

《物理学报》创刊 90 周年

铌酸锂集成光子器件的发展与机遇

熊霄 曹启韬 肖云峰[†]

(北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 纳光电子前沿科学中心, 北京 100871)

(2023 年 8 月 9 日收到; 2023 年 9 月 2 日收到修改稿)

铌酸锂, 作为应用最广泛的非线性光学晶体之一, 近十年来由于薄膜铌酸锂晶圆的出现而再次获得了学术界与产业界的关注. 基于薄膜铌酸锂的集成光电子器件的优越性能已在诸多应用中得到演示, 例如光信息处理、激光雷达、光学频率梳、微波光子学和量子光学等. 2020 年, 薄膜铌酸锂器件通过光刻技术在 6 in (1 in = 2.54 cm) 晶圆上的成功制备, 推动了铌酸锂加工从实验室逐步走向工业化. 薄膜铌酸锂光子器件的研究主要聚焦于利用电光、声光和二阶/三阶非线性效应进行光调制或频率转换; 最近三年, 掺杂稀土离子还成功赋予铌酸锂增益特性, 实现了片上铌酸锂放大器和激光器. 本文将简略回顾薄膜铌酸锂的发展过程, 着眼于集成光子器件, 介绍国内外研究组取得的进展、意义以及面临的挑战.

关键词: 集成光学, 非线性光学, 铌酸锂, 微腔光子学**PACS:** 42.82.-m, 42.65.-k, 42.70.Mp, 42.55.Sa**DOI:** 10.7498/aps.72.20231295

1 引言

铌酸锂是一种双折射非线性晶体, 具有优异的力学、热学、光学、声学 and 电学性质, 比如较高的折射率 (~ 2.2)、较宽的透明窗口 (350 nm—5 μm)、超强的二阶 ($d_{33} = 27 \text{ pm/V}$) 和三阶 ($n_2 = 1.8 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$) 非线性光学响应, 以及电光效应、压电效应、光弹效应、光折变效应等等^[1]. 通过电-光、声-光相互作用, 还可将其频谱范围进一步扩展, 覆盖射频-太赫兹-红外-可见波段. 伴随着激光器的发明、非线性光学的发展, 我国从 1970 年代起便在铌酸锂领域做出了很多开创性的工作, 包括南开大学与西南技术物理研究所合作的研究成果“中国之星”(掺镁铌酸锂晶体)、南京大学物理系生长的周期性极化铌酸锂 (periodically poled lithium niobate, PPLN) 晶体首次实验验证了准相位匹配原理、南京大学发展的首个基于铌酸锂的量子光学芯片等.

与硅材料相比, 铌酸锂的微纳加工极其困难, 长久以来都只能用块材晶体. 通过钛扩散或质子交换形成的 PPLN 波导 (尺寸 $\sim 10 \mu\text{m}$) 能够提高非线性相互作用的效率, 但依然无法满足集成化需求. 1998 年, 离子切片技术在铌酸锂晶体上实现; 2002—2004 年, 切片技术的优化、化学机械抛光对晶体表面的平整化以及晶圆键合技术的陆续发展, 大力推动了高质量薄膜铌酸锂 (thin film lithium niobate, TFLN) 的商业化生产, 使得晶圆级别的铌酸锂集成器件制造成为可能. 在这样的背景下, 再结合微纳加工技术的发展, 铌酸锂材料焕发新生, TFLN 集成光子器件也于近十年得到迅猛发展. 另一方面, 通过结合稀土离子或二维材料, 还可以实现基于铌酸锂的光源或光电探测.

随着基于铌酸锂的光源、光调制、光探测等重要器件的实现, 铌酸锂光子学回路有望像硅基集成电路一样, 成为高速率、大容量、低能耗光学信息处理的重要平台, 在光量子计算、大数据中心、人工智能等领域彰显应用价值. 关于铌酸锂集成光子

[†] 通信作者. E-mail: yfxiao@pku.edu.cn

器件已经有一些综述^[1-5], 本文不作重复阐述, 将重点梳理该领域的发展过程与研究现状, 以及对未来的展望.

2 薄膜铌酸锂平台

商业可用的 TFLN 晶圆厚度通常为 300—900 nm, 通过微纳加工, 铌酸锂波导、微腔等结构可将光场局域在亚波长量级, 从而大大降低器件的尺寸, 提高非线性作用效率. 其中, 波导的传输损耗是评价一个集成光学平台性能的关键指标, 它反映了材料对光的吸收、微纳结构表面的粗糙度以及其他损耗通道 (如弯曲、缺陷等) 的影响. 对于应用已经非常成熟的硅波导, 它的传输损耗通常在 1 dB/cm 量级.

最先发展起来的 TFLN 波导的制备工艺是干法刻蚀, 于 2005 年通过离子束刻蚀实现, 进一步经过工艺优化, 传输损耗已降至 0.027 dB/cm^[6]; 2015 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员^[7]首次提出了飞秒激光微加工结合聚焦离子束研磨工艺, 进一步降低了损耗、实现了大面积加工, 2018 年, 他们又发展了飞秒激光光刻辅助化学机械抛光工艺, 可获得传输损耗低至 0.0034 dB/cm 的波导和品质因子高达 10^8 的微腔; 2007 年, TFLN 波导的湿法刻蚀工艺被首次报道^[8], 经过工艺优化, 清华大学的研究人员^[9]获得了品质因子接近 10^7 的微环腔, 对应传输损耗约 0.04 dB/cm. 目前, 主流的方法还是干法刻蚀, 不过加工原料和加工过程的缺陷都会引入传输损耗; 化学机械抛光方法得到的器件性能可以逼近材料本身的吸收极限, 但难以实现需要临界耦合的结构, 如单片微环与光波导的临界耦合、定向耦合等; 湿法刻蚀虽然能够获得高品质微腔, 但也有亟待优化的方面, 比如刻蚀的各向异性.

TFLN 与其他材料异质集成是一个新的方向, 比如硅、氮化硅、III-V 族半导体等. 异质集成可以规避对铌酸锂的直接刻蚀, 从而发挥 CMOS 工艺和铌酸锂光学性质的双重优势. 随着 TFLN 微纳加工技术的发展和普及, 如今的异质 TFLN 器件为了将不同材料的优势最大化, 也会刻蚀铌酸锂从而提升器件性能.

基于实验室的前期探索, 铌酸锂晶圆级别的光子学器件加工已经于 2020 年通过深紫外光刻结合

干法刻蚀工艺实现^[10]. 如图 1 所示, 整片晶圆上, 波导的平均传输损耗为 ~ 0.27 dB/cm, 谐振腔的光学品质因子高达 10^6 , 同时还兼具高产率、高均一性和低成本等优点. 除了这种工艺, 飞秒激光光刻结合化学机械抛光刻蚀的方案已实现 4 in (1 in = 2.54 cm) 晶圆级集成, 另外, 紫外光刻结合干法刻蚀的方案也已有报道.

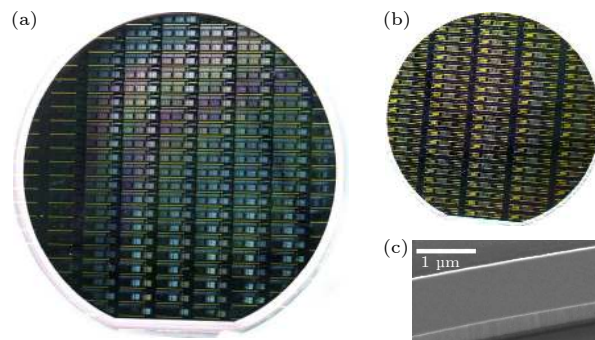


图 1 刻蚀后的 TFLN 晶圆, 以及 TFLN 微纳结构的平滑表面^[10]

Fig. 1. TFLN wafers after patterning, and TFLN nanostructures with smooth surface^[10].

3 TFLN 集成光子器件

3.1 铌酸锂光源

为了实现一体化 TFLN 集成芯片, 片上铌酸锂激光器、放大器的实现必须借助其他增益介质. 比如稀土材料具有谱线丰富、跃迁稳定、能级寿命长、线宽窄等优势, 其中 Er 离子因辐射波长在通讯波段受到更多关注, 其他常见的离子还有 Yb (发射截面大)、Nd (吸收波段宽) 和 Tm (“人眼安全”辐射范围) 等. 自 2020 年开始, 陆续出现了许多掺杂稀土离子的 TFLN 有源器件的报道^[3], 包括片上激光器和放大器, 这类有源器件通常需要光泵浦. 对于激光器, 已经实现了阈值低至 20 μ W、波长可调谐的激光输出; 放大器的归一化净增益高达 30 dB/cm. 值得注意的是, 这类开创性的工作主要来自中国, 包括南开大学、华东师范大学、上海交通大学、香港城市大学、山东大学, 处于国际领先水平.

还有一类是将 TFLN 与 III-V 族半导体异质集成, 进行电泵浦, 具有增益效率高和即插即用的优势, 详见参考文献^[4]. 2021 年, 通过微转移印刷技术, 将半导体光放大器与 TFLN 进行集成, 首个

电泵浦 TFLN 激光器得以实现; 几乎同时, 中山大学的研究人员通过端面耦合直接在 TFLN 芯片上外接反射半导体光放大器, 实现了片上 2.5 mW、调谐范围 36 nm 的激光输出; 2022 年, 通过外接分布式反馈激光器, TFLN 激光器的片上激光功率可达 60 mW; 结合电光效应, 还可以对出射激光进行 10^{18} Hz/s 量级的快速调谐; 最近, 晶圆级别、快速可调的 SiN-TFLN 激光器得以实现, 并用于演示激光雷达[11].

3.2 非线性光子器件

TFLN 非线性光子器件大致可以分为光调制、频率转换 (包括谐波产生和光频率梳)、量子光学三类 (图 2), 接下来进行简要介绍.

首先, 薄膜铌酸锂支持高效的电光、声光相互作用, 是发展光调制器的出色平台. 集成光子学技术的快速发展, 推动了高性能片上集成铌酸锂电光调制器的研究[2]. 2018 年, 哈佛大学的研究人员[12]通过设计制备高品质 TFLN 波导马赫曾德干涉结构, 并利用微纳尺度增强的光电耦合和相位匹配, 首次实现了传输速率达 210 Gbit/s、带宽大于 100 GHz 的 TFLN 电光调制器; 2019 年, 中山大学和华南师范大学的研究人员[13]合作, 通过发展 TFLN 和硅基材料体系的异质集成技术, 实现了 CMOS 芯片兼容的铌酸锂调制器, 同时具有高达 100 Gbit/s 的调制速率. 基于 TFLN 高效电光调制效应, 哈佛

大学研究人员实现了高效宽谱电光频率梳[14]、单边带调制器[15]、飞秒光脉冲产生[16]等. 此外, 斯坦福大学[17]于 2020 年首次报道了基于 TFLN 声学表面波导的声光调制器, 降低了声学悬浮结构的加工难度.

其次, 得益于铌酸锂优异的二阶/三阶非线性光学特性, TFLN 光子器件已经广泛地应用于高效谐波产生[18-21], 成为当前大范围光学频率拓展的重要手段之一. 谐波产生的效率强烈依赖于相位匹配条件, 尤其对于微纳尺度的 TFLN 波导和微腔, 结构和材料色散共同影响着相位匹配情况. 因此, 微纳光学加工技术的快速发展, 除了在提高样品加工精度方面具有重要意义, 还为各种高效相位匹配机制的实现提供了必要条件, 包括 PPLN 准相位匹配[18]、*x*-切晶向辅助的自然准相位匹配[19]、双层反极化自然相位匹配[20]、*x*-切跑道腔辅助自发准相位匹配[21]等. 迄今, 集成铌酸锂微腔体系已实现二次谐波归一化转换效率高达 5000000%/W[18]; 但绝对效率还有待提升, 目前最高为 58%. 进一步, 在多种非线性效应的协同作用下, TFLN 也已经发展成为集成光频率梳或超连续光产生和应用的重要平台, 并展现出自启动、电调控等优异性能[22], 可用于颗粒物中红外检测、精密测量和光钟授时. 除此之外, 通过电光、声光效应, TFLN 还能够实现光波与微波的转换[23], 其应用场景除了气体传感、6G 通信, 还可以结合超导量子回路, 进行量子计算、搭建量子网络.

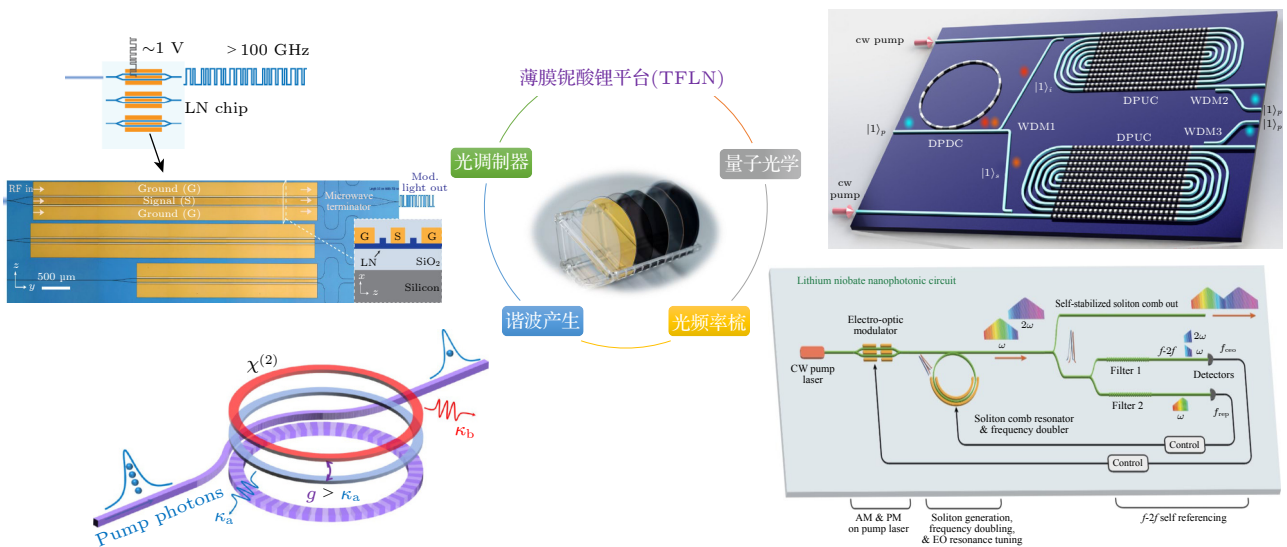


图 2 薄膜铌酸锂非线性光子器件 光调制器[12], 谐波产生[18], 光频率梳[22], 量子光学[26]

Fig. 2. TFLN nonlinear optical devices: optical modulators[12], harmonics generation[18], frequency combs[22], quantum optics[26].

最后,量子光学方面,利用前面提到的各种高性能 TFLN 器件进行量子光源产生和逻辑门操作,详见参考文献 [5]. 相比于硅基的自发四波混频, TFLN 中的自发参量下转换过程能以更低的泵浦、更高的效率产生纠缠光子对或单光子源,且信号光不受泵浦光的干扰. 该过程于 2016 年率先在 TFLN 微盘腔中实现,通过设计结构色散,不同偏振的模式满足自然相位匹配,产生的光子对的聚束和纠缠特性均得到了证实;通过引入周期极化,同一偏振的基模相位匹配首先在 PPLN 波导中实现,10 MHz 的光子对产生速率需要 0.23 mW 的泵浦,符合计数比高达 6.7×10^4 ;同年,在高品质因子微环腔中,同样的光子对产生速率仅需 3 μ W,且符合计数比保持在同一量级;类似器件的指标还持续在刷新 [24]. 除了预报单光子源, TFLN 上还实现了确定性的单光子源、压缩态 [25],有望实现任意光子数态 [26]. 原则上,还可以利用二阶非线性效应实现逻辑门操作.

3.3 铌酸锂探测器

铌酸锂本身对光子吸收极弱(可见-中红外波段),要实现光探测功能,也需要结合其他材料. 2019 年,通过沉积一层非晶硅,对可见光的探测率先在 TFLN 波导上实现 [27],光电流响应效率为 ~ 0.03 A/W;结合石墨烯 [28]和银离子注入 [29],能够大幅提高探测带宽(400—2000 nm)和光电流响应效率(10^5 A/W),但它们都是基于未刻蚀的铌酸锂薄膜,尚未在 TFLN 集成波导中实现;2020 年,耶鲁大学的研究人员 [30]报道了基于超导纳米线的单光子探测,片上探测效率达到 46%. 这些工作的数据显示,该领域尚处在初步探索阶段,在探测谱宽、响应时间、可测功率极限等方面均存在挑战,本质上或许是因为铌酸锂的电导率和光电转换效率低;要走向实用化,必须通过掺杂或异质集成的方法突破材料本身的限制.

4 总结与展望

薄膜铌酸锂的发展有望将现有的各种铌酸锂器件小型化,提高器件性能的同时,还能降低功耗,克服体块材料在 SWaP (size, weight, and power) 指标方面的限制. 不过,未来的铌酸锂光子学要走向工业化生产和应用,仍然存在一些挑战.

首先,大部分 TFLN 功能性器件都是基于非

线性光学效应,器件的性能强烈依赖于色散工程和相位匹配条件;而铌酸锂中天然存在光学、电学、力学、热学等多物理场耦合,使得器件内部的相互作用非常复杂和难以预知. 这两个方面导致 TFLN 器件难以控制,也给实验现象的理解和调控带来了巨大挑战. 但换个角度思考,这些复杂的多物理场作用也必将为基础物理研究和新型多功能器件设计带来机遇,未来的努力方向包括但不限于对非线性动力学行为、多物理场耦合等的理论建模和数值计算.

其次,虽然一体化的 TFLN 芯片也能实现,但归根到底,铌酸锂的优势不在光源和光探测;而未来集成器件的发展必将呈现多功能、多材料、多波段、多维度的特征,因此, TFLN 器件的研究应该立足光电子技术领域的产业需求,着眼于将“调控”这一优势发扬光大,继续优化对电场、光场、声场调控的速率、效率和带宽,降低调控的功耗和成本. 另外, TFLN 器件在量子光学方面的能力尚未完全开发,目前主要演示了单光子源、光子对产生方面的优势,可以预见, TFLN 器件在量子态操纵、量子逻辑门等方面亦有广阔的应用前景.

最后, TFLN 的微纳加工技术距离实现大批量生产还有很长的路. 比如, TFLN 波导的传输损耗仍高于材料的吸收极限,说明制备工艺仍有进步的空间; TFLN 晶圆的表征还不是很到位,导致铌酸锂的加工工艺尚不能标准化;还有现有加工方法与 CMOS 工艺不兼容的问题,必须考虑到未来异质集成器件的大批量生产.

本文因篇幅限制,只能浅谈 TFLN 集成光子器件方面的进展与应用. 实际上,铌酸锂中丰富的电光、声光、非线性光学等效应,使其成为了研究多物理场耦合的绝佳平台,也是连接不同体系或不同波段的信息载体的不二选择,它的研究早已覆盖了射频至可见波段的方方面面. 相信随着基础物理研究的深入和加工技术的进步, TFLN 器件将像块材铌酸锂一样,继续助力前沿探索和科技进步.

参考文献

- [1] Zhu D, Shao L, Yu M, Cheng R, Desiatov B, Xin C J, Hu Y, Holzgrafe J, Ghosh S, Shams-Ansari A, Puma E, Sinclair N, Reimer Christian, Zhang M, Lončar M 2021 *Adv. Opt. Photon.* **13** 242
- [2] Boes A, Chang L, Langrock C, Yu M, Zhang M, Lin Q, Lončar M, Fejer M, Bowers J, Mitchell A 2023 *Science* **379**

cabj4396

- [3] Jia Y, Wu J, Sun X, Yan X, Xie R, Wang L, Chen Y, Chen F 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2200059
- [4] Luo Q, Bo F, Kong Y, Zhang G, Xu J 2023 *Adv. Photonics* **5** 034002
- [5] Saravi S, Pertsch T, Setzpfandt F 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100789
- [6] Zhang M, Wang C, Cheng R, Shams-Ansari A, Lončar M 2017 *Optica* **4** 1536
- [7] Gao R, Yao N, Guan J, Deng L, Lin J, Wang M, Qiao L, Fang W, Cheng Y 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 011902
- [8] Hu H, Ricken R, Sohler W, Wehrspohn R B 2007 *IEEE Photon. IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 417
- [9] Zhuang R, He J, Qi Y, Li Y 2022 *Adv. Mater.* **35** 2208113
- [10] Luke K, Kharel P, Reimer C, He L, Loncar M, Zhang M 2020 *Opt. Express* **28** 24452
- [11] Snigirev V, Riedhauser A, Lihachev G, Churaev M, Riemensberger, Wang R N, Siddharth A, Huang G, Möhl C, Popoff Y, Drechsler U, Caimi D, Hönl S, Liu J, Seidler P, Kippenberg T J 2023 *Nature* **615** 411
- [12] Wang C, Zhang M, Chen X, Bertrand M, Shams-Ansari A, Chandrasekhar S, Winzer P, Lončar M 2018 *Nature* **562** 101
- [13] He M, Xu M, Ren Y, Jian J, Ruan Z, Xu Y, Gao S, Sun S, Wen X, Zhou L, Liu L, Guo C, Chen H, Yu S, Liu L, Cai X 2019 *Nat. Photonics* **13** 359
- [14] Zhang M, Buscaino B, Wang C, Shams-Ansari A, Reimer C, Zhu R, Kahn J, Lončar M 2019 *Nature* **568** 373
- [15] Hu Y, Yu M, Zhu D, Sinclair N, Shams-Ansari A, Shao L, Holzgrafe J, Puma E, Zhang M, Lončar M 2021 *Nature* **599** 587
- [16] Yu M, Barton D, Cheng R, Reimer C, Kharel P, He L, Shao L, Zhu D, Hu Y, Grant H R, Johansson L, Okawachi Y, Gaeta A L, Zhang M, Lončar M 2022 *Nature* **612** 252
- [17] Sarabalis C J, McKenna T P, Patel R N, Van Laer R, Safavi-Naeini A H 2020 *APL Photonics* **5** 086104
- [18] Lu J, Li M, Zou C-L, Sayem A A, Tang H X 2020 *Optica* **7** 1654
- [19] Lin J, Yao N, Hao Z, Zhang J, Mao W, Wang M, Chu W, Wu R, Fang Z, Qiao L, Fang W, Bo F, Cheng Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 173903
- [20] Luo R, He Y, Liang H, Li M, Lin Q 2019 *Laser Photonics Rev.* **13** 1800288
- [21] Yuan T, Wu J, Liu Y, Yan X, Jiang H, Li H, Liang Z, Lin Q, Chen Y, Chen X F 2023 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **66** 284211
- [22] He Y, Yang Q F, Ling J W, Luo R, Liang H X, Li M X, Shen B Q, Wang H M, Vahala K, Lin Q 2019 *Optica* **6** 1138
- [23] Shao L, Yu M, Maity S, Sinclair N, Zheng L, Chia C, Shams-Ansari A, Wang C, Zhang M, Lai K, Lončar M 2019 *Optica* **6** 1498
- [24] Xue G T, Niu Y F, Liu X, Duan J C, Chen W, Pan Y, Jia K, Wang X, Liu H Y, Zhang Y, Xu P, Zhao G, Cai X, Gong Y X, Hu X, Xie Z, Zhu S N 2021 *Phys. Rev. Applied* **15** 064059
- [25] Nehra R, Sekine R, Ledezma L, Guo Q, Gray R M, Roy A, Marandi A 2022 *Science* **377** 1333
- [26] Liu H Y, Shang M, Liu X, Wei Y, Mi M, Zhang L, Gong Y X, Xie Z, Zhu S N 2022 *Adv. Photon. Nexus* **2** 016003
- [27] Desiatov B, Lončar M 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 121108
- [28] Guan H Y, Hong J Y, Wang X L, Ming J Y, Zhang Z L, Liang A J, Han X Y, Dong J L, Qiu W T, Chen Z, Lu H H, Zhang H 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100245
- [29] Sun X L, Sheng Y, Gao X, Liu Y, Ren F, Tan Y, Yang Z X, Jia Y C, Chen F 2022 *Small* **18** 2203532
- [30] Sayem A A, Cheng R, Wang S, Tang H X 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 151102

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Thin-film lithium niobate photonic integrated devices: Advances and opportunities

Xiong Xiao Cao Qi-Tao Xiao Yun-Feng[†]

(Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics,
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 9 August 2023; revised manuscript received 2 September 2023)

Abstract

Lithium niobate, known as one of the most widely used nonlinear optical crystals, has recently received significant attention from both academia and industrial circles. The surge in interest can be attributed to the commercial availability of thin-film lithium niobate (TFLN) wafers and the rapid advancements in nanofabrication techniques. A milestone was achieved in 2020 with the successful fabrication of wafer-scale TFLN photonic integrated circuits, which paved the way for mass-producible and cost-effective manufacturing of TFLN-based products.

At present, the majority of research on TFLN photonic integrated devices focuses on light manipulation, i.e. field modulation and frequency conversion. The electro-optic, acousto-optic, photo-elastic and piezo-electric effects of lithium niobate are harnessed to modulate the amplitude, phase and frequency of light. The second-order and third-order nonlinearities of lithium niobate enable frequency conversion processes, which leads to the development of frequency converters, optical frequency combs, and supercontinuum generation devices. These exceptional optical properties of lithium niobate enable the electromagnetic wave to manipulate covering from radio-frequency to terahertz, infrared, and visible bands. Using the outstanding performance of TFLN photonic integrated devices, including remarkable modulation rate, wide operation bandwidth, efficient nonlinear frequency conversion, and low power consumption, diverse applications, such as spanning optical information processing, laser ranging, optical frequency combs, microwave optics, precision measurement, quantum optics, and quantum computing, are demonstrated.

Additionally, it is reported that TFLN-based lasers and amplifiers have made remarkable progress, and both optical and electrical pumps are available. These achievements include combining gain materials, such as rare-earth ions or heterostructures, with III-V semiconductors. The integration of low-dimensional materials or absorptive metals with TFLN can also realize TFLN-based detectors. These significant developments expand the potential applications of TFLN photonic integrated devices, thus paving the way for monolithic TFLN chips.

The versatility and high performances of TFLN photonic integrated devices have made revolutionary progress in these fields, opening up new possibilities for cutting-edge technologies and their practical implementations. In this point of view, we briefly introduce the development of TFLN nanofabrication technology. Subsequently, we review the latest progress of TFLN photonic integrated devices, including lasers, functional nonlinear optical devices, and detectors. Finally, we discuss the future development directions and potential ways of TFLN photonics.

Keywords: integrated optics, nonlinear optics, lithium niobate, microcavity optics

PACS: 42.82.-m, 42.65.-k, 42.70.Mp, 42.55.Sa

DOI: [10.7498/aps.72.20231295](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231295)

[†] Corresponding author. E-mail: yfxiao@pku.edu.cn



铌酸锂集成光子器件的发展与机遇

熊霄 曹启韬 肖云峰

Thin-film lithium niobate photonic integrated devices: Advances and opportunities

Xiong Xiao Cao Qi-Tao Xiao Yun-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 234201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231295

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231295>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绝缘体上铌酸锂薄膜片上光子学器件的研究进展

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

物理学报. 2020, 69(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200302>

低维半导体材料在非线形光学领域的研究进展

Research progress of low-dimensional semiconductor materials in field of nonlinear optics

物理学报. 2020, 69(18): 184211 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200206>

应用于宽带中红外激光产生的啁啾周期极化铌酸锂晶体结构设计及数值模拟

Structure design and numerical simulation of chirped periodically polarized lithium niobate crystal for broadband mid-infrared laser generation

物理学报. 2022, 71(13): 134206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220016>

边界对石墨烯量子点非线性光学性质的影响

Effect of edge on nonlinear optical property of graphene quantum dots

物理学报. 2021, 70(5): 057801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201643>

基于介电常数近零模式与间隙表面等离激元强耦合的增强非线性光学效应

Enhanced nonlinear optical effects based on strong coupling between epsilon-near-zero mode and gap surface plasmons

物理学报. 2021, 70(18): 187303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210290>

利用域排列算法设计铌酸锂晶体实现3 μm 中红外波段频域纯态单光子源

Preparation of spectrally pure single-photon source at 3 μm mid-infrared band from lithium niobate crystal with domain sequence algorithm

物理学报. 2022, 71(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220739>