupled plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0906001
周钰杰, 冯力群, 孙军强. 掺镁铌酸锂晶体的 ICP 刻蚀性能 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0906001