

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2021.04.004

# LNOI阵列波导光栅的设计与制备\*

王琛全<sup>1,2\*\*</sup>, 周奉杰<sup>1,2</sup>, 顾晓文<sup>1,2</sup>, 唐 杰<sup>1,2</sup>, 钱 广<sup>1,2</sup>

(1.微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室,南京 210016; 2.南京电子器件研究所,南京 210016)

**摘 要:** 基于薄膜铌酸锂(Lithium Niobate on insulator, LNOI)材料平台,设计并制备了中心波长1 550 nm、4通道且通道间隔为400 GHz的阵列波导光栅,并完成了LNOI波导端面抛光。测试结果表明,该阵列波导光栅相邻通道间串扰约-7.5 dB,通道非均匀性小于0.5 dB,中心波长1 551.3 nm,但存在较大插入损耗,约27.2 dB。该研究工作对研制高性能LNOI阵列波导光栅具有重要推动作用。

**关键词:** 薄膜铌酸锂;阵列波导光栅;波分复用

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)04-0258-04

## Design and Fabrication of LNOI Arrayed Waveguide Grating

WANG Chenquan<sup>1,2</sup>, ZHOU Fengjie<sup>1,2</sup>, GU Xiaowen<sup>1,2</sup>, TANG Jie<sup>1,2</sup>, QIAN Guang<sup>1,2</sup>

(1.Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing 210016, CHN; 2.Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, CHN)

**Abstract:** Based on the Lithium Niobate on insulator (LNOI) platform, an arrayed waveguide grating with a center wavelength of 1 550 nm, 4 channels and a channel spacing of 400 GHz was designed and fabricated, and the edges of the LNOI waveguide was polished. The test results show that the crosstalk between adjacent channels of the arrayed waveguide grating is about -7.5 dB, the channel non-uniformity is less than 0.5 dB, and the center wavelength is 1 551.3 nm, but there is a large insertion loss of about 27.2 dB. The research will play an important role in the development of high-performance LNOI arrayed waveguide grating.

**Key words:** LNOI; arrayed waveguide grating; WDM

## 引 言

薄膜铌酸锂作为一种新兴的光子集成芯片材料,具有低损耗、透光光谱宽等特点<sup>[1]</sup>。其借助于先进的微纳加工技术,可制备出许多高性能的集成光

子器件,并应用于微波光子、光通信等技术领域<sup>[2]</sup>。相比于铌酸锂体单晶材料制备的传统光子器件,LNOI光子器件更有利于实现器件小型化与大规模集成化。其中,阵列波导光栅(Arrayed waveguide grating, AWG)作为波分复用(Wavelength division

收稿日期:2021-04-23

\* 基金项目:重点实验室基金项目(614280304012003)

作者简介:王琛全(1993—),男,工程师,主要研究方向为集成微波光子技术;(E-mail: wcq161204@163.com)

周奉杰(1994—),男,工程师,主要研究方向为集成微波光子技术;

顾晓文(1989—),男,工程师,主要研究方向为集成微波光子技术。

\*\* 通讯作者

multiplexing, WDM)技术的主要器件之一,具有性能稳定、分辨率高、信道数大等综合优势<sup>[3]</sup>。近年来国内外对于不同材料的阵列波导光栅都开展了多方面的深入研究,包括 SiO<sub>2</sub><sup>[4]</sup>、SOI<sup>[5]</sup>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub><sup>[6]</sup>、InP<sup>[7]</sup>等,但目前关于 LNOI 阵列波导光栅的相关研究仍然较少。2018 年美国加利福尼亚大学 Mathias 等人研制了 8 通道且通道间隔为 500 GHz 的 LNOI 阵列波导光栅<sup>[8]</sup>,插入损耗约 25 dB,相邻通道间串扰约 -15 dB,器件尺寸 1.4×1.2 mm<sup>2</sup>,但其通道非均匀性较差。2020 年山东大学 Li 等人仿真设计了中心波长与通道带宽可调谐的 LNOI 阵列波导光栅<sup>[9]</sup>,但该研究并未实现器件制备。

文中基于 LNOI 材料平台设计并制备了 4 通道且通道间隔为 400 GHz 的阵列波导光栅。通过实验测得器件相邻通道间串扰约 -7.5 dB,通道非均匀性小于 0.5 dB,中心波长为 1 551.3 nm。该结果为实现 LNOI 阵列波导光栅研制提供了技术基础。

### 1 结构设计

阵列波导光栅主要由输入/输出波导、平板波导、阵列波导构成,如图 1 所示。其中平板波导一般采用罗兰圆结构,有利于减少衍射畸变。输入光在平板波导中形成高斯远场衍射,并以相同相位进入阵列波导中。由于相邻阵列波导存在固定长度差  $\Delta l$ ,光经过阵列波导后形成相位差,致使不同波长的光在输出端平板波导中聚焦于不同输出波导端口处,实现波长解复用功能。由于器件整体结构呈对称性,该传输过程可逆向实现,即波长复用功能。

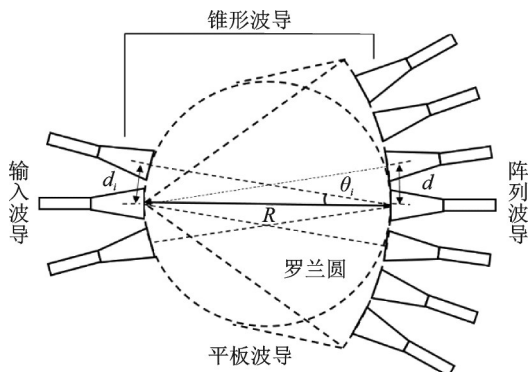


图1 阵列波导光栅输入端结构图  
Fig.1 Structure of input part of arrayed waveguide grating

阵列波导光栅作为光栅器件之一,其工作原理满足光栅方程:

$$n_s d \sin \theta_i + n_c \Delta l + n_s d \sin \theta_o = m \lambda_0 \quad (1)$$

其中,  $\lambda_0$  为中心波长,  $n_c$  和  $n_s$  分别为阵列波导与平板波导有效折射率,  $d$  为相邻阵列波导的中心间距,  $\Delta l$  为相邻阵列波导长度差,  $m$  为衍射级数,  $\theta_i$  和  $\theta_o$  分别为阵列波导与中心输入/输出波导的夹角。对于中心波长  $\lambda_0$ , 其对应的  $\theta_i$  和  $\theta_o$  皆为  $0^\circ$ , 因此式(1)可化简为:

$$\Delta l = \frac{m \lambda_0}{n_c} \quad (2)$$

同时, 平板波导结构中罗兰圆直径可由式(3)计算得出:

$$R = \frac{n_c n_s d d_i}{n_g m \Delta \lambda} \quad (3)$$

其中,  $d_i$  为输入波导中心间距,  $n_g$  为阵列波导群折射率,  $\Delta \lambda$  为相邻通道波长差。

如图 2 所示, LNOI 阵列波导光栅采用脊形波导结构, 现阶段波导刻蚀后的侧壁倾角约  $80^\circ$ 。针对芯层 ( $n_{LiN} = 2.20$ ) 厚度  $0.6 \mu\text{m}$ , 上下包层 ( $n_{SiO_2} = 1.44$ ) 厚度  $2.0 \mu\text{m}$ , 设计波导脊高  $0.3 \mu\text{m}$ 。通过仿真可得, 当波导宽度  $1.0 \mu\text{m}$  时, 波长  $1 550 \text{ nm}$  的光满足单模传输条件, 可得  $n_c = 1.954 6$  且  $n_g = 2.305 4$ , 同时通过仿真可得平板波导  $n_s = 2.029 2$ 。

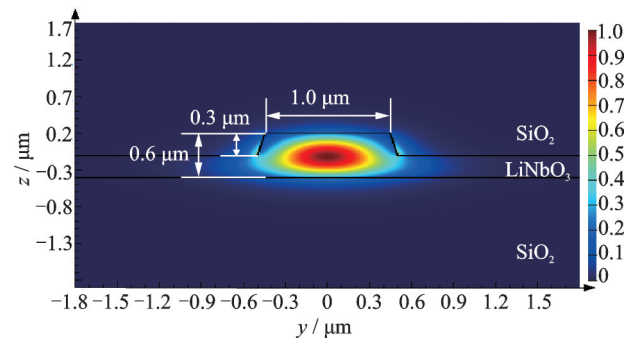


图2 阵列波导 TE 模场图

Fig.2 TE mode field diagram of arrayed waveguide

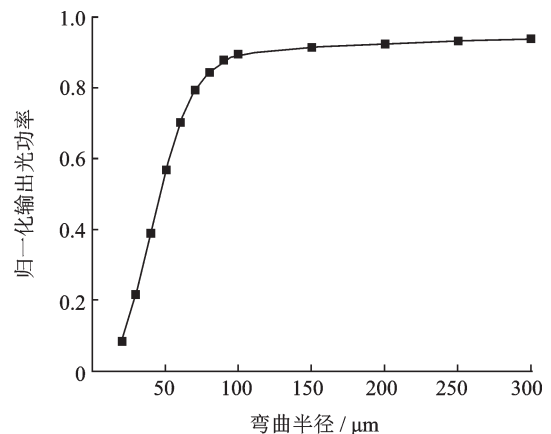


图3 归一化输出功率与弯曲半径关系

Fig.3 The relationship between normalized output optical power and bending radius

LNOI阵列波导光栅中存在大量弯曲波导,弯曲半径越大,弯曲损耗越小,但是过大的弯曲半径也会导致器件体积增大。通过仿真得到弯曲半径与归一化输出光功率的关系如图3所示,可以看出当弯曲半径小于 $100\ \mu\text{m}$ 时,弯曲损耗急剧增加;而当弯曲半径大于 $150\ \mu\text{m}$ 时,归一化输出光功率接近于1,弯曲损耗较小。根据器件性能综合考量,选取弯曲半径 $200\ \mu\text{m}$ 。

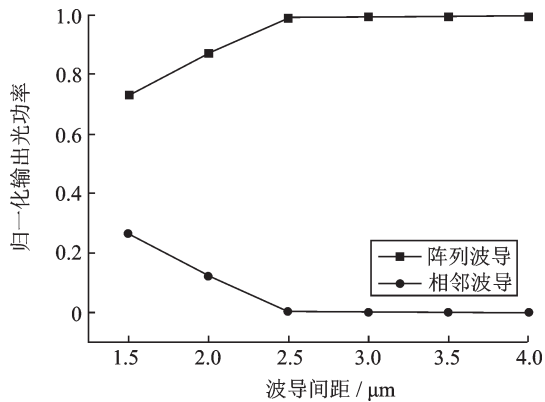


图4 归一化输出光功率与波导间距关系

Fig.4 The relationship between normalized output optical power and waveguide spacing

为了避免相邻阵列波导之间发生串扰,对阵列波导间距进行了仿真设计,结果如图4所示。当波导间距大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,传输光基本不会因倏逝波耦合进入相邻波导中。但波导间距过大,根据式(3)也会造成罗兰圆直径增大,不利于器件小型化,所以选取波导间距 $3.0\ \mu\text{m}$ 。同时在输入/输出波导、阵列波导和平板波导连接处加入了锥形波导,有利于降低模式失配影响。根据阵列波导光栅的基本设计原理<sup>[10]</sup>,器件主要结构参数如表1所示。

表1 LNOI阵列波导光栅结构参数

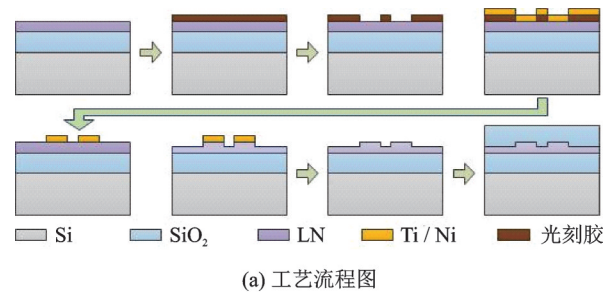
Tab.1 Structure parameters of LNOI array waveguide grating

参数	数值
中心波长/nm	1 550
相邻通道间隔/GHz	400(~3.2 nm)
自由光谱范围/nm	16.0
阵列波导长度差/ $\mu\text{m}$	64.71
罗兰圆直径/ $\mu\text{m}$	177
阵列波导数	31

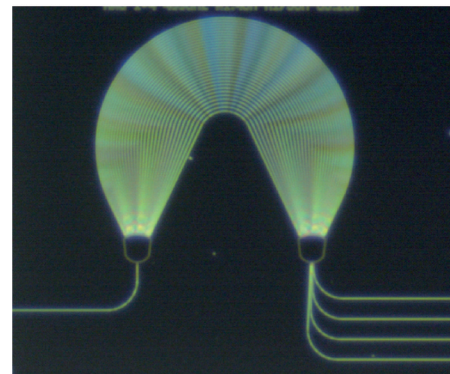
## 2 器件制备

文中LNOI阵列波导光栅基于LNOI圆片工艺制备,其制备流程如图5(a)所示。首先在LNOI晶

圆表面涂胶、曝光、显影制备出光刻图案;然后利用金属蒸发剥离工艺制备出器件图案的Ti/Ni掩膜;再基于ICP-RIE刻蚀工艺将LNOI芯层刻蚀到所需脊高的深度;最后去除Ti/Ni掩膜,并通过等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺在芯层上方沉积一层厚度 $2.0\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅上包层,制备完成的LNOI阵列波导光栅如图5(b)所示。



(a) 工艺流程图



(b) 器件显微图

图5 LNOI阵列波导光栅

Fig.5 LNOI arrayed waveguide grating

由于器件基于圆片工艺制备,需切片分离出单个器件,才可进行端面耦合通光测试。目前高精度的切片工艺依然会造成光波导端面破损与二氧化硅上包层崩边,如图6(a)所示,严重降低光耦合效率,影响器件性能。因此,采用化学机械抛光工艺,通过定制夹具垂直夹持芯片,对LNOI阵列波导光栅芯片光耦合端面进行高精度抛光。该抛光工艺中选用聚氨酯抛光垫,配合粒径纳米级的二氧化硅抛光液,抛光结果如图6(b)所示。显微镜下可以看出芯片边缘的崩边基本去除,同时在SEM下可以看到波导端面的破损明显改善,脊形波导结构清晰可见。

## 3 测试结果

由于输入/输出波导端面仅亚微米级别,因此对于测试系统的精度要求较高。采用六维高精度端面耦合系统对LNOI阵列波导光栅进行光谱测试,该测

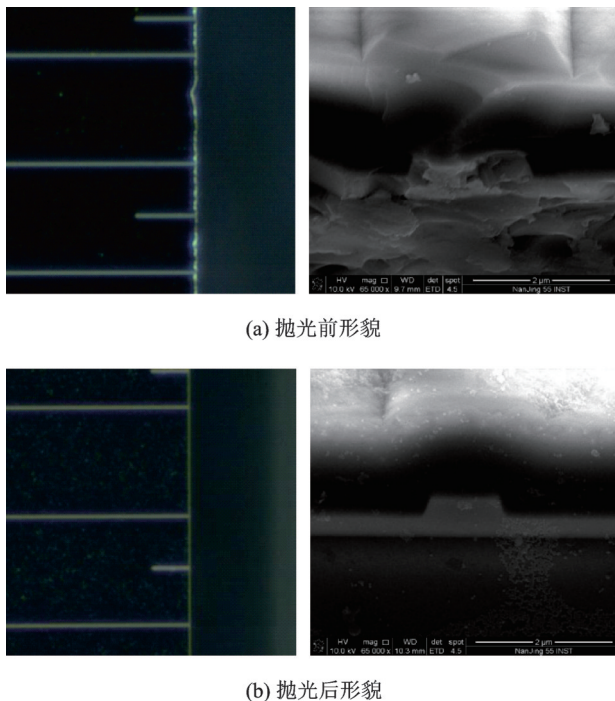


图6 LNOI光波导上表面与端面的抛光前后形貌

Fig.6 LNOI waveguide upper surface and end face before and after polishing

试系统主要包括一对灵敏度 70 nm 的六维调节架、高清监控 CCD 显微镜、输入/输出单模光纤、偏振控制器、可调谐激光源、光谱仪等。常用的单模光纤芯径约 9.0  $\mu\text{m}$ , 与波导尺寸相差较大, 光纤与波导耦合时存在严重的模式失配, 因此改用具有聚焦特性的锥形透镜光纤, 其尾部透镜结构可汇聚传输光, 消除衍射效应。

LNOI 阵列波导光栅的光谱测试结果如图 7 所示, 相邻通道间串扰约  $-7.5$  dB, 通道插入损耗约 27.2 dB, 通道非均匀性小于 0.5 dB, 相邻通道间隔以及自由光谱范围与设计值基本一致。器件的中心波长为 1 551.3 nm, 与设计值 1 550 nm 存在偏差, 主要

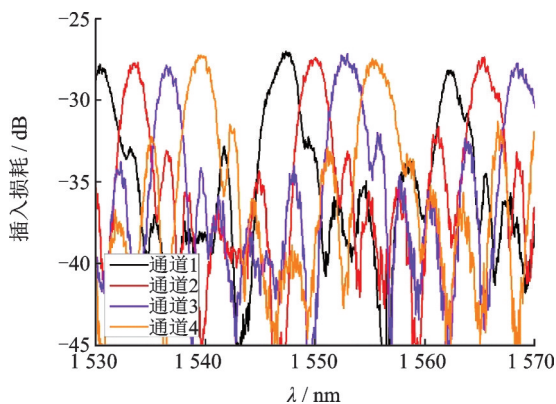


图7 LNOI阵列波导光栅响应光谱

Fig.7 Spectral response of LNOI arrayed waveguide grating

原因是工艺误差对阵列波导长度差的影响, 以及沉积的二氧化硅上包层折射率偏差, 引起了波导有效折射率变化。同时, 器件整体插入损耗较大, 一方面因为刻蚀条件较为严苛, 波导侧壁存在一定的粗糙度, 增加了光散射损耗; 另一方面, 输入/输出端暂未加入模斑转换器, 影响传输光耦合效率。

## 4 结 论

文中设计并制备了 4 通道且通道间隔为 400 GHz 的 LNOI 阵列波导光栅, 相邻通道间串扰约  $-7.5$  dB, 通道非均匀性小于 0.5 dB, 中心波长 1 551.3 nm。后续将进一步优化器件的设计与工艺, 降低相邻通道间串扰, 同时加入模斑转换器结构, 减小器件插入损耗, 为 LNOI 阵列波导光栅实用化发展奠定技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] Levy M, Osgood R M, Liu R, et al. Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing [J]. Applied Physics Letter, 1998, 73(16): 2293-2295.
- [2] 张涛, 何杰, 胡少勤, 等. 集成铌酸锂光子器件技术的研究进展 [J]. 压电与声光, 2020, 255(6): 105-110.
- [3] Yuan R. Arrayed waveguide grating component and its applications [J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(1): 1-5.
- [4] Adar R, Serbin M R, Mizrahi V. Less than 1 dB per meter propagation loss of silica waveguides measured using a ring resonator [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1369-1372.
- [5] Zhang J S, An J M, Zhao L, et al. Ultra compact triplexing filters based on SOI nanowire AWGs [J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(4): 044009.
- [6] Dai D, Zhi W, Bauters J F, et al. Low-loss  $\text{Si}_3\text{N}_4$  arrayed-waveguide grating (de) multiplexer using nano-core optical waveguides [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14130-14136.
- [7] Barbarin Y, Leijtens X J M, Bente E A J M, et al. Extremely small AWG demultiplexer fabricated on InP by using a double-etch process [J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2004, 16: 2478-2480.
- [8] Prost M, Liu G, Yoo S. A compact thin-film Lithium Niobate platform with arrayed waveguide gratings and MMIs [C]. Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), San Diego, CA, USA, 2018: 1-3.
- [9] Li J, Yin R, Huang Q, et al. AWG optical filter with tunable central wavelength and bandwidth based on LNOI and electro-optic effect [J]. Optics Communication, 2019, 454: 124445.
- [10] Smit M K, Dam C V. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 236-250.