

超低损耗铌酸锂光子学

乔玲玲¹, 汪旻², 伍荣波^{1,3}, 方致伟², 林锦添¹, 储蔚², 程亚^{1,2*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;²华东师范大学物理与电子科学学院极端光机电实验室, 上海 200241;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 铌酸锂光子集成是推动未来高速光通信和光信息处理领域变革性发展的重要前沿技术。介绍了利用铌酸锂光子芯片制造技术制备集成光路中关键光子结构与器件的最新研究进展。得益于单晶铌酸锂晶体的高非线性系数和强电光效应, 利用制备的高性能铌酸锂光子器件演示了多种高效的非线性光学过程。

关键词 光学器件; 铌酸锂; 飞秒激光; 微谐振腔; 光波导; 光损耗; 集成光路

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823012

Ultra-Low Loss Lithium Niobate Photonics

Qiao Lingling¹, Wang Min², Wu Rongbo^{1,3}, Fang Zhiwei²,Lin Jintian¹, Chu Wei², Cheng Ya^{1,2*}¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Extreme Optoelectromechanics Laboratory, School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Lithium niobate on insulator (LNOI) provides the critical platform for the next-generation photonic integrated circuits demanded by the high-speed optical communications and optical information processing in the future. The recent advances in fabrication of a variety of key photonic structures and devices using LNOI chip manufacturing technology are reviewed. The fabricated LNOI photonic devices are used for demonstrating highly efficient and tunable nonlinear optical processes thanks to the large nonlinear coefficient as well as the strong electro-optic property of monocrystalline LNOI.

Key words optical devices; lithium niobate; femtosecond laser; microresonator; optical waveguide; optical loss; photonic integrated circuits

OCIS codes 130.3730; 130.3120; 140.3390; 140.4780

1 引言

人类文明的进步很大程度上得益于信息通信与处理技术的发展。目前, 光纤通信技术已使以接近光速传递信息成为可能, 而半导体技术则促进了超

大规模集成电路的发展, 促使信息处理的速度和效率达到了前所未有的高度。然而, 随着信息产业中大数据、人工智能、量子计算等新兴变革性高技术的不断涌现, 人类对信息获取与处理能力提出了更高的要求。集成光路(PICs)有望成为一种极具竞争

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-06

基金项目: 国家科技部重点研发计划项目(2019YFA0705000)、国家自然科学基金(11734009)、中科院先导(XDB 16030300)

* E-mail: ya.cheng@siom.ac.cn

力的技术手段,可为信息产业提供具有更高速度与更低功耗的先进芯片的支撑平台。自1969年集成光路的概念被提出以来^[1],科学家们就一直为实现大规模的光子芯片而进行不懈的努力,比较典型的技术途径有二氧化硅平面集成光路、硅基集成光路等。但标准化的制造路线至今仍未确立。其主要原因是光子芯片中的核心结构光波导,往往需要同时具备超低传输损耗、小弯曲半径、高调制效率这三项重要特征。对于传统光子材料和加工技术手段而言,同时满足这三方面要求极其困难。

二氧化硅平面集成光路的工艺流程分以下步骤^[2]:1)采用具有较高沉积速率的火焰水解沉积法在硅片上沉积一层白色的二氧化硅精细颗粒,这层颗粒经高温处理后变成透明石英玻璃膜,形成厚度可大于30 μm的波导下包层;2)利用火焰水解沉积和高温处理,在下包层上生长出掺杂GeO₂的高折射率波导芯层,并在波导芯层上利用光刻与反应离子束刻蚀制备出光波导结构;3)采用火焰水解沉积和高温处理来制备包覆波导芯的上包层。由于上下包层都由纯熔融石英组成,而波导芯部分则因掺杂了GeO₂而具有稍高的折射率,因此可以形成低损耗的光子回路。

该技术方案中,波导与单模光纤具有相同的结构设计和材料组分,全面继承了光纤所具有的优良特性,故可获得超低的传输与耦合损耗。此外,在加工波导的工艺中,离子束干法刻蚀可以将波导侧壁的粗糙度控制在纳米量级,远远小于波导中的传输光波长;再加上波导芯和包层之间的折射率差较小,可以有效抑制由表面粗糙度引起的散射损耗。尽管如此,二氧化硅平面集成光路仍存在两方面主要的缺陷:第一,二氧化硅的非线性系数和电光系数都较低,调控难度大,可实现的功能器件种类受限;第二,通过化学组分调控实现的波导芯结构同样具有折射率变化较小、波导弯曲半径过大的缺点,也不适用于大规模的光子集成应用。

硅基集成光路的加工通常是借助深紫外光刻和干法刻蚀等工艺来实现。1)将光刻胶旋涂在绝缘体上的硅(SOI)晶片上进行预烘;2)将晶片送到光刻机,通过带图案的掩模对光刻胶曝光;3)在平版印刷光刻之后,对光刻胶进行后烘,并进行显影;4)将显影后的光刻胶作为硅刻蚀的掩模,对顶部的硅薄膜层进行离子刻蚀;5)剥离光刻胶,留下紧贴在二氧化硅层上的纳米硅线波导结构。通常对刻蚀产生的纳米硅线还要进行一些后处理,如再沉积一层二氧化

硅作为波导的上包层等^[3-4]。这种硅线波导具有亚微米量级的模场尺寸和微米量级的弯曲半径,非常有利于实现高密度的光子集成。

得益于成熟的半导体光刻技术及其工业化产能,硅基集成光路具有大规模、低成本的工艺优势。此外,硅的折射率很高,在1550 nm波长约为3.5,硅和空气之间如此高的折射率差使得硅纳米线波导的弯曲半径可小到几个微米,从而可以实现极高密度的光子集成。利用该技术已制备了维度达15×15的可编程路径编码多维纠缠系统,能够以极高的精度、可控性和通用性实现全片上多维纠缠的产生、操控与测量^[5]。尽管如此,硅基集成光路仍存在一些与硅材料自身特性相关的缺陷,如:硅晶体没有电光系数,因此通常只能通过热光效应对硅线波导进行调控,能耗较高且响应时间较慢,通常调制带宽为50~60 GHz;此类硅线波导的损耗仍然较大,典型的传输损耗约在1 dB/cm量级。

相当长的一段历史时期,种类繁多的光子芯片都得到了较为深入的研究,包括石英玻璃光子芯片^[6-9]、聚合物光子芯片^[10-12]、以硅为代表的半导体光子芯片^[13-16]等。这些光子芯片技术均有各自的优势与不足。例如:石英玻璃光子芯片具有低成本与超低损耗的优势,然而,因其转弯半径过大,存在集成度难以提升的问题;聚合物光子芯片具有成本低廉、制备方便等优点,然而其调制效率与稳定性有待提高,损耗有待减小;以硅为代表的半导体光子芯片具有制造工艺成熟、成本较低等优势,然而对半导体材料进行高速光调制需借助载流子效应,故存在损耗与色散等问题。

以上示例表明,实现高质量的大规模集成光子芯片需要优越的材料特性和先进的加工手段完美结合。铌酸锂(LN)晶体具有宽的透射窗口(0.35~5.00 μm)、高的非线性系数($\chi^{(2)}=30$ pm/V)、高的折射率(~ 2.2)和大的电光系数($r_{33}=30.8 \times 10^{12}$ m/V)等优异特性,是光子集成器件衬底材料的重要候选者^[17-22],被誉为“光子学中的硅”。表1对比了铌酸锂薄膜(LNOI)与几种典型的光子集成器件衬底材料的性能^[23]。我国科学家在铌酸锂薄膜技术的发展与产业化方面走在世界前列,已有全球知名的铌酸锂薄膜品牌(NanoLN),这为高品质铌酸锂光子器件的制备奠定了重要材料基础^[24]。将铌酸锂晶体材料与合适的加工技术相结合,可以实现多功能的高品质铌酸锂光子结构的制备,进而为光子芯片提供高性能的核心器件^[25-38]。然而长期

以来,对于铌酸锂衬底的光子结构制备一直非常困难,这主要是由于铌酸锂晶体具有稳定的物理与化学特性,无法像类似半导体光刻技术那样对其进行精密刻蚀。在过去的不到十年中,国际上发展了三条重要的铌酸锂光子芯片制造技术路线,能够用于获得高品质、具有实用意义的光子芯片原型器件。这三种技术路线分别为飞秒激光直写结合聚焦离子

束刻蚀技术、电子束曝光结合离子刻蚀技术,以及飞秒激光光刻辅助化学机械抛光技术。本文首先介绍了这三种典型的铌酸锂光子芯片制造技术路线;随后展示了在制备超低损耗铌酸锂光子器件方面的最新成果;最后展示了高品质铌酸锂光子器件中的非线性光学效应。

表 1 典型光子集成平台对比^[23]Table 1 Comparison between typical photonic integrated platforms^[23]

Material	SOI	GaAs	Ti:LN	LNOI
Index contrast	1.5	0.1	0.04	0.7
Propagation loss / (dB · cm ⁻¹)	2	>3	0.1	0.027
Coupling loss	Moderate	High	Low	Moderate
Support of high optical power	No	No	Yes	Yes
Switching speed /GHz	~50	>50	>100	>100
Switching power consumption	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
Integrated lasers	Heterogeneous	Yes	No	Rare-earth-doped
Integrated detectors	Yes	Yes	No	Heterogeneous integration
Mass production	Cheap	Moderate	Expensive, limited wafer size	Expensive

2 飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀

飞秒激光由于具有显著降低的热效应、可突破衍射极限的加工精度、可对透明材料内部进行三维加工等独特优势,被广泛用于微纳加工领域。2015年,利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀来制备高品质铌酸锂微腔的技术路线被首次提出,同时成功地实现了品质因子(Q值)超过 10^5 的微腔的制备,突破了当时国际最高纪录^[28-29]。该方案使用铌酸锂薄膜/二氧化硅/铌酸锂衬底的材料作为样品,如图1(a)所示,主要技术步骤包括:1)将铌酸锂薄膜样品置入水中,利用飞秒激光在薄膜晶圆上烧蚀出微盘轮廓;2)使用聚焦离子束(FIB)对微盘侧壁进行研磨抛光,以降低侧壁散射损耗;3)将样品放入质量分数为5%的氢氟酸(HF)溶液中进行化学腐蚀,选择性地去除铌酸锂薄膜下方的二氧化硅层,在铌酸锂圆盘下形成二氧化硅支柱;4)通过高温退火,减少了铌酸锂微盘的晶格损伤,降低了圆盘内部的散射损耗,提高了微盘Q值。

在具体步骤上,飞秒激光烧蚀后获得直径约 $59\ \mu\text{m}$ 、厚度约 $15\ \mu\text{m}$ 的圆盘轮廓,其扫描电镜图(SEM)如图1(b)所示,激光烧蚀后的圆盘侧壁粗糙度约为几十纳米,不能满足高Q值微腔的应用。聚焦离子束刻蚀后样品的扫描电镜图如图1(c)所示,

圆盘直径减小到 $55\ \mu\text{m}$,圆盘边缘高度平滑。为形成独立微腔(即由微基座支撑的薄盘),在质量分数为5%的氢氟酸溶液中选择性地腐蚀二氧化硅层,以形成铌酸锂微腔的支柱。图1(d)为化学腐蚀后形成的直径为 $55\ \mu\text{m}$ 的部分悬空微腔的扫描电镜俯视图,插图为侧视图,可以清楚地看到铌酸锂微盘和基底之间的间隙为 $2\ \mu\text{m}$,铌酸锂微腔的厚度为 $700\ \text{nm}$ (取决于使用的薄膜厚度)。经测量,退火处理后,铌酸锂薄膜微腔的品质因子在 $1553.83\ \text{nm}$ 波段高达到 2.5×10^5 [图1(e)],该数值为当时国际最高纪录。随后,经过工艺优化,该技术路线可将Q值进一步提高至 9.6×10^6 ^[39]。

该项铌酸锂光子结构加工技术不仅可以加工单个光子结构,还可以实现多个光子结构的集成。图2展示了利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术制备的几个集成光子结构^[40-42]。图2(a)和图2(b)是微腔与波导集成的光学显微图和扫描电镜图(俯视图)。由于聚焦离子束具有高的加工精度,微腔与波导的间隔仅为 $162.5\ \text{nm}$ 。该间隔保证了微腔与波导的高效率耦合(近临界耦合)。可调谐激光经过此波导耦合到微腔,测得微腔的品质因子为 1.67×10^5 。图2(d)是制备出的直径分别为 $35\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$ 的铌酸锂微腔组成的光子学分子(PM)结构的扫描电镜图。左下是直径为

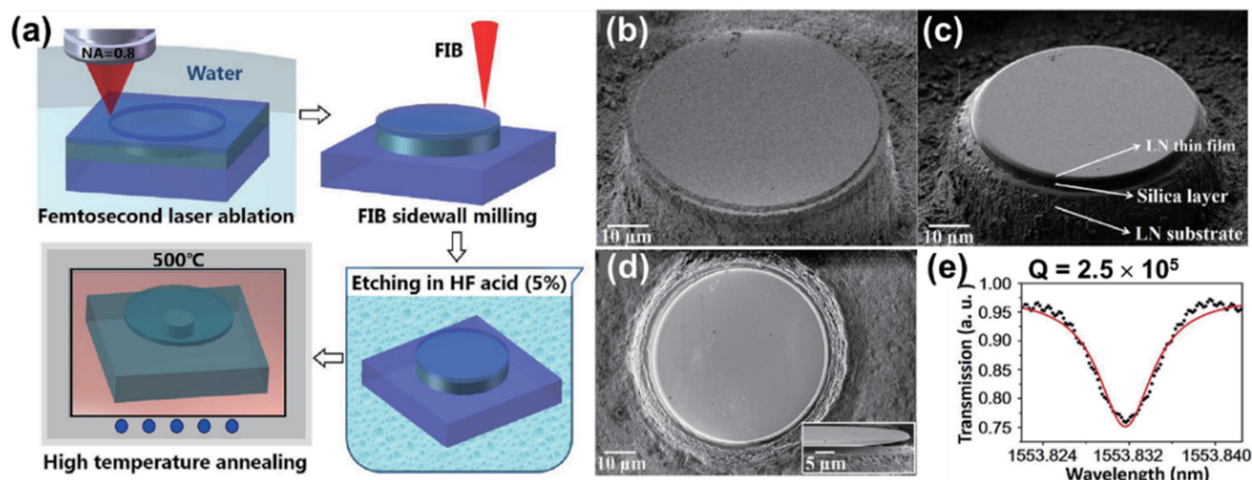


图 1 利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术制备的高品质因子铌酸锂微腔^[28-29]。(a) 铌酸锂微腔制备流程图；(b) 飞秒激光烧蚀后形成的微柱体 SEM 图像；(c) 聚焦离子束刻蚀后形成的微柱体 SEM 图像；(d) 经过化学腐蚀和高温退火后，直径为 55 μm 微盘的 SEM 俯视图，插图为微盘 SEM 侧视图；(e) 微腔在 1553.83 nm 谐振波长附近的透射光谱（虚线）及洛伦兹拟合曲线（实线）

Fig. 1 LN microresonator with high Q factor fabricated by the femtosecond laser writing combined with focused ion beam milling^[28-29]. (a) Procedures of fabrication of an LN microresonator; (b) SEM image of a cylindrical post formed after femtosecond laser ablation; (c) SEM image of a cylindrical post formed after the FIB milling; (d) SEM image (top view) of the 55- μm diameter microresonator after the chemical etching and high temperature annealing, in which the inset is side view of the microresonator; (e) measured transmission spectrum (dotted line) and its Lorentzian fitting curve (solid line) around the resonant wavelength of 1553.83 nm

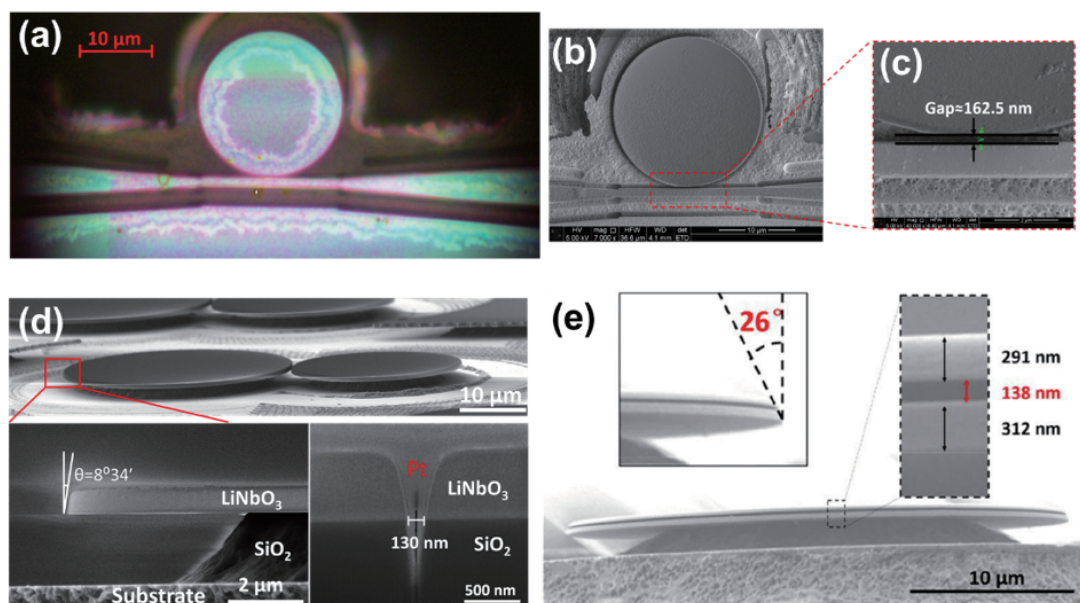


图 2 利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术制备的集成光子结构。(a)~(c) 铌酸锂微盘腔与波导的片上集成^[40]；(d) 耦合铌酸锂微盘光子学分子^[41]；(e) 垂直集成的双盘铌酸锂微腔^[42]

Fig. 2 Integrated photonic structures fabricated by the femtosecond laser writing combined with focused ion beam milling. (a)~(c) Monolithic integration of an LN microdisk with a free-standing waveguide^[40]; (d) coupled LN microdisk photonic molecules^[41]; (e) vertical integration of double LN microdisks^[42]

35 μm 的微盘边缘的侧面放大图，从图中可以看到上表面与铌酸锂薄膜微盘腔底部中心的键合完好，

微腔边缘有约 5 μm 的宽度是悬空的，并且侧壁十分光滑。右下是利用相同刻蚀参数刻蚀双盘图形，

得到的双盘间狭缝的侧视图,为了让微盘边缘更加清晰,狭缝区域沉积了一层金属铂。从电镜图中可以看到,两盘间距最小处为 130 nm,刻蚀深度约 1.2 μm 。实验测得该结构的 Q 值在 10^6 以上,其中一对耦合模式的 Q 值分别为 5.1×10^6 与 2.6×10^6 。图 2(e)为利用该技术垂直集成的铌酸锂双腔结构。铌酸锂双腔盘光子学分子结构具有多种非线性光学效应,其非线性光学效应将在第 6 节中详述。

3 电子束曝光结合离子刻蚀

电子束曝光结合离子刻蚀技术于 2014 年由哈佛大学研究组提出^[43]。该技术路线的主要工艺流程如图 3 所示,核心步骤包括电子束光刻掩模、干法刻蚀及基于电子束剥离(lift-off)工艺的金属电极制备。通常制备基底材料为铌酸锂薄膜晶圆,由 600 nm 厚的铌酸锂薄膜、2 μm 厚的二氧化硅及 500 μm 厚的硅衬底三层结构组成。首先,利用标准

的电子束光刻工艺,在晶圆表面旋涂一层电子束负光刻胶(如 HSQ),经电子束曝光、显影后,得到非晶态二氧化硅掩模图形。随后,通过电感耦合等离子体反应离子刻蚀(ICP-RIE)将该掩模图形转移到铌酸锂薄膜上,通常采用氩离子等离子体进行物理刻蚀,刻蚀过程中等离子体的功率和真空腔等条件需要进行精确调整,以尽量减少已去除的铌酸锂在结构表面的再沉积。干法刻蚀后的样品经过清洗、去除抗蚀剂后,变为裸露在空气中的铌酸锂光子回路芯片。对于需要实现片上电光调控功能的芯片器件,除了表面沉积一层二氧化硅包层外,还需用剥离技术制备金属微电极。该流程同样基于电子束光刻工艺:先在样品表面旋涂一层 PMMA 电子束光刻胶,通过电子束曝光、显影,形成微电极掩模图形;然后,利用镀膜工艺在掩模上镀上目标金属薄膜,再利用去胶液(又称剥离液)溶解光刻胶,获得与图形一致的目标金属电极结构;最后,通过化学气相沉积在表面加盖二氧化硅包层。

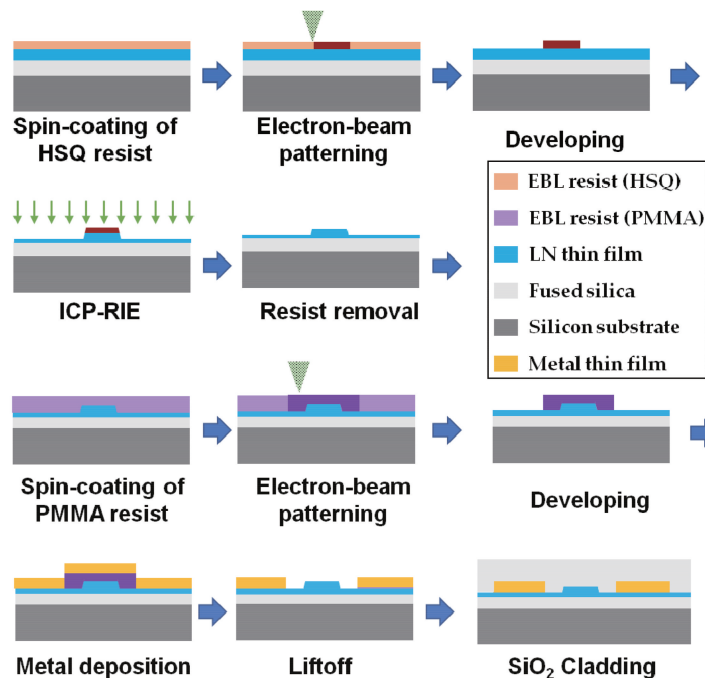


图 3 电子束曝光结合离子刻蚀的铌酸锂光子芯片制造工艺流程图^[43]

Fig. 3 Fabrication flow schematic of LN photonic chip by the electron beam exposure combined with ion milling^[43]

采用该技术制备的直径为 28 μm 的铌酸锂微盘腔如图 4(a)所示^[43],由扫描电镜图可以看到,该微盘腔具有非常光滑的侧壁。由原子力显微镜(AFM)定量分析得到该微盘腔的侧壁及表面粗糙度分别小于 5 nm、1 nm。利用光纤锥耦合微腔的透射谱进行微腔 Q 值测量,实验测得的透射光谱如图 4(b)所示,频谱显示有 3 组不同的高 Q 值共振模

式,每种模式在 13 nm 附近具有相似的自由光谱范围(FSR)。图 4(c)~(e)为 3 种不同模式的高分辨透射光谱,洛伦兹拟合测得一阶、二阶、三阶径向模式的 Q 值分别为 1.02×10^5 、 8.8×10^4 和 4.4×10^4 。随后,经过优化氩离子刻蚀参数和覆盖二氧化硅包层,该技术可将微腔的本征 Q 值提升至 10^7 量级^[44]。

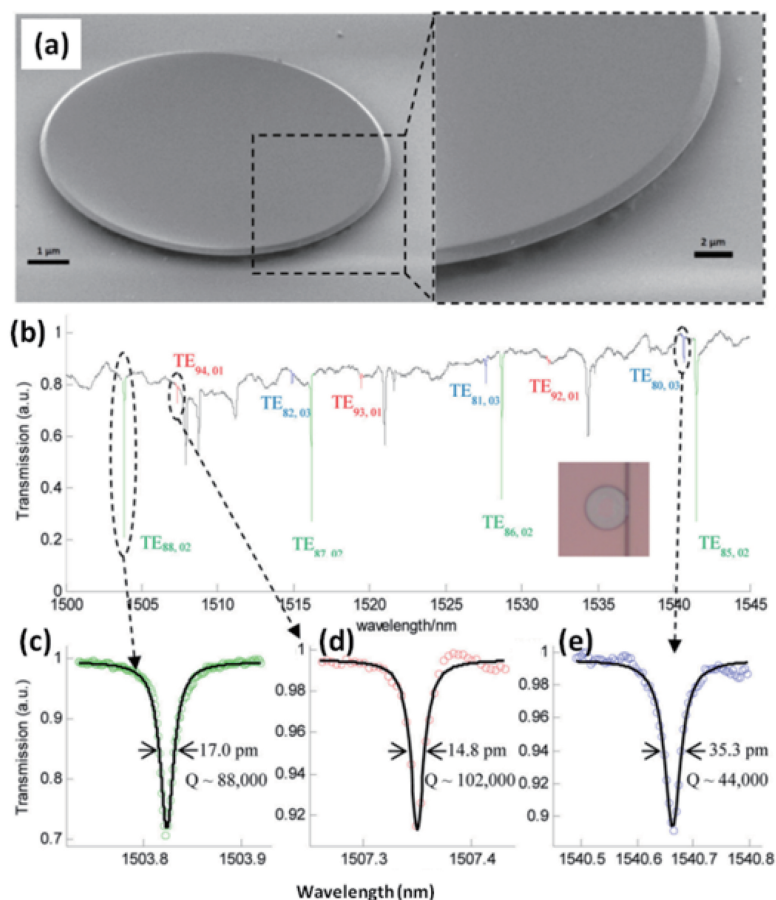


图 4 制备的直径为 $28\ \mu\text{m}$ 的铌酸锂微盘腔的 SEM 图和透射谱^[43]。(a) 铌酸锂微盘腔的 SEM 图,其放大图显示侧壁非常光滑;(b) 微盘腔的透射谱,显示多组谐振模式,其中插图光纤锥耦合到微盘腔顶部的光学显微图;(c)~(e) 二阶、一阶、三阶谐振模式的高分辨率透射光谱

Fig. 4 SEM image and transmission spectra of the fabricated LN microdisk resonators with $28\text{-}\mu\text{m}$ diameter^[43]. (a) SEM image of the LN microdisk and its magnified view, revealing that the microdisk edge has smooth sidewalls; (b) representative transmission spectrum collected from the microdisk, revealing several sets of resonant modes, in which the inset shows the optical micrograph of tapered fiber coupling on top of the microdisk resonator; (c)–(e) high-resolution transmission spectra for 2nd, 1st and 3rd order resonant modes, respectively

图 5 为哈佛大学研究组利用电子束曝光结合离子刻蚀技术制备的低损耗光波导,经过覆盖二氧化硅包层,直波导的损耗可低至约 $0.027\ \text{dB/cm}$ ^[44]。图 5(a) 上方为低损耗光波导电镜图,下方为用于测量直波导损耗的跑道型微腔的光学显微设计图,弯曲半径为 $80\ \mu\text{m}$ 。如图 5(b) 所示,利用不同臂长的跑道型微腔获得的直波导传输损耗为 $0.027\ \text{dB/cm}$,测量时使用的激发波长为 $1590\ \text{nm}$ 。

该技术利用现有较为成熟的电子束曝光工艺与离子刻蚀技术,一旦找准工艺条件,就可以快速复制该技术路线,进行小批量光子原型器件的研发,因此被多个国内外研究团队所采纳^[45-46]。

4 飞秒激光光刻辅助化学机械抛光

如上所述,飞秒激光直写与聚焦离子束刻蚀相结合,可以制备出 Q 值大于 10^6 的铌酸锂薄膜微盘腔。然而,人们通常需要更高 Q 值的回音壁模式(WGM)微谐振腔,以在低泵浦功率下实现高效的非线性过程。聚焦离子束刻蚀不可避免地会留下纳米量级的表面粗糙度,从而将铌酸锂薄膜微腔的 Q 值限制在 10^7 以下。鉴于此,飞秒激光光刻辅助化学机械抛光(PLACE)技术于 2018 年被提出并报道,实现了 Q 值高达 4.7×10^7 的铌酸锂微盘腔的制备^[47];最近,通过进一步完善工艺,利用该技术已经能够将铌酸锂微腔的品质因子提高至 10^8 以上^[48],这一品质因子的最新

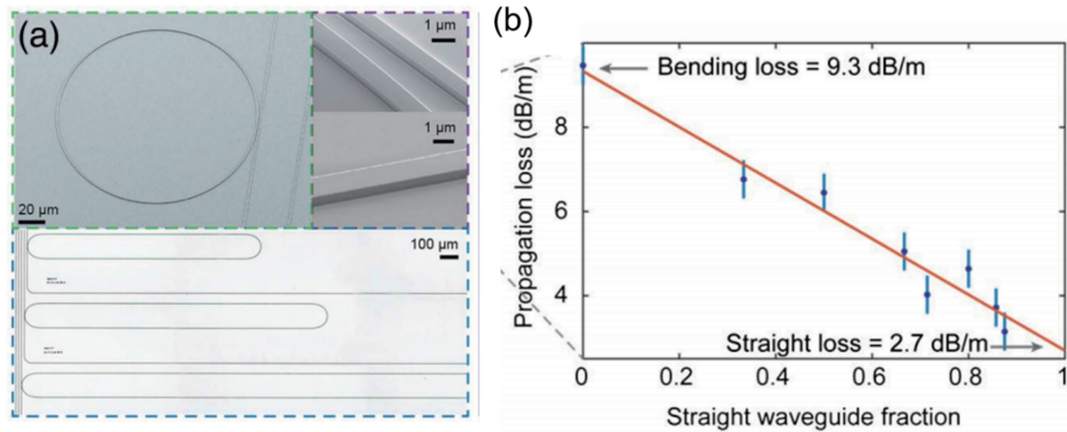


图 5 制备的波导耦合微环腔和跑道型微腔以及传输损耗测量^[44]。(a)波导耦合微环腔和跑道型微腔的 SEM 图(上方)以及跑道型微腔的设计图(下方);(b)利用不同臂长的跑道型微腔获得的传输损耗,激发波长为 1590 nm

Fig. 5 Fabricated waveguide-coupled microring and micro-racetrack resonators, and propagation loss measurement^[44]. (a) SEM images of the microring and micro-racetrack resonators (top) and design of the micro-racetrack resonators (bottom); (b) extracted propagation loss for micro-racetrack resonators with different lengths at excitation wavelength of 1590 nm

纪录已经接近铌酸锂材料的本征吸收极限。

PLACE 技术的独特优势在于该技术采用化学机械抛光(CMP)来选择性地去除或刻蚀衬底材料以完成芯片构图,而传统的 CMP 只是一种提高表

面光滑度的手段。PLACE 技术的主要步骤如图 6 所示。1)利用磁控溅射技术在铌酸锂薄膜晶元表面沉积一层约 600 nm 至 1 μm 的铬膜。因铬金属的破坏阈值比铌酸锂晶体低,故铬金属可作为一种很

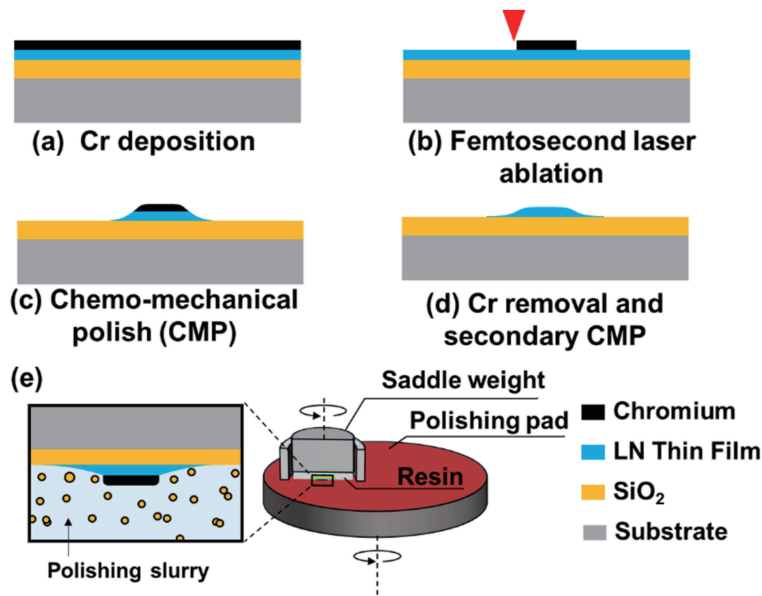


图 6 飞秒激光光刻辅助化学机械抛光(PLACE)的铌酸锂光子芯片制造流程图。(a)在 LNOI 上沉积铬(Cr)层;(b)飞秒激光烧蚀 Cr 薄膜形成掩模图案;(c)通过化学机械抛光将掩模图案从 Cr 膜转移到 LNOI 上;(d)移除 Cr,并进行二次化学机械抛光;(e)化学机械抛光原理与实验装置图

Fig. 6 Fabrication flow schematic of LN photonic chip by the femtosecond laser photolithography assisted chemo-mechanical etching (PLACE). (a) Depositing a thin layer of Cr on the top of the lithium niobate on insulator (LNOI) wafer; (b) patterning the Cr layer by femtosecond laser ablation; (c) conducting chemo-mechanical polishing (CMP) on the sample to transfer the pattern from the Cr mask to the LNOI; (d) chemically removing the remaining Cr mask and performing a secondary CMP; (e) schematic illustration of the CMP principle and the instrument

好的高硬度掩模材料,在后续化学机械抛光时用于保护其下方的铌酸锂薄膜。2)利用聚焦飞秒激光空间选择性地扫描刻蚀铬膜,形成掩模图案。飞秒激光脉冲的持续时间短,可实现激光与材料之间的非热相互作用,从而保证在底部铌酸锂薄膜完好无损的情况下完全去除铬膜。飞秒激光直写系统的三维平台位移精度约 100 nm,可以确保极高的加工精度和分辨率。3)飞秒激光刻蚀后的样品被安装在树脂样品底座上进行化学机械抛光,样品暴露在外的部分被抛光去除,而有铬膜保护的铌酸锂薄膜则被完整保留,实现了微结构图案从铬层到 LN 薄膜层的转移,形成图案所对应的光子结构。由于铬膜的硬度比铌酸锂高得多,因此 CMP 工艺之后可以完全去除裸露的铌酸锂薄膜,并将由铬掩模形成的图案转移到铌酸锂薄膜上。4)将样品在铬腐蚀溶液中浸泡 10 min,以去除铌酸锂薄膜上残余的铬金属,并进行二次化学机械抛光,留下的铌酸锂光子结构表面可以达到光学级

的表面光滑度(粗糙度约 0.1 nm),由此便可实现高品质因子的铌酸锂光学微腔的制备。

图 7 为基于 PLACE 技术制备的直径为 1030 μm 的微盘腔^[48]。由图 7(a)~(d)可见,该微盘腔具有光滑的表面,侧壁楔角约为 8° 。利用光纤锥将窄线宽可调激光(<200 kHz)耦合到微盘并进行扫描来测量微盘的 Q 值。如图 7(e)所示,通过将 1551 nm 谐振波长处的谐振峰值作洛伦兹曲线拟合,测得微盘的负载 Q 值达到 7.5×10^7 ,表明本征 Q 值约为 1.2×10^8 。为了更精确地测试微腔的 Q 值,还通过振铃测试进一步确认了该微盘腔的超高 Q 值,测量中利用高速电光马赫-曾德尔调制器对可调谐激光进行调制。如图 7(f)所示,实验测得的谐振光子的寿命为 ~ 64.3 ns,表明微腔在 1550 nm 波长附近的负载 Q 值为 7.8×10^7 ,本征 Q 值为 1.23×10^8 。该数值为目前已报道的片上铌酸锂微腔品质因子的最高值,接近材料本征吸收极限的 2.0×10^8 。

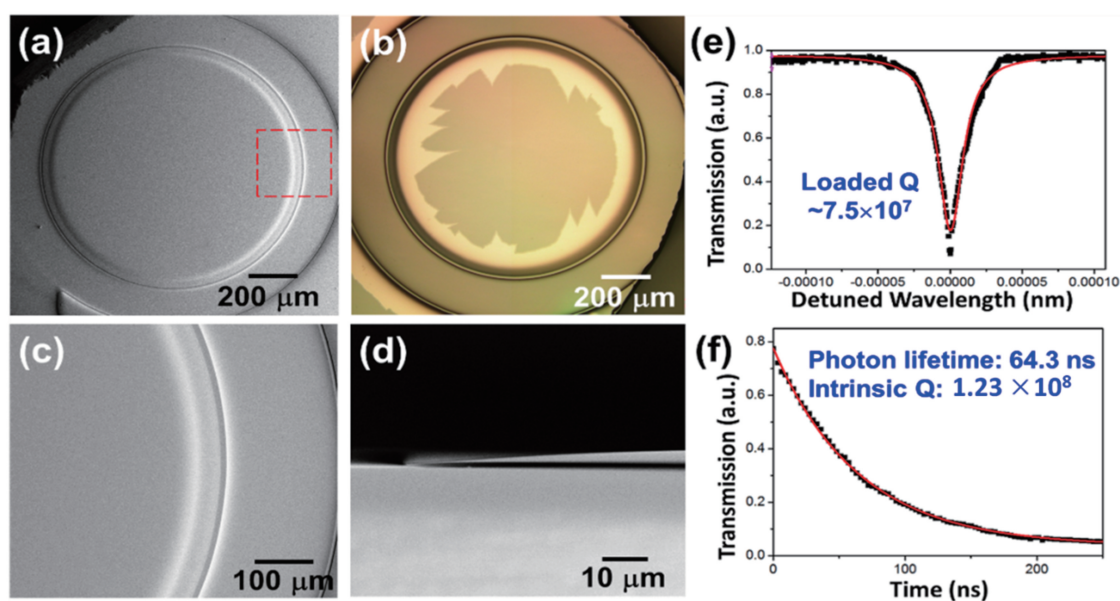


图 7 制备的超高 Q 值铌酸锂微腔(直径约为 1030 μm)^[48]。(a)扫描电镜图;(b)光学显微图;(c)(d)图 7(a)中虚线框内微腔边缘扫描电镜放大图的俯视图和侧视图;(e)利用光纤锥耦合微腔的透射谱进行 Q 值测量,洛伦兹拟合曲线表明微腔负载 Q 值为 7.5×10^7 ;(f)振铃测试获得谐振光子的寿命为 64.3 ns,表明微腔的负载 Q 值为 7.8×10^7 ,本征 Q 值为 1.23×10^8

Fig. 7 Fabricated ultra-high Q LN microresonator with a diameter of $\sim 1030 \mu\text{m}$ ^[48]. (a) (b) SEM image and optical micrograph of the microresonator; (c) zoom-in SEM image of microresonator periphery [the dashed box in Fig. 7(a)] from the top view; (d) zoom-in SEM image of microresonator periphery [the dashed box in Fig. 7(a)] from the side view; (e) Q factor measurement using the transmission spectrum from fiber taper coupling, indicating a loaded Q -factor of 7.5×10^7 of the microresonator; (f) ring-down measurement, indicating the lifetime of the resonant photon is 64.3 ns, corresponding to the loaded (intrinsic) Q factor of 7.8×10^7 (1.23×10^8)

研究发现,通过控制化学机械抛光过程的持续时间,可以连续改变铌酸锂悬空微盘的边缘楔

角^[49]。如图 8(a)~(f)所示,如当抛光时间从 12 min 增加到 60 min 时,微盘边缘楔角可以从 9°

增大到 51° 。同时,所获得的微盘腔的品质因子几乎与该楔角无关,都达到了 10^7 量级[图 8(g)]。这种楔角结构为铌酸锂薄膜光子器件提供了一个额外

的调控自由度,可以用于实现光场调控、模式色散等操控,这对利用铌酸锂微腔实现高性能非线性光源和光频梳产生具有重要意义。

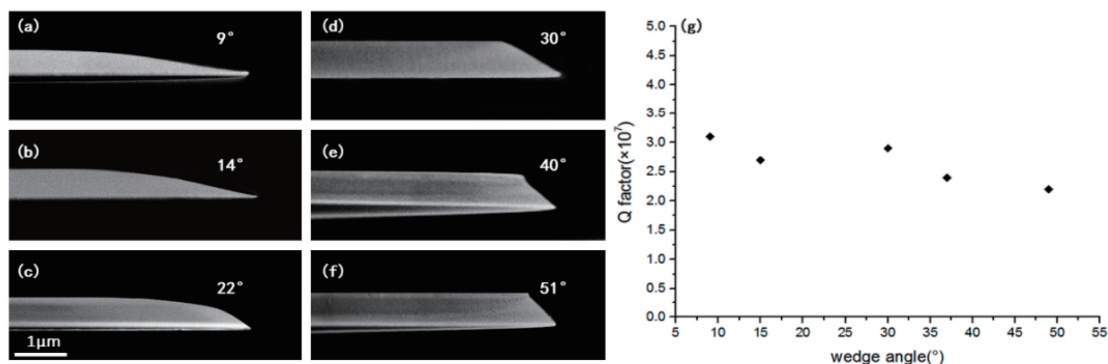


图 8 不同边缘楔角对铌酸锂微盘的影响^[49]。(a)~(f)不同边缘楔角的铌酸锂微盘的扫描电镜侧视图,角度分别为 9° 、 14° 、 22° 、 30° 、 40° 和 51° ; (g)不同边缘楔角的微盘腔的 Q 值

Fig. 8 Influence of different wedge angles on LN microdisk^[49]. (a)–(f) SEM images of the fabricated LN microdisks from the side view with different wedge angles of 9° , 14° , 22° , 30° , 40° , and 51° , respectively; (g) Q factor of the fabricated LN microdisks with different wedge angles

PLACE 技术可以实现传输损耗低至 0.027 dB/cm 的脊型铌酸锂光波导的制备^[50]。制备铌酸锂光波导的工艺流程与制备微盘腔的基本相同,区别在于飞秒激光直写光刻之后,保留金属铬掩模的铌酸锂薄膜区域是狭长的条形,从而在经过化

学机械抛光、铬膜腐蚀等后续处理后,只留下脊型铌酸锂波导结构。图 9 为利用 PLACE 技术所制备的铌酸锂环形微腔和脊型光波导结构,其中波导宽度仅约 $3\mu\text{m}$ 。无论是微环腔还是脊型光波导,都具有极为平滑的侧边和极低的表面粗糙度,如图 9(c)所示,

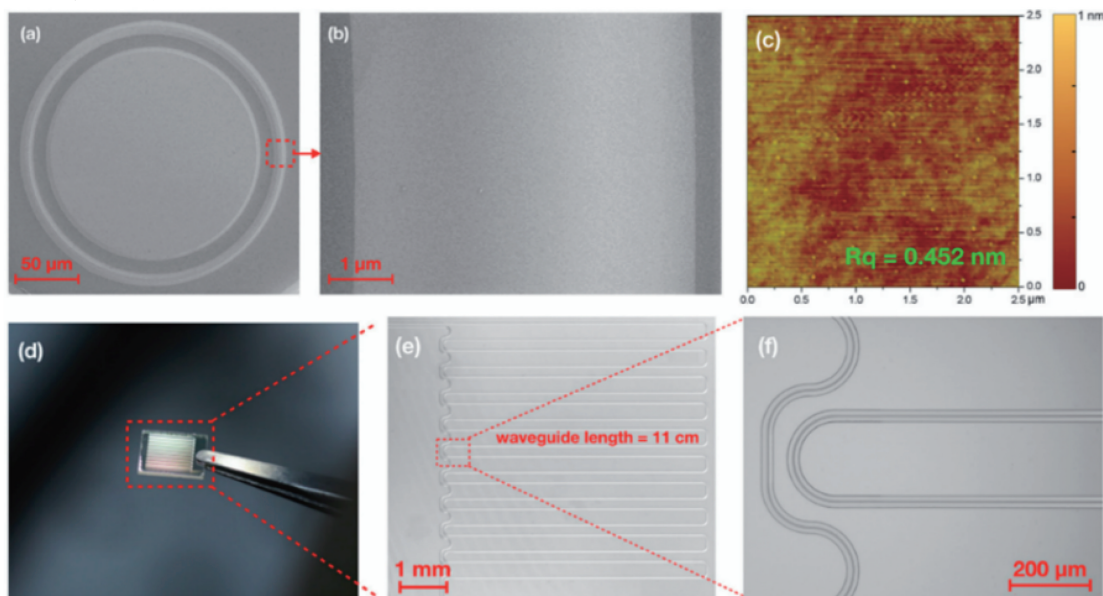


图 9 基于 PLACE 技术制备的铌酸锂微环腔和光波导^[50]。(a)(b)铌酸锂微环腔的 SEM 俯视图及其局部放大图;(c) AFM 测得微环表面的粗糙度为 0.452 nm ; (d)长度为 11 cm 的铌酸锂光波导的数码照片;(e)(f)铌酸锂光波导的光学显微图

Fig. 9 LN microring cavity and optical waveguide based on PLACE technique^[50]. (a) Top-view SEM image of a LN microring resonator; (b) zoomed view of the ridge of the microring resonator in Fig. 9 (a); (c) AFM image of the ridge, revealing that the surface roughness of the microring is 0.452 nm ; (d) picture of a chip consisting of an 11-cm -long waveguide captured by digital camera; (e)(f) zoomed images of the waveguides on the chip captured with an optical microscope

AFM 定量分析得到表面粗糙度约为 0.452 nm(当时的测量值,实际可以提升到 0.1 nm 量级)。得益于铌酸锂与 SiO₂ 衬底及外界空气间较大的折射率差,这种铌酸锂脊型波导具有非常低的弯曲损耗,因此在不足 1 cm² 的微小铌酸锂薄膜芯片上,初步实现了长度达 11 cm 的波导结构的制备[图 9(e)]。利用回音壁模式波导微环谐振腔的损耗测量方法,测得所制备的铌酸锂光波导的传输损耗低至 0.027 dB/cm,突破了之前在 PIC 芯片上仅能达到 10⁻¹ dB/cm 的波导传输损耗瓶颈。此时获得的铌酸锂波导仍为多模波导。对于单模波导应用,可以在加工好的波导样品上通过电子束蒸发沉积一层 3.5 μm 厚的超低损耗氧化钽(Ta₂O₅)薄膜,构成具有适当折射率差的包层,最终获得稳定的铌酸锂单模波导。

如图 10 所示,用电子束显微镜表征了覆盖氧化钽后的铌酸锂单模脊形波导形貌,其中突起的亮线即脊形波导,可以看出波导边缘是非常均匀和平滑的。将不同偏振的 1550 nm 激光耦合入脊形波导,并用红外 CCD 相机观测输出端的成像。激发并测量了铌酸锂薄膜脊形波导在 1550 nm 的 TE(横电场)和 TM(横磁场)波的空间模式分布,如图 10(b)和图 10(d)所示。可以看出这种波导既能支持 TE 波的单模传输,也能支持 TM 波的单模传输,这与模拟计算结果[图 10(c)和图 10(e)]完全一致。通过测量,得到 TE 和 TM 单模的模场半峰全宽(FWHM)分别约 2.5 μm 和 2.3 μm。该技术可支持损耗低至 0.027 dB/cm 的多模波导和损耗低至 0.042 dB/cm 的单模波导^[38, 50]。

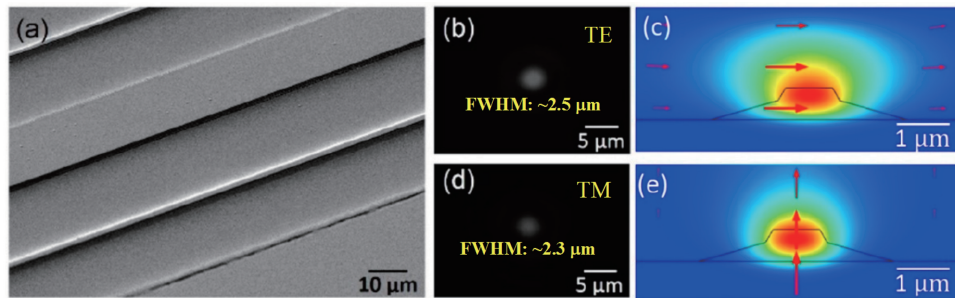


图 10 铌酸锂单模脊形波导^[38]。(a)覆盖氧化钽后的铌酸锂单模波导 SEM 图;(b)(c)测量与模拟的 TE 波输出空间模式;(d)(e)测量和模拟的 TM 波输出空间模式

Fig. 10 Single-mode ridge waveguide on lithium niobate^[38]. (a) SEM image of LN waveguide covered with Ta₂O₅; (b)(c) measured and calculated TE mode profiles; (d)(e) measured and calculated TM mode profiles

5 超低损耗铌酸锂薄膜光子器件

利用以上的技术途径,目前已经在铌酸锂薄膜衬底上实现了一批高品质因子的铌酸锂光子原型器件,包括波导耦合分束器^[51]、可重构多功能芯片^[52]、光子延时线^[53]、微腔激光器^[54]、波导放大器^[55]、高速光调制器^[56]、微波光子芯片^[5]等。

5.1 波导耦合分束器

图 11(a)和图 11(b)为利用 PLACE 技术在单片铌酸锂薄膜材料上构建的单模波导耦合分束器阵列^[51]。将 1550 nm 的单模激光耦合进入波导耦合分束器,可以观测得到输出端的模场分布保持很好的单模状态。通过直接测量耦合分束器两个输出端的功率,发现这些波导耦合分束器的分光比与所制备波导耦合区域的长度直接相关,表现出与耦合区长度明显的正弦依赖性,从而可以实现特定比例的光强分束功能,如图 11(c)和图 11(d)所示。这种波导耦合分束器既可以用于波导分束,也可以用于波

导合束,是构建铌酸锂薄膜片上马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的关键核心结构。

5.2 可重构多功能集成光子芯片

图 12 为基于铌酸锂薄膜可电光调控的多功能芯片^[52]。该芯片包含 7 个马赫-曾德尔干涉仪、4 个电光相移器和 1 个微电极阵列,所有结构被布局在一个 6.5 cm×0.2 cm 的区域内,如图 12(a)所示。在马赫-曾德尔干涉臂和电光相移器附近设计了 12 个金电极的阵列,用于器件实时调控与重构。图 12(b)是加工完成的器件照片,其尺寸大小可与硬币的对比来获得。该芯片可以实现高消光比(~28 dB)的马赫-曾德尔干涉仪、1×6 光开关和 3×3 均衡干涉分束器等多种不同光子学功能。值得一提的是,在整个器件所覆盖的可谓非常庞大的芯片面积内[可覆盖整片直径为 15.24 cm(6 英寸)的晶圆],用于激光直写的微纳加工系统都可保持~500 nm 的均匀制备精度,一般的商业化飞秒激光直写设备通常无法满足这一苛刻要求。

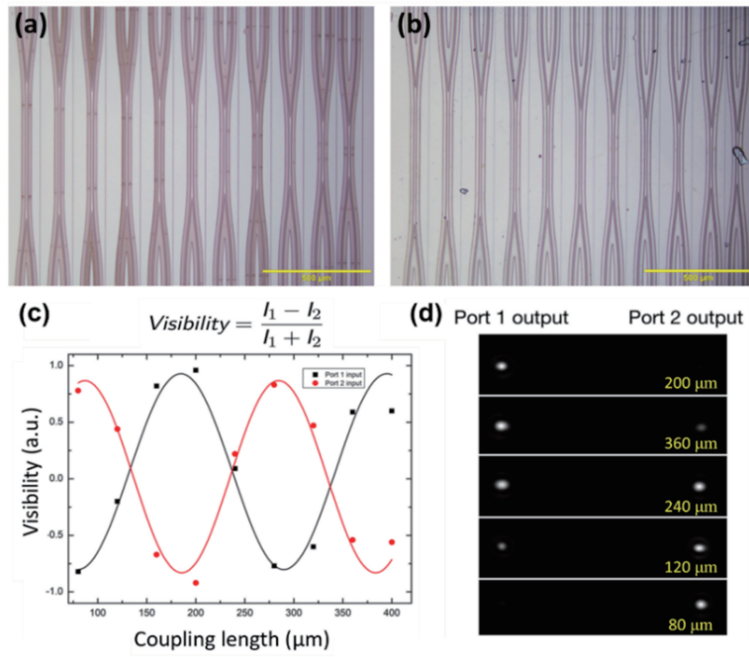


图 11 铌酸锂单模波导分束器^[51]。(a)化学机械抛光制备的裸露(无覆盖)铌酸锂分束器的光学显微图;(b)沉积 Ta₂O₅ 包层膜后的铌酸锂分束器的光学显微图;(c)分束比随耦合长度的变化呈正弦振荡关系;(d)不同耦合长度的分束器输出端口的模场分布

Fig. 11 LNOI single-mode beam splitters^[51]. (a) Optical microscope image of the bare LNOI beam splitters fabricated with the chemo-mechanical polish lithography; (b) optical microscope image of the LNOI beam splitters covered with a layer of Ta₂O₅; (c) visibility as a function of the coupling length, showing a sinusoidal dependence of the splitting ratio on the coupling length; (d) near-field profiles captured at the output ports of the beam splitters with the different coupling lengths

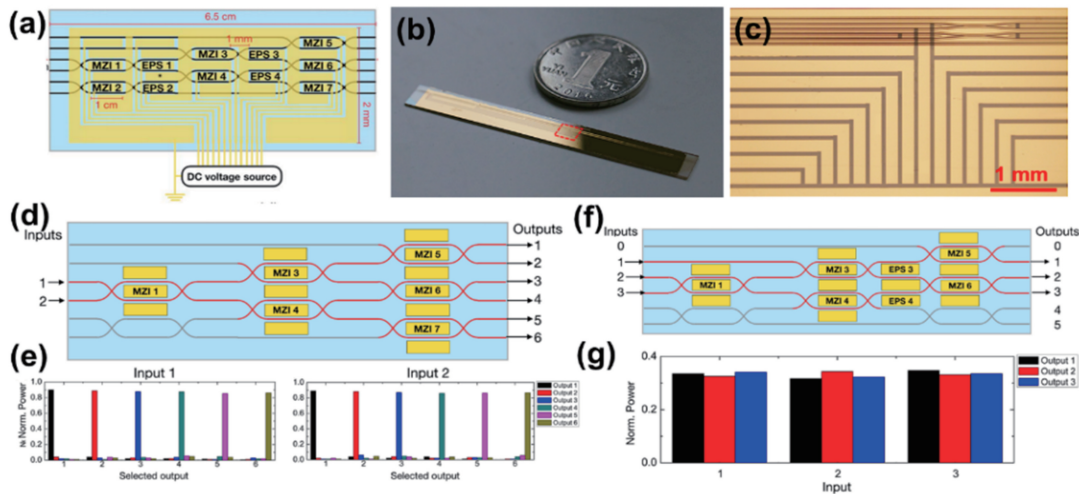


图 12 基于铌酸锂薄膜的可重构多功能集成光子芯片^[52]。(a)多功能集成光子芯片设计示意图;(b)制备的芯片样品和硬币的数码照片;(c)图 12(b)虚线框对应的放大显微图;(d)1×6 光开关波导布线示意图;(e)光开关的测试结果图;(f)3×3 均衡干涉分束器的波导布线示意图;(g)均衡干涉分束器的测试结果图

Fig. 12 Reconfigurable multifunctional photonic integrated chip on LNOI^[52]. (a) Schematic of the multifunctional photonic integrated chip; (b) digital camera picture of the chip placed near by a 1 RMB coin; (c) zoom-in micrograph of the area [the dashed box in Fig. 12(b)]; (d) schematic of waveguide wiring of a 1×6 light switch; (e) measurement result of the light switch; (f) schematic of waveguide wiring of a balanced 3×3 interference beam splitter; (g) measurement result of the balanced interference beam splitter

5.3 可重构光子延时线

大尺寸低损耗光波导组成的光学延迟线 (OTDL) 在光学陀螺、微波光子学、全光信号和量子信息处理等领域都引起了广泛的兴趣。2020 年, 利用 PLACE 加工技术, 已经实现了长度超越 1 m 的波导低损耗光子延时线, 如图 13 所示, 突破了现有铌酸锂薄膜光波导制备中的长度限制^[53]。铌酸锂脊形波导由 PLACE 技术加工而成, 通过覆盖 SiN 包层可以获得单模传输能力。经测量, 该新型波导的传输损耗仅为 0.029 dB/cm, 即光在该 1 m 长

的波导中传输后, 其能量损失不到总输入光功率的 50%。设计方案如图 13(a) 所示, 将不同长度的单模光波导延迟线单元、基于波导耦合器的电光调控马赫-曾德尔干涉仪, 以及调控微电极集成在单一铌酸锂芯片上, 通过在微电极上施加调控电压, 使得激光经马赫-曾德尔干涉仪后切换到所需长度的波导延迟线上, 实现了延迟时间的电控切换。在该电光可切换波导延迟线器件中, 最长的单根波导延迟线的长度达 110 cm, 相应的延迟时间超过了 7 ns。

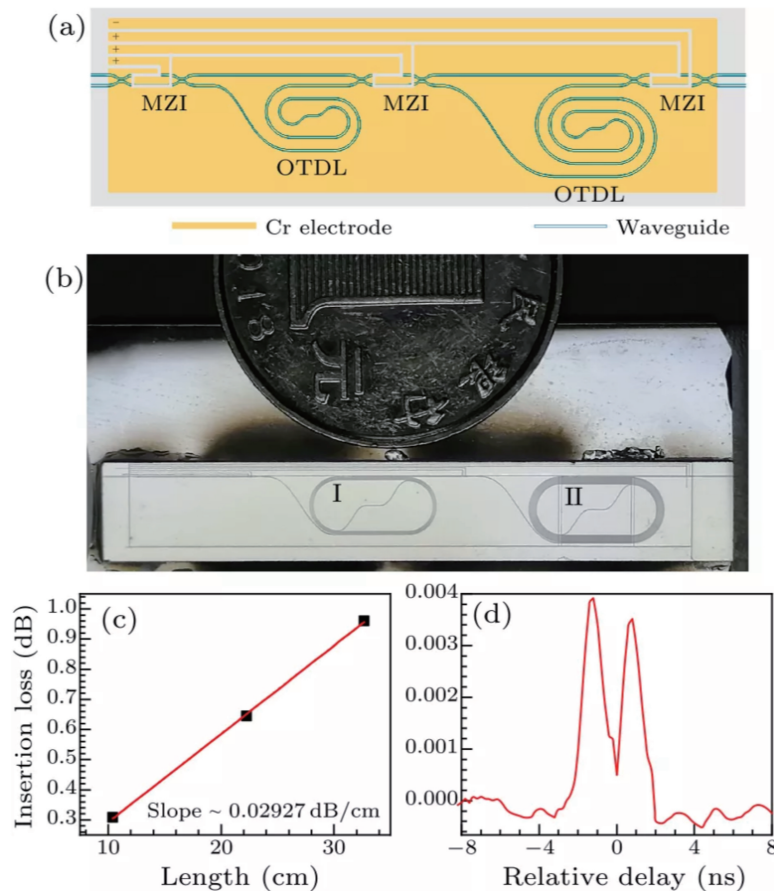


图 13 米级长度的铌酸锂波导光学延迟线^[53]。(a) 可重构光学延时线设计图; (b) 加工完成的光学延时线器件数码照片; (c) 光学延时线中测得的传输损耗值, 显示随延时线的长度呈线性依赖关系; (d) 光脉冲经过不同长度的光学延时线后, 示波器测得的时间相差 2.2 ns 的双脉冲峰, 时间负值代表光脉冲先到达光探测器

Fig. 13 OTDL of a waveguide on LN with meter-scale lengths^[53]. (a) Schematic of the reconfigurable OTDL; (b) digital camera photo of the fabricated OTDL device; (c) measured losses of OTDL, showing a linear dependence on the length of OTDL; (d) waveform recorded on the oscilloscope after the light pulse traveling through the OTDLs with different lengths, showing two peaks separated by a time delay of 2.2 ns, in which negative time means that the pulses arrive first at the photodetector

5.4 微腔激光器

利用 PLACE 技术, 已经在厚度为 600 nm 的 Z 切掺铒铌酸锂薄膜上实现了微腔激光器的制备^[54]。微腔的激光发射光谱如图 14(a) 所示, 当利用波长

为 976 nm 的激光进行泵浦时, 在约 1560 nm 波长处可观察到激光发射, 插图为实验中观测到的微盘上转换荧光的光学显微图像, 可以看到泵浦激光下掺铒铌酸锂微盘内产生强烈的上转换荧光。

图 14(b)是实验观测到的 1563 nm 附近的激光发射光谱,有几条 C 波段的激光线,激光线之间的距离约为 1.8 nm,与直径为 200 μm 的掺铒铌酸锂微盘腔的自由光谱范围相匹配。在波长 1563.3 nm 处测得的微盘激光线宽约为 24 pm。如图 14(c)所示,实验测

得激光阈值略高于 200 μW ,激光转换效率为 $1.91 \times 10^{-2} \%$ 。虽然目前获得的转换效率较低,但该性能可以通过优化微盘形状、耦合效率、掺铒离子浓度等关键参数加以提升。该铌酸锂微盘激光器为实现有源无源混合集成的铌酸锂光子器件提供了关键依据。

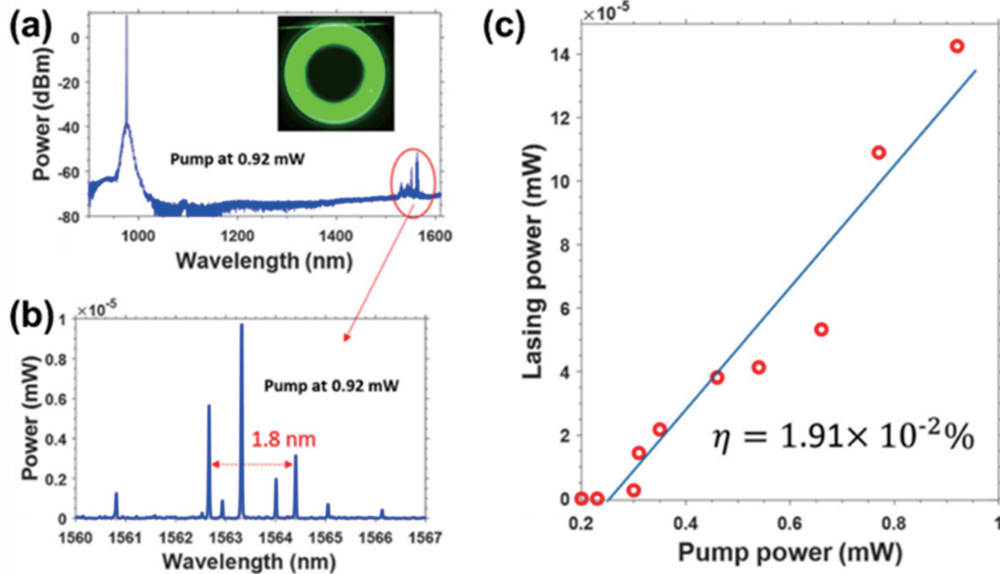


图 14 掺铒铌酸锂微盘腔激光器的激光阈值特性^[54]。(a)泵浦功率为 0.92 mW 的掺铒激光器的光谱,插图显示出很强的上转换荧光;(b) 1560 nm 附近的放大光谱,显示出多模激光光谱;(c)激光强度与 976 nm 泵浦光功率之间的依赖关系,圈圈为实验数据,实线为拟合曲线

Fig. 14 Lasing threshold characteristics of the Er^{3+} -doped LN microdisk^[54]. (a) Spectrum of the Er^{3+} -doped laser with the pump power at 0.92 mW, in which the inset displays the strong upconversion fluorescence of the microdisk; (b) enlarged spectrum around 1560 nm, revealing the multimode lasing spectrum; (c) dependence of the intensity of all emission lines on the absorbed pump power at 976 nm, where the experimental data are shown as circles and the curve is a linear fitting

5.5 高增益波导放大器

最近,利用 PLACE 技术实现了高增益掺铒铌酸锂波导放大器^[55]。图 15(a)是该波导放大器的设计图,600 nm 厚的 Z 切掺铒铌酸锂波导的顶部宽度约为 1.2 μm ,底部宽度约为 4 μm ,采用螺旋形设计,减小了放大器的器件尺寸,波导总长度为 3.6 cm,最小弯曲半径为 800 μm 。铌酸锂波导中掺铒离子的摩尔分数约为 1%。图 15(b)显示波导放大器的光学显微放大图。波导边缘在光照下显示出干涉图样,这是由波导光滑边沿的倾角所致。图 15(c)为波导横截面的扫描电镜图。为获得清晰的 SEM 图像,在铌酸锂波导上覆盖有一层薄薄的金属膜,因此波导顶面和侧壁稍显粗糙。通过测量微环腔的 Q 值,可知该掺铒铌酸锂波导放大器的传输损耗为 0.16 dB/cm。该波导放大器的内部净增益可以表示为

$$g = 10 \log \frac{P_{\text{on}}}{P_{\text{off}}} - \alpha_L L, \quad (1)$$

式中, P_{on} 和 P_{off} 分别是在输出光纤处有泵浦激光时收集到的信号光功率,而 α_L 是掺铒铌酸锂波导的光传输损耗, L 是光传输长度。图 15(e)为不同泵浦功率下测得的 1530 nm 波长处的信号光光谱。图 15(f)显示了信号波长为 1530 nm 时,波导放大器的净增益与泵浦光功率之间的依赖关系。插图显示在波导放大器中可以观测到很强的上转换荧光。图中曲线表明,随泵浦功率的增加,增益快速上升,当泵浦功率大于 20 mW 时增益缓慢地达到饱和。当泵浦光功率约 40 mW 时,1530 nm 信号光的增益值达到最大,约 18 dB。

5.6 高速光调制器

2018 年,哈佛大学研究小组在包覆 SiO_2 层的 X 切铌酸锂中,制备了基于马赫-曾德尔干涉仪的单

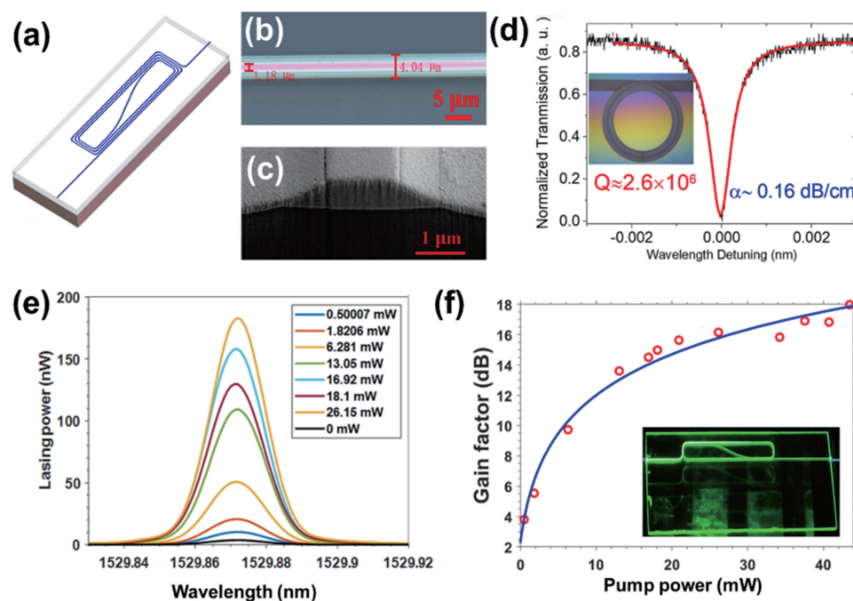


图 15 制备的掺铒铌酸锂波导放大器及其性能测量^[55]。(a)掺铒铌酸锂波导放大器示意图;(b)直波导的光学显微图;(c)掺铒铌酸锂波导横截面的 SEM 图(倾斜角:52°);(d)传输损耗曲线,插图为直径为 400 μm 的掺铒铌酸锂微环的显微图像;(e)不同泵浦功率下测得的 1530 nm 波长处的信号光光谱;(f)1530 nm 信号光波长处测得的掺铒铌酸锂波导的净增益与泵浦光功率之间的依赖关系

Fig. 15 Fabricated Er^{3+} -doped LN waveguide amplifier chip and characterization measurement^[55]. (a) Schematic of the Er^{3+} -doped LN waveguide amplifier chip; (b) optical micrograph of the straight waveguide; (c) SEM image of the cross section of the fabricated Er^{3+} -doped LN waveguide (tilt angle: 52°); (d) propagation loss curves, in which the inset is micrography of a $400\text{-}\mu\text{m}$ -diameter Er^{3+} -doped LN microring; (e) measured spectra at the signal wavelength of 1530 nm for the different pump powers; (f) net gain of the Er^{3+} -doped LN waveguide as a function of launched pump power at the signal wavelength of 1530 nm

片高速电光调制器^[31]。如图 16(a)~(d)所示,分光比为 50:50 的 Y 型分束器将光信号分束到两个铌酸锂脊形波导,即马赫-曾德尔干涉仪的两个臂中,输出信号再与其他 Y 结合并。在距离臂约 $1\ \mu\text{m}$ 附近,集成有长度为 20 mm 的条形电极。通过优化光波导和电极的尺寸,由于普克尔斯效应,具有与光场匹配的群速度的高频微波会在两个臂之间产生光学相位差。当相位差从 0 调谐到 π 时,光信号的传输从最大值调谐到最小值。得益于显著增加的紧束缚光学模式和微波模式之间的空间重叠,获得了 1.4 V 半波电压和 $2.8\ \text{V}\cdot\text{cm}$ 的半波电压-长度积。因此,微波信号驱动的 CMOS 电路可以直接施加在电极上,获得的电光响应带宽大于 $45\ \text{GHz}@3\ \text{dB}$,消光比为 30 dB。在调制速率为 100 GHz 的调制器中,数据速率高达 210 Gbit/s。考虑到光纤和波导之间的插入损耗,测得的插入损耗小于 0.5 dB。

单个马赫-曾德尔干涉仪调制器因其具有高消光比特性,能够很好地用于制备分光比为 50:50 的 Y 型结构,然而,由于其存在不可避免的加工误差,

制备具有 50:50 完美分光比的 Y 型结构极其困难。级联马赫-曾德尔干涉仪能够克服此问题,可以提供更高的消光比。2019 年,史蒂文斯理工学院研究小组通过感应耦合等离子反应刻蚀(ICP-RIE),可在 X 切铌酸锂薄膜上加工出级联马赫-曾德尔干涉仪(图 17)。单模脊形波导的传输损耗为 3 dB/cm,总插入损耗为 15 dB,电极长为 4.5 mm,间距为 $4.5\ \mu\text{m}$,这表明 TE 模式下的半波电压为 12 V。通过扫描任一马赫-曾德尔干涉仪上的电压,最小化某一输出端口的输出功率,获得了 1500~1600 nm 宽带下 53 dB 的高消光比^[56]。

图 18 展示了我国中山大学学者利用电子束曝光结合离子刻蚀技术实现的铌酸锂混合基高速光调制器^[36]。如图 18(a)所示,该调制器由两层混合集成的 Si/LN 脊形波导和垂直绝热耦合器(VAC)组成。上方波导由 X 切铌酸锂薄膜干法刻蚀而成,用作发生光电相互作用(普克尔效应)的相位调制器。下方的 SOI 回路支持所有其他无源功能,包括两个将光信号分开并合并的 3 dB 多模干涉(MMI)耦合

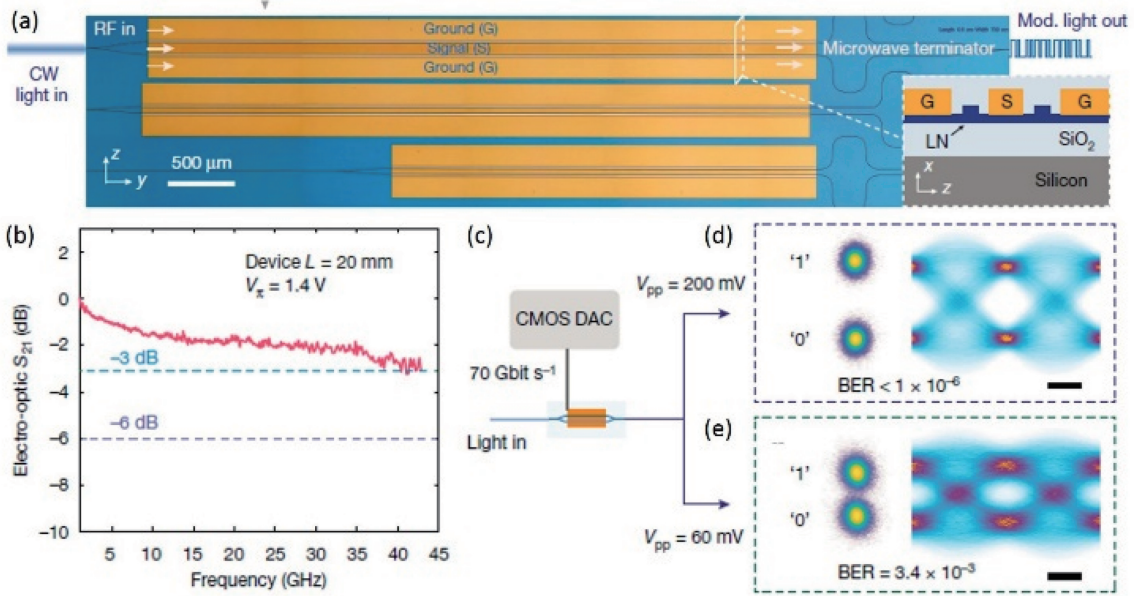


图 16 单片高速电光调制器^[31]。(a)由 3 个马赫-曾德尔干涉仪调制器构成的电光调制器芯片显微图,插图为调制器横截面示意图;(b) 70 Gbit/s 速率下的数据传输实验;(c) CMOS 驱动电路;(d)(e)峰峰值电压为 200 mV 和 60 mV 时,使用相干接收器和重构眼图获得的已测星座图

Fig. 16 Monolithic high-speed electro-optic modulator^[31]. (a) Micrograph of electro-modulator chip consisted of three MZI modulators, in which the inset is cross-sectional schematic of the modulator; (b) data-transmission experiment at a rate of 70 Gbit/s; (c) CMOS driven circuit; (d) (e) measured constellation diagrams obtained with a coherent receiver and the reconstructed eye diagrams at peak-to-peak voltages of 200 mV and 60 mV

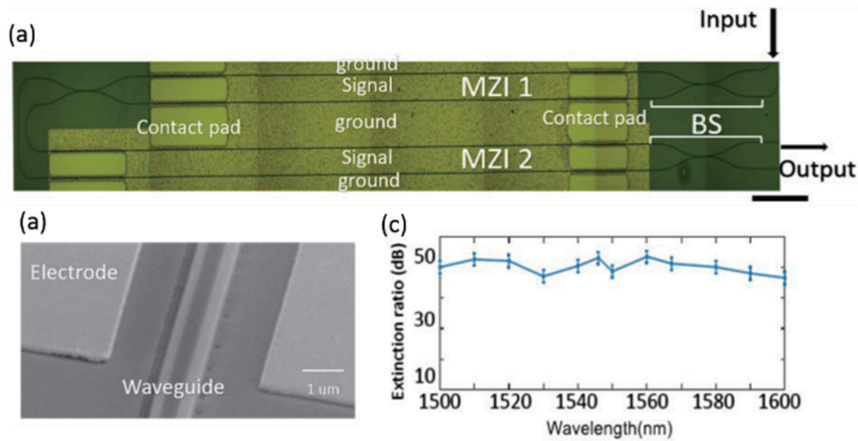


图 17 高消光比级联 MZI 光子芯片^[56]。(a)显微图;(b)单模脊形波导 SEM 图;(c)消光比与波长的关系

Fig. 17 High extinction cascaded MZI photonic chip^[56]. (a) Micrograph; (b) SEM of single-mode ridge waveguide; (c) extinction ratio as a function of wavelength

器,以及两个用于片外耦合的光栅耦合器。VAC 由锥形硅波导和叠加的铌酸锂波导形成,用于上下层之间光的耦合。该混合集成器件具有两个明显的优势:1)光路传输由下方硅波导完成,因此仅需在铌酸锂薄膜上制备简单的直波导,器件体积更小,灵活性更高;2)VAC 与干法刻蚀的铌酸锂波导,利于光学模式局域在铌酸锂波导内部。与其他无刻蚀的铌酸

锂薄膜上的 Si/LN 混合器件相比,该器件可以更加有效地利用铌酸锂有源区。如图 18(g)~(h)所示,当器件长度为 3 mm 和 5 mm 时,该调制器的半波电压分别为 7.4 V 和 5.1 V。图 18(i)为眼图测试结果,从中可以看出该器件的光信号调制速度可达 100 Gbit/s。

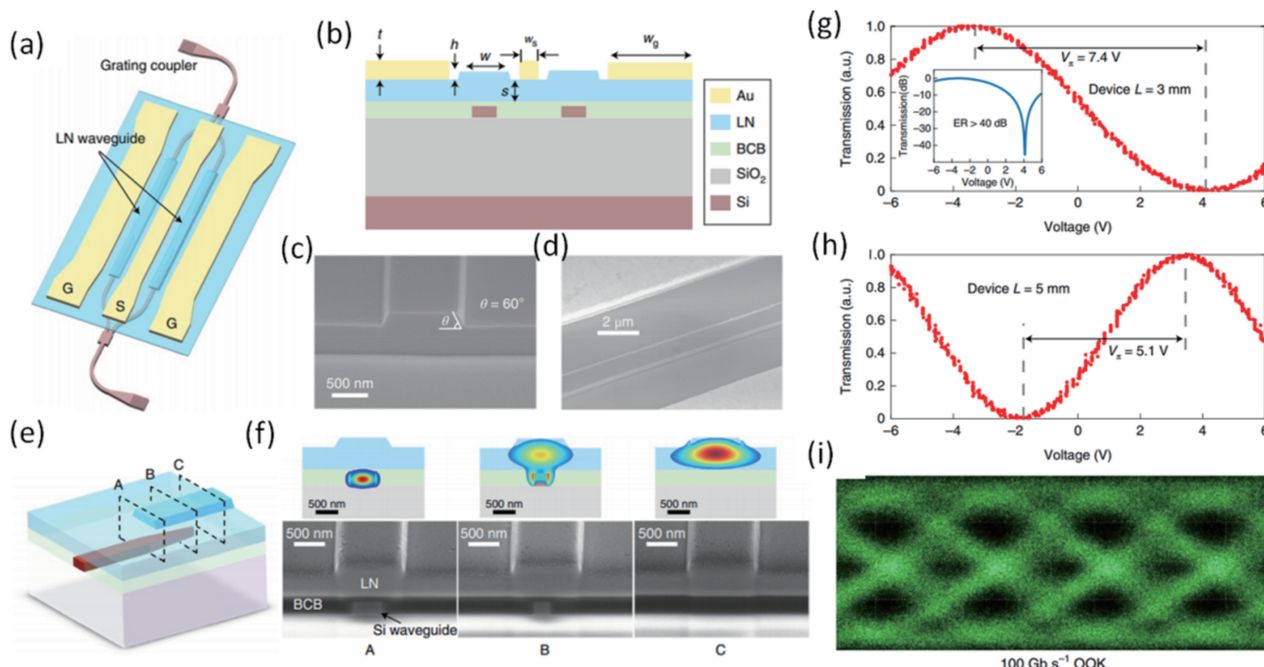


图 18 高速硅与铌酸锂混合集成电光调制器^[36]。(a)调制器结构示意图;(b)混合波导的横截面结构示意图;(c)铌酸锂波导的横截面 SEM 图;(d)电极和波导的 SEM 图;(e)垂直绝热耦合器示意图;(f)垂直绝热耦合器不同位置(A、B、C)的横截面 SEM 图和理论计算的 TE 模式分布;(g)器件长度为 3 mm 时透射率随施加电压的变化关系,插图为对数坐标下的消光比;(h)器件长度为 5 mm 时透射率随施加电压的变化关系;(i)眼图测试结果,结果显示该器件的光信号调制速度可达 100 Gbit/s

Fig. 18 High-speed hybrid silicon and LN electro-optic modulators^[36]. (a) Schematic of the structure of the modulator; (b) schematic of the cross-section of the hybrid waveguide; (c) SEM image of the cross-section of the LN waveguide; (d) SEM image of the metal electrodes and the optical waveguide; (e) schematic of the VAC; (f) SEM images of the cross-sections of the VAC at different positions (A, B, C) and calculated mode distributions; (g) normalized transmission of the devices with 3-mm length as a function of the applied voltage, in which the inset is measured extinction ratio on a logarithmic scale; (h) normalized transmission of the devices with 5-mm length as a function of the applied voltage; (i) optical eye diagram for the signal at data rates of 100 Gbit/s

5.7 微波光子芯片

图 19 展示了利用电子束曝光结合离子刻蚀技术制备的新型铌酸锂微波光子芯片,该芯片可以将微波信号与高品质铌酸锂微腔中的光场相耦合,实现从微波频段到光波频段的直接转换^[57]。图 19(a)为制备的微波光子器件的总体显微图,图 19(b)为微波光子器件中的高品质光学微腔局部显微图。图 19(c)为在悬空铌酸锂薄膜上通过加工叉指电极构成的薄膜声学腔。该器件利用铌酸锂薄膜的光机械相互作用可将频率高达 4.5 GHz 的微波转换为波长为 1500 nm 的光波。设计方案中利用叉指换能器(IDT)驱动一个悬空的长度为 100 μm 的薄膜声学腔,以调制光在迈克尔逊干涉仪或跑道型微腔中的传输。叉指换能器可以提供强大的微波声耦合,同时利用铌酸锂优异的光弹性、压电和电光效应,迈克尔逊干涉仪和跑道型微腔可以分别实现

4.6 V 和 0.77 V 的半波电压。器件中声光跑道型微腔具有 1.1 kHz 的光机械单光子耦合强度。该微波光子器件能够实现微波与光波的高效转换,这主要得益于铌酸锂优异的光电性能。

6 铌酸锂薄膜光子器件的非线性光学效应

6.1 自然准相位匹配高效非线性谐波产生

高 Q 值铌酸锂微腔能够产生诸多有趣的非线性光学特性。通过控制铌酸锂微腔的色散和光子偏振态,在尺寸为 30 μm、厚度为 600 nm 的铌酸锂单晶微腔中,利用铌酸锂晶体最大的电光系数 d_{33} ,实现了宽谱的、自然准相位匹配的二次谐波(SHG)、级联三次谐波(THG)产生^[39]。在 X 切、晶体光轴沿 Z 方向的铌酸锂微腔中,沿微腔外围传播的 TE 波可以感受到晶体取向的不断变化。二

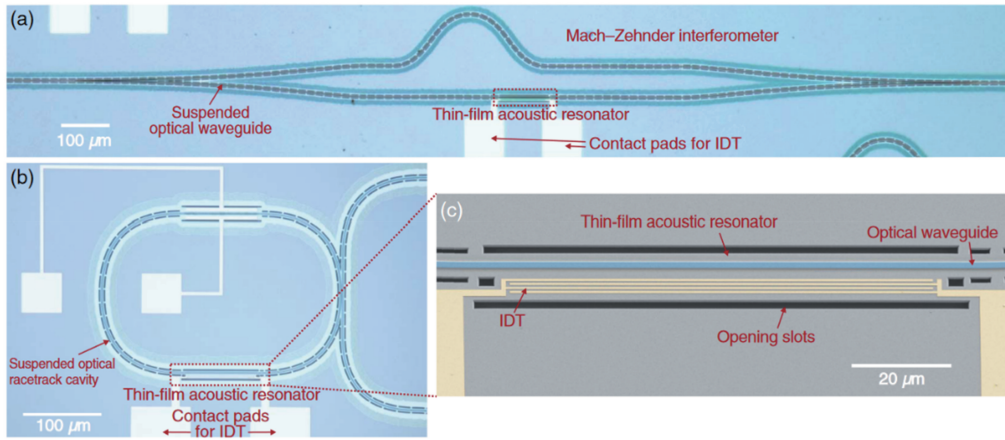


图 19 铌酸锂微波光子芯片^[57]。(a)光子芯片总体显微图；(b)含有薄膜声学腔的悬空光学跑道型微腔显微图；(c)由叉指换能器和光波导构成的薄膜声学腔的 SEM 伪彩图

Fig. 19 Microwave photonic chip on LNOI^[57]. (a) Microscope image of the photonic chip; (b) microscope image of a suspended optical racetrack cavity with a thin-film acoustic resonator; (c) false-color SEM image of the thin-film acoustic resonator composed of an interdigital transducer (IDT) and an optical waveguide

阶非线性系数可以表示为

$$d_{\text{eff}} = -d_{22} \cos^3 \theta + 3d_{31} \cos^2 \theta \sin \theta + d_{33} \sin^3 \theta, \quad (2)$$

其中 θ 是波矢 k 与光轴之间的角度,如图 20(a) 中所示。因此, d_{eff} 的符号在铌酸锂微腔中每半个周期反转一次,类似于常规 PPLN 晶体中的畴反转。如图 20(b) 所示,波长为 1547.8 nm、偏振态为

TE 的泵浦光,通过光纤锥耦合到 X 切的铌酸锂微腔中,与微腔的基模(Q 值 961 万)谐振,产生了波长为 773.9 nm、偏振态为 TE 的二次谐波(与微腔的高阶模谐振),其归一化转换效率为 $9.9\% \text{ mW}^{-1}$ 。同时,产生了级联三次谐波[图 20(c)],其波长为 515.9 nm、偏振态为 TE,归一化转换效率为 $1.05\% \text{ mW}^{-2}$ 。

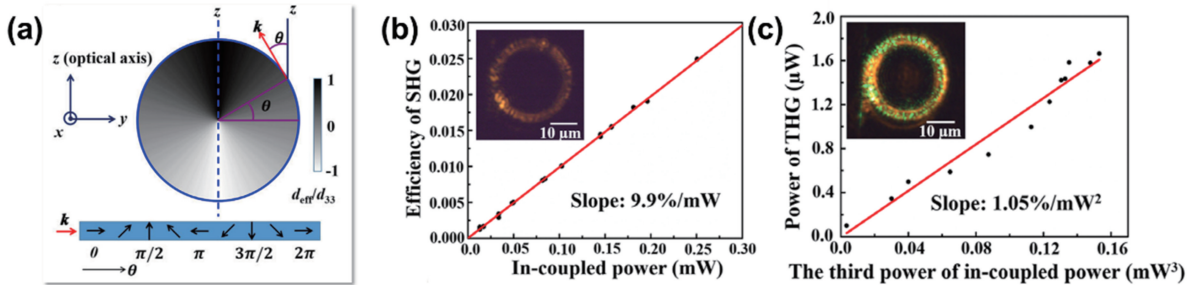


图 20 X 切铌酸锂微腔中宽带准相位匹配谐波的产生^[39]。(a)微腔的有效非线性系数随方位角的变化；(b)二次谐波转换效率与耦合功率的依赖关系,插图为微腔二次谐波光学显微俯视图；(c)级联三次谐波功率与耦合功率三次方之间的依赖关系,插图为微腔二次谐波及级联三次谐波的光学显微俯视图

Fig. 20 Broadband quasi-phase-matched harmonic generation in an X-cut lithium niobate microdisk^[39]. (a) Effective nonlinear coefficient of the microcavity varying with the azimuth; (b) conversion efficiency of SHG as a function of the in-coupled power, in which the inset is top-view optical micrograph of the SHG from the microresonator; (c) power of cascaded THG as a function of the cubic power of the in-coupled light, in which the inset is top-view image of the SHG and cascaded THG

其背后的非线性动力学机制为:泵浦光每绕微腔循环一周,有效非线性系数的符号改变一次,类似周期极化的铌酸锂结果,这提供了第一阶倒格矢去补偿倍频过程的相位失配;同时,有效非线性系数的振幅也在振荡,这提供了第三阶倒格矢去补偿级联

三倍频过程的相位失配。

6.2 电光可调光机械力学效应

腔光机械力学是研究光与材料机械性能之间相互作用的一门学科,回音壁模式光学微腔由于能够在共振时形成一个光学弹簧,已成为研究光学-力学

耦合作用的极佳平台,可以在腔量子电动力学、单分子探测等领域得到应用。

利用 PLACE 技术在厚度为 700 nm 的 Z 切铌酸锂薄膜材料上制备出与微电极同片集成的超高 Q 值铌酸锂微腔光机械系统^[58]。该系统的主要工艺流程为:首先通过飞秒激光直写技术在镀铬膜的铌酸锂薄膜材料上刻写出微盘腔和两个电极的轮廓,然后通过一次化学机械抛光技术去除未被铬膜保护的铌酸锂,留下微盘腔和两个电极部分。为了保留铬金属镀层的调控电极,不采用铬金属腐蚀液,而再次采用飞秒激光直写技术选择性地去除微盘腔上的铬膜,最后将样品浸入稀的氢氟酸溶液中腐蚀掉微盘腔下的部分二氧化硅,得到悬空的微盘腔结构,其直径约为 66 μm 。

为表征该集成铌酸锂光机械系统的性能,采用

如图 21(b)所示的测量装置,利用扫频激光器测量发现该微盘腔有模式劈裂,通过双洛伦兹拟合得到 970 nm 波段共振处双峰劈裂的光学 Q 值分别为 1×10^7 和 2.8×10^6 。在铬膜电极上施加电压,电压每增加 100 V,对应的电光调谐约为 2.5 pm,即调谐效率为 2.5 pm/100 V。实验测得该微腔光机械系统的机械共振频率为 $f_m = 100.23$ MHz,与理论模拟得到 100.79 MHz 的机械频率非常接近,并测得其有效力学品质因子 Q_m 高达 2.86×10^8 [图 21(c)]。为了演示该系统的实时电调机械模式,需要测量不同电压下的机械频率,如图 21(d)所示,所测量的机械频率随着施加电压的增加而单调降低。在 100, 200, 300, 400, 500, 600 V 的电压下,机械频率分别降低 75, 200, 350, 500, 630, 780 kHz。线性拟合得到机械频率电调效率约为 -134 kHz/100 V。

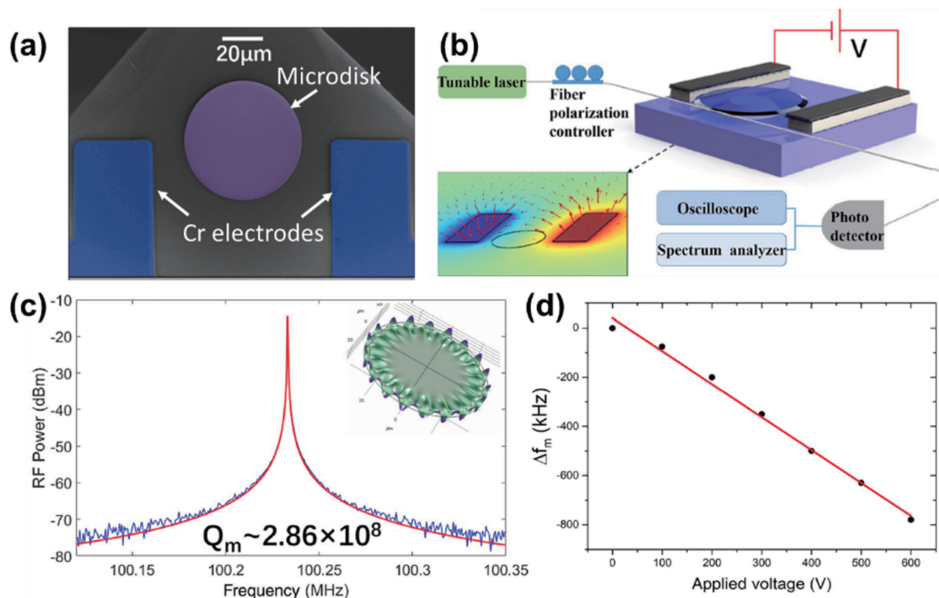


图 21 基于铌酸锂微腔的光机械力学系统^[58]。(a)集成有 Cr 电极的 66 μm 铌酸锂微腔的 SEM 俯视图;(b)微腔光机械的测试装置,左下插图铌酸锂微腔中的模拟电场分布;(c)腔传输的射频谱,右上插图铌酸锂微盘中机械模式的仿真结果;(d)在 100, 200, 300, 400, 500, 600 V 的直流(DC)电压下,机械频率呈线性下降,分别下降 75, 200, 350, 500, 630, 780 kHz

Fig. 21 Optomechanical system on LN microresonator^[58]. (a) Top-view SEM of the 66- μm LN microresonator integrated with Cr electrodes; (b) experimental setup for characterizing the optomechanical system on microresonator, in which the inset (lower left) is simulated distribution of the electric field in LN microresonator; (c) radio frequency (RF) spectrum of the cavity transmission, in which the top-right inset is the simulation result of the mechanical mode in the LN disk; (d) mechanical frequency decreases linearly by 75, 200, 350, 500, 630, and 780 kHz at the DC voltages of 100, 200, 300, 400, 500, and 600 V, respectively

6.3 电光可调宽带光学频率梳

光学频率梳(简称光频梳)是在频域上表现为离散的、等间距的光学频率序列,是精密计时、光通信、光谱学等领域十分重要的精密光谱测量和频率计量

的工具。小型化光频梳可以极大地拓展传统光频梳的应用范围,如光学原子钟、光通信、精密光谱测量和量子计算等领域。通常情况下,频率梳是通过主动控制飞秒激光器的特性来实现的。最近研究表

明,高 Q 值微谐振器中产生的级联三阶非线性光学过程,如四波混频、拉曼效应等,可以用于片上频率梳的产生。微腔频率梳具有数十甚至数百 GHz 的重复频率,大大减小了器件的尺寸,降低了器件的能耗。尽管在微腔中产生的光脉冲的零频率和重复频率有时候没有被锁定,但研究人员习惯将其也称为频率梳。下文使用术语“频率梳”来描述在铌酸锂微腔中获得的多频光源。

为了产生频率梳,在微谐振腔中通常需要有异常色散来平衡克尔效应。铌酸锂克尔频率梳最早在 X 切铌酸锂微环腔中得到证实^[59]。如图 22 所示,在半径为 $100\ \mu\text{m}$ 、厚度为 $600\ \text{nm}$ 的 Z 切微环腔中产生了锁模孤子微梳。该微环的 Q 值为 2.2×10^6 ,FSR 为 $199.7\ \text{GHz}$,在通信波段的群速度色散为 $-0.047\ \text{ps}^2/\text{m}$ [$D_2/(2\pi) = 1.76\ \text{MHz}$]。为了驱动从混沌状态向孤子状态的转变,在 SiO_2 , SiN , CaF_2 和 MgF_2 微谐振腔中,通常需要沿模式的长波长方向进行激光扫描,以克服热效应。铌酸锂的光

折变效应会导致与强度有依赖关系的折射率下降,这与热效应相反,而且热光系数在室温附近相对较小,因此 Z 切微环腔中的准 TE 模式将表现出光学双稳性。当泵浦光在形成孤子的位置向长波方向偏移时,它将稳定激光谐振腔的失谐,使孤子锁模过程自启动,且与泵浦光的方向无关。当芯片上的泵浦激光功率为 $33\ \text{mW}$ 时,可以观察到平滑双曲正割型(Sech^2)光谱包络,实现单孤子状态梳状光谱的输出,其中 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $27.9\ \text{nm}$ 。通过频率分辨光学门技术(FROG),测量了输出脉冲的时域波形,证实其为单孤子状态,脉冲波形的周期为 $5\ \text{ps}$ 。该数值与微谐振器的往返时间相符合。此外,在同一微环腔中观察到了克尔孤子的二次谐波产生。在铌酸锂薄膜微腔中观察到的双色孤子微梳对于产生片上自参考、倍频程带宽频率梳光源具有巨大的潜力。此外,在半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的 Z 切铌酸锂微环中也观察到了孤子梳锁模至 $2\ \mu\text{m}$ 的状态。

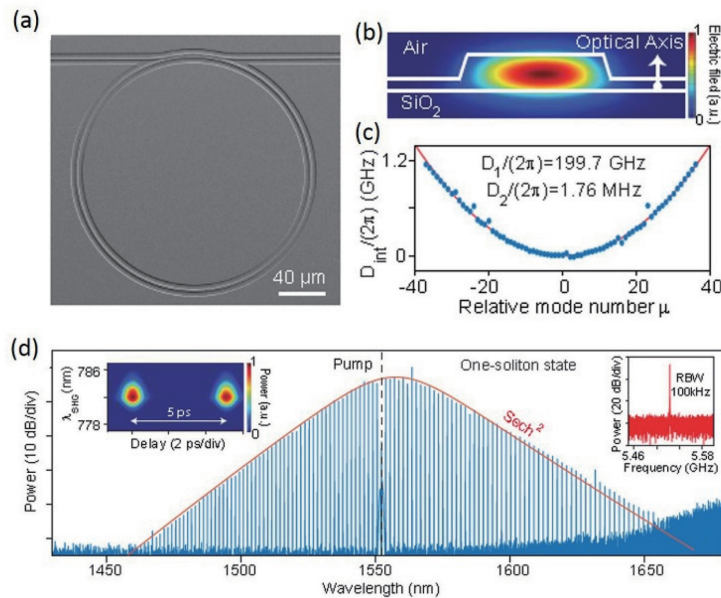


图 22 微环中产生的孤子频率梳^[59]。(a)微环的 SEM 图;(b)模式的横截面示意图;(c)群速度色散;(d)孤子梳

Fig. 22 Soliton frequency comb generated from a microring^[59]. (a) SEM image of the microring; (b) cross sectional schematic of mode; (c) GVD; (d) soliton comb

铌酸锂是具有几个强振动声子分支的拉曼活性晶体,通过拉曼散射可以产生拉曼激光和拉曼频率梳。如图 23 所示,基于 PLACE 技术制备的 Q 值高达 7.1×10^6 的铌酸锂微腔,通过集成微电极,可以实现电光可控的宽带光频梳的产生^[60]。制备工艺中,为了利用铬膜作为微电极给微盘腔施加电场,在 PLACE 标准工序中未使用铬金属腐蚀液浸泡去除铬膜掩模,而是再次采用飞秒激光直写技术选择

性地去除微盘腔边缘上的铬膜,保留微盘腔中心及微盘外的铬膜。图 23 (a) 为制备完成的直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的铌酸锂微腔光频梳器件的显微俯视图,通过透射光成像,可见铬电极因其不透光而清晰可辨,与透明的铌酸锂微盘腔相比,呈黑色状。阳极设计为圆形垫,直径大小可以覆盖二氧化硅支撑区域,而阴极则设计为直径约为 $130\ \mu\text{m}$ 的凹半圆形图案。该片上集成微盘腔光频梳器件通过飞秒激光直写一

次性完成,以 100 nm 的加工精度同时直写微盘和微电极。如图 23(b) 所示,泵浦激光功率为 20.4 mW 时,可以观察到光谱中心为 1552.4 nm 的拉曼辅助频率梳,光频梳谱宽为 200 nm。由于化学机械抛光制备的铌酸锂微盘具有更高的 Q 值,因此梳齿产生的泵浦功率明显低于先前报道的泵浦功率。通过在铬微电极上添加可调电压,进一步演示

对光频梳的实时调控,实验发现,电压从 -100 V 增加到 300 V 时,共振波长连续红移约 150 pm,如图 23(c) 所示,拟合曲线表明,该微腔具有约 38 pm/100 V 的电光调制效率。图 23(d) 显示在 ± 500 V 的电压下,该微腔光频梳具有 400 pm 的电调范围,覆盖了铌酸锂微盘腔的 FSR 的九分之一。

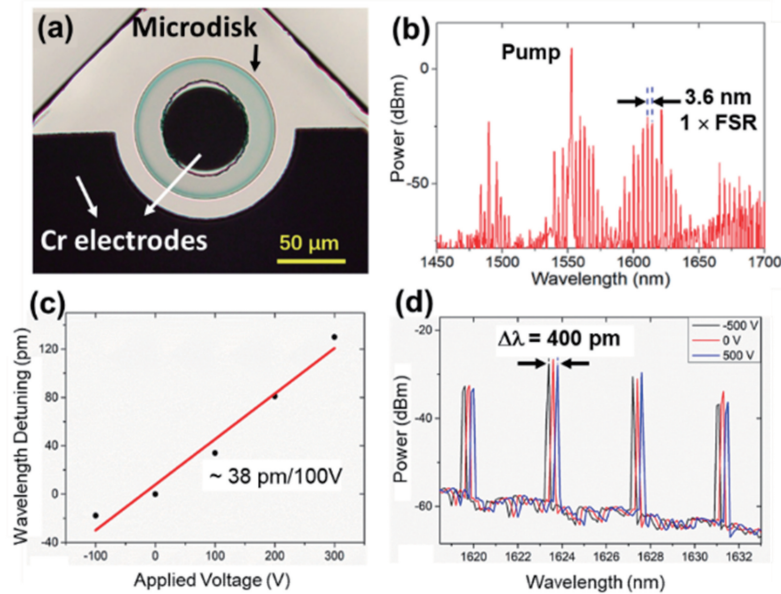


图 23 电光可调谐带铌酸锂微盘腔光频率梳^[60]。(a)微盘和集成的 Cr 电极的光学显微图(透射照明);(b)产生的梳状光谱;(c)共振波长以 ~ 38 pm/100 V 的电调制率随电压而线性变化;(d)光频梳随调控电压的变化

Fig. 23 Electro-optical tunable optical frequency comb on an LN microdisk^[60]. (a) Optical micrograph of the disk and integrated Cr electrodes under transmission illumination; (b) optical spectra of comb generation; (c) resonant wavelength shifts linearly with an electrical tuning efficiency of ~ 38 pm/100 V; (d) comb line shift as a function of the applied voltage

6.4 新型多边形模式物理效应

在超高 Q 值的铌酸锂微谐振腔中可以观测到多边形模式的物理效应,与此前在变形微腔中观测到的多边形模式相比,当前观测到的多边形模式微盘腔具有更高的 Q 值(1.4×10^6)^[61]。图 24(a) 和图 24(b) 为观察到的多边形模式所用的高品质铌酸锂微盘腔的光学显微图。实验中使用 632 nm 的可调谐激光在铌酸锂微盘腔中激发出三角形、四边形、五边形和五角星模式,如图 24(c) 和图 24(f) 所示。实验证实,耦合光纤可以导致微腔对称性破缺,从而形成多边形模式。理论上,通过 COMSOL 在柱坐标系下,模拟了光纤-微盘腔耦合系统的共振模式。将宽度为 1 μm 的锥形光纤放置在半径为 15 μm 的 Z 切铌酸锂微盘附近,不断减小耦合光纤与微盘腔的间距,随着间距的减小,原来微盘腔的圆形模式[图 24(g)] 逐渐变为四边形模式[图 24(h)],

图 24(g) 和图 24(h) 的间距分别为 900 nm、0 nm。由此推测,耦合光纤破坏了微盘腔的对称性,从而产生了多边形模式。由于通过光纤扰动产生的模式扰动仅局限在光纤-微盘腔耦合区域,因此对光损耗的影响相对较小,有助于维持较高的光学 Q 值。

6.5 双腔光子学分子非线性效应

光子学分子是由两个微谐振腔耦合组成的一种光子结构,具有独特而复杂的模式特征,是实现相位匹配的非线性频率转换的一种有效结构。利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术,已经实现了片上集成的铌酸锂双微盘腔光子学分子结构[图 2(d)]^[41]。该结构由两个直径分别为 25 μm 和 35 μm 的铌酸锂微盘腔组成,微盘耦合区域的最小距离为 130 nm。两个微盘具有不同的自由光谱范围,这种不对称的结构有助于利用游标(Vernier)效应实现两个微盘中特定回音壁模式的共振,降低了

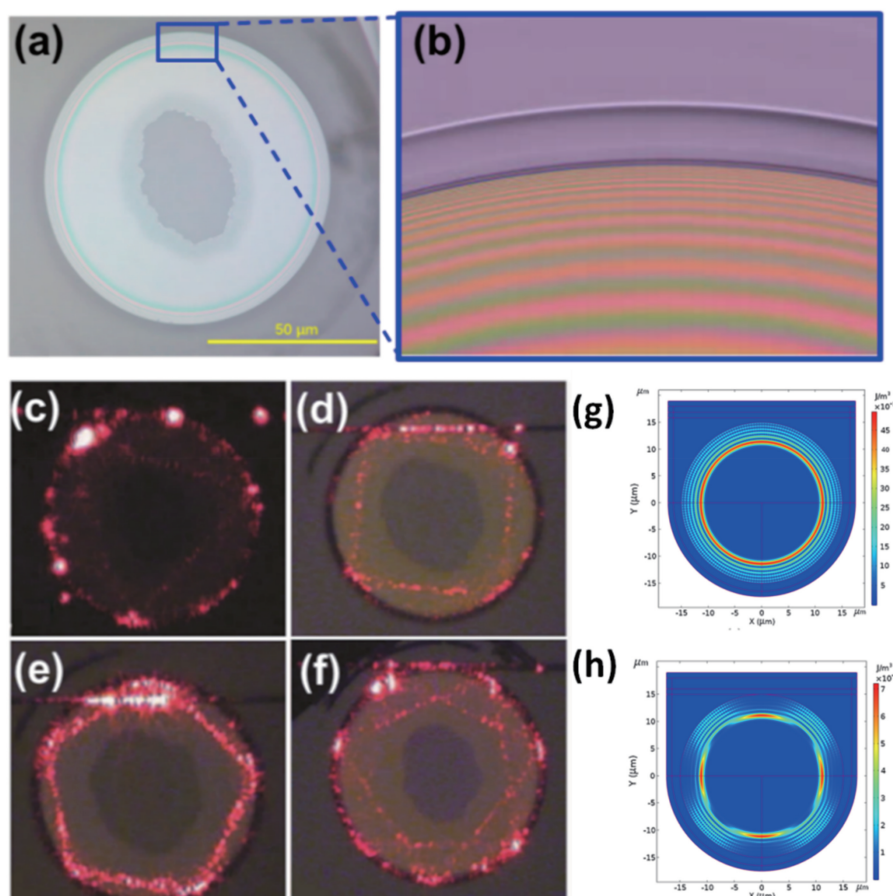


图 24 回音壁模式微腔中的多边形相干模式^[61]。(a)直径为 84 μm 的铌酸锂微谐振腔的光学显微图;(b)微盘边缘的光学显微图;(c)三角形模式;(d)四边形模式;(e)五边形模式;(f)五角星模式;(g)(h)当耦合光纤与微盘的间距为 900 nm 和 0 nm 时,理论模拟获得的微盘腔内的相干模式

Fig. 24 Polygon coherent modes in a weakly perturbed whispering gallery microresonator^[61]. (a) Optical micrograph of an 84- μm -diameter LN microdisk; (b) close-up view optical micrograph of the edge of the microdisk; (c) triangle mode; (d) square mode; (e) pentagon mode; (f) star mode; (g)(h) intensity distribution of the tapered fiber-microdisk resonance modes when the gap between the tapered fiber and microdisk is 900 nm and 0 nm, respectively

对加工精度的要求。实验测得该结构的 Q 值可达 10^6 以上。

如图 25(a)和图 25(b)所示,在波长约 1550 nm 的连续光泵浦下,随着泵浦功率逐渐提高,实验观测到了该光子学分子结构产生的多种非线性光学过程,包括倍频效应以及由在倍频信号附近产生的级联四波混频和受激拉曼散射信号。当泵浦功率为 10.4 mW 时,仅观测到 782.73 nm 处的二次谐波峰;当泵浦功率增加到 14 mW 时,围绕二次谐波峰出现两个对称等距的四波混频峰,波长分别为 778.09 nm(F1)和 787.37 nm(F2);随着泵浦功率的增加,出现了级联四波混频过程,进一步在 773.44 nm(F3)和 792.01 nm(F4)处出现峰值。当倍频信号功率达到微瓦量级时,四波混频信号的转换效率可达 14%。同时,实验中还观察到级联拉曼

散射,其拉曼位移分别为 580,581,252 cm^{-1} ,分别如图 25(b)中的拉曼峰 R1,R2 和 R3 所示。另一方面,如图 25(b)右上方插图所示,在基频泵浦波长附近未发现明显的四波混频或拉曼峰,这表明二次谐波共振波长处丰富的非线性效应是由两个微腔腔膜的强耦合所致。

同时,利用二维时域有限差分法等数值模拟方法,分别对单个直径为 35 μm 大腔、单个直径为 25 μm 小腔,以及双腔耦合模的腔模分布进行了仿真计算。图 25(c)右上图显示了大腔中二次谐波峰周围的 5 个相邻模式,对应共振波长分别为 778.232,780.463,782.710,784.963,787.22 nm。这些模式在频域中分布不均匀,根据动量守恒原理,无法进行有效的四波混频。幸运的是,如图 25(c)右侧所示,两个微腔在 782.71 nm 波长处有简并的

回音壁模式(大腔 $TE_{1,300}$ 和小腔 $TE_{1,213}$)。当两个微盘腔的间隙为 130 nm 时,腔膜可实现强耦合,劈裂为 782.70 nm(反成键模式)和 782.73 nm(成键模式)两种模式[图 25(d)]。如图 25(c)右下图所示,此时,778.232,782.70,787.22 nm 的模式之间由于完全满足相位匹配条件,可以实现有效的四波混频。以上数值模拟表明,大腔 $TE_{1,300}$ 和小腔 $TE_{1,213}$ 腔膜之间发生耦合,形成光子学分子特有的模式劈裂。模式劈

裂产生的平移恰好使得其中一个耦合模式与旁边相隔 2 个自由光谱范围(4.6 nm)的大腔模式满足四波混频所需的相位匹配条件,从而在没有反常色散的倍频波段实现了四波混频。未来可以通过集成微电极以更高的速度和灵活性来调节光子学分子中单个微盘的谐振。铌酸锂微盘光子学分子提供的非线性光学平台为片上光子存储、纠缠双光子源、宇称-时间对称、量子光学等大量应用提供了新的机遇。

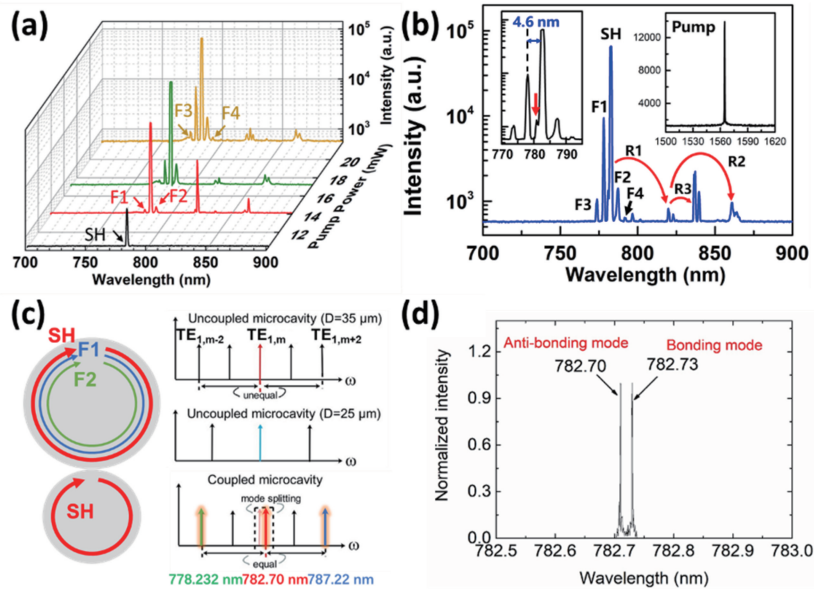


图 25 铌酸锂微盘光子学分子结构的非线性光学特性^[41]。(a)泵浦功率分别为 10.4, 14.0, 17.1, 21.9 mW 时,双盘腔在二次谐波波段的非线性光谱;(b)泵浦功率为 23.2 mW 时的输出频谱,其中左插图是为四波混频频谱,右插图是泵浦波长附近的光谱;(c)利用光子学分子分裂模式实现四波混频过程的相位匹配机制示意图;(d)强耦合引起模式劈裂

Fig. 25 Nonlinear optical characteristic in LN microdisk photonic molecules^[41]. (a) Nonlinear spectra generated near the second harmonic (SH) wavelength at the pump powers of 10.4, 14.0, 17.1, and 21.9 mW; (b) spectra at the pump power of 23.2 mW, in which the left inset is four wave mixing (FWM) spectrum and the right inset is spectrum near the pump wavelength; (c) schematic illustration of the phase matching mechanism of the FWM process achieved by utilizing the splitting mode of the photonic molecules; (d) mode splitting due to strong coupling

6.6 双层腔高 Q 值腔外回音壁模式效应

传统的回音壁模式光学微腔通过全内反射将光场局域在微腔内部,其光与物质相互作用局限于光与微腔介质本身之间的相互作用,只有一小部分的模式能量可以通过隐矢波形式延伸到腔外环境中用于光耦合或光传感,这极大地限制了它们在腔光力学、光学检测等重要领域中的应用。研究人员利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术制备出双层铌酸锂微盘腔,并在理论上证实:该双层微盘腔不仅可以支持腔内高 Q 值回音壁模式振荡,而且可以支持狭缝回音壁模式振荡,同时双层微盘腔均具有较高的 Q 因子和很强的光局域性,可使光场在狭缝中得到增强^[62]。

如图 26(c) 所示,该双层微盘腔直径约为 30 μm ,上下层铌酸锂微盘的厚度分别约为 291 nm 和 312 nm,两层微盘之间仅有 138 nm 高的均匀狭缝,双盘距离衬底铌酸锂体材料约 2 μm ,放大的伪彩图清楚地显示上下微盘分离良好。该双层微盘腔 Q 值高达 10^5 。通过 AFM 表征,该微盘腔的表面均方根粗糙度为 0.5 nm。有限元分析表明(图 27),该结构中外部狭缝回音壁模式能量占 43.9%,腔内回音壁模式能量占 56.1%。而对于同等厚度的单层微盘腔而言,能量在腔外的比例只有 1.3%左右,这说明所制备的双层微盘腔结构中水平狭缝的上下表面非常光滑,其狭缝回音壁模式是微腔共振和狭缝结构双重增强的效果。该结果相比于目前同类最

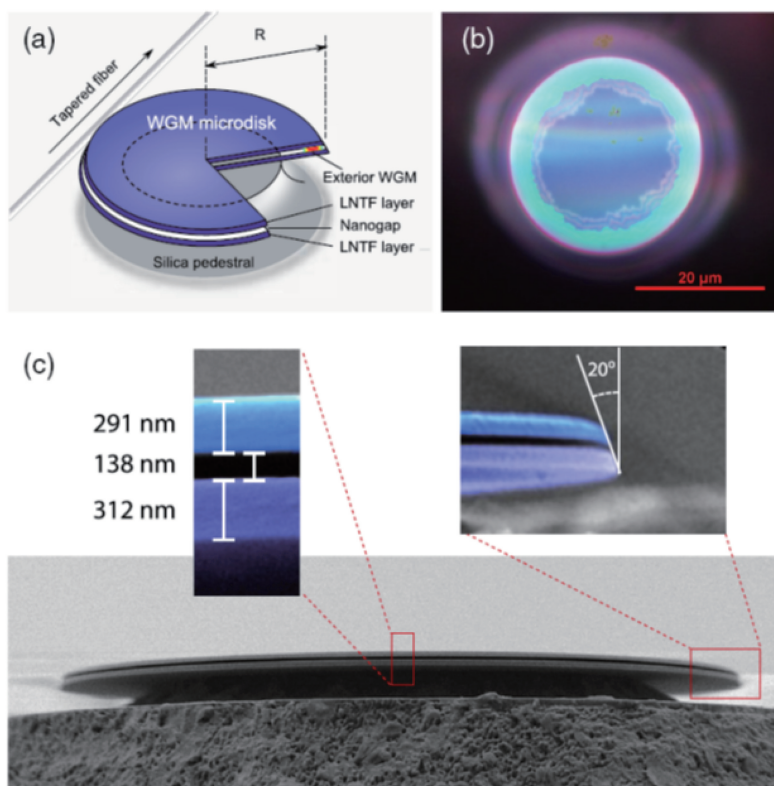


图 26 铌酸锂双层微盘腔^[62]。(a) 铌酸锂双层微盘腔结构示意图；(b) 微盘腔的光学显微俯视图，两个不规则圆形为向内腐蚀的二氧化硅缓冲层；(c) 微盘腔 SEM 侧视图，放大的伪彩图显示上下微盘层分离良好

Fig. 26 Double-layer LNOI microdisk^[62]. (a) Schematic of the double-layer LNOI microdisk; (b) top-view optical microscopy image of the microdisk, in which the two inner irregularly shaped circles indicate the inward etched silica buffer layers; (c) SEM image of the microdisk, with enlarged false-colored images clearly showing the well-separated upper and lower layers

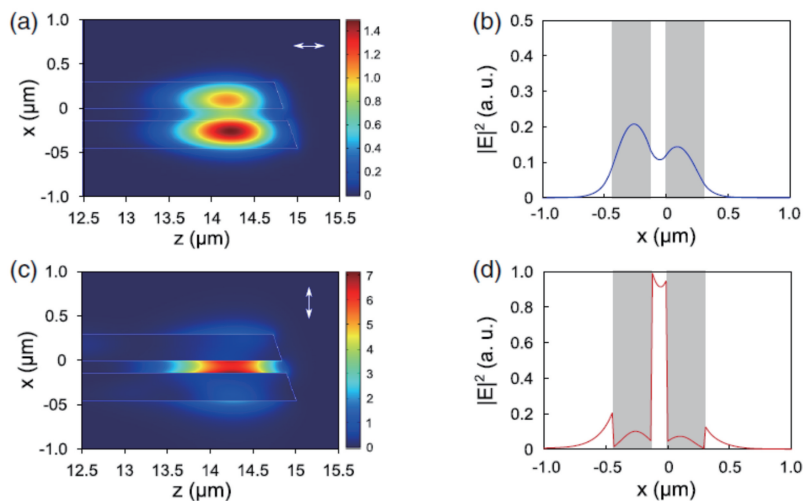


图 27 铌酸锂双层微盘腔内外模式的能量分布^[62]。(a)(c) 铌酸锂双微盘内和微盘间的 WGM 横向强度分布 ($|E|^2$), 箭头表示电场极化方向；(b)(d) 相应模式沿 X 向的强度分布, 其中灰色条对应铌酸锂微盘层

Fig. 27 Energy distribution of interior and exterior modes in the double-layer LNOI microdisk^[62]. (a) (c) Transverse intensity profiles of interior WGMs and exterior slot WGMs, in which the arrows indicate the polarization of the electric field; (b) (d) intensity distribution of the respective mode along the X direction, in which the gray regions correspond to the LNOI microdisk layers

优的硅基垂直狭缝模式有更大的提高。这种新型的双层微腔为研究微腔光学提供了一个新颖的平台和手段,未来有望在片上电光调制、频率变换、电场感应、腔光力学、非线性光学和光学检测等方面得到更多应用。

7 结束语

综上所述,利用飞秒激光直写结合聚焦离子束刻蚀技术、电子束曝光结合离子刻蚀技术、飞秒激光光刻辅助化学机械抛光技术,实现了超高品质因子微盘腔、超低损耗光波导等集成光路中的关键核心光子结构的制备。同时,基于这些光子结构构建了一批高性能铌酸锂光子器件,并实现了多种非线性光学效应。聚焦离子束技术的制造效率相对较低,目前不在产业界的考虑范围,另外两条技术途径目前都已产生了许多令人瞩目的成果,且都进入了产业界的视野。原理上来讲,化学机械抛光技术能够将光子结构表面的散射损耗降至极低水平,从而使所得制备的铌酸锂光子器件的损耗接近材料本征吸收损耗。该技术已逐渐从实验室走向实际应用,可以预见,未来该技术将会使光子集成领域的学术界和产业界受益匪浅。

当然,该技术也有一些问题有待解决,比如,受限于有限的铬与铌酸锂之间的刻蚀比率,铌酸锂微腔与平面集成波导之间存在较大的间隔,很难做到临界耦合;尽管微腔的 Q 值已突破 10^8 ,但脊型波导的损耗却没有获得相应进展;大规模集成展露曙光,然而要实现复杂的功能集成,尚需时日;片上激光器已被实现,但还不是单模激光,且还没实现激光的片上非线性频率变换。铌酸锂光子集成技术的未来充满了机遇与挑战,尚有巨大发展空间等待着人们去探索。

参 考 文 献

- [1] Miller S E. Integrated optics: an introduction [J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2059-2069.
- [2] Takahashi H. Planar lightwave circuit devices for optical communication: present and future [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5246: 520-531.
- [3] Bogaerts W, Wiaux V, Taillaert D, et al. Fabrication of photonic crystals in silicon-on-insulator using 248-nm deep UV lithography[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(4): 928-934.
- [4] Bogaerts W, Baets R, Dumon P, et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 401-412.
- [5] Wang J, Paesani S, Ding Y, et al. Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics[J]. Science, 2018, 360(6386): 285-291.
- [6] Politi A, Cryan M J, Rarity J G, et al. Silica-on-silicon waveguide quantum circuits [J]. Science, 2008, 320(5876): 646-649.
- [7] Meany T, Gräfe M, Heilmann R, et al. Laser written circuits for quantum photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(4): 363-384.
- [8] Crespi A, Osellame R, Ramponi R, et al. Anderson localization of entangled photons in an integrated quantum walk[J]. Nature Photonics, 2013, 7(4): 322-328.
- [9] Gräfe M, Heilmann R, Perez-Leija A, et al. On-chip generation of high-order single-photon W-states [J]. Nature Photonics, 2014, 8(10): 791-795.
- [10] Zhang Z Y, Felipe D, Katopodis V, et al. Hybrid photonic integration on a polymer platform [J]. Photonics, 2015, 2(3): 1005-1026.
- [11] Xia H Y, Chen T K, Hu C, et al. Recent advances of the polymer micro/nanofiber fluorescence waveguide[J]. Polymers, 2018, 10(10): 1086.
- [12] Han X Y, Wu Z L, Yang S C, et al. Recent progress of imprinted polymer photonic waveguide devices and applications[J]. Polymers, 2018, 10(6): 603.
- [13] Gunn C, Koch T L. Silicon photonics[M]//Kaminow I P, Li T, Willner A E, et al. Optical fiber telecommunications V A (fifth edition): components and subsystems. Amsterdam: Elsevier, 2008: 381-429.
- [14] Hu Y J, Wang S X, Wang D W, et al. Research progress of mid-infrared micro-ring resonator and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230004.
胡玉洁, 王书晓, 汪大伟, 等. 中红外微环谐振器及应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230004.
- [15] Fathpour S. Emerging heterogeneous integrated photonic platforms on silicon [J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): 143-164.
- [16] Komljenovic T, Davenport M, Hulme J, et al. Heterogeneous silicon photonic integrated circuits [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 20-35.
- [17] Sohler W, Hu H, Ricken R, et al. Integrated optical devices in lithium niobate[J]. Optics and Photonics News, 2008, 19(1): 24-31.

- [18] Weis R S, Gaylord T K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure [J]. *Applied Physics A*, 1985, 37(4): 191-203.
- [19] Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2004, 201(2): 253-283.
- [20] Carrascosa M, García-Cabañes A, Jubera M, et al. LiNbO_3 : a photovoltaic substrate for massive parallel manipulation and patterning of nano-objects [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 040605.
- [21] Bazzan M, Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: recent developments and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 040603.
- [22] Kong Y, Bo F, Wang W, et al. Recent progress in lithium niobate: optical damage, defect simulation, and on-chip devices [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(3): e1806452.
- [23] Krasnokutskaya I. Photonic circuits engineering in lithium niobate on insulator [D]. Melbourne: RMIT University, 2019: 9-14.
- [24] Poberaj G, Hu H, Sohler W, et al. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonics devices [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(4): 488-503.
- [25] Jin H, Liu F M, Xu P, et al. On-chip generation and manipulation of entangled photons based on reconfigurable lithium-niobate waveguide circuits [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(10): 103601.
- [26] 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.
- [27] Sulser F, Poberaj G, Koechlin M, et al. Photonic crystal structures in ion-sliced lithium niobate thin films [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20291-20300.
- [28] Lin J T, Xu Y X, Fang Z W, et al. Second harmonic generation in a high-Q lithium niobate microresonator fabricated by femtosecond laser micromachining [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(11): 1-5.
- [29] Lin J, Xu Y, Fang Z, et al. Fabrication of high-Q lithium niobate microresonators using femtosecond laser micromachining for second harmonic generation [C]//CLEO: Science and Innovations 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California United States. Washington D. C.: Optical Society of America, 2015: STh3M.3.
- [30] Wang J, Bo F, Wan S, et al. High-Q lithium niobate microdisk resonators on a chip for efficient electro-optic modulation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23072-23078.
- [31] 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.
- [32] Wolf R, Breunig I, Zappe H, et al. Cascaded second-order optical nonlinearities in on-chip micro rings [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29927-29933.
- [33] Wolf R, Jia Y C, Bonaus S, et al. Quasi-phase-matched nonlinear optical frequency conversion in on-chip whispering galleries [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 872-875.
- [34] Li M X, Liang H X, Luo R, et al. High-Q 2D lithium niobate photonic crystal slab nanoresonators [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(5): 1800228.
- [35] Gao B F, Ren M X, Wu W, et al. Lithium niobate metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(5): 1800312.
- [36] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ and beyond [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [37] He L Y, Zhang M, Shams-Ansari A, et al. Low-loss fiber-to-chip interface for lithium niobate photonic integrated circuits [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2314-2317.
- [38] Lin J T, Zhou J X, Wu R B, et al. High-precision propagation-loss measurement of single-mode optical waveguides on lithium niobate on insulator [J]. *Micromachines*, 2019, 10(9): 612.
- [39] Lin J T, Yao N, Hao Z Z, et al. Broadband quasi-phase-matched harmonic generation in an on-chip monocrystalline lithium niobate microdisk resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(17): 173903.
- [40] Fang Z, Xu Y, Wang M, et al. Monolithic integration of a lithium niobate microresonator with a free-standing waveguide using femtosecond laser assisted ion beam writing [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45610.
- [41] Wang M, Yao N, Wu R B, et al. Strong nonlinear optics in on-chip coupled lithium niobate microdisk photonic molecules [J]. *New Journal of Physics*, 2020, 22(7): 073030.
- [42] Fang Z W, Yao N, Wang M, et al. Fabrication of high quality factor lithium niobate double-disk using a femtosecond laser [J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2017, 11(1): 47-54.
- [43] Wang C, Burek M J, Lin Z, et al. Integrated high quality factor lithium niobate microdisk resonators [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 30924-30933.

- [44] Zhang M, Wang C, Cheng R, et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator [J]. *Optica*, 2017, 4(12): 1536-1537.
- [45] Jia Y C, Wang L, Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: recent advances and perspectives[J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(1): 011307.
- [46] Lin J T, Bo F, Cheng Y, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1910-1936.
- [47] 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.
- [48] Gao R, Zhang H, Bo F, et al. Broadband highly efficient nonlinear optical processes in on-chip integrated lithium niobate microdisk resonators of Q-factor above 10^8 [EB/OL]. (2021-01-31) [2021-03-15]. <https://arxiv.org/abs/2102.00399>.
- [49] Zhang J, Fang Z, Lin J, et al. Fabrication of crystalline microresonators of high quality factors with a controllable wedge angle on lithium niobate on insulator[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(9): 1218.
- [50] Wu R B, 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.
- [51] Wang M, Wu R B, Lin J T, 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.
- [52] Wu R B, Lin J T, Wang M, et al. Fabrication of a multifunctional photonic integrated chip on lithium niobate on insulator using femtosecond laser-assisted chemomechanical polish [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4698-4701.
- [53] Zhou J X, Gao R H, Lin J T, et al. Electro-optically switchable optical true delay lines of meter-scale lengths fabricated on lithium niobate on insulator using photolithography assisted chemo-mechanical etching[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(8): 084201.
- [54] Wang Z, Fang Z, Liu Z, et al. On-chip tunable microdisk laser fabricated on Er^{3+} -doped lithium niobate on insulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 380-383.
- [55] Zhou J X, Liang Y T, Liu Z X, et al. On-chip integrated waveguide amplifiers on erbium-doped thin film lithium niobate on insulator[EB/OL]. (2021-01-04) [2021-03-15]. <https://arxiv.org/abs/2101.00783>.
- [56] Jin M, Chen J Y, Sua Y M, et al. High-extinction electro-optic modulation on lithium niobate thin film [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1265-1268.
- [57] Shao L B, Yu M J, Maity S, et al. Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators[J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1498-1505.
- [58] Fang Z W, Haque S, Lin J T, et al. Real-time electrical tuning of an optical spring on a monolithically integrated ultrahigh Q lithium niobate microresonator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1214-1217.
- [59] He Y, Yang Q F, Ling J W, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO_3 soliton microcomb [J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1138-1144.
- [60] Fang Z, Luo H, Lin J, et al. Efficient electro-optical tuning of an optical frequency microcomb on a monolithically integrated high-Q lithium niobate microdisk[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5953-5956.
- [61] Fang Z W, Haque S, Farajollahi S, et al. Polygon coherent modes in a weakly perturbed whispering gallery microresonator for efficient second harmonic, optomechanical, and frequency comb generations[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(17): 173901.
- [62] Zheng Y, Fang Z, Liu S, et al. High-Q exterior whispering-gallery modes in a double-layer crystalline microdisk resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(25): 253902.