



激光与光电子学进展  
*Laser & Optoelectronics Progress*  
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

## 《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目： 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件  
作者： 田永辉, 袁明瑞, 秦士敬, 李浩, 王思璇, 肖恢芙  
收稿日期： 2024-01-15  
网络首发日期： 2024-03-23  
引用格式： 田永辉, 袁明瑞, 秦士敬, 李浩, 王思璇, 肖恢芙. 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件[J/OL]. 激光与光电子学进展.  
<https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20240320.1548.056>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件

田永辉\*, 袁明瑞, 秦士敬, 李浩, 王思璇, 肖恢英  
兰州大学物理科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 材料因其优异的电光、声光和非线性光学特性, 被视为实现高性能集成光电子芯片的理想材料平台。近年来, 随着晶圆级绝缘衬底上的铌酸锂 (LNOI) 薄膜的成功制备和微纳加工技术的突破, LNOI 平台在大规模高速光电子器件集成方面已展现出显著优势。在高速调制器等基础通信器件已成功利用光电子集成技术实现的基础上, 通过多信道并行传输数据以扩展链路容量的先进多路复用技术也受到广泛关注。基于 LNOI 平台, 多个复用维度的集成光子器件得以开发, 旨在实现高速大容量光电子通信器件的单片集成。本文探讨了 LNOI 光波导以及近期报道的多维复用 LNOI 集成光子器件, 包括波长、模式、偏振维度的光信号复用、调控等关键技术, 介绍了器件的工作机制、设计原理和方法以及性能指标。最后, 本文讨论了 LNOI 平台上多维复用集成光子器件面临的挑战和潜在解决方案。

**关键词** 集成光子器件; 薄膜铌酸锂; 光波导; 多维复用; 光互连

**中图分类号** TN256 **文献标志码** A

## Thin Film Lithium Niobate On-chip Integration of Multi-dimensional Multiplexed Photonic Devices

Tian Yonghui\*, Yuan Mingrui, Qin Shijing, Li Hao, Wang Sixuan, Xiao Huifu

*School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gan Su, China*

**Abstract** Lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) material, due to its excellent electro-optic, acousto-optic, and nonlinear optical properties, is widely recognized as an ideal platform for developing high-performance integrated optoelectronic chips. In recent years, with the successful fabrication of wafer-scale lithium niobate on insulator (LNOI) thin films and advancements in micro-nano processing technology, the LNOI platform has demonstrated significant advantages in large-scale high-speed optoelectronic device integration. With the successful realization of fundamental communication devices like high-speed modulators using optoelectronic integration technology, there has been increased attention on advanced multiplexing techniques that extend data capacity by transmitting multiple channels in parallel. In the LNOI platform, various integrated photonic devices based on multiple multiplexing dimensions have been developed, aiming to achieve monolithic integration of high-speed and large-capacity optoelectronic communication devices. This paper delves into LNOI waveguides and recently reported multi-dimensional multiplexed LNOI integrated photonic devices, including key technologies such as optical signal multiplexing, manipulation, and control in wavelength, mode, polarization dimensions. It also details the working mechanisms, design principles, methods, and performance parameters of the devices. Finally, this paper discusses the current challenges and potential solutions for implementing multi-dimensional multiplexed integrated photonic devices in the LNOI platform.

**基金项目:** 甘肃省自然科学基金重点项目 (23JRRA1026)、甘肃省自然科学基金在站博士后专项项目 (23JRRA1126)

**通信作者:** \*E-mail: siphoton@lzu.edu.cn

**Key words** integrated photonic devices; thin film lithium niobate; optical waveguide; multi-dimensional multiplexing; optical interconnection

## 1 引言

铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) 是集成光子学领域中倍受关注的电光和非线性光学器件材料之一<sup>[1]</sup>。与硅<sup>[2,3]</sup>、氮化硅<sup>[4,5]</sup>、磷化铟<sup>[6]</sup>等传统材料平台相比, LN 具有大的电光/非线性/声光/热释电系数, 以及大折射率 (1550 nm 时  $n_o=2.21$ ,  $n_e=2.14$ )、宽透明窗口 (覆盖 400 nm 至 5  $\mu\text{m}$ ) 和稳定的物理及化学性质<sup>[1, 7-14]</sup>。人们普遍认为 LN 对光子学的重要性与硅对电子学的重要性相当, 因此 LN 也被誉为“光学硅”。基于 LN 的优异特性, 多种光子器件的应用潜力已经被证明, 例如 LN 较大的电光系数 ( $\gamma_{33}=27 \text{ pm/V}$ ) 可用于实现高速调制器。由于不涉及载流子运动过程, 与其他材料平台如硅<sup>[15]</sup>和磷化铟<sup>[16]</sup>上的调制器相比, LN 调制器在调制速度和线性度方面均表现出优越的性能<sup>[9]</sup>。然而, 尽管具有巨大的潜力, 但由于材料集成和加工技术的挑战, LN 器件在很大程度上仍然是体积较大的分立元件。

自上世纪开始, 人们就尝试将 LN 应用于集成光子学中。1974 年, Schmidt 和 Kaminow 首次利用金属扩散工艺制备了 LN 集成光波导<sup>[17]</sup>。随着金属扩散技术的不断进步, 钛扩散因其能够提供较高的折射率对比度 ( $\sim 0.04$ ) 和较小的有效扩散深度 ( $\sim 1.6 \mu\text{m}$ )<sup>[9, 17-19]</sup>而逐渐成为常用方法之一。质子交换是另一种传统的 LN 微纳结构制备方法, 可以实现与钛扩散相似的波导结构和性能<sup>[20-22]</sup>。钛扩散和质子交换技术为探索 LN 在集成光子学中的卓越性能提供了可能。但受限于技术, 这些工艺很难实现小于 10  $\mu\text{m}$  的波导宽度和大于 0.1 的折射率对比度<sup>[22-24]</sup>。对于宽度超过 10  $\mu\text{m}$  的波导, 在可见光和近红外波段设计和实现单模波导及集成光子回路都颇具挑战。此外, 低折射率对比度会导致光场限制减弱<sup>[25-27]</sup>, 进而降低器件的性能, 如波导弯曲损耗增加、马赫-曾德尔调制器臂增长以及谐振器品质因数降低等。上述问题使得 LN 集成光子器件的高功耗和大尺寸与当前集成光子学追求的能效和集成度趋势相悖, 成为 LN 集成光子学进一步发展的主要阻碍。

绝缘体上的铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$  on insulator, LNOI) 平台由亚微米厚的 LN 薄膜覆盖在二氧化硅基底上组成<sup>[11, 28]</sup>。为了制备 LNOI, 首先需要利用“离子切片”技术从体 LN 晶体上剥离出单晶的亚微米级 LN 薄膜, 随后通过苯并环丁烯键合<sup>[29]</sup>或晶体键合<sup>[30]</sup>的方式将其固定到低折射率的基底上。2007 年以来, 成熟的制备工艺推动了 LNOI 晶圆的商业化进程, 基于 LNOI 的微纳结构图形化技术经历了快速发展<sup>[31]</sup>。LNOI 具有较大的折射率对比度, 因此通过使用多种蚀刻技术 (如湿法刻蚀、干法刻蚀、化学机械抛光、金刚石切割、飞秒激光直

写和聚焦离子束铣削等<sup>[32-44]</sup>)可以在 LNOI 平台上制备 LN 波导或器件结构。然而, 尽管近年来 LN 的直接蚀刻技术已被广泛地采用, 但由于与标准 CMOS 制备工艺不兼容, 与硅光子学等其他平台相比, LNOI 平台的可扩展性目前仍然有限。

基于负载材料与 LNOI 异质集成的间接刻蚀法被认为是一种极具潜力的替代方案。这种方案在 LNOI 上沉积一层光学性质与 LN 材料类似的负载材料, 然后刻蚀光学负载材料形成负载材料-铌酸锂异质光波导。负载材料可以通过成熟的制备工艺进行沉积和刻蚀, 在提供强光学模式限制的同时可以通过设计光波导结构使得大部分光场被限制在 LN 层, 这意味着可以在充分发挥 LN 优异材料特性的同时避免对 LN 进行直接蚀刻。因此, 该方案在高性能 LN 光电子器件制造领域具有广阔的应用前景。近年来, 以不同材料(例如硅、氮化硅、聚合物、二氧化钛等)作为负载材料的新兴 LNOI 平台被提出, 并成功演示了一系列集成光子器件<sup>[45]</sup>。以氮化硅-铌酸锂异质集成平台为例, 氮化硅材料具有成熟的高质量薄膜沉积技术和低侧壁粗糙度的刻蚀工艺<sup>[46-48]</sup>。除了成熟的波导制备工艺外, 氮化硅作为 LNOI 波导的负载材料还具有几个吸引人的特性。首先, 它具有相似但略低于 LN 的折射率(在 1550 nm 波长处约为 2.0), 这使得光学模式主要被限制在 LN 中, 从而能够充分发挥 LN 的材料特性。其次, 氮化硅具有较大的光学透明窗口, 覆盖可见光、近红外和中红外波段, 这使得 LNOI 器件能够在更宽的波长范围内工作。

LNOI 不仅继承了体 LN 优异的材料和光学性能, 而且具备与硅基平台相似的光子器件集成能力, 因此非常适合构建面向通信应用的新一代高速、大容量集成光电子芯片。得益于 LN 的强电光效应和二阶非线性效应, 目前 LNOI 平台上的研究主要集中在有源光子器件上, 其中最具代表性的是电光调制器和波长转换器<sup>[49-52]</sup>。然而, 为了实现大规模、高性能、多功能的集成光子回路, 仅仅依靠这些有源光子器件是远远不够的。我们仍然迫切地需要开发一系列重要的无源组件, 以便与有源器件进行单片集成, 从而实现高性能、多功能、低成本的集成光子电路。多维复用光子器件正是这些关键的无源组件之一。首先, 它们能够充分利用光子的频率/波长、偏振、空间结构等物理资源维度, 通过多维复用技术将不同波长、偏振和模式编码的多个光信号由多信道并行传输到单个信道, 从而显著提升光通信系统数据容量<sup>[53-54]</sup>。其次, LNOI 平台具有较大的电光系数, 高速光调制和多路光复用在 LNOI 平台上的单片集成有助于实现高速、大容量、低成本的集成光子电路, 为数据流量爆炸式增长提供有力的支撑方案<sup>[55]</sup>。

本文旨在全面概述 LNOI 平台上多维复用集成光子器件的最新研究进展, 帮助研究者更深入地了解这些复用器件的技术发展。本文结构如下: 第 2 节“薄膜铌酸锂集成光波导”介

绍了 LNOI 平台上光波导的制备方法、工艺流程和传输特性，比较了不同波导制作工艺的优点和潜在缺点。第 3 节“多维复用薄膜铌酸锂集成光子器件”以光波导结构为基础，介绍了基于波长、模式、偏振复用的薄膜铌酸锂集成光子器件，并分析了它们的工作机制、设计原理和方法以及性能指标。第 4 节“薄膜铌酸锂多维复用调制一体光子集成回路”介绍了 LNOI 高速电光调制器的最新成果，以及其与薄膜铌酸锂多维复用技术的结合应用。第 5 节“总结与展望”对本文进行了总结，并讨论了 LNOI 平台上的多维复用集成光子器件发展所面临的挑战和潜在解决方案。

## 2 薄膜铌酸锂集成光波导

光波导是集成光学器件的核心组件，理想的光波导应具备大的光学模式限制能力与低损耗特性，并能够支持紧凑的弯曲半径。为了实现这一目标，LNOI 平台上涌现了多种新型光学波导结构，旨在提高单芯片的光学元件集成度。本节将对这些波导进行综述，探讨其优缺点及权衡因素。

传统的体 LN 材料通常采用钛扩散或质子交换技术制备光波导<sup>[44]</sup>。但对于 LNOI 光波导而言，钛扩散方法所需的退火温度(约 1000°C)会破坏 LN 薄膜与二氧化硅之间的缓冲层，该缓冲层的最高承受温度约为 500°C<sup>[56]</sup>。相比之下，质子交换可在较低的温度范围(150~400°C)内进行<sup>[44]</sup>。基于该方法，在 LNOI 上实现的 TE 偏振波导损耗为 0.2 dB/cm，TM 偏振波导损耗为 0.6 dB/cm<sup>[36, 37, 57, 58]</sup>。然而，质子交换所实现的波导折射率对比度有限，因此波导的弯曲半径达到毫米量级<sup>[36]</sup>，这对于实现高集成度的片上光学元件而言是一个重大挑战。此外，质子交换会增加非寻常折射率而降低寻常折射率，这意味着波导只能传输特定偏振的光，从而限制了其应用范围。

与传统制备方案相比，通过刻蚀 LN 材料实现波导结构的方法具有以下优势：1) 波导与背景介质(如空气和二氧化硅)的边界更加清晰；2) 波导的几何形状(包括宽度和纵横比)可以更加灵活地定义；3) 通过在波导上方沉积覆盖层，可以灵活调整折射率对比度。这些优点使得 LN 波导在光芯片上能够实现更高的集成度和更小的波导弯曲半径。刻蚀 LN 波导的一种方法是使用机械刻蚀技术，通过精密划片机刻蚀波导两侧的 LN<sup>[59-61]</sup>。这种方法得到的光波导传输 TE 和 TM 偏振光的损耗分别为 1.2 dB/cm 和 2.8 dB/cm<sup>[60]</sup>。然而，该方法的缺点是只能进行直线切割，因此限制了其实现更复杂的光子集成芯片应用。另一种制备方法是采用超精密金刚石切割技术<sup>[62]</sup>。这种技术具有实现弯曲波导的潜力，然而其局限性在于

两个波导之间的最小间距受金刚石工具的限制。此外，尽管在体 LN 上已证实该技术的可行性，但 LNOI 上 LN 薄膜与二氧化硅缓冲层之间的结合强度较弱，其实现可能面临挑战。化学机械抛光（Chemical Mechanical Polishing, CMP）也是一种制备波导的有效方法。在该方法中，铬层作为掩模层通过飞秒激光刻蚀对其进行图案化，随后使用晶圆抛光机打磨裸露的 LN 以形成波导结构，最后通过湿法蚀刻去除 LN 波导上的铬层<sup>[63]</sup>。值得一提的是，通过调整 CMP 过程的持续时间，波导的侧壁角度可以在几度到近 80° 的范围内灵活调整<sup>[64]</sup>。通过该工艺，可以实现表面粗糙度均方根低至 0.452 nm 的超光滑波导表面，同时波导损耗低于 0.1 dB/cm<sup>[65]</sup>。然而，这种方法在大规模生产和制备精细特征尺寸结构方面存在一定的局限性。除了 CMP，聚焦离子束刻蚀<sup>[66]</sup>和氩离子轰击<sup>[67]</sup>工艺也被证实可用于制备 LN 波导。然而，这两种技术同样存在一些问题和局限性。首先，它们的制备过程相对缓慢且繁琐，其中聚焦离子束刻蚀是一个串行过程，难以扩展到晶圆级制备。其次，离子轰击方法需要大量的掩模，并且在实现小特征尺寸的结构方面同样存在局限性。

更加灵活且高分辨率的光波导制备方法包括湿法蚀刻和干法蚀刻技术。湿法蚀刻技术利用金属掩模和氢氟酸与硝酸的混合物进行蚀刻，在体 LN 上成功制备了条形波导<sup>[68]</sup>。然而，该方法的局限性不仅在于蚀刻速率受晶体特性影响，而且晶体切割方式也受到限制。特定晶体面的优先蚀刻导致波导弯曲处侧壁突变，进而增加了光的散射损耗。相比之下，干法蚀刻显示出巨大潜力。如图 1 (a) - (d) 所示，通过在 LNOI 表面制作蚀刻掩模，然后进行干法蚀刻，接着去除蚀刻掩模，就可以成功制备出波导结构。这种制备方法的关键在于反应离子蚀刻工艺需要控制不同气体参数从而优化刻蚀过程<sup>[11, 69-73]</sup>。比如氟化物基气体在蚀刻过程中会在 LN 表面形成结晶氟化锂颗粒，导致表面粗糙度增加<sup>[74, 75]</sup>。通过调整蚀刻参数或使用质子交换技术用氢离子取代锂离子，便可以有效降低氟化锂的生成<sup>[76, 77]</sup>。另一种方案是避免使用氟化物基蚀刻气体而采用物理蚀刻方法，如氩气刻蚀<sup>[78]</sup>。这种工艺已成功制备出损耗低至 3 dB/cm 的条形波导，其弯曲半径小于 20  $\mu\text{m}$ <sup>[79]</sup>，尤其适用于 C 波段通信波长。经过进一步的工艺优化，光学损耗能够有效降低至 2.7 dB/m<sup>[80]</sup>。这项技术为实现 LN 光子集成芯片的高性能与高密度集成提供了有力支持<sup>[79]</sup>。然而，这种制备工艺的缺点是波导侧壁角度较大（通常在 40° 至 45° 之间<sup>[71, 73]</sup>），为实现强耦合波导及小尺寸微纳结构带来了挑战。

除了直接蚀刻方案外，另一种值得关注的 LN 波导制备方法是在 LNOI 上方沉积光学负载材料，随后刻蚀负载材料形成脊形波导，如图 1 (e) - (h) 所示。目前，多种材料包括氮化硅<sup>[41, 81, 82]</sup>、二氧化钛<sup>[56]</sup>、五氧化二钽<sup>[33]</sup>和硫系玻璃<sup>[39]</sup>已被提出并证明能实现 LN 波导结构。其中，氮化硅因具有与 LN 相似的透射率和折射率而被认为是最有前景的光学负载材料。

氮化硅的刻蚀技术与 CMOS 工艺兼容，其沉积和蚀刻可采用标准工艺实现<sup>[41, 82]</sup>。基于这种方法，损耗低至约 0.3 dB/cm 的波导<sup>[82]</sup>及半径约 200  $\mu\text{m}$  的弯曲<sup>[39]</sup>已在 C 波段实现。通过将氮化硅键合在低压化学气相沉积的 LNOI 上，有望实现更低的波导损耗<sup>[42]</sup>。这种方法对于实现 LN 波导器件，尤其是布拉格光栅、光子晶体、超构波导等小特征尺寸器件并推动其应用具有关键意义。

低损耗波导是实现高性能集成光学器件的关键。脊波导中的光场与波导侧壁的相互作用面积较小，因此比条形波导损耗更低。而条形波导具有更强的横向折射率对比度，可以实现更小的波导弯曲半径。因此，在选择波导几何形状时，需根据特定应用对波导弯曲半径和光损耗进行权衡。此外，在波导上方覆盖二氧化硅缓冲层有助于保护波导并降低光损耗。随着集成 LNOI 波导制备技术的进步，LN 波导的损耗已得到显著改善<sup>[83]</sup>。由于 LN 晶体对光的吸收，LN 波导的传播损耗理论最低值约为 0.001 dB/cm。通过使用 CMP<sup>[63]</sup>和直接刻蚀<sup>[80]</sup>技术制备的光波导可以得到 0.027 dB/cm 的低传输损耗。这对于封装尺寸为数十至数百平方微米的集成器件来说可以忽略不计。集成 LN 波导的主要损耗来源包括波导弯曲引起的辐射损耗和表面粗糙度引起的散射损耗。对于给定的波导，不同的光模式具有不同的损耗。一般而言，高阶模式更接近截止条件且束缚比低阶模式弱，因此具有更高的辐射损耗和散射损耗<sup>[84]</sup>。

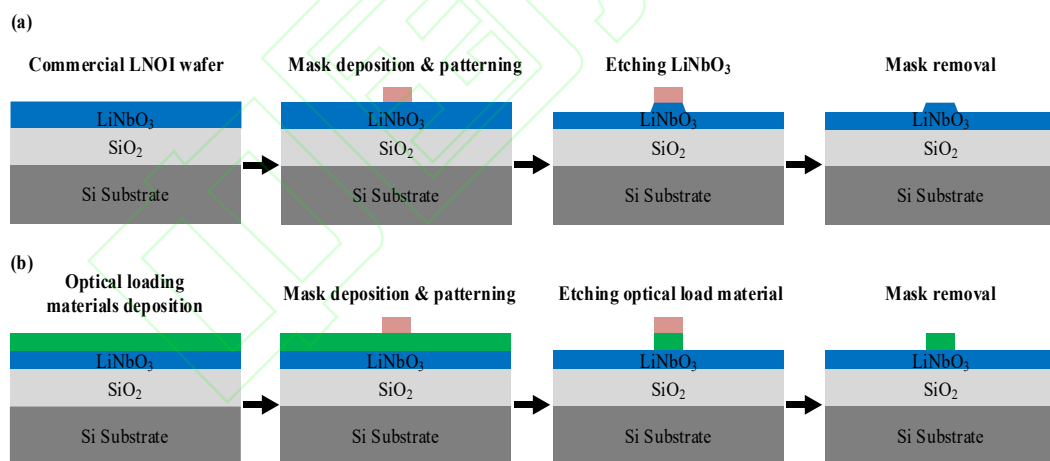


图1 LNOI波导的制备方法。(a) 直接刻蚀LN形成脊形波导的制备步骤；(b) 在LN上方沉积光学负载材料形成脊形波导的制备步骤

Fig. 1 Preparation method of LNOI waveguide. (a) Preparation step of directly etching LN to form a ridge waveguide; (b) preparation step of depositing optical load material on top of LN to form a ridge waveguide

### 3 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件

#### 3.1 基于波长复用的薄膜铌酸锂集成光子器件

波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术能够在同一波导中同时传输多个不同波长的光信号, 是提升数据通信容量的重要技术之一<sup>[85]</sup>。通过将 WDM 技术与高性能电光调制器结合, 可以在 LNOI 平台上构建出多信道、多波长发射机芯片, 为数据中心光通信提供核心组件<sup>[53, 86]</sup>。根据信道间隔的不同, WDM 系统主要分为密集波分复用 (DWDM) 和粗波分复用 (CWDM)。DWDM 信道间隔较窄, 范围在 12.5 GHz (0.1 nm) 至 100 GHz (0.8 nm), 因此对波长偏移非常敏感, 需要精细的波长控制。相较之下, CWDM 的宽信道间隔 (如 20 nm) 对器件要求较低, 更适用于短距离光互连<sup>[87]</sup>。目前, 研究者已提出多种基于不同结构的 CWDM 器件设计, 如图 2 所示, 包括阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG)<sup>[88-92]</sup>、多模干涉耦合器 (Multi-Mode Interference Coupler, MMI)<sup>[86, 93]</sup>、多模波导光栅 (Multimode Waveguide Grating, MWG)<sup>[53, 94-96]</sup> 和亚波长光栅 (Subwavelength Grating, SWG)<sup>[97]</sup> 等。

AWG 具有良好的波长选择性, 可以实现精确的波长复用。图 2 (a) 为美国加州大学在 Z 切薄膜 LN 平台上实现的一种 8 信道 AWG<sup>[88]</sup>, 其信道间隔为 500 GHz, 器件整体尺寸为  $1.4 \times 1.2 \text{ mm}^2$ 。这一突破为 LNOI 平台上的 AWG 器件在 WDM 系统中的应用揭示了新的研究方向。2020 年, 山东大学利用 LN 的电光效应提出一种中心波长和带宽可调谐的 AWG, 该 AWG 展现了出色的波长调谐能力, 具有 4 nm (1548~1552 nm) 的中心波长调谐范围和 0.653 nm (0.28 nm~0.933 nm) 的 3 dB 带宽调谐范围<sup>[89]</sup>。2021 年, 南京电子器件研究所演示了 4 信道的 AWG, 信道间隔被缩短至 400 GHz<sup>[90]</sup>。然而该器件插入损耗较大 (27.2 dB), 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/输出端缺少模斑转换器, 影响了光耦合效率。为了进一步降低器件的损耗和串扰, 香港中文大学在聚合物加载的异质集成平台上实现了一种 AWG, 实验演示了在通信和近可见光波段内的 4、8 和 16 信道 WDM, 所有信道的插入损耗均低于 9.1 dB, 串扰小于 -12.8 dB<sup>[91]</sup>。2023 年, 山东大学报道了一种可调谐  $4 \times 4$  AWG 路由器, 通过设计电极区域实现了对路由器中心波长和带宽的精确调谐。所设计的 AWG 信道间隔为 0.8 nm, 最小插入损耗为 2.3 dB<sup>[92]</sup>。上述工作对高性能 LNOI 波分复用器的研究具有推动作用, 然而, LN 的各向异性特性导致弯曲波导内的存在模式杂化现象, 这成为限制 LN 波导实现紧凑片上集成的主要因素<sup>[98]</sup>, 在 LN 平台上实现基于 AWG 结构的 WDM 器件相对具有挑战。

基于 MMI 结构的波分复用器提供了有效的解决方案, 其关键部分不涉及弯曲结构, 从而避免了模式杂化问题。基于这一优势, 浙江大学实现了如图 2 (b) 所示的紧凑、高性能的 CWDM 器件, 其带宽可以通过调整结构参数进行灵活调节<sup>[93]</sup>。随后, 该研究组将这一结构



与高性能电光调制器结合，成功演示了单片集成的 4 信道 CWDM 发射机<sup>[86]</sup>。然而，这种基于倾斜 MMI 结构的波分复用器长度接近两毫米，在信道多、信道间距窄的应用场景下存在一定的局限性。此外，理想的 CWDM 器件应具备低损耗、低信道串扰以及平顶响应等特性。但遗憾的是，基于 AWG 和 MMI 的器件均存在非平顶响应问题<sup>[99]</sup>，这导致器件旁瓣抑制比较低，进而限制了带宽的扩展。

光栅结构能在 LNOI 平台上实现高性能的滤波功能，为上述问题提供了有效的解决方案<sup>[100-102]</sup>。基于 MWG 的复用器能够实现低损耗、低信道串扰、平顶响应以及小尺寸的 WDM<sup>[103]</sup>。2021 年，中国科学院半导体研究所在富硅氮化物负载 LNOI 集成平台上实现了一种 4 通道 CWDM 器件。通过级联 MWG 得到了信道间隔 20 nm 的低损耗（1.08 dB）、低串扰（-18 dB）平顶光谱响应<sup>[94]</sup>。2023 年，浙江大学基于 MWG 实现了如图 2（c）所示具有平顶响应的 4 通道 CWDM 复用器<sup>[95]</sup>，并通过与调制器集成实现了高速光调制发射机<sup>[53]</sup>。这项研究预示着 LNOI 在大规模光子集成领域的巨大潜力。此外，该研究组还实现了一种用于 50 G 无源光网络的 3 通道光学滤波器。测得器件损耗小于 0.2 dB，信道间的串扰约为 -30 dB，信道旁瓣抑制比约为 20 dB<sup>[96]</sup>。为了进一步缩小信道间隔，兰州大学在氮化硅负载 LNOI 集成平台上提出一种如图 2（d）所示的 SWG 辅助反向定向耦合器结构，演示了器件信道间隔为 3.2 nm (400 GHz) 的 3 通道 WDM，器件插入损耗约为 2.5 dB，信道间串扰低至 -20 dB<sup>[97]</sup>。表 1 给出了 LNOI 平台上波分复用器的性能概述。

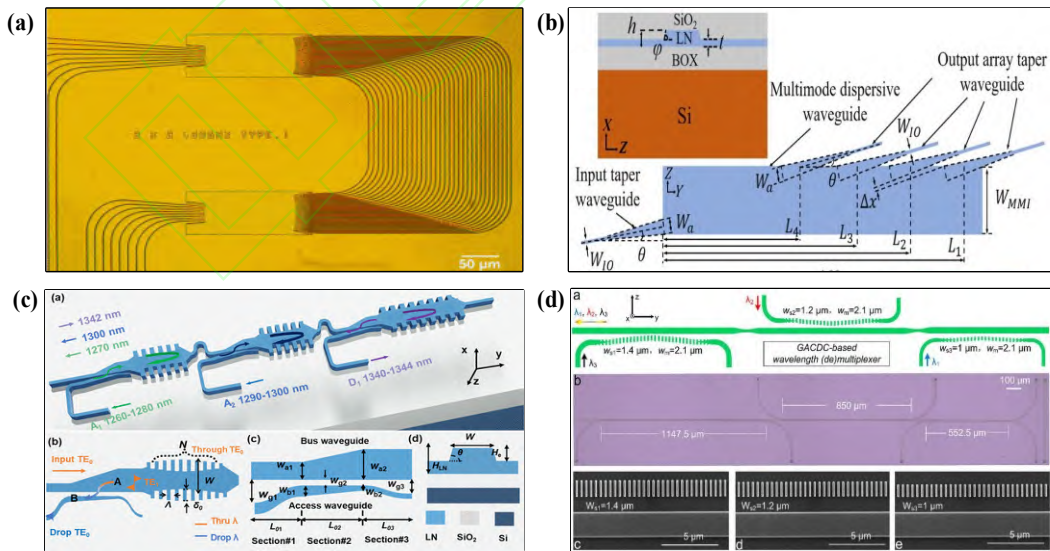


图2 薄膜铌酸锂波分复用器。(a) 阵列波导光栅结构<sup>[88]</sup>；(b) 多模干涉耦合器结构<sup>[93]</sup>；(c) 多模波导光栅结构<sup>[96]</sup>；(d) 亚波长光栅结构<sup>[97]</sup>

Fig. 2 Thin-film lithium niobate wavelength division multiplexers. (a) AWG structure<sup>[88]</sup>; (b) MMI structure<sup>[93]</sup>; (c) MWG structure<sup>[96]</sup>; (d) SWG structure<sup>[97]</sup>

表1 薄膜铌酸锂平台上的波分复用器

Table 1. Wavelength division multiplexers in thin film lithium niobate platform

Ref.	Structure	Wavelength Channel	Channel Spacing (nm)	Insertion Loss (dB)	Crosstalk (dB)
88	MMI+AWG	8	4.0	< 25.0	< -10.0
90	AWG	4	3.2	< 27.2	< -7.5
91	AWG	8/16	9.6/3.7	< 6.6/8.4	< -19.3/-18.3
92	AWG	4	0.8	2.3	-20.0
86	AMMI+4 MZI	4	—	< 0.9	~18.2
93	MMI	4	20.0	< 0.7	< -18.0
53	4 FP cavities+ WDM filter	4	7.0	~0.8	< -22.0
94	Bragg grating	4	20.0	< 1.0	< -18.0
96	MWG	3	—	< 0.2	~30.0
97	Subwavelength grating	3	3.2	~2.5	< -20.0

### 3.2 基于模式复用的薄膜铌酸锂集成光子器件

模分复用 (Mode Division Multiplexing, MDM) 技术利用光的多个正交模式作为单波长的独立信号通道, 能够显著提高通信系统的传输容量和频谱效率<sup>[104-106]</sup>。高阶模式的引入大大增强了 MDM 技术的链路容量<sup>[107, 108]</sup>以及提高片上光子器件的设计灵活性<sup>[109]</sup>。当前, 多模光子学在 LNOI 平台上已有一定研究基础, 各种多模光子器件包括模式 (解) 复用器、多模波导弯曲和多模波导交叉等已经被成功证明。然而, LNOI 光波导在制备工艺、折射率对比度和模式特性等方面与硅基光波导存在差异。通过干法蚀刻技术制备的波导通常具有倾斜的侧壁, 虽然通过异质集成的间接刻蚀方法避免了 LN 的直接蚀刻, 但波导垂直方向的不对称性和材料各向异性特性导致了模式杂化现象的产生<sup>[54, 110, 111]</sup>。因此, 近年来研究人员在多模 LN 光子器件的设计方面付出了大量的努力。

#### 3.2.1 光模式复用器

光模式复用器是 MDM 系统的重要组成部分, 其主要功能是将多个不同的光信号复用到同一多模波导中传输。如图 3 所示, 目前已有多种基于不同平台及结构的高性能光学模式复用器被提出。2020 年, 香港中文大学在聚合物加载的 LNOI 平台上利用连续域中的光子束缚态 (Bound states in the continuum, BIC) 实现了如图 3 (a) 所示的 4 通道 TM 模式复用器<sup>[112]</sup>。尽管器件性能显著, 但 BIC 波导的局限性在于仅支持特定偏振和波长的光传输, 这意味着此类器件在应用上受到一定限制。此外, 较大的插入损耗和串扰使得器件性能仍有进一步优化空间。图 3 (b) 为电子科技大学提出的一种基于马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder

interferometer, MZI) 的可重构双模复用器, 可在两种模式之间进行切换<sup>[113]</sup>。然而, 这项工作模式通道数有限, 且工作带宽仅 30 nm。基于非对称定向耦合结构的模式复用器因其可扩展的结构和简洁的设计原理而具有吸引力。图 3 (c) 为中国科学院半导体研究所在富硅氮化物异质集成平台上通过绝热定向耦合器演示的一种 4 通道模式复用器<sup>[110]</sup>, 在 100 nm 的带宽范围内器件串扰小于 -16 dB。该器件展现出了优异的性能, 但同时也存在一些不可忽视的问题。首先, 富硅氮化物的折射率比 LN 更高, 导致光模式与 LN 薄膜的光场重叠较低, 在片上集成时限制了电光调制或二次谐波产生的效率。其次, 与氮化硅相比, 富硅氮化物材料的带隙更窄, 这意味着波导可支持的最短波长受到限制。这为未来的研究和改进提供了方向, 以期在保持器件优良性能的同时克服这些挑战。图 3 (d) 为兰州大学在氮化硅负载 LNOI 集成平台上实现的一种基于非对称定向耦合结构的 4 通道模式复用器<sup>[54]</sup>, 并成功演示了 40 Gbps 的数据传输。值得一提的是, 氮化硅负载的 LNOI 波导蚀刻工艺相对简单, 并且氮化硅的折射率略低于 LN 薄膜, 能够实现模式与 LN 薄膜的高光场重叠。需要注意的是, 上述模式复用器是沿着 LN 晶体的 Z 轴方向设计的。浙江大学提出一种具有各向异性特性的 LNOI 波导设计<sup>[114]</sup>。该研究基于绝热非对称耦合结构, 实现了 4 通道模式复用器, 如图 3 (e) 所示。模式复用器波导沿 LN 的 Z 轴方向传输, 通过设计多模波导弯曲将多模光转为 Y 传播方向, 有助于充分利用 LN 的电光系数 ( $r_{33}$ ) 和非线性系数 ( $d_{33}$ )。

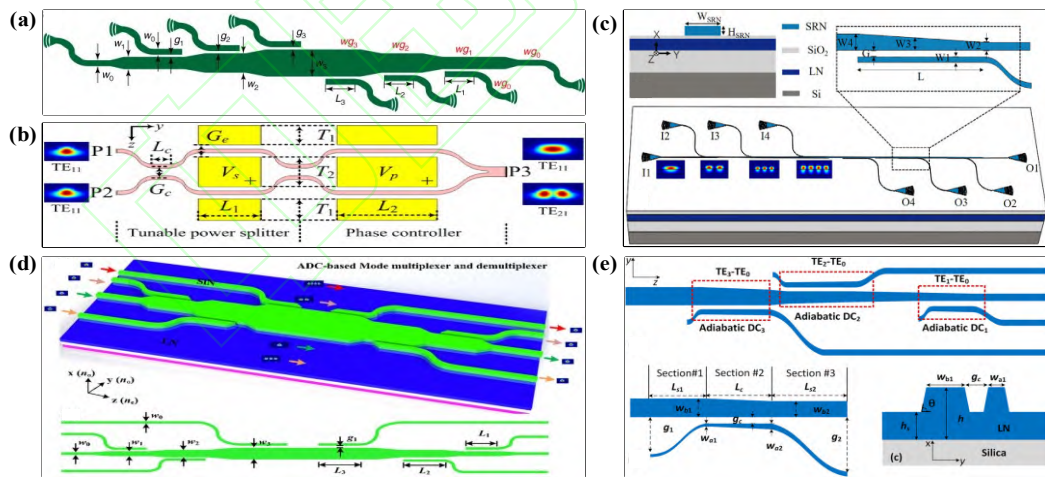


图3 薄膜铌酸锂光模式复用器。(a) 聚合物加载LNOI平台上的连续域中的光子束缚态结构<sup>[112]</sup>; (b) 直刻LN平台上的马赫-曾德尔干涉仪结构<sup>[113]</sup>; (c) 富硅氮化物加载LNOI平台上的绝热定向耦合结构<sup>[110]</sup>; (d) 氮化硅加载LNOI平台上的非对称定向耦合结构<sup>[54]</sup>; (e) 直刻LN平台上的绝热非对称耦合结构<sup>[114]</sup>

Fig. 3 Thin film lithium niobate mode division multiplexers. (a) Photonic BIC structure in the polymer-loaded LNOI platform<sup>[112]</sup>; (b) MZI structure in the direct etching LN platform<sup>[113]</sup>; (c) asymmetric directional coupling structure in the silicon rich nitride-loaded LNOI platform<sup>[110]</sup>; (d) asymmetric directional coupling structure in the silicon nitride-loaded LNOI platform<sup>[54]</sup>; (e) adiabatic asymmetric coupling structure in the direct etching LN platform<sup>[114]</sup>

表 2 给出了 LNOI 平台上光模式复用器的性能概述。目前, LNOI 平台上的模式复用器

最高仅报道了四阶模的多路复用，尚未有更高阶模式通道数的 MDM 演示。对于直刻 LN 方案而言，倾斜波导侧壁限制了相邻波导之间的最小耦合间距，从而不利于构建基于强耦合波导的高效器件。为了克服这些挑战，研究人员正积极探索其他介质材料负载的 LNOI 平台。这些新兴平台在制备工艺、支持的光偏振和波长范围、LN 层中的模限制因子、模式通道数、器件插入损耗以及串扰性能等方面展现出更高的潜力，有望推动 MDM 技术实现更高性能。

表 2 薄膜铌酸锂平台上的光模式复用器

Table 2. Mode multiplexers in thin film lithium niobate platform

Ref	Structure	Modes	Insertion Loss		Crosstalk		Bandwidth	
			(dB)		(dB)		(nm)	
			Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
112	ADC	4	~0.6	~1.5	-13.0	-13.0	50	50
113	MZI	2	-	-	< -20.0	< -16.9	30	30
110	Adiabatic DC	4	0.2	1.6	-	-16.0	-	100
54	ADC	4	0.5	2.8	-13.0	-11.0	70	70
114	Adiabatic DC	4	~0.1	~0.2	-23.0	-20.0	200	>80

### 3.2.2 光功分器

光功分器是光通信和光电子领域中的关键器件之一，用于将输入的光信号功率分配到多个输出端口。随着光通信技术的飞速发展，对功分器的性能要求也越来越高，包括低插入损耗、宽带宽、小尺寸和高功率分配平衡度等。图 4 (a) 为中科院长春光机所提出的一种基于超表面的功分器设计<sup>[115]</sup>。该器件由一组位于直刻 LN 波导上方的硅纳米天线组成，能够将输入的基模转换为多种输出模式，这些模式相互干涉后从两个分支波导输出。得益于超表面的特殊光学性质，这种功分器为宽带光通信系统提供了新的可能性。随后，中山大学实现了一种如图 4 (b) 所示的基于 Y 分支结构的任意分束比 (0 dB~15 dB) 功分器，器件尺寸仅  $20\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ ，具有较低的插入损耗 (<0.18 dB) 和较宽的带宽范围 (>100 nm)<sup>[116]</sup>。其创新之处在于可以实现任意的功率分配比，为复杂光网络中的灵活功率管理提供了有力支持。为了进一步提高器件集成度，如图 4 (c) 所示的基于遗传算法逆向设计的 Y 型和 T 型超紧凑功分器使得器件尺寸进一步减小 (分别为  $2.6\ \mu\text{m} \times 2.6\ \mu\text{m}$  和  $2.85\ \mu\text{m} \times 4.94\ \mu\text{m}$ )，器件在 1550 nm 处插入损耗分别小于 0.1 dB 和 0.7 dB<sup>[117]</sup>，展示了这种方法在光器件设计中的潜力。

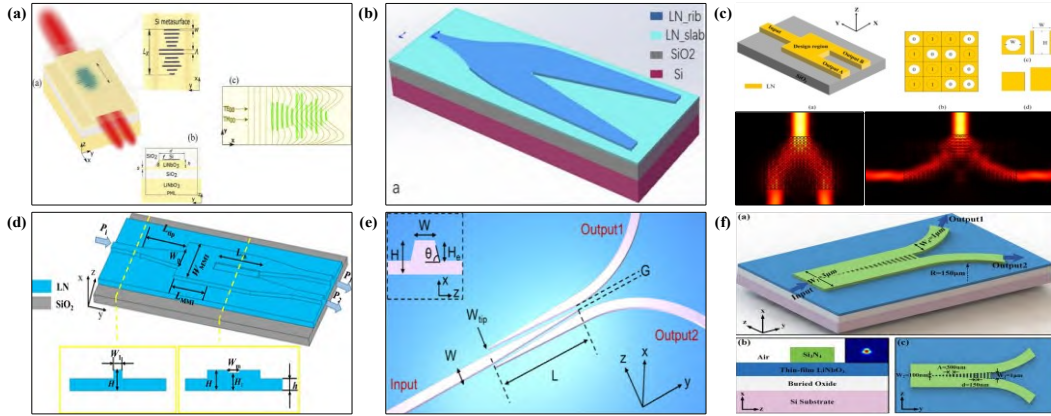


图4 薄膜铌酸锂光功分器。(a) 超表面结构<sup>[115]</sup>；(b) Y分支结构<sup>[116]</sup>；(c) 逆向设计结构<sup>[117]</sup>；(d) 多模干涉耦合器结构<sup>[118]</sup>；(e) 绝热模式演化结构<sup>[119]</sup>；(f) 基于亚波长光栅的Y分支结构<sup>[120]</sup>

Fig. 3 Thin film lithium niobate power splitters. (a) Metasurface structure<sup>[115]</sup>; (b) Y-branch structure<sup>[116]</sup>; (c) inverse design structure<sup>[117]</sup>; (d) MMI structure<sup>[118]</sup>; (e) adiabatic mode evolution structure<sup>[119]</sup>; (f) SWG-assisted Y-branch structure<sup>[120]</sup>

MMI 结构以其低插损、宽带宽和大工艺容差的特点成为一种备受关注的设计方案。如图 4 (d) 所示，北京邮电大学提出一种基于 MMI 的功分器<sup>[118]</sup>。该器件尺寸为  $42.94 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ，工作带宽被扩展到了 1314 nm。随后，华中科技大学基于绝热模式演化结构提出一种超宽带  $1 \times 2$  3dB 功分器，如图 4 (e) 所示。实验表明，器件在 1260~1360 nm、1480~1640 nm 和 1930~2030 nm 波长下的插入损耗小于 0.7 dB，能够在 O-、C-、L-和  $2 \mu\text{m}$  波段同时工作<sup>[119]</sup>。图 4 (f) 为兰州大学提出的一种基于 SWG 的 Y 分支 3dB 功分器。该器件在 800 nm 的带宽内表现出小于 0.12 dB 的插入损耗。SWG 结构的引入使得功分器在保持低损耗的同时实现了更小的尺寸( $9.6 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ )<sup>[120]</sup>。这类宽带器件在实现片上多波段系统方面发挥了关键作用，不仅丰富了光通信和光电子领域的技术手段，也为未来高性能光通信系统的发展奠定了坚实基础。表 3 给出了 LNOI 平台上光功分器的性能概述。

表 3 薄膜铌酸锂平台上的光功分器

Table 3. Optical power splitters in thin film lithium niobate platform

Ref	Structure	Insertion Loss		Bandwidth		Length ( $\mu\text{m}$ )
		(dB)		(nm)		
		Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	
115	Y-branch+SWG	0.16	—	800	—	2.7
116	Y-branch	—	0.18	—	100	20.0
117	Y-branch +Intelligent algorithm	0.10	—	20	—	2.6

	T-branch	1.30	–	100	–	2.9
118	MMI	0.01	–	1314	–	42.9
					100 (C band)	
119	Adiabatic DC	0.53	0.70	900	160 (O band)	60.0
					100 (L band)	
120	Y-branch+SWG	0.12	0.20	800	100	9.6

### 3.2.3 光波导交叉/弯曲

光波导交叉和弯曲作为光学链路中的核心组件，对于构建高效、紧凑的光子系统具有重要意义。光波导交叉的主要作用是实现光信号在不同路径间的无损切换和交叉传输。近年来，基于不同结构的光波导交叉在降低插入损耗、抑制串扰以及减小器件尺寸等方面取得了显著的进展。弯曲波导则是光学链路中另一个不可或缺的组成部分。在紧凑的光子集成系统中，如何实现低损耗、小尺寸的弯曲波导是长期以来的挑战。近年来，弯曲波导的性能通过优化设计算法、改进制造工艺等方法也得到了显著的提升。

图 5 (a) 为香港城市大学在直刻 LN 平台上实现的一种基模波导交叉与弯曲结构<sup>[121]</sup>。该研究利用三维梯度逆向设计算法对波导形状进行优化，从而实现了高性能的波导交叉结构。器件在 100 nm 的带宽范围内具有 0.48 dB 的插入损耗和小于 -36 dB 的串扰，同时其紧凑的尺寸 (12  $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ) 也显示出了出色的集成潜力。该项工作还实现了一种弯曲半径为 6  $\mu\text{m}$  的 90° 弯曲波导，在 100 nm 带宽内模式插入损耗为 0.29 dB，器件尺寸为 10  $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。值得一提的是，逆向设计算法模型不仅能够庞大的参数空间中高效搜索，还充分考虑实际制造过程中的各种限制因素，包括最小特征尺寸和波导侧壁角度等。然而，所提出的器件是基于 Z 切 LNOI 晶圆设计，难以充分发挥 LN 材料优异的光学特性，且由于在直刻 LN 平台上实现，较大的波导侧壁角度限制了器件的最小尺寸 (0.4  $\mu\text{m}$ )。随后，该研究组基于 X 切 LNOI 晶圆提出一种波导交叉方案。如图 5 (b) 所示，利用谐振器辅助表征了基于 MMI 的单模 LN 波导交叉，其在 1550 nm 波长处的插入损耗低于 0.07 dB，串扰低于 -50 dB<sup>[122]</sup>。图 5 (c) 为兰州大学基于双槽刻蚀结构实现的一种多模弯曲波导 (弯曲半径为 120  $\mu\text{m}$ )。在 50 nm 的带宽范围内测得三种 TE 模式的插入损耗均小于 2.5 dB，模间串扰低于 -12.2 dB<sup>[123]</sup>。同年，浙江大学在直刻 LN 平台上实现了如图 5 (d) 所示的基于 45° 修正欧拉弯的多模弯曲波导 (等效半径为 160  $\mu\text{m}$ )。在 80 nm 的波长范围内测得四种 TE 模式的损耗均小于 0.045 dB，模间串扰低于 -17 dB<sup>[102]</sup>。多模弯曲波导为 LNOI 平台中的多模光子互联提

供了紧凑的解决方案，也为实现高速、大容量的片上通信系统铺平了道路。表 4 和表 5 分别给出了 LNOI 平台上光波导弯曲及交叉的性能概述。

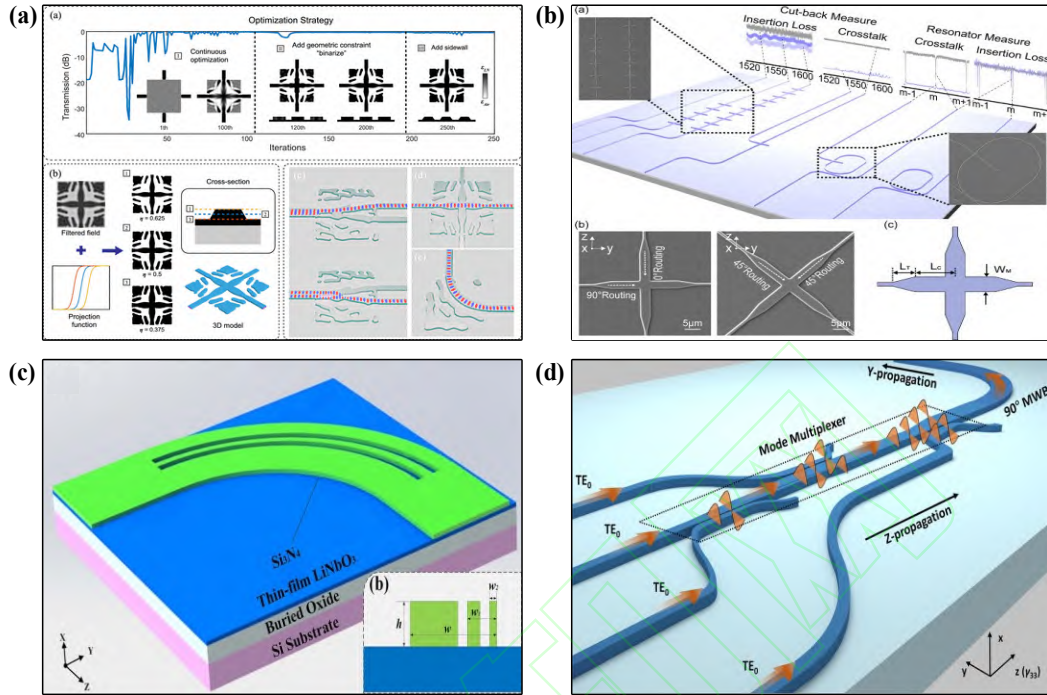


图5 薄膜铌酸锂光波导交叉及弯曲。(a) 逆向设计结构<sup>[121]</sup>；(b) 多模干涉耦合器结构<sup>[122]</sup>；(c) 双槽刻蚀结构<sup>[123]</sup>；(d) 修正欧拉弯结构<sup>[102]</sup>

Fig. 5 Thin-film lithium niobate waveguide crossings and bends. (a) Inverse-designed structure<sup>[121]</sup>; (b) MMI structure<sup>[122]</sup>; (c) double-slot etching structure<sup>[123]</sup>; (d) modified Euler structure<sup>[102]</sup>

表4 薄膜铌酸锂平台上的光波导弯曲

Table 4. Bending waveguides in thin film lithium niobate platform

Ref	Structure	Modes	Insertion Loss (dB)		Crosstalk (dB)		Bandwidth (nm)	Length ( $\mu\text{m}$ )
			Sim.	Exp.	Sim.	Exp.		
121	Intelligent algorithm	1	0.29	0.41	-	-	100	6
123	Air grooves	3	0.85	2.50	-12.8	-12.2	100	120
102	Euler bend	4	0.04	0.05	-25.0	-17.0	100	160

表5 薄膜铌酸锂平台上的光波导交叉

Table 5. Waveguide crossings in thin film lithium niobate platform

Ref	Modes	Insertion Loss	Crosstalk	Bandwidth	Length
		(dB)	(dB)	(nm)	( $\mu\text{m}$ )
121	1	0.48	-36	100	12
122	1	0.07	-50	80	35

### 3.3 基于偏振复用的薄膜铌酸锂集成光子器件

LN 是一种具有各向异性特性的晶体，其固有的双折射特性使其传播特性对入射光的偏振态具有强烈的依赖性。在传输系统中，偏振态的纯度对器件性能有着至关重要的影响。此外，LN 的电光系数和非线性系数也与偏振态密切相关，导致在 LNOI 波导中传播的 TE 和 TM 偏振模式具有不同的电光和非线性效应。因此，在光学集成平台中，偏振管理器件具有至关重要的作用。

#### 3.3.1 起偏器

起偏器是一种基本的偏振管理器件，能够通过特定的波导结构或高度偏振依赖的材料输出所需的偏振模式，并在短距离内衰减与之正交的模式。目前，基于 LNOI 的起偏器已通过多种不同的结构实现。其中一种方案是采用浅刻蚀波导结构，引入偏振相关的模式辐射损耗来滤除不需要的偏振光。但此方法存在两个主要的限制：器件尺寸大（毫米量级）和工作带宽较窄（ $< 200 \text{ nm}$ ）<sup>[124, 125]</sup>。香港城市大学通过设计如图 6（a）所示的长周期光栅，将基模耦合成高阶辐射模式，实现了一种带宽为  $270 \text{ nm}$ 、消光比为  $20 \text{ dB}$  的 TE 起偏器，以及带宽为  $90 \text{ nm}$ 、消光比为  $20 \text{ dB}$  的 TM 起偏器<sup>[126]</sup>。另一类器件是基于混合等离激元波导光栅结构的起偏器，这类器件可以实现超过  $100 \text{ nm}$  的工作带宽和更为紧凑的尺寸，如图 6（b）和（c）所示长度分别为  $23 \mu\text{m}$ <sup>[127]</sup>和  $9 \mu\text{m}$ <sup>[128]</sup>的 TM 和 TE 起偏器。然而，由于金属欧姆损耗的限制，这类起偏器的插入损耗通常较高（ $1\sim 3 \text{ dB}$ ）。图 6（d）所示的空气槽辅助波导结构采用导模截止的概念<sup>[129]</sup>，为实现高效 TM 起偏器提供了另一种可能。这种起偏器可以实现约  $110 \text{ nm}$  的工作带宽，其消光比大于  $20 \text{ dB}$ ，插入损耗低于  $0.5 \text{ dB}$ 。此外，SWG 结构的光栅间距小于工作波长，从而避免了衍射效应，使其能够像均匀介质材料一样工作。这为开发新型超宽带波导起偏器提供了可能。图 6（e）为兰州大学实现的一种基于 SWG 的 TM 起偏器<sup>[130]</sup>。器件的长度约为  $55 \mu\text{m}$ ，在  $1526\sim 1565 \text{ nm}$  的波长范围内具有  $20 \text{ dB}$  的消光比和低于  $0.6 \text{ dB}$  的插入损耗。上述起偏器都具有良好的消光比和损耗性能，但其工作带宽有限（ $< 300 \text{ nm}$ ），这在一定程度上限制了它们在大容量多频段光通信系统中的应用。天津大学基于有效介质理论设计了一种如图 6（f）所示的宽带 TM 起偏器<sup>[131]</sup>。该起偏器由 SWG 超材料结构组成，实现了较宽带的工作范围（ $1.26\sim 1.675 \mu\text{m}$ ），SWG 的设计有效避免了辐射模式在二氧化硅和衬底界面处的反射，从而显著提高了器件的消光比（ $> 29.4 \text{ dB}$ ）。基于相变材料的可调起偏器也受到了广泛关注。江南大学提出一种 TE 起偏器<sup>[132]</sup>，其由在 LNOI 波导传播



方向对称沉积的光学相变材料构成。该起偏器的工作状态可通过控制相变材料的相态来实现。这一设计不仅丰富了起偏器的调控手段，而且为未来光通信和光电子集成系统提供了更多的可能性。表 6 给出了 LNOI 平台上起偏器的性能概述。

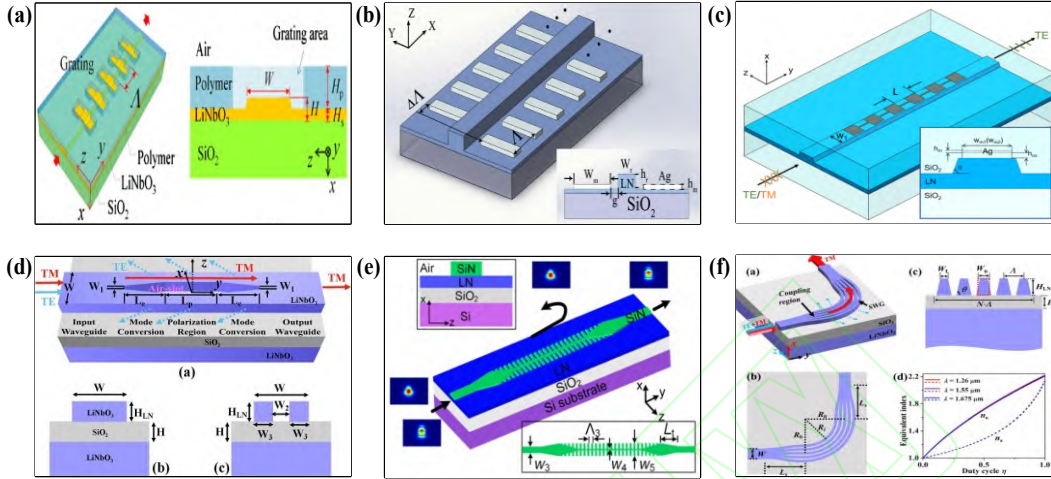


图6 薄膜铌酸锂起偏器。(a)长周期光栅结构TM起偏器<sup>[126]</sup>；(b)混合等离子激元结构TM起偏器<sup>[127]</sup>；(c)混合等离子激元结构TE起偏器<sup>[128]</sup>；(d)空气槽辅助波导结构TM起偏器<sup>[129]</sup>；(e)亚波长光栅结构TM起偏器<sup>[130]</sup>；(f)基于亚波长光栅超材料结构TM起偏器<sup>[131]</sup>

Fig. 6 Thin-film lithium niobate polarizers. (a) TM-pass polarizer based on long-period grating structure<sup>[126]</sup>; (b) TM-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating structure<sup>[127]</sup>; (c) TE-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating structure<sup>[128]</sup>; (d) TM-pass polarizer based on air-slot assisted waveguide structure<sup>[129]</sup>; (e) TM-pass polarizer based on SWG structure<sup>[130]</sup>; (f) TM-pass polarizer based on SWG metamaterial structure<sup>[131]</sup>

表6 薄膜铌酸锂平台上的起偏器

Table 6. Polarizers in thin film lithium niobate platform

Ref.	Function	Extinction Ratio (dB)	Insertion Loss (dB)	Bandwidth (nm)	Length ( $\mu\text{m}$ )
126	Exp.	>20.0	<2.0	270 (TE) 90 (TM)	300
127	Sim.	>20.0	<2.5	140 (TM)	23
128	Sim.	>15.0	<3.4	300 (TE)	9
129	Sim.	>20.0	<0.5	110 (TM)	13
130	Exp.	>20.0	<0.6	40(TM)	55
131	Sim.	>29.4	<1.1	415 (TM)	75
132	Sim.	>25.0	<0.5	200 (TE)	7.5

### 3.3.2 偏振分束器

偏振分束器能有效分离或组合两种正交模式，是偏振管理的核心组件。在相干光通信、偏振复用以及量子信息处理系统中，偏振分束器都有着广泛的应用。通常，具有超高模式双折射系数的波导更易于实现高性能偏振分束器，但 LNOI 单模波导的模式双折射系数相对较

低。对于薄膜厚度为 500 nm 的 LNOI，其模式双折射系数仅为 0.2，这使得在 LNOI 平台上实现偏振分束器具有挑战。目前，仅有少数结构被提出并证实能在 LNOI 平台上实现偏振分束，包括 MZI、受激拉曼绝热通道、超材料、混合等离子激元波导以及定向耦合器等。如图 7 (a) 和 (b) 所示，利用 MZI 和受激拉曼绝热通道结构被认为是在 LNOI 平台上实现宽带 ( $> 100$  nm) 和高消光比 ( $> 20$  dB) 偏振分束器的有效方案<sup>[133, 134]</sup>。然而，这些器件的尺寸相对较大(数千平方微米)。相比之下，混合等离子激元波导成为减小器件尺寸的一种有效方式。图 7 (c) 所示为一种基于混合等离子激元波导的偏振分束器<sup>[135]</sup>。通过将混合等离子激元波导与非对称定向耦合结构结合，使得器件长度缩短至 47  $\mu\text{m}$ 。由于等离子体具有偏振依赖性，该器件成为 X 切 LNOI 平台上 C 波段和 L 波段最短的偏振分束器。此外，各向异性超材料也被用于调控波导色散和双折射特性，一种基于此原理的偏振消光比大于 20 dB、带宽大于 85 nm 的偏振分束器已被提出<sup>[136]</sup>，如图 7 (d) 所示。然而，这种偏振分束器的结构较为复杂，需要借助高精度的制备技术。

定向耦合器结构是实现偏振分束器的一种相对简单的方案<sup>[137]</sup>，非对称定向耦合器<sup>[138]</sup>和三波导耦合器<sup>[139]</sup>均在理论上被证明能实现 LNOI 上的紧凑型高性能偏振分束器。然而，由于干涉效应对波长的敏感性，定向耦合器的工作带宽通常仅在数十纳米范围内。图 7 (e) 为兰州大学提出的一种基于光子晶体辅助 MMI 的偏振分束器<sup>[140]</sup>。二维光子晶体被刻蚀在 MMI 的末端，通过其偏振选择特性实现两种偏振光的高效分离。该器件的优势在于 MMI 的长度无需是两种偏振自成像长度的整数倍，这为器件设计提供了更大的灵活性。此外，该器件的性能可以针对两种偏振进行独立优化，进一步提升了其性能和应用潜力。同年，浙江大学提出如图 7 (f) 所示的热光 MZI 偏振分束器<sup>[141]</sup>，实现了对不同偏振态光信号的灵活操控。该器件每个 MZI 臂中沿 LN 晶体的 Y 方向和 Z 方向都被分别设置了移相器，通过热光效应实现对光信号相位的精确控制。对于两种偏振，该设计可进一步实现任意分束比以及酉矩阵传输的任意组合。这项研究首次对 LNOI 波导和 MZI 中各向异性的相移关系进行了系统和深入的理论实验研究。表 7 给出了 LNOI 平台上偏振分束器的性能概述。

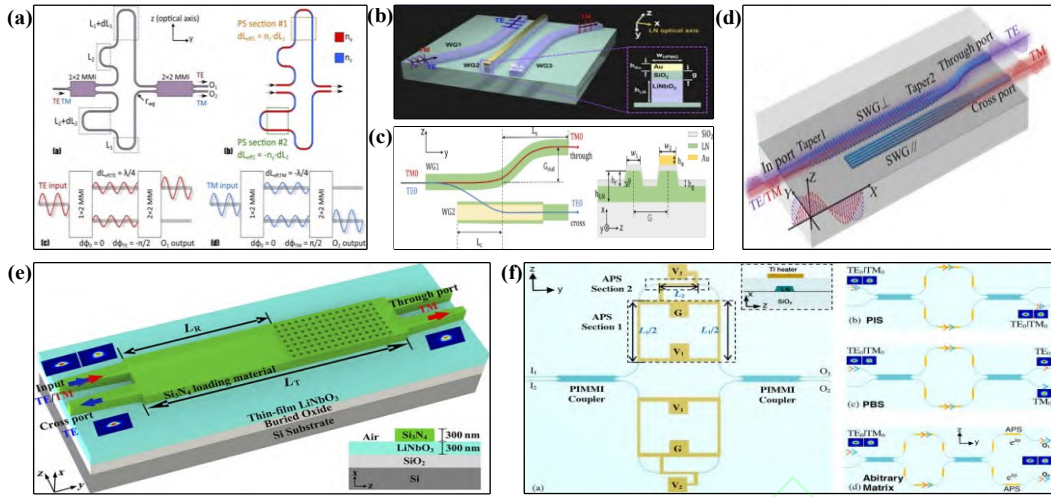


图7 薄膜铌酸锂偏振分束器。(a) 马赫-曾德尔干涉仪结构<sup>[133]</sup>；(b) 受激拉曼绝热通道结构<sup>[134]</sup>；(c) 混合等离子激元结构<sup>[135]</sup>；(d) 各向异性超材料结构<sup>[136]</sup>；(e) 光子晶体辅助多模干涉耦合器结构<sup>[140]</sup>；(f) 热光马赫-曾德尔干涉仪结构<sup>[141]</sup>

Fig. 7 Thin-film lithium niobate polarization beam splitters. (a) MZI structure<sup>[133]</sup>; (b) stimulated Raman adiabatic passage structure<sup>[134]</sup>; (c) hybrid plasmonic structure<sup>[135]</sup>; (d) hetero-anisotropic metamaterial structure<sup>[136]</sup>; (e) photonic-crystal-assisted MMI structure<sup>[140]</sup>; (f) thermo-optic MZI structure<sup>[141]</sup>

表7 薄膜铌酸锂平台上的偏振分束器

Table 7. Polarization beam splitters in thin film lithium niobate platform

Ref.	Function	Extinction Ratio	Insertion Loss (dB)	Bandwidth (nm)	Length ( $\mu\text{m}$ )
133	Sim.	47.7 (TE) 48.0 (TM)	0.6 (TE) 0.9 (TM)	> 200 (ER > 17.8 dB, TE) > 200 (ER > 22.8 dB, TM)	~430
134	Sim.	~21.0 (TE) ~45.0 (TM)	< 1.0 (TE&TM)	150 (ER > 20 dB, TE) 250 (ER > 40 dB, TM)	> 6000
135	Sim.	40.9 (TE) 26.1 (TM)	< 0.3 (TE&TM)	> 200 (ER > 10 dB, TE) > 200 (ER > 20 dB, TM)	47
136	Sim.	~24.0 (TE) ~25.0 (TM) > 35.0	0.3 (TE) 1.0 (TM)	185 (ER > 20 dB, TE) 85 (ER > 20 dB, TM)	160
137	Sim.	(TE&TM)	—	65 (ER > 10 dB, TE&TM)	~85
138	Sim.	26.7 (TE) 21.3 (TM)	<0.05 (TE&TM)	140 (ER > 10 dB, TE&TM)	16
139	Sim.	—	—	100 (ER > 29.4 dB & IL < 0.066 dB, TE)	31
140	Sim. Exp.	25.3 (TE) 23.4 (TM) 25.1 (TE) 25.3 (TM)	0.9 (TE) 1.1 (TM) 2.2 (TE) 2.6 (TM)	40 (ER > 22.5 dB & IL < 1.86 dB, TE) 40 (ER > 19.5 dB & IL < 1.34 dB, TM) 40 (ER > 15 dB & IL < 3.86 dB)	157.4
141	Exp.	—	—	35 (ER > 21 dB & IL < 1.1 dB, TE) 35 (ER > 21 dB & IL < 1.8 dB, TM)	1450

### 3.3.3 偏振旋转器

偏振旋转器是偏振管理中的核心元件，用于实现光的不同偏振态之间的转换。在 LNOI 平台上实现偏振旋转器的关键在于利用横向不对称结构的波导实现光轴旋转。目前主要的实现方法包括利用如图 8 (a) 所示的不对称倾斜波导结构<sup>[142]</sup>和如图 8 (b) 所示的不对称混合等离激元波导结构<sup>[143]</sup>。前者通过在 LN 波导的一侧沉积氮化硅材料引入不对称波导结构，使两个正交模式相对于光轴旋转，从而实现偏振旋转功能<sup>[142]</sup>。后者利用不对称混合等离激元波导内的混合模式之间的干涉效应，在仅 13.7  $\mu\text{m}$  的器件长度内实现偏振消光比为 59.58 dB 的偏振旋转<sup>[143]</sup>。然而，混合等离激元波导使得器件存在较大的损耗 ( $\sim 1.4$  dB)。图 8 (c) 为天津大学利用材料和波导双折射的相互作用产生模式杂化现象，从而实现的一种偏振旋转器<sup>[144]</sup>。该器件通过在锥形波导的一侧引入半无限介电覆盖层来实现横向不对称结构。器件偏振转换效率可以通过选择合适的覆盖层材料或调整其厚度进行优化。仿真结果表明，器件有望通过 100  $\mu\text{m}$  的锥长实现 95% 的模式转换效率。光学相变材料的不同晶态具有不同的光学性质，且晶态可以通过施加外部热、电或光场进行转换。因此，通过在 LNOI 波导上加载相变材料可以调控光的偏振态。图 8 (d) 为江南大学提出的一种基于低损耗光学相变材料三硒化锑( $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ )的可调谐偏振旋转器<sup>[145]</sup>。这种结构在 17.7  $\mu\text{m}$  的器件长度内实现了 TE-TM (TM-TE) 的偏振旋转，转换效率和插入损耗分别为 99.6% (99.2%) 和 0.38 dB (0.4 dB)。表 8 给出了 LNOI 平台上偏振旋转器的性能概述。

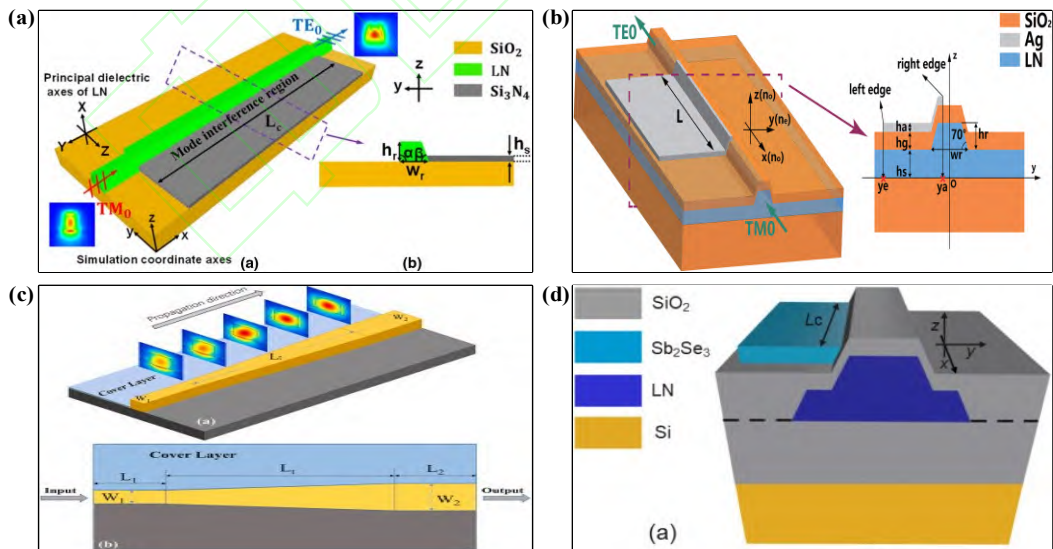


图8 薄膜铌酸锂偏振旋转器。(a) 不对称倾斜波导结构<sup>[142]</sup>；(b) 不对称混合等离激元波导结构<sup>[143]</sup>；(c) 不对称锥形波导结构<sup>[144]</sup>；(d) 不对称相变材料加载结构<sup>[145]</sup>

Fig. 8 Thin-film lithium niobate polarization rotators.(a) Asymmetric inclined waveguide structure<sup>[142]</sup>; (b) asymmetric hybrid plasmonic waveguide structure<sup>[143]</sup>; (c) asymmetric tapered waveguide structure<sup>[144]</sup>; (d) asymmetric optical phase change material structure<sup>[145]</sup>

表8 薄膜铌酸锂平台上的偏振旋转器

Table 8. Polarization rotators in thin film lithium niobate platform

Ref.	Function	Mode conversion type	PER (dB)	PCE (%)	Insertion Loss (dB)	Length ( $\mu\text{m}$ )
142	Sim.	TE $\rightarrow$ TM	38.57	99.99	0.20	15.8
		TM $\rightarrow$ TE	68.95	~100.00	0.22	
143	Sim.	TM $\rightarrow$ TE	59.58	—	1.44	13.7
144	Sim.	TM $\rightarrow$ TE	19.96	99.00	—	150.0
145	Sim.	TE $\rightarrow$ TM	—	99.60	0.38	17.7
		TM $\rightarrow$ TE	—	99.20	0.40	

### 3.3.4 偏振旋转分束器

偏振旋转分束器是将入射光根据偏振状态进行分离，并对其中一路输入光进行  $90^\circ$  偏振旋转的光学器件，能同时执行偏振旋转和偏振分束两种功能。在光通信系统中，偏振旋转分束器可以实现偏振复用，从而提高系统通信容量。目前基于 LNOI 的偏振旋转分束器主要是通过绝热模式演化过程将输入的  $\text{TM}_0$  模式转换为  $\text{TE}_1$  模式，随后  $\text{TE}_1$  模式通过非对称定向耦合结构转换为  $\text{TE}_0$  模式，实现高性能的偏振旋转和分束功能。研究者们采用了不同的设计和优化方法提高偏振旋转分束器的性能，包括增加工作带宽、降低插入损耗、提高偏振消光比等。图 9 (a) 为香港城市大学提出的一种基于两阶段绝热模式演化过程的偏振旋转分束器<sup>[146]</sup>，在  $130 \text{ nm}$  的工作带宽内测得了小于  $-8 \text{ dB}$  的偏振串扰。这种器件对工作波长不敏感且易于制备，但过长的器件长度不利于芯片的紧凑集成。图 9 (b) 为兰州大学基于氮化硅异质集成平台实现的一种基于非对称定向耦合的偏振旋转分束器<sup>[54]</sup>。在  $40 \text{ nm}$  的波长范围内，器件插入损耗小于  $1.49 \text{ dB}$ ，串扰低于  $-13.03 \text{ dB}$ 。中山大学提出一种由绝热锥、非对称定向耦合器和 MMI 组成的高性能偏振旋转分束器<sup>[147]</sup>，如图 9 (c) 所示。器件工作在 O 波段，在  $80 \text{ nm}$  的带宽范围内消光比大于  $20 \text{ dB}$ ，插入损耗小于  $0.65 \text{ dB}$ 。基于此，该研究组进一步实现了包括任意偏振产生（偏振消光比高达  $41.9 \text{ dB}$ ）、快速偏振测量、偏振扰动（扰动率达  $65 \text{ Mrad} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和自动偏振控制功能的 LN 器件<sup>[148]</sup>。同年，华南师范大学提出一种基于绝热模式演化的偏振旋转分束器，如图 9 (d) 所示。实验表明，在  $110 \text{ nm}$  波长范围内，器件插入损耗小于  $0.5 \text{ dB}$ ，消光比大于  $15 \text{ dB}$ <sup>[149]</sup>。在上述工作中，模式演化通常需要较长的锥形波导（从几百微米到一毫米以上）来实现高效模式转换，不利于器件集成。为此，浙江光

纤传感研究中心提出一种如图 9 (e) 所示的基于多锥度级联结构的偏振旋转分束器以增强模式转换。该器件尺寸仅 271  $\mu\text{m}$ ，工作带宽覆盖 C 波段和 L 波段的 160 nm 带宽，插入损耗小于 2 dB，消光比大于 11 dB，展示了器件在宽波长范围内的优异性能<sup>[150]</sup>。同年，华中科技大学提出一种全绝热偏振旋转分束器，如图 9 (f) 所示。该器件具有较大的工艺容差，且能够保证光信号偏振态的平稳演化，避免了因模式突变引起的损耗。实验表明，器件在 40 nm 的波长范围内实现了大于 20 dB 的偏振消光比及小于 1.5 dB 的插入损耗<sup>[151]</sup>。

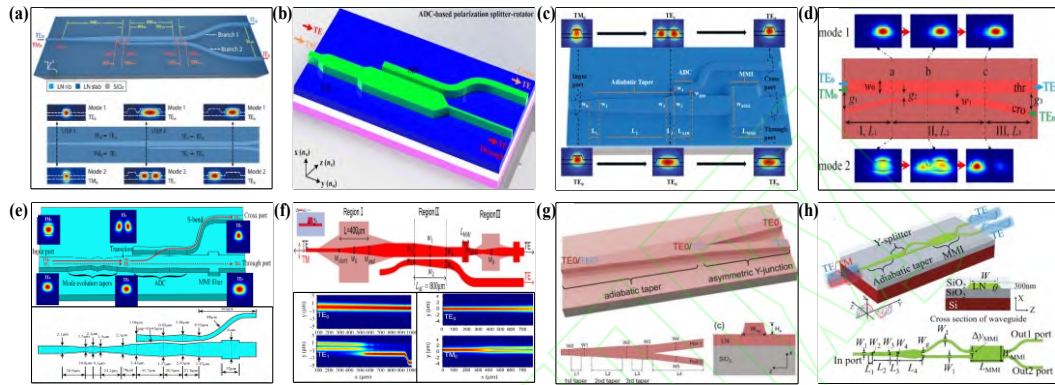


图9 薄膜铌酸锂偏振旋转分束器。(a) 两阶段绝热模式演化结构<sup>[146]</sup>；(b) 非对称定向耦合器结构<sup>[54]</sup>；(c) 绝热锥、非对称定向耦合器和多模干涉耦合器组合结构<sup>[147]</sup>；(d) 绝热模式演化结构<sup>[149]</sup>；(e) 多锥级联结构<sup>[150]</sup>；(f) 全绝热结构<sup>[151]</sup>；(g) 非对称Y型分支结构<sup>[152]</sup>；(h) 绝热锥、Y分支和多模干涉耦合器组合结构<sup>[153]</sup>

Fig. 9 Thin-film lithium niobate polarization rotator-splitters. (a) two-stage adiabatic mode evolution structure<sup>[146]</sup>; (b) asymmetric directional coupler structure<sup>[54]</sup>; (c) combined structure consisting of an adiabatic taper, an asymmetric directional coupler, and a MMI mode splitter<sup>[147]</sup>; (d) adiabatic mode evolution structure<sup>[149]</sup>; (e) multi-taper structure<sup>[150]</sup>; (f) fully adiabatic structure<sup>[151]</sup>; (g) asymmetric Y-branch structure<sup>[152]</sup>; (h) combined structure consisting of an adiabatic taper, a Y-branch, and a MMI mode splitter<sup>[153]</sup>

虽然已经得到了良好的器件性能及紧凑的结构，基于模式演化结合非对称定向耦合结构的偏振旋转分束器由于耦合结构需要精确的相位匹配条件，工作带宽和制造容差仍然有限。为了解决这一问题，华中科技大学提出一种如图 9 (g) 所示的偏振旋转分束器，其中模式转换部分基于非对称 Y 分支结构，这意味着器件波长依赖性较弱，对制造误差不敏感。该器件长度为 440  $\mu\text{m}$ ，在 60 nm 的带宽范围内测得的插入损耗小于 1 dB，偏振消光比大于 19.6 dB<sup>[152]</sup>。随后，东南大学提出一种由绝热锥、Y 分支和 MMI 组成的大带宽偏振旋转分束器，如图 9 (h) 所示。这项工作首次提出并验证了基于 LN 条形波导的偏振旋转分束器。实验结果表明，器件在 47 nm 波长范围内的插入损耗小于 1.5 dB，偏振消光比大于 10 dB。其较大的特征尺寸（500 nm）降低了器件制备难度<sup>[153]</sup>。表 9 给出了 LNOI 平台上偏振旋转分束器的性能概述。

表 9 薄膜铌酸锂平台上的偏振旋转分束器

Table 9. Polarization rotating beam splitters in thin film lithium niobate platform

Ref.	Function	Extinction Ratio (dB)	Insertion Loss (dB)	Bandwidth (nm)	Length ( $\mu\text{m}$ )
54	Exp.	> 17.8 (TE) > 10.6 (TM)	< 0.9 (TE) < 1.5 (TM)	40	620
146	Exp.	> 8.0	< 2.0	130	> 7000
147	Exp.	20.0	<0.7	>80	431
148	Exp.	>19.6	<1.0	>60	440
149	Exp.	>15.0	<0.5	>165	1240
150	Exp.	> 22.0 (TE) > 11.0 (TM)	< 1.0 (TE) < 2.0 (TM)	160	405
151	Exp.	> 20.0	< 1.5	> 40	> 1200
152	Exp.	> 26.6 (TE) > 19.6 (TM)	< 1.0	60	440
153	Exp.	> 20.0 (TE) > 10.0 (TM)	< 1.3 (TE) < 1.5 (TM)	> 126 (TE) > 47 (TM)	679

## 4 薄膜铌酸锂多维复用调制一体光子集成回路

在信息化社会的快速发展中，大数据、云计算和物联网技术的革新对光通信基础设施提出了更高要求。LNOI 电光调制器目前已实现了超过 100 GHz 的 3 dB 带宽<sup>[154,155]</sup>，其凭借大调制带宽、高线性度、低传输损耗等优点吸引了越来越多的关注。而采用多维复用技术（波分复用、模分复用、偏振复用等）构建多维复用调制一体光子集成回路可进一步显著提升系统容量。因此，在 LNOI 上将高速调制器与高性能复用器件进行单片集成进而实现大容量光芯片极具吸引力。

### 4.1 电光调制器

光调制器在数字通信中扮演着至关重要的角色，包括电光、声光、磁光等多种类型。在这些调制器中，LN 材料凭借其优异的电光特性成为制造高性能电光调制器的首选材料。与依赖非线性调制方法的硅基调制器和磷化铟调制器不同，LN 调制器的工作机制不涉及载流子的移动。它利用线性电光效应，将电调制信号有效地加载到光载波上。这种调制方式的优势在于，其调制速率主要取决于微波电极的性能，从而能够实现更高的调制速度、更高的线性度以及更低的功耗。近年来，LNOI 电光调制器的研究取得了显著进展<sup>[154-162]</sup>。2018 年，哈佛大学基于经典的 MZI 结构，实现了 200 GHz 的调制速度<sup>[163]</sup>。2019 年，中山大学基于

硅和 LN 混合集成平台，实现了 3 dB 调制带宽大于 70 GHz、插入损耗为 2.5 dB、调制效率为 2.2 V·cm 的电光调制器，并进一步演示了 112 Gbps 超高数据调制速率以及 170 fJ/bit 的低功耗<sup>[156]</sup>。随后，该研究组实现了一种基于 LNOI 的双偏振同向-正交（Dual-polarization in-phase quadrature, DP-IQ）调制器，该调制器由两个并联的马赫-曾德尔调制器组成的双 IQ 调制器构成。该器件不仅具有 1 V 的低驱动电压，还展示了高达 110 GHz 的电光带宽，以及通过 400 QAM（Quadrature Amplitude Modulation）实现的 1.96 Tb/s 信号传输速率<sup>[154]</sup>。这些卓越性能使得该调制器成为下一代电光接口的理想选择，尤其是在追求超高速和低功率运行的应用场景中。

目前，所报道的 LNOI 电光调制器已展现出优异传输速度，但仍可通过缩减 MZI 臂长或使用更先进的调制方案来进一步提升其性能。此外，调制器的性能评估涉及多项指标，要同时实现所有指标的最优化极具挑战。值得一提的是，LN 的强电光效应不仅可用于实现高性能调制器，其在其他电光调制显示出优势的领域，如电光频率梳，同样展现出巨大的应用潜力<sup>[164]</sup>。

#### 4.2 多维复用调制一体光子集成回路

近年来，基于不同平台的集成光子技术取得了显著进展，特别是在提高数据传输速率和容量方面。香港中文大学在 2020 年基于聚合物加载的 LNOI 平台，将电光调制器与基于 BIC 的 4 通道 TM 模式复用器结合在同一芯片上，实现了片上单通道 100 Mbps、4 通道总计 400 Mbps 的信号传输<sup>[112]</sup>。2022 年，兰州大学在氮化硅负载的 LNOI 平台上进一步推进了这项技术，开发了一种包含 4 通道模式复用器和微环调制器的集成片上数据通信回路。这种结构的单通道数据调制速率达 70 Gbps，总数据吞吐量达到 280 Gbps<sup>[55]</sup>。这表明通过优化材料和结构设计，集成光子技术的性能可以得到极大提升。同年，浙江大学联合华南师范大学和中山大学，在 LNOI 平台上实现了另一项重要突破。他们集成了基于倾斜 MMI 的 4 通道粗波分复用器和 4 路 MZI 调制器，在 O 波段实现了 4 通道总速率 256 Gb/s（4×64 Gb/s）OOK 信号传输和 400 Gb/s（4×100 Gb/s）PAM-4 信号传输<sup>[86]</sup>。这项工作不仅展示了 LNOI 平台在高速光互连方面的巨大潜力，而且为未来 400 G、800 G 甚至 1.6 T 光模块的应用提供了可行的解决方案。2023 年，浙江大学采用新型 2×2 F-P 腔电光调制器阵列与 4 通道多模波导光栅波分复用器，实现了单片集成的薄膜铌酸锂光发射芯片。其功能区尺寸 0.3mm×2.8 mm，各通道具有出色的均匀性（额外损耗 0.8 dB、消光比 >20 dB），演示了 320 Gbps（4×80



Gbps) OOK 信号和 400 Gbps ( $4 \times 100$  Gbps) PAM4 信号的大容量传输<sup>[53]</sup>。该系统具有结构紧凑、设计简便、拓展灵活等突出优势, 不仅展示了铌酸锂材料在光子集成领域的广阔应用前景, 而且在波分复用光互连及光计算等领域具有重要潜力。

综上所述, 随着材料科学的进步和集成技术的不断发展, LNOI 集成光子技术正日益成为实现高速、大容量数据传输的关键技术。未来, 通过结合多种复用技术, 以及进一步优化芯片设计和制造工艺, LNOI 集成光子技术的性能还将得到进一步提升, 为构建更加高效、灵活的光通信网络奠定坚实基础。

## 5 结论与展望

在光电子学的快速发展中, LN 材料因其独特的电光、声光和非线性光学特性, 成为了实现高性能集成光电子芯片的理想材料平台。过去十年, 随着 LNOI 微纳加工技术的不断进步和商业化, 我们见证了 LN 在光子学和工业界的革命性进展。目前, LNOI 片上光子器件的性能已接近体 LN 光学器件, 这些进展极大地改变了现代光子学的格局。在传统光通信系统中, 通过单一波长通道进行数据传输的能力有限。为了提高数据传输速率和容量, 多维复用技术成为了关键。基于 LNOI 平台, 多个复用维度的集成光子器件得以开发, 旨在实现高速大容量光电子通信器件的单片集成。这不仅提高了数据传输的效率和容量, 还为下一代光通信系统的发展奠定了基础。

本文深入探讨了目前报道的 LNOI 波导以及多维复用 LNOI 集成光子器件。这些器件利用波长、模式和偏振等多维度的复用实现高速大容量光信号传输。首先, 波分复用利用不同波长的光信号在同一通信链路上进行传输, 实现更高的数据速率和更大的容量。在 LNOI 平台上, 多通道 CWDM 发射器芯片和接收器芯片已经被报道, 它们能够在宽波长范围内实现低插入损耗、高旁瓣抑制比和良好的波长稳定性。其次, 模式复用利用光的多种模式在同一波长下进行传输, 进一步提高了数据传输的容量。基于 LNOI 平台的多模调控器件, 如模式复用器、多模波导交叉和弯曲等, 已经取得了重要的研究进展。最后, 偏振复用利用光的偏振态进行多路数据传输。在 LNOI 平台上, 起偏器、偏振旋转器、偏振分束器和偏振旋转分束器等器件已经实现了高性能的偏振态管理, 为 PDM 技术的实现提供了有效的解决方案。多维复用 LNOI 集成光子器件在性能指标方面表现优异。首先, 这些器件具有高速的数据传输和处理能力, 能够实现高带宽、低延迟的数据传输。其次, 由于采用了集成化的设计, 这些器件具有紧凑的尺寸和低功耗的优点。此外, 通过采用先进的微纳加工技术, 这些器件还

具有高可靠性和长期稳定性的优点。

尽管基于 LNOI 平台的多维复用光子器件已经取得了显著的进展，但仍面临一些挑战：

1) 性能优化：进一步优化器件性能，如降低插入损耗、提高偏振消光比和增加工作带宽等，是未来的重要研究方向。此外，提高器件的制造工艺和降低成本也是实现商业化应用的关键；  
2) 新功能探索：探索基于 LNOI 平台的新功能器件，如可重构光分插复用器、光开关和光逻辑门等，将为光通信系统的灵活性和可扩展性提供新的解决方案；  
3) 集成化与系统应用：将多维复用光子器件与光源、探测器和其他光子器件进行高度集成，形成完整的光子集成电路或系统，将为实现高速、大容量和低能耗的光通信提供有力支持；  
4) 新材料与新工艺探索：随着新材料和新工艺的不断涌现，如二维材料、超构材料和微纳加工技术等，它们与 LNOI 平台的结合将为多维复用光子器件的设计和实现提供更多的可能性和创新空间。

综上所述，基于薄膜 LN 平台的多维复用光子器件在近年来取得了显著的进展，目前仍面临许多机遇和挑战。通过持续的研究和技术创新，我们有信心在未来实现更高性能、更多功能和更高集成度的光子器件，为推动光通信和集成光子学领域的发展做出重要贡献。

## 参考文献

- [1] Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2004, 201(2): 253-283.
- [2] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [3] Lim A E-J, Song J, Fang Q, *et al.* Review of silicon photonics foundry efforts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 20(4): 405-416.
- [4] Levy J S, Gondarenko A, Foster M A, *et al.* CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 37-40.
- [5] Okawachi Y, Saha K, Levy J S, *et al.* Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3398-3400.
- [6] Ogiso Y, Ozaki J, Ueda Y, *et al.* Over 67 GHz bandwidth and 1.5 V  $V_{\pi}$  InP-based optical IQ modulator with n-i-p-n heterostructure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(8): 1450-1455.
- [7] Nikogosyan D N. *Nonlinear optical crystals: a complete survey*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [8] Weis R S, Gaylord T K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure[J]. *Applied Physics A*, 1985, 37(4): 191-203.
- [9] Wooten E L, Kissa K M, Yi-Yan A, *et al.* A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1): 69-82.

- [10] Janner D, Tulli D, García-Granda M, *et al.* Micro-structured integrated electro-optic LiNbO<sub>3</sub> modulators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(3): 301-313.
- [11] Poberaj G, Hu H, Sohler W, *et al.* Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-phonic devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(4): 488-503.
- [12] Boes A, Corcoran B, Chang L, *et al.* Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700256.
- [13] Honardoost A, Abdelsalam K, Fathpour S. Rejuvenating a versatile photonic material: thin-film lithium niobate[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(9): 2000088.
- [14] Jia Y, Wang L, Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: recent advances and perspectives[J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(1): 011307.
- [15] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, *et al.* Silicon optical modulators[J]. *Nature photonics*, 2010, 4(8): 518-526.
- [16] Smit M, Leijtens X, Ambrosius H, *et al.* An introduction to InP-based generic integration technology[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29(8): 083001.
- [17] Schmidt R V, Kaminow I P. Metal-diffused optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25(8): 458-460.
- [18] Neyer A, Sohler W. High-speed cutoff modulator using a Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> channel waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 35(3): 256-258.
- [19] Fukuma M, Noda J. Optical properties of titanium-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(4): 591-597.
- [20] Jackel J L, Rice C E, Veselka J J. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(7): 607-608.
- [21] Wong K K, De La Rue R M, Wright S. Electro-optic-waveguide frequency translator in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by proton exchange[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(11): 546-548.
- [22] Suchoski P G, Findakly T K, Leonberger F J. Stable low-loss proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguide devices with no electro-optic degradation[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(11): 1050-1052.
- [23] Vohra S T, Mickelson A R, Asher S E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton-exchanged and annealed LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(11): 5161-5174.
- [24] Stepanenko O, Quillier E, Tronche H, *et al.* Highly confining proton exchanged waveguides on Z-cut LiNbO<sub>3</sub> with preserved nonlinear coefficient[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(15): 1557-1560.
- [25] Yi-Yan A. Index instabilities in proton-exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 42(8): 633-635.
- [26] Korkishko Y N, Fedorov V A, De Micheli M P, *et al.* Relationships between structural and optical properties of proton-exchanged waveguides on Z-cut lithium niobate[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(36): 7056-7060.
- [27] Cai L, Kang Y, Hu H. Electric-optical property of the proton exchanged phase modulator in single-crystal lithium niobate thin film[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4640-4647.
- [28] Levy M, Osgood Jr R M, Liu R, *et al.* Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(16): 2293-2295.
- [29] Poberaj G, Koechlin M, Sulser F, *et al.* Ion-sliced lithium niobate thin films for active photonic devices[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(7): 1054-1058.

- [30] Rabiei P, Gunter P. Optical and electro-optical properties of submicrometer lithium niobate slab waveguides prepared by crystal ion slicing and wafer bonding[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(20): 4603-4605.
- [31] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, *et al.* Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(7): 407-410.
- [32] Chen L, Reano R M. Compact electric field sensors based on indirect bonding of lithium niobate to silicon microrings[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4032-4038.
- [33] Rabiei P, Ma J, Khan S, *et al.* Heterogeneous lithium niobate photonics on silicon substrates [J]. *Optics express*, 2013, 21(21): 25573-25581.
- [34] Chen L, Wood M G, Reano R M. 12.5 pm/V hybrid silicon and lithium niobate optical microring resonator with integrated electrodes[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27003-27010.
- [35] Cao L, Aboketaf A, Wang Z, *et al.* Hybrid amorphous silicon (a-Si: H)-LiNbO<sub>3</sub> electro-optic modulator[J]. *Optics Communications*, 2014, 330(1): 40-44.
- [36] Cai L, Kong R, Wang Y, *et al.* Channel waveguides and y-junctions in x-cut single-crystal lithium niobate thin film[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29211-29221.
- [37] Cai L, Wang Y, Hu H. Low-loss waveguides in a single-crystal lithium niobate thin film[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3013-3016.
- [38] Chen L, Chen J, Nagy J, *et al.* Highly linear ring modulator from hybrid silicon and lithium niobate[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13255-13264.
- [39] Rao A, Patil A, Chiles J, *et al.* Heterogeneous microring and Mach-Zehnder modulators based on lithium niobate and chalcogenide glasses on silicon[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22746-22752.
- [40] Bo F, Wang J, Cui J, *et al.* Lithium-niobate-silica hybrid whispering-gallery-mode resonators[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(48): 8075-8081.
- [41] Jin S, Xu L, Zhang H, *et al.* LiNbO<sub>3</sub> thin-film modulators using silicon nitride surface ridge waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(7): 736-739.
- [42] Chang L, Pfeiffer M H P, Volet N, *et al.* Heterogeneous integration of lithium niobate and silicon nitride waveguides for wafer-scale photonic integrated circuits on silicon[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 803-806.
- [43] Witmer J D, Valery J A, Arrangoiz-Arriola P, *et al.* High-Q photonic resonators and electro-optic coupling using silicon-on-lithium-niobate[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 46313.
- [44] Bazzan M, Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4):040603.
- [45] Han X, Yuan M, Xiao H, *et al.* Integrated photonics on the dielectrically loaded lithium niobate on insulator platform[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(5): D26-D37.
- [46] Hiraki T, Aihara T, Nishi H, *et al.* Deuterated SiN/SiON waveguides on Si platform and their application to C-band WDM filters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 2500207.
- [47] Ji X, Barbosa F A S, Roberts S P, *et al.* Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 619-624.
- [48] Frigg A, Boes A, Ren G, *et al.* Low loss CMOS-compatible silicon nitride photonics utilizing reactive sputtered thin films[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37795-37805.
- [49] Zhu D, Shao L, Yu M, *et al.* Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(2): 242-352.

- [50] Chen G, Li N, Ng J D, *et al.* Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 034003.
- [51] Chen G, Gao Y, Lin H-L, *et al.* Compact and efficient thin-film lithium niobate modulators[J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(12): 2300229.
- [52] Vazimali M G, Fathpour S. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 034001.
- [53] Liu H, Pan B, Huang Y, *et al.* Ultra-compact lithium niobate photonic chip for high-capacity and energy-efficient wavelength-division-multiplexing transmitters[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(1): 13.
- [54] Han X, Jiang Y, Frigg A, *et al.* Mode and polarization-division multiplexing based on silicon nitride loaded lithium niobate on insulator platform[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(1): 2100529.
- [55] Jiang Y, Han X, Huang H, *et al.* Monolithic photonic integrated circuit based on silicon nitride and lithium niobate on insulator hybrid platform[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(10): 2200121.
- [56] Li S, Cai L, Wang Y, *et al.* Waveguides consisting of single-crystal lithium niobate thin film and oxidized titanium stripe[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24212-24219.
- [57] Cai L, Wang Y, Hu H. Efficient second harmonic generation in  $\chi^{(2)}$  profile reconfigured lithium niobate thin film[J]. *Optics Communications*, 2017, 387(15): 405-408.
- [58] Cai L, Han S L H, Hu H. Waveguides in single-crystal lithium niobate thin film by proton exchange[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1240-1248.
- [59] Kurimura S, Kato Y, Maruyama M, *et al.* Quasi-phase-matched adhered ridge waveguide in LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19):191123.
- [60] Volk M F, Sunstov S, Rüter C E, *et al.* Low loss ridge waveguides in lithium niobate thin films by optical grade diamond blade dicing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1386-1391.
- [61] Courjal N, Guichardaz B, Ulliac G, *et al.* High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(30): 305101.
- [62] Takigawa R, Higurashi E, Kawanishi T, *et al.* Lithium niobate ridged waveguides with smooth vertical sidewalls fabricated by an ultra-precision cutting method[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27733-27738.
- [63] Wu R, Wang M, Xu J, *et al.* Long low-loss-litium niobate on insulator waveguides with sub-nanometer surface roughness[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 910.
- [64] Wu R, Zhang J, Yao N, *et al.* Lithium niobate micro-disk resonators of quality factors above  $10^7$ [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4116-4119.
- [65] Wang M, Wu R, Lin J, *et al.* Chemo-mechanical polish lithography: A pathway to low loss large-scale photonic integration on lithium niobate on insulator[J]. *Quantum Engineering*, 2019, 1(1): e9.
- [66] Cai L, Zhang S, Hu H. A compact photonic crystal micro-cavity on a single-mode lithium niobate photonic wire[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035801.
- [67] 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.
- [68] 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.

- [69] Hu H, Ricken R, Sohler W. Lithium niobate photonic wires[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24261-24268.
- [70] Deng J, Si G, Danner A J. Dry etching of LiNbO<sub>3</sub> using inductively coupled plasma[C]//2010 Photonics Global Conference, December 14-16, 2010, Orchard, Singapore. New York: IEEE, 2011: 5706006.
- [71] Siew S Y, Saha S S, Tsang M, *et al.* Rib microring resonators in lithium niobate on insulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(5): 573-576.
- [72] Ulliac G, Calero V, Ndao A, *et al.* Argon plasma inductively coupled plasma reactive ion etching study for smooth sidewall thin film lithium niobate waveguide application[J]. *Optical Materials*, 2016, 53(1): 1-5.
- [73] Wang C, Xiong X, Andrade N, *et al.* Second harmonic generation in nano-structured thin-film lithium niobate waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6963-6973.
- [74] Nagata H, Mitsugi N, Shima K, *et al.* Growth of crystalline LiF on CF<sub>4</sub> plasma etched LiNbO<sub>3</sub> substrates[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 187(3-4): 573-576.
- [75] Shima K, Mitsugi N, Nagata H. Surface precipitates on single crystal LiNbO<sub>3</sub> after dry-etching by CHF<sub>3</sub> plasma[J]. *Journal of Materials Research*, 1998, 13(3): 527-529.
- [76] Hu H, Milenin A P, Wehrspohn R B, *et al.* Plasma etching of proton-exchanged lithium niobate[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2006, 24(4): 1012-1015.
- [77] Krasnokutskaya I, Tambasco J-L J, Li X, *et al.* Ultra-low loss photonic circuits in lithium niobate on insulator[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 897-904.
- [78] Sacher W D, Huang Y, Lo G-Q, *et al.* Multilayer silicon nitride-on-silicon integrated photonic platforms and devices[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(4): 901-910.
- [79] Wang C, Zhang M, Stern B, *et al.* Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1547-1555.
- [80] Zhang M, Wang C, Cheng R, *et al.* Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator[J]. *Optica*, 2017, 4(12): 1536-1537.
- [81] Rao A, Malinowski M, Honardoost A, *et al.* Second-harmonic generation in periodically-poled thin film lithium niobate wafer-bonded on silicon[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29941-29947.
- [82] Chang L, Li Y, Volet N, *et al.* Thin film wavelength converters for photonic integrated circuits[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 531-535.
- [83] Ahmed A N R, Shi S, Zablocki M, *et al.* Tunable hybrid silicon nitride and thin-film lithium niobate electro-optic microresonator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 618-621.
- [84] Hunsperger R G. *Integrated optics: theory and technology*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [85] Cantono M, Schmogrow R, Newland M, *et al.* Opportunities and challenges of C plus L transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(5): 1050-1060.
- [86] Chen K, Chen G, Ruan Z, *et al.* Four-channel CWDM transmitter chip based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43(11): 112301.
- [87] Zhou Z, Chen R, Li X, *et al.* Development trends in silicon photonics for data centers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 44(1): 13-23.
- [88] Prost M, Liu G, Yoo S J B. A compact thin-film lithium niobate platform with arrayed waveguide gratings and MMIs[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and

- Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, California, United States. New York: IEEE, 2018.
- [89] Li J, Yin R, Ji W, *et al.* AWG optical filter with tunable central wavelength and bandwidth based on LNOI and electro-optic effect[J]. *Optics Communications*, 2020, 454(1): 124445.
- [90] 王琛全,周奉杰,顾晓文,等. LNOI 阵列波导光栅的设计与制备[J]. *光电子技术*, 2021, 41(4): 258-261.
- Wang C, Zhou F, Gu X, *et al.* Design and fabrication of LNOI arrayed waveguide grating[J]. *Optoelectronic Technology*, 2021, 41(4): 258-261.
- [91] Yu Y, Yu Z, Zhang Z, *et al.* Wavelength-division multiplexing on an etchless lithium niobate integrated platform[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(10): 3253-3259.
- [92] Wu Q, Ji W, Yin R, *et al.* Reconfigurable AWGR based on LNOI with a tunable central wavelength and bandwidth used in elastic optical networking[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(25): 6631-6638.
- [93] Chen G, Ruan Z, Wang Z, *et al.* Four-channel CWDM device on a thin-film lithium niobate platform using an angled multimode interferometer structure[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 8-13.
- [94] Liu Y, Huang X, Guan H, *et al.* C-band four-channel CWDM (de-) multiplexers on a thin film lithium niobate–silicon rich nitride hybrid platform[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4726-4729.
- [95] Liu D, Zhang M, Shi Y, *et al.* Four-channel CWDM (de) multiplexers using cascaded multimode waveguide gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(4): 192-195.
- [96] He J, Zhang M, Liu D, *et al.* First realization of a three-channel lithium-niobate photonic filter for 50G passive optical networks[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(10): 3740-3747.
- [97] Han X, Jiang Y, Xiao H, *et al.* Subwavelength grating-assisted contra-directional couplers in lithium niobate on insulator[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(10): 2300203.
- [98] Wang J, Chen P, Dai D, *et al.* Polarization coupling of X-cut thin film lithium niobate based waveguides[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 2200310.
- [99] Liu D, Xu H, Tan Y, *et al.* Silicon photonic filters[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(9): 2252-2268.
- [100] Baghban M A, Schollhammer J, Errando-Herranz C, *et al.* Bragg gratings in thin-film LiNbO<sub>3</sub> waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32323-32332.
- [101] Prencipe A, Baghban M A, Gallo K. Tunable ultranarrowband grating filters in thin-film lithium niobate[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(10): 2923-2930.
- [102] He J, Liu D, Pan B, *et al.* High-performance lithium-niobate-on-insulator optical filter based on multimode waveguide gratings[J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 34140-34148.
- [103] Jiang J, Qiu H, Wang G, *et al.* Silicon lateral-apodized add–drop filter for on-chip optical interconnection[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8425-8429.
- [104] Luo L-W, Ophir N, Chen C P, *et al.* WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3069.
- [105] Dai D, Wang J, He S. Silicon multimode photonic integrated devices for on-chip mode-division-multiplexed optical interconnects (Invited Review)[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, 143(1): 773-819.
- [106] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, *et al.* Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference,

- March 6-10, 2011, Los Angeles, California, USA. Washington: Optical Society of America, 2011.
- [107] Li G, Bai N, Zhao N, *et al.* Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [108] Xu H, Dai D, Shi Y. Silicon integrated nanophotonic devices for on-chip multi-mode interconnects[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6365.
- [109] Li C, Liu D, Dai D. Multimode silicon photonics[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(2): 227-247.
- [110] Liu Y, Huang X, Li Z, *et al.* On-chip four-mode (de-) multiplexer on thin film lithium niobate-silicon rich nitride hybrid platform[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3179-3182.
- [111] Dai D, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10940-10949.
- [112] Yu Z, Tong Y, Tsang H K, *et al.* High-dimensional communication on etchless lithium niobate platform with photonic bound states in the continuum[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2602.
- [113] Zhang M, Chen K, Wang M, *et al.* Electro-optic reconfigurable two-mode (de) multiplexer on thin-film lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1001-1004.
- [114] Zhao W, Liu R, Zhu M, *et al.* High-performance mode-multiplexing device with anisotropic lithium-niobate-on-insulator waveguides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(5): 2200774.
- [115] Alquliah A, Elkabbash M, Zhang J, *et al.* Ultrabroadband, compact, polarization independent and efficient metasurface-based power splitter on lithium niobate waveguides[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8160-8170.
- [116] Ke W, Lin Z, Cai X. A compact Y-branch power splitter with an arbitrary power splitting ratio based on thin-film lithium niobate platform [C]/2021 Asia Communications and Photonics Conference, October 24-27, 2021, Shanghai, China. Washington: Optical Society of America, 2011.
- [117] Xu Q, Liu J M, Zhang D L, *et al.* Ultra-compact lithium niobate power splitters designed by an intelligent algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 160(1): 109057.
- [118] Li M, Rao L, He X, *et al.* Low-loss, broadband MMI coupler based on thin film lithium niobate platform[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(3): 035506.
- [119] Yi Q, Pan A, Xia J, *et al.* Ultra-broadband  $1 \times 2$  3 dB power splitter using a thin-film lithium niobate from 1.2 to 2  $\mu\text{m}$  wave band[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(20): 5375-5378.
- [120] Chen L, Han X, Zhou X, *et al.* Demonstration of a high-performance 3 dB power splitter in silicon nitride loaded lithium niobate on insulator[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300377.
- [121] Shang C, Yang J, Hammond A M, *et al.* Inverse-designed lithium niobate nanophotonics[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(4): 1019-1026.
- [122] Chen Y, Zhang K, Feng H, *et al.* Design and resonator-assisted characterization of high-performance lithium niobate waveguide crossings[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(9): 2218-2221.
- [123] Ma M, Yuan M, Zhou X, *et al.* Multimode waveguide bends in lithium niobate on insulator[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(5): 2200862.
- [124] Saitoh E, Kawaguchi Y, Saitoh K, *et al.* TE/TM-pass polarizer based on lithium niobate on insulator ridge waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6600610.
- [125] Liu Y, Huang X, Li Z, *et al.* TE/TM-pass polarizers based on lateral leakage in a thin film lithium niobate-silicon nitride hybrid platform[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4915-4918.



- [126] Jin W, Chiang K S. Leaky-mode long-period grating on a lithium-niobate-on-insulator waveguide[J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1624-1631.
- [127] Yu W, Dai S, Zhao Q, *et al.* Wideband and compact TM-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating in LNOI[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34857-34863.
- [128] Dai S, Yu W, Zhao Y, *et al.* Broadband and compact TE-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating on LNOI platform[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 13(1): 2700109.
- [129] Liu J M, Zhang D L. Air-slot assisted TM-pass waveguide polarizer based on lithium niobate on insulator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 155(1): 108421.
- [130] Han X, Chen L, Jiang Y, *et al.* Integrated subwavelength gratings on a lithium niobate on insulator platform for mode and polarization manipulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2200130.
- [131] Liu J M, Zhang D L. Ultra-broadband thin-film lithium niobate TM-pass waveguide polarizer using subwavelength grating metamaterial[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 164(1): 109556.
- [132] Fei Y, Xu Y, Dong Y, *et al.* Reconfigurable TE-pass polarizer based on lithium niobate waveguide assisted by  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and silicon nitride[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(24): 6499-6506.
- [133] Xu H, Dai D, Liu L, *et al.* Proposal for an ultra-broadband polarization beam splitter using an anisotropy-engineered Mach-Zehnder interferometer on the x-cut lithium-niobate-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10899-10908.
- [134] Yang G, Sergienko A V, Ndao A. Plasmonic loss-mitigating broadband adiabatic polarizing beam splitter[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 629-632.
- [135] Li X, Tao J, Zhao Y, *et al.* Ultra-compact, broadband polarization beam splitter based on x-cut lithium-niobate-on-insulator platform using hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Communications*, 2023, 545(15): 129629.
- [136] Deng C, Lu M, Sun Y, *et al.* Broadband and compact polarization beam splitter in LNOI hetero-anisotropic metamaterials[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11627-11634.
- [137] Gong Z, Yin R, Ji W, *et al.* Optimal design of DC-based polarization beam splitter in lithium niobate on insulator[J]. *Optics Communications*, 2017, 396(1): 23-27.
- [138] Zhang L, Fu X, Yang L. Compact, broadband and low-loss polarization beam splitter on lithium-niobate-on-insulator using a silicon nanowire assisted waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 6601906.
- [139] Liu J M, Zhang D L. Compact and high-performance polarization beam splitter based on triple-waveguide coupler[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161(1): 109159.
- [140] Yuan M, Han X, Xiao H, *et al.* Integrated lithium niobate polarization beam splitter based on a photonic-crystal-assisted multimode interference coupler[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(1): 171-174.
- [141] Song L, Liu W, Guo Z, *et al.* Anisotropic thermo-optic Mach-Zehnder interferometer on LNOI for polarization handling and multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(8): 2300025.
- [142] Wang Q, Xiao J. Compact and efficient polarization rotator using laterally asymmetric rib waveguides on a lithium-niobate-on-insulator platform[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(18): 5042-5049.

- [143] Zhao Y, Yu W, Dai S, *et al.* Compact lithium-niobate-on-insulator polarization rotator based on asymmetric hybrid plasmonics waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 4800105.
- [144] Xu Q, Chen F, Xue S, *et al.* A fundamental mode converter based on tapered LiNbO<sub>3</sub>-on-insulator photonic wire with a laterally asymmetric structure[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 136(1): 115028.
- [145] He X, Xu Y, Zhang B, *et al.* Highly efficient and tunable polarization rotator based on lithium niobate on an insulator[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(10): 2434-2441.
- [146] Chen Z, Yang J, Wong W-H, *et al.* Broadband adiabatic polarization rotator-splitter based on a lithium niobate on insulator platform[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 2319-2324.
- [147] Luo H, Chen Z, Li H, *et al.* High-performance polarization splitter-rotator based on lithium niobate-on-insulator platform[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1423-1426.
- [148] Lin Z, Lin Y, Li H, *et al.* High-performance polarization management devices based on thin-film lithium niobate[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 93.
- [149] Gan R, Qi L, Ruan Z, *et al.* Fabrication tolerant and broadband polarization splitter-rotator based on adiabatic mode evolution on thin-film lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5200-5203.
- [150] Shen Y, Ruan Z, Chen K, *et al.* Broadband polarization splitter-rotator on a thin-film lithium niobate with conversion-enhanced adiabatic tapers[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1354-1366.
- [151] Song L, Zhao J, Dai X, *et al.* Fully adiabatic polarization rotator-splitter based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19604-19612.
- [152] Wang X, Pan A, Li T, *et al.* Efficient polarization splitter-rotator on thin-film lithium niobate[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 38044-38052.
- [153] Deng C, Zhu W, Sun Y, *et al.* Broadband polarization splitter-rotator on lithium niobate-on-insulator platform[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(1): 7-10.
- [154] Xu M, Zhu Y, Pittalà F, *et al.* Dual-polarization thin-film lithium niobate in-phase quadrature modulators for terabit-per-second transmission [J]. *Optica*, 2022, 9(1): 61-62.
- [155] Kharel P, Reimer C, Luke K, *et al.* Breaking voltage–bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 357-363.
- [156] He M, Xu M, Ren Y, *et al.* High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach–Zehnder modulators for 100 Gbit s<sup>-1</sup> and beyond[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [157] Xu M, He M, Zhang H, *et al.* High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3911.
- [158] Wang Z, Chen G, Ruan Z, *et al.* Silicon–lithium niobate hybrid intensity and coherent modulators using a periodic capacitively loaded traveling-wave electrode[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(8): 2668-2675.
- [159] Yu M, Barton Iii D, Cheng R, *et al.* Integrated femtosecond pulse generator on thin-film lithium niobate[J]. *Nature*, 2022, 612(7939): 252-258.
- [160] Xue Y, Gan R, Chen K, *et al.* Breaking the bandwidth limit of a high-quality-factor ring modulator based on thin-film lithium niobate[J]. *Optica*, 2022, 9(10): 1131-1137.
- [161] Wang X, Shang C, Pan A, *et al.* Thin-film lithium niobate dual-polarization IQ modulator on a silicon substrate for single-carrier 1.6 Tb/s transmission[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(7): 076101.
- [162] Lin J, Farajollahi S, Fang Z, *et al.* Electro-optic tuning of a single-frequency ultranarrow linewidth microdisk laser [J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 036001.

- [163] Wang C, Zhang M, Chen X, *et al.* Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [164] Zhang K, Sun W, Chen Y, *et al.* A power-efficient integrated lithium niobate electro-optic comb generator[J]. *Communications Physics*, 2023, 6(1): 17.



## 网络首发:

**标题:** 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件

**作者:** 田永辉,袁明瑞,秦士敬,李浩,王思璇,肖恢芙

**收稿日期:** 2024-01-15

**录用日期:** 2024-02-23

**DOI:** 10.3788/LOP240525

## 引用格式:

田永辉,袁明瑞,秦士敬,李浩,王思璇,肖恢芙. 薄膜铌酸锂片上集成多维复用光子器件[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(09):0916004.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别,请以正式出版文件为准!

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 基于V形硅的薄膜铌酸锂波导模式转换器

张程 徐银 董越 张博 倪屹

江南大学物联网工程学院,江苏 无锡 214122

激光与光电子学进展,2024,61(5):0523001

### 飞秒激光直写光波导放大器与激光器(特邀)

孙翔宇 陈智 王宇莹 陈道远 刘小峰 马志军 钟理京 邱建荣

之江实验室,浙江 杭州 311100

激光与光电子学进展,2024,61(3):0314003

### 飞秒激光制备红外微光学元器件

牛亚华 孙盛芝 刘小峰 邱建荣

宁波大学红外材料及器件实验室,高等技术研究院,浙江 宁波 315211

激光与光电子学进展,2023,60(23):2314006

### 硅基光波导光学相控阵多光束形成方法

周恒超 王春阳 王子硕 刘雪莲 肖博

西安工业大学信息感知与智能控制重点实验室,陕西 西安 710021

激光与光电子学进展,2021,58(11):1123001

### 飞秒激光直写激光晶体光波导的研究进展

张彬 李子琦 王磊 陈峰

山东大学物理学院,晶体材料国家重点实验室,山东 济南 250100

激光与光电子学进展,2020,57(11):111415