

综述

绝缘体上铌酸锂薄膜片上光子学器件的研究进展*

李庚霖 贾曰辰[†] 陈峰[‡]

(山东大学物理学院, 晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

(2020年2月27日收到; 2020年5月7日收到修改稿)

铌酸锂晶体具有卓越的电光和非线性光学性质, 一直以来都被认为是最有前景的集成光子学基质材料之一. 也正是由于铌酸锂晶体多方面优良的光学性能, 近年来新兴的铌酸锂薄膜技术在集成光子学的研究中受到了极大的关注. 借助于先进的微纳加工技术, 许多高性能的铌酸锂集成光子学器件已经得以实现. 本文总结了微纳加工技术在基于铌酸锂薄膜的片上光子学器件制备中的应用, 介绍了铌酸锂薄膜片上光子学器件的最新进展, 并展望了其在集成光子学研究中的潜在应用.

关键词: 铌酸锂薄膜, 微纳加工, 非线性光学, 集成光子学器件

PACS: 78.20.-e, 42.82.Cr, 42.65.-k, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.69.20200302

1 引言

集成光子学平台可以在单片基质材料中集成高密度、多功能的微纳光学元件, 能够灵活地实现有源 (active) 和无源 (passive) 等多种光子学功能, 因此可以大幅度改善光子学系统的稳定性并提高其效率, 同时也为光学系统的小型化、集成化提供了低成本、小尺寸、可扩展的解决方案^[1]. 铌酸锂 (LiNbO_3 , LN) 晶体是一种多功能的铁电材料, 被称为光子学领域中的“硅”, 具有出色的电光、非线性光学、声光和光折变特性. 而基于 LN 基质材料的集成光子学平台因其出色的光学特性, 已在快速电光调制、非线性光学频率转换和频率梳生成等方面得到广泛的应用^[2]. LN 较宽的带隙使其具有紫外到中红外 (0.35—5 μm) 的较宽透明窗口, 从而可以实现较宽波段范围内的多种光学应用. 同时, LN 晶体是双折射单轴晶体, 在通信波段内其寻常光折射率 (n_o) 和非寻常光折射率 (n_e) 分别为 2.21 和 2.14, 其较高的折射率可以提供较强的光学

限制, 因此 LN 被广泛应用于多种光波导器件的制备. 在非线性光学应用方面, LN 具有较高的二阶非线性极化率张量 ($\chi^{(2)}$), 其中最大的分量 d_{33} 为 27 pm/V, 此外 LN 也具备优良的三阶非线性光学特性^[3]. 将 LN 优良的二阶与三阶非线性光学特性与相位匹配技术相结合, 可以在 LN 平台上制备微型高效的电光调制、非线性光学频率转换、光频梳等光子学器件. 此外, 基于准相位匹配的周期性极化铌酸锂 (periodically poled lithium niobate, PPLN) 也已逐渐成为成熟的集成光学平台, 被广泛应用于非线性光学、光量子技术等多个领域.

过去的几年中, 研究人员在硅基光子平台发展方面付出了巨大努力并取得了显著成就, 较大尺寸、较高品质的绝缘体上硅晶片 (silicon-on-insulator, SOI) 制备工艺已趋于成熟. 与 SOI 相比, LN 具有优良的非线性光学、电光、声光等特性, 目前已经在 LN 块体 (bulk) 材料上实现了光子学器件的商业化生产. 然而, 在块体材料上制备的光子学器件尺寸往往较大, 很难提高器件集成度. 因此, 类似 SOI 结构制备的单晶 LN 薄膜是急需

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFA0705000)、山东省泰山学者青年专家计划和山东大学齐鲁青年学者计划资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yuechen.jia@sdu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: drfchen@sdu.edu.cn

的. 随着晶片键合技术日臻成熟, 由智能切片工艺 (“smart cut”) 制备的绝缘体上 LN 薄膜 (lithium-niobate-on-insulator, LNOI) 已经实现了商业化销售^[4,5]. 位于 SiO₂ 或 Si 衬底上的 LN 薄膜厚度可以达到几百纳米, 并能够在较大尺寸 (3 in) 下保证良好的均匀性. 与周围介质是 LN 块体材料的传统质子交换波导相比, 基于 LNOI 薄膜的光波导周围介质一部分为空气, 另一部分是低折射率绝缘介质衬底, 因此可以提供更高的折射率对比度, 从而可以对导波模式有更强的限制^[6].

随着微纳加工技术的发展, LNOI 薄膜片上光子学器件的品质和功能在近些年得到了明显的提升, 基于 LNOI 的集成光子学器件研究也得到了迅猛的发展. 本文简要回顾了 LNOI 薄膜技术的发展历程, 结合目前较成熟的微纳加工技术, 总结了近期 LNOI 片上光子学器件的研究进展, 并对有发展潜力的研究方向进行了简单的展望.

2 LNOI 平台的发展

2.1 智能切片工艺

智能切片工艺是制备高品质、大尺寸 LNOI 薄膜的有效方法, 其主要的技术手段包括离子注入 (ion implantation)、晶片键合 (wafer bonding) 以及热剥离 (thermal splitting) 等. LNOI 薄膜的制备首先需要通过离子注入在 LN 块体材料中注入高剂量 (10¹⁶—10¹⁷ cm⁻²) 的 He⁺^[7], 目的是在靶材料中形成“损伤层”, 从而可以借助后续的特殊热处理过程实现 LN 薄膜与块体材料的分离. 制备的 LN 薄膜的厚度可以通过改变离子注入的能量在一定程度上进行调整.

晶片键合是 LN 薄膜制备过程中的关键步骤,

它将经过离子注入的 LN 块体材料与衬底材料键合, 以可控的方式实现热处理过程中薄膜的剥离. 常见的 LNOI 薄膜晶片键合方式主要有两种: 苯并环丁烯 (Benzocyclobutene, BCB) 键合和直接键合. 其中, 使用有机高分子键合材料 (如 BCB, 折射率 $n_{BCB} \approx 1.55$) 可以在最大程度上降低对键合表面平整度和粗糙度的要求^[4]. 而相较于 BCB 键合, 晶片直接键合可以使整个样品结构承受更高的温度, 这有利于退火时在一定程度上降低离子注入晶格损伤以及恢复材料的光学性能^[8,9]. 另外, 在更高的温度下退火还可以显著降低 LNOI 薄膜材料表面的粗糙度.

热剥离过程是在超过 220 °C 条件下, 诱导离子注入损伤层内气泡和裂纹的产生, 最终使注入层与 LN 衬底完全分离, 仅留下键合有 LN 注入层和衬底的 LNOI 薄膜. 下文中将以直接键合工艺为例对 LNOI 薄膜的制备工艺进行简单介绍.

晶片直接键合方法可以使键合材料在更高的温度下退火, 这十分有利于恢复因离子注入造成的晶格损伤, 并同时降低薄膜表面的粗糙度. 采用晶片直接键合制备单晶 LNOI 薄膜的流程主要分为五个步骤, 如图 1 所示. 1) 离子注入. 在 LN 晶片 (作为施体材料 donor wafer, 该晶片直径可为 3 in, 1 in = 2.54 cm) 中注入剂量约为 4.5×10^{16} cm⁻² 的 He⁺, 注入离子能量则根据所需的薄膜厚度 (即注入深度) 选择. 2) 沉积 SiO₂. 使用等离子体化学气相沉积 (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 技术在衬底材料晶片 (受体材料 acceptor wafer, 通常为 LN, 也可以是 Si 或者其他衬底材料) 表面沉积一层厚度为 1.3 μm 的高密度 SiO₂ 薄膜. 沉积结束后, 样品需要在 450 °C 下退火 8 h, 目的是将沉积过程中产生的气泡从 SiO₂ 薄

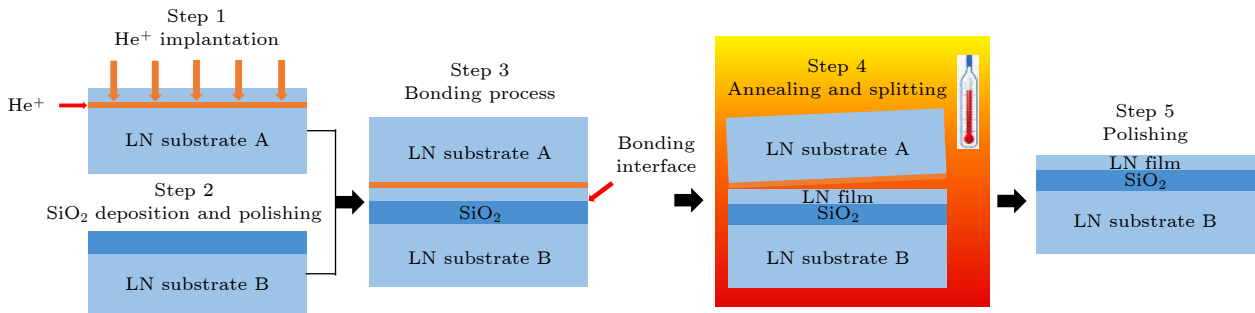


图 1 晶片直接键合制备单晶 LN 薄膜流程图

Fig. 1. Flow chart of preparation of single crystal lithium niobate films by direct bonding of wafers.

层中排出. 为了提高键合强度, 此时需要对沉积的 SiO_2 薄膜表面和离子注入面进行化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP), 使 SiO_2 薄膜表面的粗糙度降低至 0.35 nm 以下, 离子注入面的粗糙度降低至 0.5 nm 以下. 3) 晶片键合. 将处理后的施体和受体晶片材料在常温下进行直接键合. 4) 后退火处理. 进一步的退火处理将进一步增强晶片之间的键合强度, 并能够实现 LN 注入层与施体材料的机械分离. 其简要流程如下: 首先在 165 °C 下退火 16 h; 随后在 190 °C 下退火 6 h, 以进一步提高键合强度^[4]. 接下来, 将样品温度提升至约 228 °C, 使 He^+ 注入层与 LN 施体材料实现分离. 5) 键合晶片抛光. 热处理结束后, 利用 CMP 使制备的 LNOI 薄膜的粗糙度降低到 0.5 nm 以下.

2.2 LNOI 的发展回顾

智能切片是一种比较熟知的晶体薄膜制备工艺, 已经被广泛应用在高品质 SOI 晶片的制备. 2004 年, Rabiei 和 Gunter^[10] 创新性地利用智能切片工艺在 SiO_2 衬底上制备了晶片面积为 1 cm^2 的 LN 薄膜, 为 LNOI 薄膜技术的开发提供了思路; 2007 年, Djukic 等^[11] 使用晶体离子切片技术制备了面积为几平方厘米的自支撑式 (freestanding) PPLN 薄膜; 随后, Poberaj 等^[4] 首次开发并使用全晶片 (full-wafer) 智能切片制备技术, 在沉积有 SiO_2 层的 LN 衬底上制备了大尺寸 (3 in 直径)、高均匀度的单晶 LNOI 薄膜, 标志着高质量 LNOI 薄膜集成光子学平台研究的开端. 目前, 借助全晶片智能切片制备技术, 山东大学胡卉课题组已在国际上率先开发出厚度为 300—900 nm 的高品质、大尺寸 LN 单晶薄膜材料产品 (“NANOLN”), 该产品可应用于制备光学调制器、光学滤波器以及高密度光学信息存储器件, 可以极大提高功能器件的性能和集成度, 在压电、铁电、红外探测等多个领域都具有广泛应用前景. LNOI 薄膜技术及其潜在的集成光子学系统已经逐渐成为当前光子学研究前沿的“变革性”技术, 有望在未来的信息、材料研究与产业发展中发挥重要的作用.

3 LNOI 片上微纳光子学结构的制备

在 LNOI 薄膜上制备片上微纳光子学结构, 可以充分利用 LN 优良的电光和非线性光学特性, 实

现多功能的集成光子学器件. 适合制备片上微纳光子学器件的加工和优化技术有很多, 本文将对其中的光刻技术、飞秒激光微加工、异质结合技术、PPLN 薄膜技术以及 CMP 技术等进行简单介绍.

3.1 光刻技术

光刻技术是一种常用的微纳图形加工技术手段. 根据光刻胶的种类, 光刻技术主要分为紫外光刻技术 (ultraviolet lithography) 和电子束曝光技术 (electron beam lithography, EBL) 两种类型. 它们共同的目的都是把掩模版 (mask) 上的图案转移至其下方的光学敏感层上, 在实际操作中, 通常在光敏层上涂覆一层光刻胶, 这相当于照片的底片. 随后借助掩模版对光刻胶进行曝光, 掩模版图案的某些部分阻挡光线或电子束不能通过, 其余的部分允许通过, 从而将特别设计的几何图案转移至光刻胶上. 接下来通过对位于光刻胶下方的光学层进行刻蚀加工实现微纳光子学结构的初步制备. 常见的刻蚀加工技术可以分为两类, 一类是液体刻蚀技术, 又被称为“湿法刻蚀”, 通常使用氢氟酸 (HF) 等液体刻蚀剂进行刻蚀; 与“湿法刻蚀”相对应的是“干法刻蚀”, 是利用等离子体化学活性较强的性质进行刻蚀的技术. 根据刻蚀机理, 可以将干法刻蚀技术分为三类: 利用高能离子束的物理性刻蚀、利用等离子体的化学性刻蚀或者利用反应离子束 (reactive ion etching, RIE) 的物理化学性刻蚀.

目前, 人们使用紫外光刻技术和 EBL 技术已在 LN 薄膜上制备了微盘、微环以及光子晶体微腔等结构. 利用紫外光刻技术以及 RIE 技术, Wang 等^[12] 制备了 Q 因子为 3.1×10^5 (波长为 1550 nm) 的片上 LN 微盘谐振腔, 在此基础上理论分析并实验验证了 LN 微腔中的热光效应. 随后, Wang 等^[13] 报道了具有定向发射特性的高质量片上 LN 微盘谐振腔 ($Q > 10^6$, 1550 nm 波长). 与紫外光刻技术相比, EBL 技术具有更高的加工精度, 可以在 LN 薄膜上制备更复杂的图案. 例如, Desiatov 等^[1] 利用 EBL 技术, 在 LN 薄膜上实现了超低损耗 (6 dB/m, 635 nm 波长) 脊型光波导结构和超高 Q 因子 (1.1×10^7 , 637 nm 波长) 微环谐振腔的片上集成. 另外, Liang 等^[14] 报道了 Q 因子为 1.09×10^5 (1452 nm 波长) 的片上 LN 光子晶体纳米束谐振腔, 其 Q 值与此前报道的其他 LN 光子晶体纳米腔相比至少高出了两个数量级.

3.2 飞秒激光微加工

作为一种新兴的加工技术,飞秒激光微加工技术具有非接触、效率高、加工精度高、热效应小和损伤阈值低等特点,能够实现真正的三维结构微加工,具有广泛的应用领域^[15–19].因此,将飞秒激光微加工技术与其他先进的微纳加工技术结合,具有十分广阔的应用前景.在LNOI片上光子学器件方面,华东师范大学程亚研究团队^[20]利用飞秒激光直写技术与聚焦离子束(focused ion beam, FIB)刻蚀技术相结合的方法,制备了 Q 因子高达 10^7 (773.49 nm 波长)的片上LN微盘谐振腔.随后,Zheng等^[21]利用该技术制备了可以支持外部回音壁模式的LN双层微盘谐振腔,并得到了 1.2×10^5 的 Q 因子(1567.4 nm 波长).该技术的主要优点在于:首先,飞秒激光直写技术与FIB技术在加工过程中均不需要掩模,这可以有效、灵活地制备具有不同功能的片上微纳光子学器件;其次,与FIB技术相比,飞秒激光直写技术通常具有较高的刻蚀速率,但缺点在于其制造分辨率不足(仅约为 $1 \mu\text{m}$).因此将两种微纳加工技术结合,可以同时利用各自的优势特点,实现高效率、高精度的片上微纳光子学器件制备^[22].

如图2所示,利用飞秒激光微加工技术制备LN片上微盘谐振腔的典型操作流程为:1)清洗待加工样品,随后在样品表面沉积铬(Cr)薄层;2)飞秒激光微加工,使用聚焦的飞秒激光脉冲刻蚀浸在水中的LN薄膜样品,将需要制备的图形转移到Cr金属膜上;3)使用CMP技术移除未被Cr膜覆盖的部分,从而将图形转移到LN薄膜上;4)湿法刻蚀,首先将样品浸泡于Cr腐蚀剂中约10 min,以去除覆盖在微盘结构表面的Cr膜,随后把样品浸没在稀释的HF溶液中,部分去除位于LN微盘结构下方的 SiO_2 层;5)采用FIB技术对LN片上微盘结构进行抛光处理,降低表面粗糙度^[20].

3.3 LN与半导体材料异质结合

由于LN晶体本身化学性质较为稳定,因此为了规避其难以刻蚀的问题,研究人员通过沉积或直接键合技术将LN薄膜与几种更易于刻蚀的半导体材料薄膜相结合^[23],进而利用较为成熟的半导体刻蚀工艺对所使用的半导体材料薄膜进行微纳加工,并通过合理的结构和尺寸设计实现了包括电光调制^[24]、非线性光学^[25–27]等在内的多种片上光

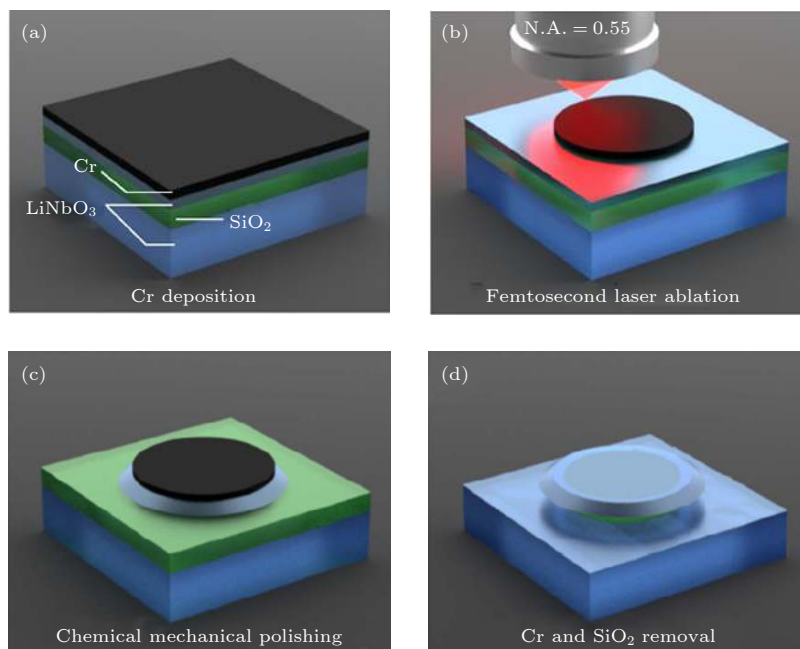


图2 使用飞秒激光微加工制备LN片上微盘谐振腔的过程 (a) 在LN样品表面沉积Cr; (b) 飞秒激光加工将微盘图形转移到Cr膜上; (c) CMP过程将微盘图形转移到LN薄膜上; (d) 湿法刻蚀去除Cr膜和 SiO_2 ^[20]

Fig. 2. Flow chart of fabricating LN microdisk using femtosecond laser micromachining: (a) Depositing metallic chromium on LN sample surface; (b) transferring microdisk graphics onto chrome layer by femtosecond laser micromachining; (c) transferring microdisk pattern onto LN film by CMP; (d) wet etching removes chromium film and SiO_2 ^[20].

学功能, 避免了对 LN 薄膜的直接刻蚀. 可供选择的半导体材料主要包括: 氮化硅 (SiN)、非晶硅 (α -Si)、硫化物玻璃 (ChG)、五氧化二钽 (Ta_2O_5) 和二氧化钛 (TiO_2) 等. 其中, SiN 是一种多功能的半导体材料, 其化学组分和光学性质 (如折射率、色散性质、光学带隙以及极化率等) 可以通过改变沉积过程中的相关参数进行一定程度上的调节 [28]. 目前, 通过使用 PECVD 和干法刻蚀技术相结合制备的 SiN 脊形波导已经被应用于电光调制 [29] 和非线性频率转换 [25,26,30] 等方面. ChG 通常具有较高的三阶非线性极化率张量 ($\chi^{(3)}$), 在三阶非线性光学效应研究中具有广泛的应用, 如四波混频 [25] 以及超连续谱产生等. 在温度较低 ($< 400\text{ }^\circ\text{C}$) 的情况下, ChG 薄膜可以通过电子束沉积或者热蒸发沉积技术与 LN 薄膜结合 [23]. 其中, Rao 等 [31] 通过将 ChG 脊形光波导与 LN 薄膜异质结合, 成功构建了片上 Mach-Zehnder (M-Z) 和微环电光调制器. 此外, Ta_2O_5 和 TiO_2 等金属氧化物薄膜也是良好的非线性光学材料, 与 LN 薄膜异质结合也具有一定的应用前景.

3.4 PPLN 片上器件的制备

一般情况下, 在单晶 LN 薄膜结构中实现高效率的非线性光学过程对相位匹配的要求十分严格, 通常可以利用 LN 晶体本身的双折射性质 [32]、制备的微纳光子学结构的几何色散 [33] 或模态控制 [34] 等来实现. 然而, 前两种方法无法利用 LN 晶体 $\chi^{(2)}$

张量中非线性系数最高的 d_{33} 分量, 后者的非线性频率转换效率则受限于基模与高阶模之间较弱的模式重叠. 具有周期性反转铁电畴结构的 PPLN 薄膜不仅可以在基波与极化波之间实现准相位匹配, 还可以同时利用到 LN 较大的 d_{33} 非线性光学系数, 为实现高效率的片上非线性频率转换提供了有效的方案 [35].

典型的制备 PPLN 片上脊形波导的过程如图 3 所示: 1) 使用 EBL 技术在 x 切 LN 薄膜表面绘制出梳状电极图案; 2) 利用电子束蒸发在薄膜表面沉积 15 nm 厚度的 Cr 膜和 60 nm 的金 (Au) 膜, 随后通过剥离工艺形成极化过程所需的金属电极; 3) 在极化电极上施加几个 450 V 的电脉冲, 其上升时间为 5 ms, 电压保持时间为 20 ms, 衰减时间为 10 ms; 4) 二次 EBL 过程, 在极化区域中制备脊形波导; 5) 使用 FIB 或 CMP 技术对制作的脊形波导进行抛光处理, 使其具有光滑的侧壁和最佳的侧壁倾斜角度, 降低波导损耗 [35].

一般来讲, 极化过程持续的时间越短, 相邻金属电极之间的电场扩展作用就越明显, 从而导致铁电畴反转轮廓不均匀. 因此, 为了提高极化品质, 在 LN 薄膜的一侧使用三角形的极化电极, 而另一侧电极则保持为矩形并且接地. 这有助于形成电场强度方向由三角形电极指向矩形电极的电场 [36], 使得电场的横向扩展最小化并显著提高极化质量.

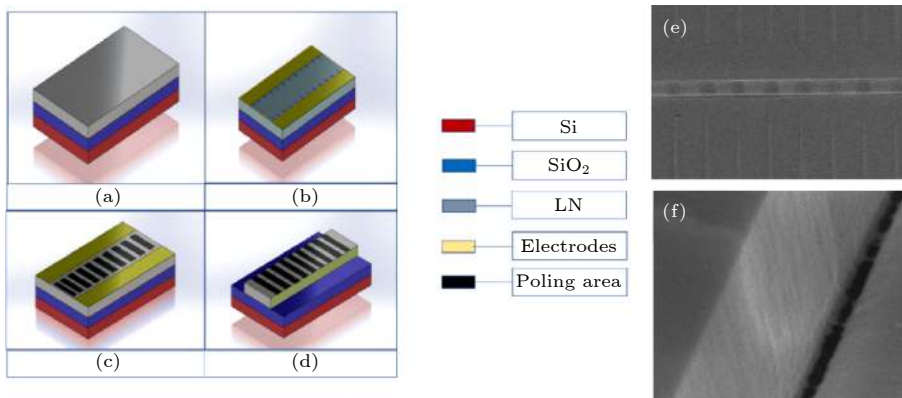


图 3 PPLN 薄膜片上脊形波导的制备流程 (a) 待加工的 x 切 LN 薄膜样品; (b) 沉积梳状金属极化电极; (c) 对金属电极施加极化电压; (d) 制作完成的 PPLN 脊形波导; (e) PPLN 脊形波导俯视图, 深色部分为铁电畴反转区域; (f) 经过 CMP 或 FIB 技术处理之后的 PPLN 片上脊形波导侧壁 [35]

Fig. 3. Preparation process of PPLN ridge waveguide: (a) The x -cut LN thin film sample to be processed; (b) deposition of comb-shaped metal polarized electrode; (c) application of polarization voltage to metal electrode; (d) the fabricated PPLN ridge waveguide; (e) top view of the PPLN ridge waveguide, the dark area is the domain inversion area; (f) PPLN ridge waveguide sidewall after CMP or FIB fabricating [35].

3.5 化学机械抛光技术

由于加工精度的限制, 利用大多数微纳加工技术制备的 LNOI 片上光子学器件通常会有较高的表面和侧壁粗糙度以及多余的散射损耗. 针对这个问题, Wolf 等^[37]提出了一种降低 LN 片上波导表面和侧壁粗糙度的抛光工艺, 可以将片上光子学器件的散射损耗降低至少一个数量级. 在使用 CMP 技术时, 为了实现对 LN 片上光子学器件的侧壁结构进行抛光, 可以选用较为柔软的抛光面 (polishing tissue), 这样待抛光的 LN 片上器件在抛光过程中可以被一定程度上压入柔软的抛光纸面中, 实现对器件直立侧壁的抛光. 在抛光过程中, 抛光浆液的颗粒度大小、抛光的压力、抛光夹具的移动和旋转速度、器件表面起保护作用的 Cr 膜厚度等因素都对抛光的效果有重要的影响, 是需要充分考虑和研究的关键参数. 图 4 展示了不同压强 (p) 和抛光时间 (t_{pol}) 参数对最终抛光效果的影响^[37].

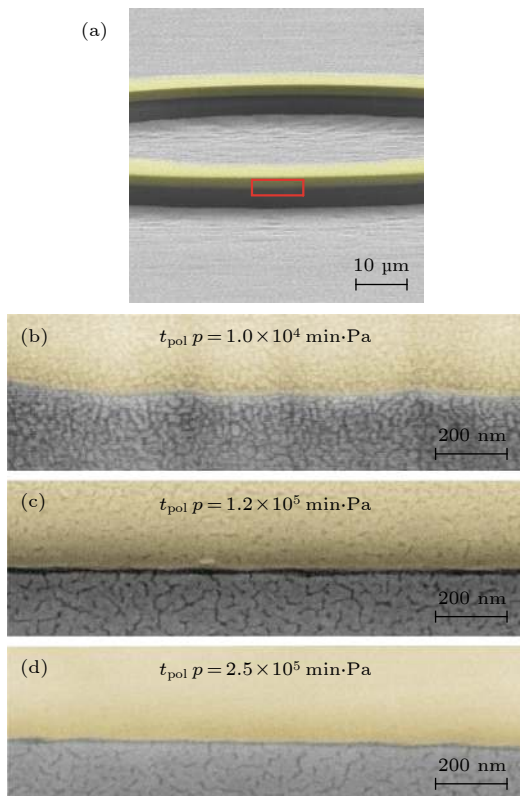


图 4 (a) 抛光后的微环谐振腔的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 着色图像 (LN 标记为黄色, SiO₂ 为灰色); (b)–(d) 不同抛光参数对最终抛光效果的影响^[37]

Fig. 4. (a) A SEM coloring image of polished micro-ring resonator (LN is yellow; SiO₂ is gray); (b)–(d) influences of different polishing parameters on the final sidewall roughness^[37].

近期, Wang 等^[38]详细介绍并总结了利用 CMP 技术制备高品质 LN 片上光子学器件的工艺流程. 具体过程如图 5 所示: 1) 通过磁控溅射在 LN 薄膜上沉积厚度为 600 nm—1 μm 的 Cr 膜, 作为刻蚀掩模; 2) 使用飞秒激光微加工在 Cr 膜上制备待加工图案; 3) 使用晶片抛光机对样品进行抛光处理, 将待加工图案从 Cr 刻蚀掩模转移到 LN 薄膜上; 4) 将样品浸入 Cr 腐蚀溶液中 10 min 去除 Cr 掩模; 5) 二次抛光处理, 确保整个器件表面具有极高的平滑度. 目前采用该技术制备的 LN 片上脊形波导在 1550 nm 附近实现了 0.04 dB/cm 的超低损耗. 此外, Fang 等^[39]将飞秒激光微加工、CMP 技术和 HF 湿法刻蚀技术结合, 制备了 Q 因子为 10^7 (970 nm 波长) 的片上 LN 微盘谐振腔.

表 1 总结了几种不同的微纳加工工艺制备的 LNOI 片上光学微腔和波导器件的主要性能参数^[1,12–14,20,21,29,37,40–43], 其中 d 为微盘直径, r 为微盘半径, W 为脊形波导宽度, H 为脊形波导高度, g 为双层微盘之间空气隙的高度, a 为光子晶体晶格常数, w 为光子晶体结构宽度, h 为光子晶体结构高度.

4 LNOI 片上光子学器件

4.1 电光调制器件

目前大多数的电光调制器都利用了外加电场使非线性光学晶体产生折射率变化这一基本电光效应, 来实现对光信号的相位、偏振以及强度的调制. 近年来, 基于 LNOI 薄膜的片上电光调制器已逐渐成为研究热点, 其性能已经与实现商业化生产的 LN 块体材料电光调制器相近. 2007 年, Guarino 等^[44]报道了在使用 BCB 键合的 z 切 LN 薄膜上制备的电光调制微环谐振腔, 其 Q 因子在通信波段可达到 4×10^3 , 调制效率可达到 0.14 GHz/V. 这项突破性的工作一经发表就受到了极大的关注, 在一定意义上代表着基于 LNOI 薄膜集成光子学器件功能性研究的开端.

随后, 研究人员在优化和提升 LNOI 片上电光调制器件方面取得了一系列的进展. Ren 等^[45]通过使用 EBL 技术和 RIE 技术制备了低损耗 (约 1 dB/channel) 双通道相位调制器, 当抽运波长控制在 1564—1576 nm 范围内时, 该相位调制器表现出较宽的频率带宽 (5—40 GHz) 以及较低的半

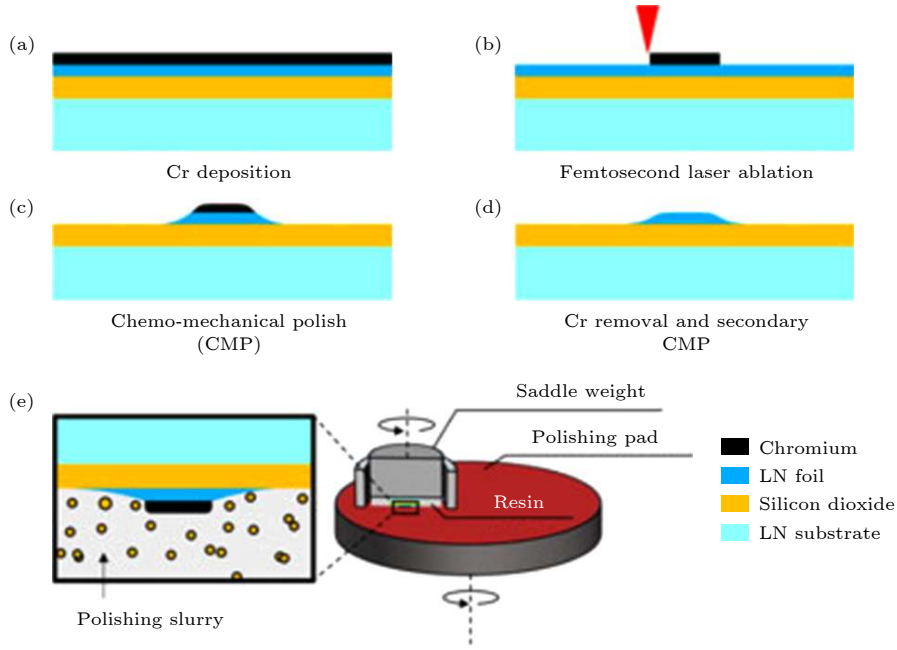


图 5 CMP 技术制备 LNOI 片上光子学器件流程图 (a) 磁控溅射沉积 Cr 薄膜; (b) 飞秒激光微加工制备待加工图案; (c) CMP 过程去除多余的 LN; (d) 使用 Cr 腐蚀剂去除刻蚀掩模以及二次 CMP 过程; (e) CMP 仪器示意图^[38]

Fig. 5. Schematic of using CMP technology to prepare LNOI on-chip optics: (a) Depositing Cr film on LNOI by magnetron sputtering; (b) femtosecond laser processing defines the pattern to be processed; (c) CMP process to remove excess LN; (d) use Cr etchant to remove the etching mask and secondary CMP process; (e) schematic diagram of CMP instrument^[38].

表 1 不同加工手段制备的 LN 片上光子学器件的主要性能参数

Table 1. Main performance parameters of LN on-chip photonic devices fabricated by different fabrication techniques.

加工图案	微纳加工技术	尺寸	损耗(测量波长)	品质因子(测量波长/nm)
微盘 ^[13]	紫外光刻技术	$d = 50 \mu\text{m}$	—	1.5×10^6 (1551.4)
微盘 ^[12]		$r = 50 \mu\text{m}$	—	3.1×10^5 (1550)
微盘 ^[40]	电子束曝光技术	$r = 25 \mu\text{m}$	—	2.9×10^5 (1502)
微盘 ^[41]		$r = 25 \mu\text{m}$	—	2.69×10^5 (1548.78)
微环 ^[1]		$r = 100 \mu\text{m}$	—	1.1×10^7 (637)
微环 ^[42]		$r = 80 \mu\text{m}$	—	$\sim 10^7$ (1590)
光子晶体微腔 ^[14]		$w = 750 \text{ nm}$	—	1.09×10^5 (1452)
		$h = 250 \text{ nm}$		
		$a = 600 \text{ nm}$		
微盘 ^[21]	飞秒激光微加工	$d = 29.92 \mu\text{m}$	—	9.61×10^6 (1547.8)
微盘 ^[20]		$d = 140 \mu\text{m}$	—	1.46×10^7 (773.49)
双微盘 ^[43]		$d = 29.92 \mu\text{m}$ $g = 138 \text{ nm}$	—	1.35×10^5 (1528.5)
脊形波导 ^[1]	电子束曝光技术	$W = 480 \text{ nm}$ $H = 120 \text{ nm}$	6 dB/m (635 nm)	—
脊形波导 ^[42]		$W = 2.4 \mu\text{m}$ $H = 0.25 \mu\text{m}$	$(2.7 \pm 0.3) \text{ dB/m}$ (1590 nm)	—
脊形波导 ^[29]	异质集成	$W = 1.3 \mu\text{m}$ $H = 0.5 \mu\text{m}$	0.1 dB/m (1550 nm)	—
脊形波导 ^[37]	化学机械抛光	$W = 4 \mu\text{m}$ $H = 3 \mu\text{m}$	4 dB/m (1550 nm)	—

波电压 (3.5—4.5 V). Jin 等^[46] 通过调整单个干涉仪的偏置电压, 补偿由于光束分离不均匀和 EBL 加工误差引起的损耗, 在级联的 M-Z 干涉仪中突破了 30 dB 消光比的极限, 在 1500—1600 nm 波长范围内实现高达 53 dB 的消光比, 提升了对施加的射频信号的调制灵敏度. Wang 等^[47] 利用 PECVD 技术与 EBL 技术实现了低损耗片上 LN 脊形波导、片上 LN 微环谐振腔以及片上 M-Z 干涉仪的紧密集成, 同时利用小尺寸集成器件可以有效限制光场与微波场的优势, 大幅提升了器件的电光调制性能. 该 LN 片上集成光子学器件的半波电压长度积 (half-wave voltage and length products) 为 1.8 V·cm, 运行速率为 40 Gbps. 同时, 在输入

波长为 1480—1580 nm 的可调谐激光器的抽运下, 该集成光子学平台上也实现了高频条件下 Q 因子为 8000, 3-dB 调制带宽为 30 GHz 的赛道型电光调制器. 图 6(a) 和图 6(b) 展示了制备的基于赛道和微环谐振腔以及 M-Z 干涉仪的 LN 片上调制器. 图 6(c) 和图 6(d) 给出了赛道型谐振腔与脊形波导耦合区域以及脊形波导与金属电极相对位置的 SEM 图像. 电光调制表征实验结果 (1.5 μm 波长) 表明, M-Z 型电光调制器 (长度约为 2 mm, Q 因子为 8000) 消光比为 10 dB, 半波电压为 9 V, 电光调制带宽 (3 dB) 为 30 GHz (如图 6(e) 和图 6(f) 所示). 另外, Wang 等^[48] 还利用 EBL 与 RIE 技术制备了能够在 CMOS 兼容的驱动电压下运行的

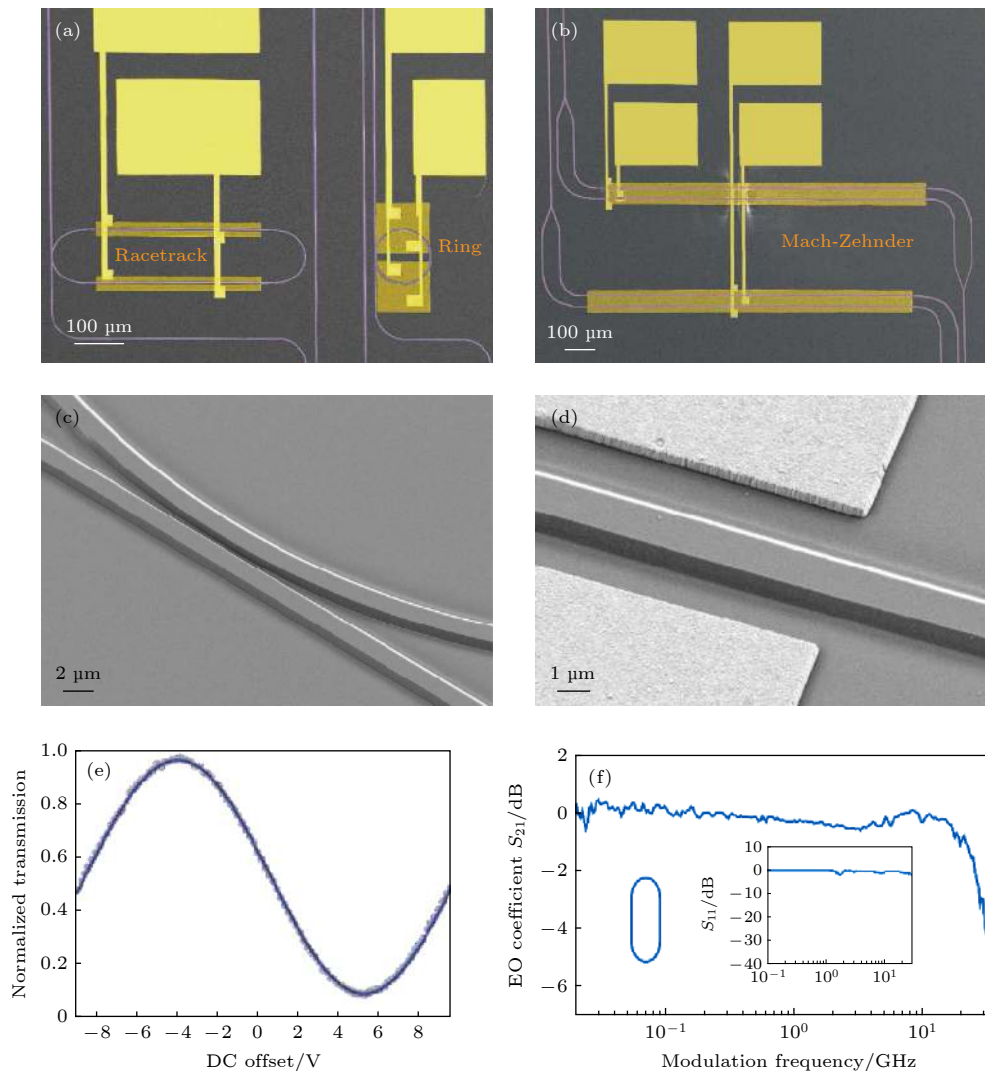


图 6 (a), (b) LNOI 片上电光调制器的 SEM 图像; (c) 赛道型电光调制器耦合区域的放大图; (d) 电极与光波导的放大图; (e) M-Z 型电光调制器的透射光谱; (f) 赛道型电光调制器的电光调制带宽 (9 V, 1480—1580 nm)^[47]

Fig. 6. (a), (b) SEM images of the LNOI modulator; (c) enlarged view of the coupling area of the track modulator; (d) enlarged view of the electrode and optical waveguide; (e) transmission spectrum of MZI modulator; (f) electro-optical bandwidth of racetrack modulator (9 V, 1480—1580 nm)^[47].

单片集成 LN 电光调制器 (通信 C 波段), 其开关电压为 1.4 V, 数据传输速率可达到 210 GBit/s, 片上光学损耗低于 0.5 dB, 3-dB 调制带宽超过 45 GHz. 该集成电光调制器通过分离光信号与电场微波信号, 将光学模限制在横截面积为亚微米量级的波导区域中, 同时将微波模主要限制于 SiO₂ 衬底中. 如此以来, 光信号与微波信号的群速度就可以通过分别调节 LN 和 SiO₂ 层的厚度来加以控制, 并最终能够在较高微波频率下保持光信号与微波信号之间的群速度匹配, 避免了光电场重叠带来的影响 [48].

与在单纯 LN 薄膜上制备的电光调制器相比, 由 LN 薄膜与半导体材料异质结合制备的电光调制器可以同时利用 LN 和半导体材料各自的优良光学特性. 2019 年, He 等 [49] 将基于 LN 的高折射率对比度波导与紧凑的低损耗 Si 电路异质集成, 使 Si 光子学平台的可扩展性与 LN 的出色电光性能结合在一起, 制备了高性能的 M-Z 调制器. 在 1.5 μm 波长下, 该调制器的半波电压长度积为 2.2 V·cm, 耦合损耗为 2.5 dB, 拥有 70 GHz 的电光调制带宽以及高达 112 Gbit/s 的电光调制速率.

此外, 近期 Ahmed 等 [50] 报道了一种由 SiN 和 LN 异质结合集成的 M-Z 电光调制器, 该电光调制器是采用多模干涉耦合器来分离和组合光, 并且能够实现低驱动电压下的有效电光调制. 在 1550 nm 波长下, 其直流半波电压为 0.875 V, 半波电压长度积为 2.11 V·cm, 消光比为 30 dB, 片上光学损耗约为 5.4 dB. Thomaschewski 等 [51] 报道了一种基于 LN 薄膜的等离子体电光定向耦合器, 它由两个在 LN 薄膜上间隔为 350 nm 的条形 Au 纳米电极组成 (如图 7 所示). 其中, Au 纳米电极作为波导可以同时引导传输耦合的电磁模式和施加的电信号, 并由此得到等离激元模式与静电场

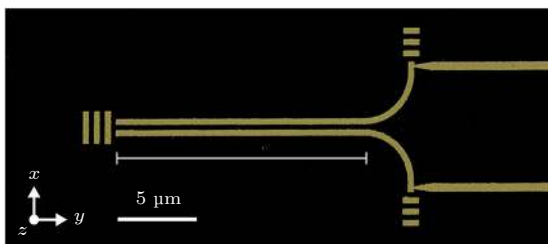


图 7 LNOI 片上等离子体电光定向耦合器的 SEM 图像 [51]
Fig. 7. False-colored SEM image of LNOI plasma electro-optic directional coupler [51].

之间良好的空间重叠, 从而有利于实现紧凑、高效的电光开关和调制功能. 在 1550 nm 波长下, 测得长度为 20 μm 的电光开关可以在 ± 50 V 电压下实现 90% 的调制深度, 其半波电压长度积可以达到 0.3 V·cm.

4.2 非线性光学频率转换器件

LN 具有较高的二阶非线性光学系数, 是重要的非线性光学晶体, 可以实现如二次谐波产生 (second harmonic generation, SHG)、和/差频产生 (sum/difference frequency generation, SFG/DFG)、光学参量放大 (optical parametric amplification, OPA) 等二阶非线性效应. 为了实现有效的频率转换, 相互作用光波的相速度需要尽量相同, 这一点可通过相位匹配 (phase matching, PM)、准相位匹配 (quasi-phase matching, QPM) 来实现. 灵活使用不同的相位匹配方式实现色散补偿, 对实现非线性光学频率转换至关重要. Chen 等 [34] 使用 EBL 技术和 PECVD 技术, 首次通过调控几何色散实现片上 LN 脊形波导与微环谐振腔之间的相位匹配. 在亚微米量级的波导 TM 模中, 观察到转换效率为 $26\% \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 SHG (1550 \rightarrow 775 nm). 此外, Luo 等 [52] 在使用 EBL 技术制备的 LN 微环谐振腔中实现了 1550 nm 的 TM₀₀ 基模与 775 nm 的 TM₂₀ 高阶模之间的相位匹配, 测量得到的转换效率为 $1500\% \cdot \text{W}^{-1}$. 通过调节抽运波长到 780 nm 波段, 该工作在实验中还观察到了通信频段的 DFG. 高度可调谐性的相干光在集成光子学应用领域有十分重要的应用价值. SHG 是一种通过频率转换产生相干光的方法, 但是在传统的非线性光子学器件中, 却很难实现同时具有高转换效率与高可调谐性的 SHG. 最近, Luo 等 [32] 利用 LN 独特的热光双折射效应, 首次在长度只有 8 mm 的 LN 片上波导 (利用 EBL 技术和 RIE 技术制备) 实现了灵活的温度调谐 (0.84 nm/K, 调制范围是 1540—1620 nm), 当抽运波长固定于 1559.06 nm 时, 观察到非线性转换效率为 $4.7\% \cdot \text{W}^{-1}$, 波长为 779.53 nm 的 SHG 输出.

在微纳光子学器件中, 由于光场被压缩到微纳尺寸的结构中, 相对的光密度会大大提升, 非常适合实现多种非线性光学频率转换效应. 例如, Luo 等 [53] 使用 *x* 切的高 *Q* 因子 (1.7×10^6 , 波长 1539.65 nm) 片上 LN 微盘 (使用 EBL 技术和 RIE

技术制备) 实现了 SHG 和自发参量下转换 (self-parametric down conversion, SPDC) 效应. 其中, 当抽运波长为 1549.32 nm 时, 二次谐波波长为 774.66 nm, SHG 转换效率达到 $3.6 \times 10^{-6} \text{ mW}^{-1}$. 而在 774.66 nm 激光的抽运下, 产生的 SPDC 带宽超过 400 nm (1400 → 1590 nm), 其输出的光子对表现出强烈的时间相关性 (随机复合比率为 43.1). 另外, Lin 等^[54]还在使用飞秒激光微加工和 FIB 技术制备的片上 LN 微盘谐振腔中同时产生了级联的 SHG (1547.8 → 773.9 nm) 和三次谐波产生, 转换效率分别为 $9.9\% \cdot \text{mW}^{-1}$ 和 $1.05\% \cdot \text{mW}^{-2}$. 其中, 当抽运激光波长在 1530—1570 nm 范围内连续变化时, 强烈的三次谐波信号出现在 515.9 nm 处, 该三次谐波信号来自于二次谐波和基波之间的级联过程. 此外, Liu 等^[55]通过级联的 cSHG-DFG 效应, 在片上 LN 微盘谐振腔中实现了有效的四波混频 (four-wave mixing, FWM). 图 8(a) 展示了抽运信号为 1534.9 nm 时级联 cSHG-DFG 过程的光谱. 通过改变抽运信号的功率, 研究者获得了闲频光功率随入射功率的变化曲线, 如图 8(b) 所示. 最近, Ye 等^[56]使用 FIB 技术和 HF 湿法刻蚀技术制备了支持高 SFG 转换效率的 LNOI 片上微盘谐振腔. 其 Q 因子为 1.8×10^5 (1536.88 nm 波长), 当抽运波长分别为 1529.76 和 1543.78 nm 时, 可以观察到位于 768.37 nm 的 SFG 峰, 该谐振腔的和频效率为 $2.22 \times 10^{-6} \text{ mW}^{-1}$.

近期, 基于准相位匹配 PPLN 薄膜平台的片上非线性光学频率转换器件的相关研究也取得了一系列进展. 例如, Wolf 等^[57]首次报道了利用 RIE 和 CMP 相结合的技术制备的 PPLN 片上微环谐振腔, 并实现了转换效率为 $9 \times 10^{-4} \text{ mW}^{-1}$

的 SHG (1551 → 775.5 nm). 随后, Chen 等^[58]使用 EBL 和离子束刻蚀技术制备了 PPLN 片上双共振微环谐振腔, 实现了 $230000\% \cdot \text{W}^{-1}$ 的 SHG 转换效率 (1545.56 → 772.78 nm). 随后, Lu 等^[59]利用压电显微镜 (piezo-force-microscopy, PFM) 制备了径向极化的 PPLN 片上双共振微环谐振腔, 实现了高达 $250000\% \cdot \text{W}^{-1}$ 的 SHG (1617.43 → 808.715 nm) 转换效率. 此外, Hao 等^[60]在使用紫外光刻和 RIE 等技术制备的 PPLN 片上微盘谐振腔中实现了转换效率为 $2.2 \times 10^{-6} \text{ mW}^{-1}$ 的 SHG (1546.7 → 773.4 nm). 近期, Hao 等^[61]还报道了使用 PFM 制备的径向极化 PPLN 片上微盘谐振腔. 实验中测得该微盘谐振腔的 Q 因子为 8×10^4 (1550 nm 波长), SHG 转换效率为 $1.44 \times 10^{-5} \text{ mW}^{-1}$ (1541.8 → 770.9 nm). Sua 等^[62]报道了在干法刻蚀制备的 PPLN 片上脊形波导内实现级联 cSHG-DFG, 并在此基础上观察到带宽超过 14 THz 的 OPA, 覆盖了 S, C 和 L 等通信频段, 最大参量增益为 38.3 dB (1550.6 nm 波长). 此外, 在 PPLN 片上波导结构中, Rao 等^[27]报道了在 PPLN 片上脊形波导内实现 $4600\% \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的超高非线性转换效率的 SHG. 最近, Niu 等^[63]利用优化的 PPLN 波导制备技术, 成功制作了长度为 6 mm、极化周期为 4.3 μm 的片上脊形波导, 实验证明该波导可以在通信 S 波段实现转换效率为 $3061\% \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 SHG.

4.3 光频梳

光频梳是能够发射离散的、等间距频率光的光源. 光频梳就像是一把拥有精密刻度的尺子或者是定时器, 其精度在长度上超过纳米, 时间上超过飞

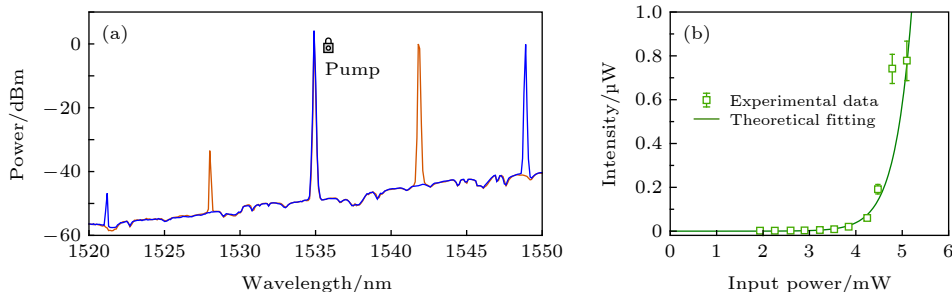


图 8 (a) 级联过程光谱, 其中抽运波长固定在 1534.9 nm, 信号光波长分别位于 1541.8 和 1548.9 nm; (b) LN 微盘中有效的 FWM 过程, FW 闲频光功率依赖性和理论拟合, 信号光功率保持在 5 mW^[55]

Fig. 8. (a) Spectrum of the cascade process: the pump wavelength is fixed at 1534.9 nm, and the signal wavelength is at 1541.8 and 1548.9 nm. (b) Effective FWM process in LN microdisk, FW idler power dependence and theoretical fitting, the signal power is maintained at 5 mW^[55].

秒甚至是阿秒. 因此光频梳在光学通信、精密计量、定时和光谱学等领域具有十分重要的作用. 到目前为止, 宽频谱的光频梳通常在具有强二阶非线性光学性质的光学谐振腔中进行电光相位调制产生. 光频梳产生的另一种方法是在锁模激光器或具有 Kerr 非线性光学性质的光学谐振腔中通过色散控制产生. 目前, 这两种方法都已在 LN 片上光学微腔得以应用并成功实现了宽频谱光频梳的输出.

Zhang 等^[64]通过 EBL 技术和 RIE 技术制备了 LNOI 片上集成的环形谐振腔, 腔内产生的电光频率梳克服了传统光频梳覆盖光谱较窄的缺陷, 使该平台同时具有强的电光响应 (相位调制指数 β 为 1.2π)、超低的光损耗 (0.004 dB/coupler)、共存的微波场和光场以及出色的色散管理能力. 实验中测得的电光频梳齿覆盖了全部 L 通信波段的频率范围 (多于 900 条梳齿线, 间隔约 10 GHz), 并且证明了通过色散控制可以实现跨倍频程光频梳的输出. 结果表明, 集成的片上 LN 电光频率梳能够产生宽频谱且性能稳定的梳状光谱. 图 9(a) 展示了 LN 片上微环谐振腔的显微照片, 产生的电光频率梳光谱如图 9(b) 所示.

此外, Wang 等^[65]首次报道了 LN 片上 Kerr 频率梳的生成、滤波以及电光调制. 该工作使用高

Q 因子 (6.6×10^5 , 1580 nm 波长) LN 片上微环谐振腔 (利用 EBL 技术、RIE 技术和湿法刻蚀制备), 并通过色散管理产生宽频谱的 Kerr 频率梳, 再使用可编程 Add-drop 滤波器选择一条梳齿, 实现所选梳齿的强度调制^[65]. 图 10(a) 和图 10(b) 展示了在半径为 80 μm 、顶部宽度为 1.3 μm 的 LN 片上微环谐振腔中宽频谱频率梳产生, 梳状线间距约为 2 nm. 其中, 测得的 TM 偏振光频梳谱宽约 300 nm (如图 10(a) 所示), TE 偏振频率梳频谱跨度可覆盖 1400—2100 nm 波段 (如图 10(b) 所示). 为了实现滤波和快速电光调制, 该工作采用可编程 Add-drop 滤波器与频率梳发生器集成的方式. 其中, Add-drop 滤波器由另外一个 LN 片上微环谐振腔组成 (如图 10(c) 所示), 其自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 要比频率梳发生器大 1%, 其轻微失谐的 FSR 利用 Vernier 效应可以在较宽的光学波段上选择一条频谱线. 当输入信号与滤波器谐振/失谐时, 特定波长处的光功率将传输到滤波器的 drop/through 端口, 从而实现光频梳信号的滤波. 另外, 将 LN 片上微环滤波器与金属电极集成, 通过电光效应快速有效地调整滤波器输出频率, 也可以同时实现输出信号强度的调制^[65].

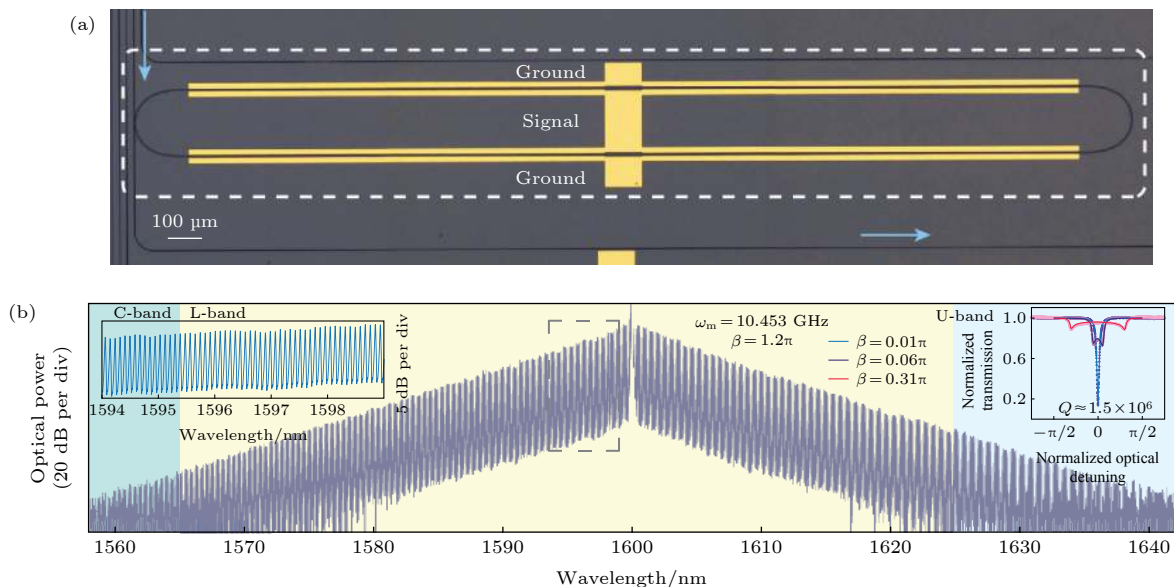


图 9 (a) LN 微环谐振腔的显微照片, 黑线是蚀刻的光波导, 黄色区域是金电极; (b) 从微环谐振腔产生的 EO 频率梳的输出频谱, 左插图显示了几条梳齿的放大图, 梳齿之间的功率变化约为 0.1 dB, 右插图显示了几个不同调制指数 (β) 的透射光谱^[64]

Fig. 9. (a) Photograph of the LN microring resonator, the black line is an etched optical waveguide, and the yellow area is a gold electrode. (b) The output spectrum of the EO frequency comb generated from the micro-ring resonator. The left illustration shows an enlarged view of several comb teeth. The power variation between the comb teeth is about 0.1 dB. The right inset shows the transmission spectra of several different modulation indices (β)^[64].

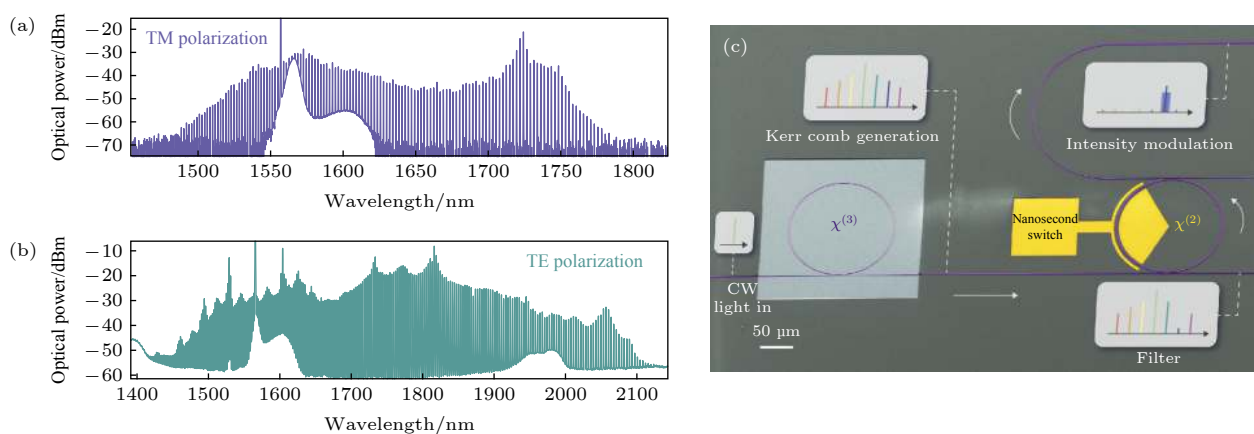


图 10 (a), (b) 宽带频率梳的产生, 即当抽运功率为 300 mW 且输入信号与 (a) TM 模和 (b) TE 模共振时, 产生的频率梳频谱; (c) LN 片上纳米光子学回路的 SEM 图像^[65]

Fig. 10. (a), (b) Generation of a broadband frequency comb: The frequency comb spectrum is generated when the pump power is 300 mW and the input signal resonates with the (a) TM mode and the (b) TE mode; (c) SEM image of nanophotonic circuit on LN film^[65].

利用锁模激光器产生超连续谱对于许多基于光频梳的应用来说至关重要. 针对此, Yu 等^[66]利用 LN 本身的二阶和三阶非线性光学效应, 在使用 EBL 技术和 RIE 技术制备的 LN 薄膜片上脊形波导中得到了相干超连续谱. 在 100 pJ 级脉冲激光 (1506 nm 波长) 的激发下, 该工作在 0.5 cm 长的 LN 脊形波导中首次实现了超过跨两倍频程的带宽. 同时, 通过对波导的色散控制可以实现相干超连续谱和 SHG 之间的频谱重叠, 从而可以使用单个波导直接检测载波-包络偏移频率 (f_{CEO}).

4.4 光力学和声光调制器件

腔光力学 (cavity optomechanics) 在近年来正逐渐成为热点研究领域, 它探索了在光辐射压力下腔内光场与微机械系统之间的相互作用. 由于 LN 同时具有较宽带隙 (约 3.5 eV) 和优良的非线性光学与力学特性, 使其成为出色的腔光力学研究平台, 并且为光子学、电子学以及力学器件的集成提供了可能. 例如, Jiang 和 Lin^[67]报道了在使用 EBL 技术和湿法刻蚀制备的片上 LN 微盘谐振腔中实现 3.6×10^{12} (1498 nm 波长) 的高频率-品质因子乘积 ($f \cdot Q$). 此外, LN 光子晶体微腔具有严格的光学模式限制, 使其腔体内的光场与器件微结构的机械运动可实现很强的光力学耦合, Liang 等^[14]在利用等离子体刻蚀的 LN 片上光子晶体微腔内实现了高达 1.47×10^{12} (1511 nm 波长) 的 $f \cdot Q$.

常见的声光器件主要分为两类: 体声光器件和表面声光器件. 在表面声光器件中, 声波为沿介质

表面传播的声表面波, 光波则为在光波导中传输的光波, 因此称为声光效应波导器件. 此时声光介质与压电材料融为一体, 衬底材料必须同时具有声光效应和压电效应. 常用的声光材料为 y 切 LN, 这是因为其具有较高的压电系数. 例如, Cai 等^[68]首次在 LN 薄膜上制备了片上声光调制器, 该调制器由叉指换能器 (interdigital transducers, IDT)、反射器和光波导组成 (如图 11(a)–(d) 所示). 通过测量 M-Z 干涉仪中不同阶的调制信号, 该工作首次实验表征了 LN 薄膜的光弹性系数, 结果表明 LNOI 薄膜保持了 LN 优良的声光性质. 同时, 研究人员在低损耗 (< 0.7 dB/cm, 1601.53 nm 波长处)、高 Q 因子 (5.32×10^5 , 1601.53 nm 波长处) 的片上光学谐振腔中实现了高效的声光调制, 与 M-Z 干涉仪型声光调制器相比, 其调制强度提高了 10 dB.

4.5 光学接口

目前, 如何实现 LN 片上光子学器件与耦合光纤之间高效率的光学耦合是基于 LNOI 的集成光子学器件在实际应用中面临一个挑战. 对于包括电光调制、非线性光学频率转换、光频梳产生等一系列光学效应来讲, 器件性能的高低在很大程度上都取决于其所能利用到的光学功率 (也即光学耦合器的耦合效率). 为了弥补在光纤端面耦合实际操作中光纤和 LN 片上器件的光学模式失配, 研究人员设计并研制了多种光纤的端面结构. 然而在大多数情况下, LNOI 集成芯片系统的光纤-芯片的耦合损

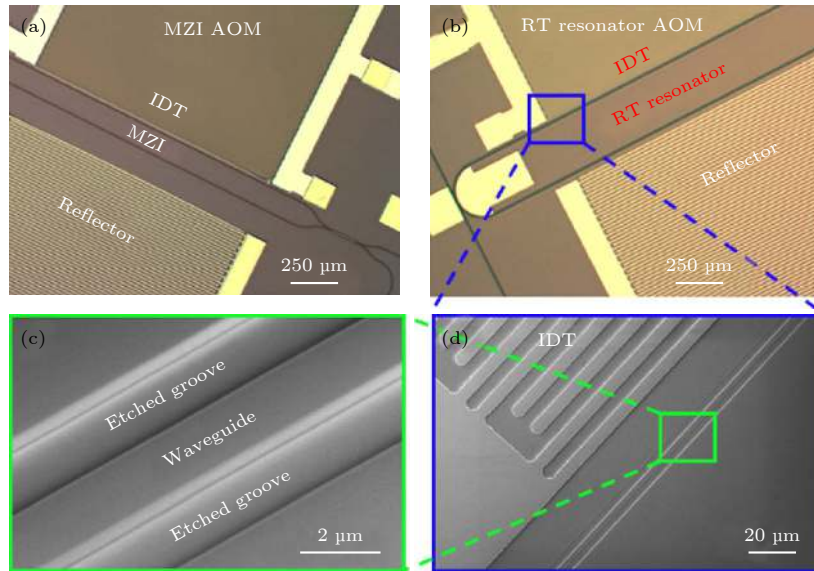


图 11 (a) M-Z 干涉仪型和 (b) 谐振腔型声光调制器的显微镜照片; (c) 光波导的 SEM 图像; (d) IDT 区域的 SEM 图像^[68]
 Fig. 11. (a) Micrograph of M-Z interferometer type and (b) resonator type acousto-optic modulator; (c) SEM image of the optical waveguide; (d) SEM image of the IDT region^[68].

耗仍大于 10 dB/facet^[5]. 近期, Yao 等^[69] 通过优化光纤端面的尺寸并利用 CMP 技术和 FIB 技术制备了锥形单模光纤 (如图 12(a) 所示), 实现了光纤模式与 LN 片上波导模式之间的高效耦合, 最低耦合损耗可达 1.32 dB/facet (1550 nm 波长).

改变 LONI 片上波导的光学模式尺寸和分布也是改善耦合模式匹配并降低耦合损耗的一种有效方案. He 等^[2] 首次利用 EBL 技术、RIE 技术和 PECVD 技术制备了 LNOI 片上双层锥形模式转换器 (如图 12(b) 所示), 能够将 LN 片上脊形波导内尺寸较小的模式转换为近似圆形对称分布的导波模式, 从而在输入光纤和脊型波导之间实现更好的光学模式尺寸重叠和折射率匹配, 并实现了超低的光纤-芯片耦合损耗 (1.7 dB/facet, 1550 nm 波长).

传统的光栅耦合器为光纤与 LN 片上光子器

件之间的光学耦合提供了一种较为便利和通用的方法. 尽管光栅耦合器一般情况下本身具有较高的耦合损耗和有限的光谱适用范围, 但由于光栅耦合器本身对于光学准直的要求并不严苛, 理论上可以在 LN 薄膜上任何地方都能够实现较为有效的光学耦合, 因此还是受到一些研究人员的青睐. 最初设计并制备的 LNOI 片上光栅耦合器由于受到其加工工艺 (干法刻蚀) 的影响, 耦合损耗约为 12 dB^[70]. 随后研究人员通过对微纳加工制备工艺以及光栅结构设计的不断优化, 将 LN 片上光栅的耦合损耗降低到 6.9 dB^[71]. 近期, Krasnokutskaya 等^[72] 报道了通过使用 FIB 技术在 *z* 切 LN 薄膜上制备的高效光栅耦合器, 可用于在光纤和单模波导之间进行垂直耦合, 其在通信 C, L 波段 (1520—1630 nm) 的耦合效率可达到 44.6%/coupler. 此外, Khan 等^[73] 提出了一种基于异质结合技术的垂直

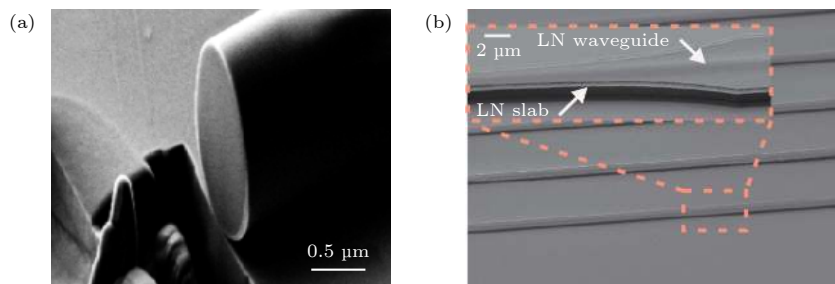


图 12 (a) 锥形单模光纤的 SEM 图像^[69]; (b) 双层锥形模式转换器的 SEM 图像^[2]
 Fig. 12. (a) SEM image of single mode tapered fiber^[69]; (b) SEM image of bilayer tapered mode converter^[2].

光栅耦合器制备方案, 该器件位于 LN 薄膜上的 SiO₂ 层内, 由 As₂S₃ 构成, 耦合效率可达到 4 dB/coupler (1550 nm 波长), 该制备方案的优势在于可以同时利用 As₂S₃ 的声光特性以及 LN 优良的电光、声学特性, 又避免了直接对 LN 薄膜进行加工, 降低了制备成本。

5 总结和展望

本文综述了 LNOI 薄膜片上光子学器件的最新研究进展. 基于现阶段高品质、大尺寸的 LNOI 薄膜技术, 结合多种先进的微纳加工工艺, 多种类型的高性能微纳光学元件在 LNOI 薄膜平台上已经实现, 如光波导、光学微腔、光子晶体等, 诸多片上光子学功能性器件如电光调制器、非线性光学频率转换器、光频梳产生器、光力学器件和声光调制器等由此也得到了迅猛发展. 随着加工和制备工艺的提升以及生产成本不断降低, LNOI 平台在多功能集成光子学领域具有良好的发展前景. 例如, 在高集成量子器件方面, LNOI 薄膜平台在单光子源、光子波长转换以及量子存储等方面具有极大的应用潜力; 在可见光和中红外领域, LNOI 平台还可以与传感器、探测器等应用相结合; 此外, LN 可以掺杂多种活性离子 (如稀土离子 Er, Nb, Tm 等), 掺杂 LNOI 薄膜及新型有源器件的研究也是一个未来的热点方向, 在光通信系统、光量子存储及紧凑光源方面有重要的应用前景. 总之, 基于 LNOI 薄膜的微纳光学和集成光子学正处于快速发展阶段, 结合 LN 本身的多功能性和更加丰富的微纳加工工艺, 类型更加多样、结构更加复杂的多功能集成光子学系统有望在 LNOI 薄膜平台上得以实现.

参考文献

- [1] Desiatov B, Shams A A, Zhang M, Wang C, Lončar M 2019 *Optica* **6** 380
- [2] He L Y, Zhang M, Shams A A, Zhu R R, Wang C, Lončar M 2019 *Opt. Lett.* **44** 2314
- [3] Nikogosyan D N 2005 *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey* (New York: Springer Science + Business Media) pp35-53
- [4] Poberaj G, Hu H, Sohler W, Günter P 2012 *Laser Photonics Rev.* **6** 488
- [5] Boes A, Corcoran B, Chang L, Bowers J, Mitchell A 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700256
- [6] Stepanenko O, Quillier E, Tronche H, Baldi P, Micheli M D 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 1557
- [7] Bruel M 1995 *Electron. Lett.* **31** 1201
- [8] Ramadan A T, Levy M, Osgood J R M 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1407
- [9] Roth R M, Djukic D, Lee Y S, Jr R M O, Bakhru S, Laulicht B, Dunn K, Bakhru H, Wu L Q, Huang M B 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 112906
- [10] Rabiei P, Gunter P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4603
- [11] Djukic D, Cerda P G, Roth R M, Jr R M O, Bakhru S, Bakhru H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 171116
- [12] Wang J, Zhu B W, Hao Z Z, Bo F, Wang X L, Gao F, Li Y G, Zhang G Q, Xu J J 2016 *Opt. Express* **24** 21869
- [13] Wang L, Wang C, Wang J, Bo F, Zhang M, Gong Q H, Lončar M, Xiao Y F 2018 *Opt. Lett.* **43** 2917
- [14] Liang H X, Luo R, He Y, Jiang H W, Lin Q 2017 *Optica* **4** 1251
- [15] Wang M, Xu Y X, Fang Z W, Liao Y, Wang P, Chu W, Qiao L L, Lin J T, Fang W, Cheng Y 2017 *Opt. Express* **25** 124
- [16] Fang Z W, Lin J T, Wang M, Liu Z M, Yao J P, Qiao L L, Cheng Y 2015 *Opt. Express* **23** 27941
- [17] Song J X, Lin J T, Tang J L, Liao Y, He F, Wang Z H, Qiao L L, Sugioka K, Cheng Y 2014 *Opt. Express* **22** 14792
- [18] Jia Y C, Chen F 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 012302
- [19] Chen F, Vázquez de Aldana J R 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 251
- [20] Wu R B, Zhang J H, Yao N, Fang W, Qiao L L, Fang C, Lin J T, Cheng Y 2018 *Opt. Lett.* **43** 4116
- [21] Zheng Y L, Fang Z W, Liu S J, Cheng Y, Chen X F 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 253902
- [22] Fang Z W, Xu Y X, Wang M, Qiao L L, Lin J T, Fang W, Cheng Y 2017 *Sci. Rep.* **7** 45610
- [23] Rao A, Fathpour S 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 8200912
- [24] Rao A, Fathpour S 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 3400114
- [25] Honardoost A, Gonzalez G F C, Khan S, Malinowski M, Rao A, Tremblay J E, Yadav A, Richardson K, Wu M C, Fathpour S 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 4500909
- [26] Gonzalez G F C, Malinowski M, Honardoost A, Fathpour S 2019 *Appl. Opt.* **58** D1
- [27] Rao A, Abdelsalam K, Sjaardema T, Honardoost A, Camacho G G F, Fathpour S 2019 *Opt. Express* **27** 25920
- [28] Wang T, Ng D K T, Ng S K, Toh Y T, Chee A K L, Chen G F R, Wang Q, Tan D T H 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 498
- [29] Honardoost A, Juneghani F A, Safian R, Fathpour S 2019 *Opt. Express* **27** 6495
- [30] Rao A, Chiles J, Khan S, Toroghi S, Malinowski M, Camacho G G F, Fathpour S 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 111109
- [31] Rao A, Patil A, Chiles J, Malinowski M, Novak S, Richardson K, Rabiei P, Fathpour S 2015 *Opt. Express* **23** 22746
- [32] Luo R, He Y, Liang H X, Li M X, Lin Q 2018 *Optica* **5** 1006
- [33] He Y, Liang H X, Luo R, Li M X, Lin Q 2018 *Opt. Express* **26** 16315
- [34] Chen J Y, Sua Y M, Fan H, Huang Y P 2018 *OSA Continuum* **1** 229
- [35] Chen J Y, Sua Y M, Ma Z H, Tang C, Li Z, Huang Y P 2019 *OSA Continuum* **2** 2914
- [36] Reich M, Korte F, Fallnich C, Welling H, Tünnermann A 1998 *Opt. Lett.* **23** 1817
- [37] Wolf R, Breunig I, Zappe H, Buse K 2018 *Opt. Express* **26** 19815
- [38] Wang M, Wu R B, Lin J T, Zhang J H, Fang Z W, Chai Z F,

- Cheng Y 2019 *Quantum Eng.* **1** 1
- [39] Fang Z W, Haque S, Lin J T, Wu R B, Zhang J H, Wang M, Zhou J X, Rafa M, Tao L, Cheng Y 2019 *Opt. Lett.* **44** 1214
- [40] Luo R, Jiang H W, Liang H X, Chen Y P, Lin Q 2017 *Opt. Lett.* **42** 1281
- [41] Jiang H W, Luo R, Liang H X, Chen X F, Chen Y P, Lin Q 2017 *Opt. Lett.* **42** 3267
- [42] Zhang M, Wang C, Cheng R, Shams A A, Lončar M 2017 *Optica* **4** 1536
- [43] Fang Z W, Yao N, Wang M, Lin J T, Zhang J H, Wu R B, Qiao L L, Fang W, Lu T, Cheng Y 2017 *Int. J. Optomechatronics* **11** 47
- [44] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, Riccardo D, Günter P 2007 *Nat. Photonics* **1** 407
- [45] Ren T, Zhang M, Wang C, Shao L B, Reimer C, Zhang Y, King O, Esman R, Cullen T, Lončar M 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 889
- [46] Jin M W, Chen J Y, Sua Y M, Huang Y P 2019 *Opt. Lett.* **44** 1265
- [47] Wang C, Zhang M, Stern B, Lipson M, Lončar M 2018 *Opt. Express* **26** 1547
- [48] Wang C, Zhang M, Chen X, Bertrand M, Shams A A, Chandrasekhar S, Winzer P, Lončar M 2018 *Nature* **562** 101
- [49] He M B, Xu M Y, Ren Y X, Jian J, Ruan Z L, Xu Y S, Gao S Q, Sun S H, Wen X Q, Zhou L D, Liu L, Guo C J, Chen H, Yu S Y, Liu L, Cai X L 2019 *Nat. Photonics* **13** 359
- [50] Ahmed A N R, Nelan S, Shi S Y, Yao P, Mercante A, Prather D W 2020 *Opt. Lett.* **45** 1112
- [51] Thomaschewski M, Zenin V A, Wolff C, Bozhevolnyi S I 2020 *Nat. Commun.* **11** 748
- [52] Luo R, He Y, Liang H X, Li M X, Ling J W, Lin Q 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 034026
- [53] Luo R, Jiang H W, Rogers S, Liang H X, He Y, Lin Q 2017 *Opt. Express* **25** 24531
- [54] Lin J T, Yao N, Hao Z Z, Zhang J h, Mao W B, Wang M, Chu W, Wu R B, Fang Z W, Qiao L L, Fang W, Bo F, Cheng Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 173903
- [55] Liu S J, Zheng Y L, Fang Z W, Ye X N, Cheng Y, Chen X F 2019 *Opt. Lett.* **44** 1456
- [56] Ye X N, Liu S J, Chen Y P, Zheng Y L, Chen X F 2020 *Opt. Lett.* **45** 523
- [57] Wolf R, Jia Y C, Bonaus S, Werner C S, Herr S J, Breunig I, Buse K, Zappe H 2018 *Optica* **5** 872
- [58] Chen J Y, Ma Z H, Sua Y M, Li Z, Tang C, Huang Y P 2019 *Optica* **6** 1244
- [59] Lu J J, Surya J B, Liu X W, Bruch A W, Gong Z, Xu Y T, Tang H X 2019 *Optica* **6** 1455
- [60] Hao Z Z, Zhang L, Gao A, Mao W B, Lyu X D, Gao X M, Bo F, Gao F, Zhang G Q, Xu J J 2018 *Sci. China, Ser. G* **61** 114211
- [61] Hao Z Z, Zhang L, Mao W B, Gao A, Gao X M, Gao F, Bo F, Zhang G Q, Xu J J 2020 *Photonics Res.* **8** 311
- [62] Sua Y M, Chen J Y, Huang Y P 2018 *Opt. Lett.* **43** 2965
- [63] Niu Y F, Lin C, Liu X Y, Chen Y, Hu X P, Zhang Y, Cai X L, Gong Y X, Xie Z D, Zhu S N 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116**
- [64] Zhang M, Buscaino B, Wang C, Shams A A, Reimer C, Zhu R R, Kahn J M, Lončar M 2019 *Nature* **568** 373
- [65] Wang C, Zhang M, Yu M J, Zhu R R, Hu H, Lončar M 2019 *Nat. Commun.* **10** 1
- [66] Yu M J, Desiatov B, Okawachi Y, Gaeta A L, Lončar M 2019 *Opt. Lett.* **44** 1222
- [67] Jiang W C, Lin Q 2016 *Sci. Rep.* **6** 36920
- [68] Cai L T, Mahmoud A, Khan M, Mahmoud M, Mukherjee T, Bain J, Piazza G 2019 *Photonics Res.* **7** 1003
- [69] Yao N, Zhou J X, Gao R H, Lin J T, Wang M, Cheng Y, Fang W, Tong L M 2020 *Opt. Express* **28** 12416
- [70] Mahmoud M, Ghosh S, Piazza G 2015 *CLEO: Science and Innovations* San Jose, USA, May 10–15, 2015 pSW41.7
- [71] Chen Z H, Peng R H, Wang Y w, Zhu H B, Hu H 2017 *Opt. Mater. Express* **7** 4010
- [72] Krasnokutskaya I, Chapman R J, Tambasco J L J, Peruzzo A 2019 *Opt. Express* **27** 17681
- [73] Khan M, Bain J A, Piazza G 2019 *Opt. Lett.* **44** 4558

REVIEW

Research progress of photonics devices on lithium-niobate-on-insulator thin films*

Li Geng-Lin Jia Yue-Chen[†] Chen Feng[‡]*(State Key Laboratory of Crystal Materials, School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)*

(Received 27 February 2020; revised manuscript received 7 May 2020)

Abstract

Lithium niobate (LiNbO_3 , LN) crystals have excellent electro-optical and nonlinear optical properties, and they have been regarded as one of the most promising materials for constructing the multifunctional photonic integrated systems. Due to the excellent optical properties of LN crystal, the emerging LN thin film technology has received great attention in the research of integrated photonics in recent years. With the help of advanced micro-nano fabrication technologies, many high-performance lithium niobate integrated photonic devices have been realized.

Integrated photonic platform can incorporate high-density, multi-functional optical components, micro-nano photonics structures, and optical materials on a monolithic substrate, which can flexibly implement a variety of photonic functions. At the same time, it also provides a low-cost, small-size, and scalable solution for miniaturizing and integrating the free-space optical systems. Photonic chips based on LN have been widely used in fast electro-optic modulation, nonlinear optical frequency conversion and frequency comb generation. In particular, periodically poled lithium niobate (PPLN) based on quasi-phase matching has gradually become a mature integrated photonic platform and has been widely used in the field of nonlinear optics.

As wafer bonding technology is matured, the lithium-niobate-on-insulator (LNOI) thin films made by the “smart-cut” process have been commercialized. The thickness of the LN film on a Si or SiO_2 substrate can reach several hundred nanometers, and good uniformity in film thickness at a larger size (3 inches) can be ensured. With the development of micro-nano fabrication technologies, the quality and functions of photonic devices on LNOI chips have been significantly improved in recent years, and research on integrated photonic devices based on LNOI has also been developed rapidly in recent years.

In this article we briefly review the development of LNOI technology, introducing the applications of several advanced micro-nano fabrication techniques and summarizing their applications in the micro-/nano-fabrication of on-chip photonic devices based on LNOI wafers. In addition, in this article we also summarize the latest advances in the functionality of LNOI on-chip photonic devices and give a short prospective on their future applications in integrated photonics.

Keywords: lithium niobate thin film, micro-nano fabricating technology, nonlinear optics, integrated photonics device

PACS: 78.20.-e, 42.82.Cr, 42.65.-k, 42.82.-m

DOI: [10.7498/aps.69.20200302](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200302)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2019YFA0705000), the “Taishan Scholars Youth Expert Program” of Shandong Province, China, and the “Qilu Young Scholar Program” of Shandong University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: yuechen.jia@sdu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: drfchen@sdu.edu.cn