

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.01.002

## 铌酸锂薄膜高速电光开关的设计与制备\*

唐 杰<sup>1,2,3</sup>, 王子彦<sup>4</sup>, 钱 坤<sup>4</sup>, 何晓舟<sup>4</sup>, 潘时龙<sup>3</sup>, 王琛全<sup>1,2</sup>,  
顾晓文<sup>1,2</sup>, 钱 广<sup>1,2\*\*</sup>, 孔月婵<sup>1,2</sup>, 陈堂胜<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;  
3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106; 4. 空军装备部上海局, 上海 200231)

**摘 要:** 基于硅基铌酸锂薄膜(Lithium Niobate on insulator, LNOI)材料平台, 设计并制备了高速电光开关芯片, 并实现了芯片的光纤耦合、管壳封装和性能测试。测试结果表明, 该高速电光开关器件的开关速度达到13.4 ns, 消光比达到31.8 dB。研究工作对未来研制光学延时芯片和光束形成网络芯片具有重要的支撑意义。

**关键词:** 铌酸锂薄膜; 电光开关; 光学波束形成

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0007-04

## Design and Fabrication of LNOI Based High-speed Electro-optic Switch

TANG Jie, WANG Ziyang, QIAN Kun, HE Xiaozhou, PAN Shilong, WANG Chenquan,  
GU Xiaowen, QIAN Guang, KONG Yuechan, CHEN Tangsheng

(1. *Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing 210016, CHN*; 2. *Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, CHN*; 3. *College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, CHN*; 4. *The Shanghai Bureau of Air Force Equipment Department, Shanghai 200231, CHN*)

**Abstract:** An electro-optic switch was developed based on the lithium niobate on insulator (LNOI) platform. The structure of the LNOI waveguide, multimode interferometer (MMI) coupler and metal electrodes were carefully designed. The fabricated electro-optic switch chip was coupled with optical fiber arrays and packaged by using metal shell. The measured on-off switch time was less than 13.4 ns and the extinction ratio was about 31.8 dB. The results showed that LNOI based electro-optic switch was an excellent candidate for developing high performance integrated optical beamforming network chips used in microwave photonic radars.

**Key words:** LNOI; electro-optic switch; optical beamforming

收稿日期: 2022-10-14

\* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2802702); 江苏省产业前瞻技术研发项目(BE2021030); 重点实验室基金项目(614280304012106)

作者简介: 唐 杰(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为集成微波光子芯片;

钱 广(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为集成微波光子芯片; (E-mail: chinaqgl@163.com)

王琛全(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为集成微波光子芯片。

\*\* 通讯作者

## 引 言

光开关是实现光路切换的重要元器件,是构筑超宽带阵列化电子信息系统中光学波束形成网络的核心器件之一<sup>[1-2]</sup>,为确保波束形成网络具备快速波束赋型能力,通常要求光开关的切换时间达到百纳秒量级以内。目前,光开关的类型主要包括微机械式光开关、磁光开关、电光开关和热光开关等。在切换速度方面,电光开关是目前唯一可以达到百纳秒甚至皮秒量级的光开关。电光开关主要基于材料的电光效应、量子限制 Stark 效应或载流子注入实现外加电场对材料折射率的调控,常用的材料包括铌酸锂<sup>[3]</sup>、III-V 族化合物<sup>[4]</sup>、硅<sup>[5]</sup>及聚合物<sup>[6]</sup>等。其中,基于 III-V 族化合物材料的波导型电光开关结构工艺相对复杂,传输损耗较大;聚合物电光材料稳定性相对较差,材料性能容易老化,电光性能随时间衰减严重。

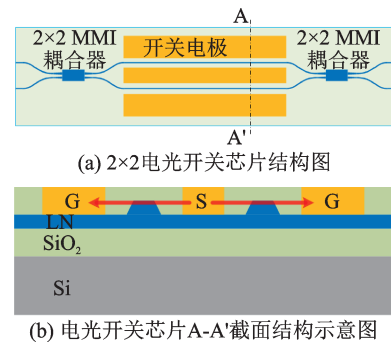
传统的铌酸锂电光开关主要包括体块晶型或掺杂波导型<sup>[7]</sup>。其中铌酸锂晶型电光开关驱动电压高、体积大,难以集成化;掺杂铌酸锂波导型电光开关由于波导结构采用扩散或质子交换工艺制备,属于渐变折射率光波导,其芯包层折射率差很小,光场模式尺寸大,光强密度低,电光相互作用弱,器件整体尺寸较大。

薄膜铌酸锂(Lithium Niobate on Insulator, LNOI)作为一种新兴的光子集成芯片平台<sup>[8]</sup>,其芯层为一层厚度百纳米量级的铌酸锂脊型光波导,上下包层均为二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),因此具有较大的芯包层折射率差,使得其光场模式尺寸小,光强密度高,可显著增强电光相互作用,从而能够实现小体积高性能的电光开关。

文章基于 LNOI 材料平台设计并制备了  $2 \times 2$  高速电光开关芯片,并实现了光纤耦合和管壳封装,通过实验测得器件开关速度为 13.4 ns,消光比达到 31.8 dB,为未来实现集成化光延时芯片和波束形成芯片提供了技术基础。

## 1 器件设计

所设计的高速电光开关基于 x 切 LNOI 材料,其结构如图 1(a)所示,包含传输光路和共面波导开关电极,其中传输光路为马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)结构,由 2 个输入端口、2 个输出端口、2 个  $2 \times 2$  多模干涉耦合器

图 1 LNOI  $2 \times 2$  电光开关结构图Fig.1 Structure of LNOI based  $2 \times 2$  electro-optic switch

(Multi-Mode Interferometer, MMI)以及两个直波导构成,两个直波导与共面波导电极组成电光相互作用区,实现推挽电光调制,如图 1(b)所示。

光信号由开关芯片任一输入端口输入,经  $2 \times 2$  MMI 耦合器分为幅度相等,相位差相差  $90^\circ$  的两束光,分别进入两个直波导,通过在开关电极上施加开关电压信号,对两个直波导中光信号的相位进行调控,两个直波导中的输出光经  $2 \times 2$  MMI 耦合器耦合并根据其相位差实现两个输出端口输出功率的调谐。当开关信号调谐直波导中两束光相位差变化量为  $180^\circ$  时,输出光将切换输出端口,实现光路切换功能。传输光路中波导采用脊型波导结构,结合前期 LNOI 光波导刻蚀结果,波导刻蚀后侧壁倾角约为  $70^\circ$ ,设计脊高  $0.3 \mu\text{m}$ ,平板波导厚度  $0.3 \mu\text{m}$ 。通过仿真得到波导脊宽与模式有效折射率关系曲线,如图 2 所示,可以看出当脊底宽大于  $1 \mu\text{m}$  时,出现 TE 高阶模式。因此,文章设计波导脊底宽为  $1 \mu\text{m}$ ,可确保波导 TE 模单模传输。

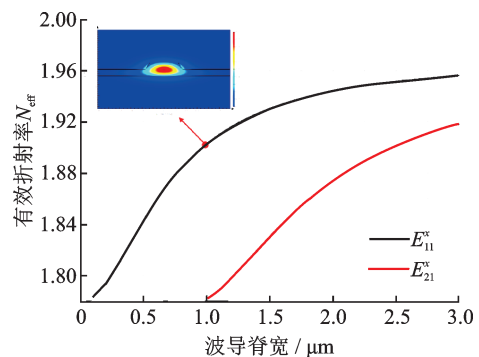


图 2 波导脊宽与模式有效折射率关系

Fig.2 The relationship between effective refractive index and ridge width of the waveguide

$2 \times 2$  MMI 耦合器是光开关传输光路中的重要部分,它由输入锥形波导、多模干涉区、输出锥形波导构成,将输入光信号无损、均匀的分成两部分是确保光开关具有低损耗和高消光比的关键。通过

对其不同结构参数下光场传输特性的仿真可得到最优的结构参数,当多模干涉区宽度  $9\ \mu\text{m}$ 、长度  $72.5\ \mu\text{m}$ 、输入/输出波导间距  $3.15\ \mu\text{m}$ 、锥形波导长度  $15\ \mu\text{m}$ 、宽度  $2.3\ \mu\text{m}$  时可获得最优光场传输效果。基于上述结构参数对 MMI 耦合器和 MZI 传输光路的光场传输特性进行了仿真分析,结果如图 3 所示,可以看出其具有优良的光场传输特性。

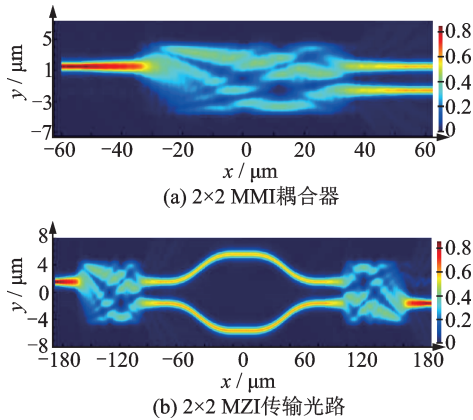


图3 光场传输特性

Fig.3 Simulation results of optical field propagation

在 LNOI 电光开关的电极设计中,由于金属对光具有强烈的吸收,因此电极间距不能太小,需在确保金属电极不影响光波导中光场分布的情况下,尽可能减小电极之间的间距,以提升电光相互作用的效率。通过仿真优化后的金属电极间距设计为  $5\ \mu\text{m}$ ,其电场分布和波导中 TE 模式光场分布如图 4 所示,可以看出金属电极对光场分布基本无影响。

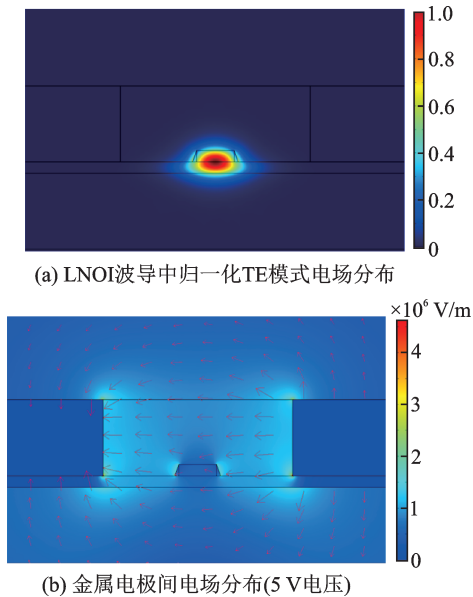


图4 加载金属电极后 LNOI 波导中 TE 模式光场分布和电极间电场分布

Fig.4 The TE polarized optical field and electric field distribution of the LNOI waveguide with electrodes

## 2 芯片制备

高速电光开关芯片的制备基于  $600\ \text{nm}$  厚度 x 切 LNOI 晶圆材料,采用前期开发出的多项目晶圆 (Multi Project Wafer, MPW) 流片工艺,其制备工艺流程如图 5 所示。首先在 LNOI 晶圆表面涂胶、光刻、显影,将传输光路图形转移至光刻胶上;利用电子束蒸发工艺沉积一层 Ti/Ni 金属,经过光刻胶剥离工艺,将传输光路图形转移至金属层,形成刻蚀掩膜;基于反应离子刻蚀机采用  $\text{SF}_6/\text{Ar}$  混合气体对铌酸锂进行刻蚀,刻蚀深度  $300\ \text{nm}$ ,将金属掩膜图形转移至铌酸锂层;之后二次涂胶、光刻、显影,将电极图形转移至光刻胶上,利用电子束蒸发工艺沉积一层 Ti/Au 金属,经过光刻胶剥离工艺,制备出金属电极;再利用化学气相沉积工艺制备一层  $2.0\ \mu\text{m}$  厚度的二氧化硅上包层;最后三次涂胶、光刻、显影,将电极开窗图形转移至光刻胶上,并采用反应离子刻蚀工艺对上包层二氧化硅进行刻蚀,使金属电极上用于金丝键合的区域裸露。

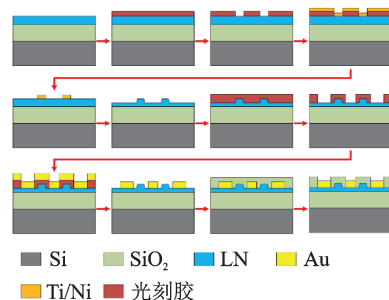


图5 LNOI 高速电光开关工艺流程图

Fig.5 The fabrication process of LNOI based high-speed electro-optic switch

基于光刻胶剥离工艺制备出的 MMI 耦合器区域金属掩膜如图 6(a) 所示,刻蚀得到的 LNOI 脊型

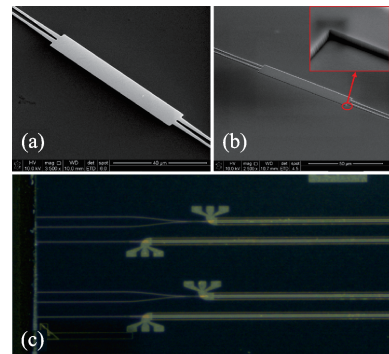


图6 LNOI 高速电光开关芯片

Fig.6 The photography of fabricated high-speed electro-optic switch

波导如图 6(b)所示,可以看出其具有良好的表面形貌。制备完成的 LNOI 高速电光开关芯片如图 6(c)所示。

### 3 封装测试

利用双通道光纤阵列对 LNOI 电光开关的输入/输出端口进行耦合,并采用金属管壳对 LNOI 电光开关芯片进行封装,封装结构示意图如图 7 所示。开关驱动信号通过焊接在管壳上的射频玻璃绝缘子由外部的射频接口耦合进入管壳内的微波共面波导转接板,再通过金丝键合实现微波共面波导转接板与光开关芯片上金属电极的互连,其中,管壳内部玻璃绝缘子与转接板通过 AuSn 焊料焊接。

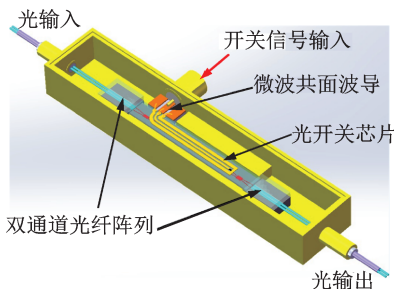


图 7 LNOI 电光开关耦合封装结构示意图

Fig.7 The structure of packaged LNOI based high-speed electro-optic switch

采用 1 550 nm 激光器、直流稳压电源和光功率计对光开关器件的消光比进行测试,测试结果如图 8 所示。可以看出在施加 4.5 V 驱动电压时,消光比达到 31.8 dB,表明所设计的 MZI 传输光路具有优良的光传输特性。同时还可以看出作为分立的器件使用,该光开关器件的插损较大,约为 23 dB,主要是由于单模光纤与 LNOI 波导的模式尺寸差别较

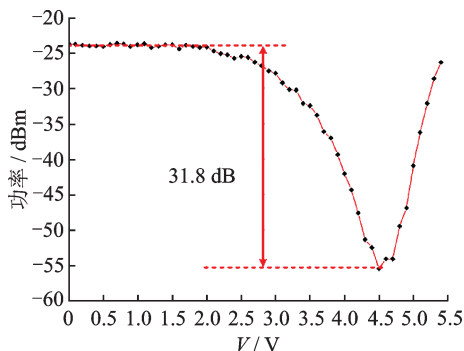


图 8 LNOI 高速电光开关消光比测试结果

Fig.8 The measured extinction ratio results of the electro-optic switch

大,导致模式失配严重,后续需设计 LNOI 模斑转换器结构,实现光纤与波导的模场匹配,以降低器件插入损耗。

利用信号发生器产生方波信号加载到电光开关的驱动信号输入接口,输出端连接高速光电探测器探测开关响应信号,并利用示波器测量光电探测器输出信号,得到电光开关的开关响应曲线,如图 9 所示。通过示波器的测量功能可以得到电光响应曲线的上升时间为 13 ns,下降时间为 13.4 ns,同时由测试结果可以看出,所施加的方波开关信号产生了失真,这主要受限于任意波形发生器的工作带宽,所施加方波信号自身的上升时间为 5.8 ns,下降时间为 6.4 ns,因此实际情况下该光开关器件的开关速度优于 13.4 ns。

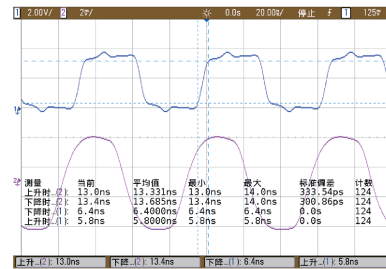


图 9 LNOI 高速电光开关的开关响应测试结果

Fig.9 The measured on-off response signal of the electro-optic switch

### 4 结 论

基于 600 nm 厚度 x 切 LNOI 材料平台,设计了  $2 \times 2$  高速电光开关芯片,对光开关波导截面结构、MMI 耦合器结构进行了设计优化,获得了最优结构参数。采用 LNOI 基 MPW 流片工艺制备出了 LNOI 高速电光开关芯片,并实现了芯片的光纤耦合、管壳封装和器件测试。结果表明该高速电光开关器件的开关速度达到 13.4 ns,消光比达到 31.8 dB。该研究工作对未来集成光延时芯片和光学波束形成芯片的设计具有重要的参考意义,未来将进一步优化器件结构,提高电光调控效率,降低驱动电压,同时开展 LNOI 波导模斑转换器设计,降低器件插入损耗,推进 LNOI 器件的实用化。

#### 参 考 文 献

- [1] Zhou L, Wang X, Lu L, et al. Integrated optical delay lines: A review and perspective Invited [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(10):101301.