



片上铌酸锂薄膜激光器研究进展

罗强, 薄方*, 孔勇发, 张国权, 许京军

南开大学物理科学学院, 泰达应用物理研究院, 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457

*联系人, E-mail: bofang@nankai.edu.cn

收稿日期: 2022-01-28; 接受日期: 2022-03-31; 网络出版日期: 2022-07-18

国家重点基础研究发展计划(编号: 2019YFA0705000)和国家自然科学基金(编号: 12034010, 92050111, 12134007, 11734009)资助项目

摘要 由于继承了铌酸锂晶体优异的光学特性并具有与半导体微纳加工工艺兼容的特性, 铌酸锂薄膜被视为具有竞争力的集成光子学平台之一. 基于不断改善的微纳制备工艺, 低损耗波导、高品质因子微腔等各类传输控制器件得以实现, 并呈现出优于传统体材料器件的性能. 然而, 作为集成光子学的重要组成部分, 铌酸锂薄膜激光器的研究近期才取得突破. 铌酸锂是间接带隙材料, 电致发光存在极大困难, 基于稀土离子掺杂实现光泵浦激光器是简易可行的方案. 本文将总结近期基于稀土离子掺杂铌酸锂薄膜实现微盘、微环和单模激光器的研究进展, 为片上铌酸锂薄膜主动器件的相关研究提供参考.

关键词 铌酸锂薄膜, 微腔激光器, 集成光学

PACS: 42.55.Sa, 42.55.Rz, 77.55.+f, 42.82.-m

铌酸锂晶体具有宽的透明窗口、高的非线性系数、强的电光和声光特性, 一直受到研究者的广泛关注. 铌酸锂薄膜(Lithium Niobate On Insulator, LNOI)兼容半导体微纳加工工艺, 并且赋予了集成光子器件更高的折射率对比度和更强的光场局域性, 被认为是十分具有前景的集成光子学平台之一^[1,2]. 近年来, 研究人员基于飞秒激光直写、氩离子刻蚀以及化学机械抛光等工艺, 发展了LNOI微腔、电光调制器、声波光波转换器以及光学频率梳等器件和应用, 使基于LNOI的集成光学平台变得丰富起来.

此外, 光源作为集成光学体系不可或缺的一部分, 吸引着许多研究者的关注, 并在近期取得了重大突破. 铌酸锂的间接带隙结构特性决定了其自身无法实现有

效的电致发光. 为此, 引入稀土离子作为增益介质实现LNOI激光器被视为一种有效的方法. 有研究组首先通过微纳加工工艺制备了LNOI波导和微环结构, 然后再通过离子注入的方式进行稀土离子掺杂, 研究了稀土离子的荧光特性^[3,4]. 但是, 由于离子注入掺杂方式对掺杂浓度和均一性的限制, 并未观察到激光信号产生.

为解决掺杂浓度和晶体质量的限制问题, 本课题组依托南开大学在铌酸锂晶体生长方面的优势, 通过在铌酸锂晶体材料生长过程中进行铒离子掺杂, 然后通过Smart Cut技术得到合适掺杂溶度和高质量的掺铒铌酸锂薄膜晶圆(Erbium-Doped Lithium Niobate On Insulator, Er-LNOI), 在此基础上开展了铌酸锂薄膜微盘、微环以及单模激光器的研究工作, 下面具体介绍.

引用格式: 罗强, 薄方, 孔勇发, 等. 片上铌酸锂薄膜激光器研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 294221

Luo Q, Bo F, Kong Y F, et al. Research progress in lithium niobate on insulator lasers (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 294221, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0045

与珐珀腔相比, 回音廊模式谐振腔具有高的品质因子和小的模式体积, 可以极大地增强光与物质的相互作用, 在实现低阈值激光器方面具有很大的优势^[5]. 如图1(a)所示, 我们基于提拉法生长了0.1 mol.%掺杂浓度的掺铒铌酸锂晶体, 结合Smart Cut技术, 得到了高光学质量的Er-LNOI^[6]. 在此基础上, 通过紫外光刻、氩离子刻蚀、化学机械抛光的工艺, 批量制备了Er-LNOI微盘腔. 通过扫描波长方法测得微盘腔在971.30 nm附近的品质因子为 1.25×10^6 . 在980 nm波段的激光泵浦下, 观察到了1550 nm波段的信号光谱如图1(b)所示. 可以看到, 低功率泵浦时, 信号光谱主要为宽带的自发辐射荧光光谱. 随着泵浦功率的增加, 激光信号逐渐从荧光背景中显现出来, 并且随着泵浦功率的继续增加, 信号的线宽逐渐变窄, 满足激光器的线宽演化规律. 图1(c)为不同泵浦功率下观察到的主峰信号的光功率, 通过拟合信号的线性增长部分, 得到激光器的阈值和转换效率分别为 $292 \mu\text{W}$ 和 $6.5 \times 10^{-5}\%$. 同期, 华东师范大学和上海交通大学基于不同的制备工艺分别制备了Er-LNOI微盘腔, 并在980和1480 nm波段激光泵浦下观察到1550 nm波段的激

光信号^[7,8]. Er-LNOI微盘腔激光器的证实是铌酸锂薄膜光源研究体系的重要里程碑, 对后续深入优化激光器性能、拓展相关应用奠定了基础.

微盘腔激光器工作时, 主要通过锥形光纤实现泵浦光的耦合和信号光的提取, 存在耦合不稳定和不便于与其他光子器件集成的局限性. 为解决这一问题, 本课题组^[9]通过电子束曝光、氩离子刻蚀的工艺, 将耦合波导和微环谐振腔制备到同一晶片上, 有效地提高了激光器工作的稳定性和增强了其可拓展性. 图2(a)展示了泵浦功率约1 mW时, 在1510–1580 nm宽带范围内观察到类似光频梳状的多模激光信号, 后续引入锁模等调制技术将有可能基于该体系实现微腔光学频率梳. 图2(a)的插图 of 高泵浦功率时观察到的绿色荧光图像, 说明泵浦光被铒离子有效吸收. 此外, 与微盘谐振腔相比, 微环结构具有更小的模式体积, 易于获得更高的光功率密度, 可以进一步增强铒离子与泵浦光的相互作用, 从而有效降低激光器的阈值. 图2(b)呈现了1532.43 nm附近的激光信号功率和泵浦功率的关系, 通过拟合线性部分数据得到激光器的阈值和转换效率分别为 $\sim 20 \mu\text{W}$ 和 $6.61 \times 10^{-5}\%$. 与微盘腔相比, 微

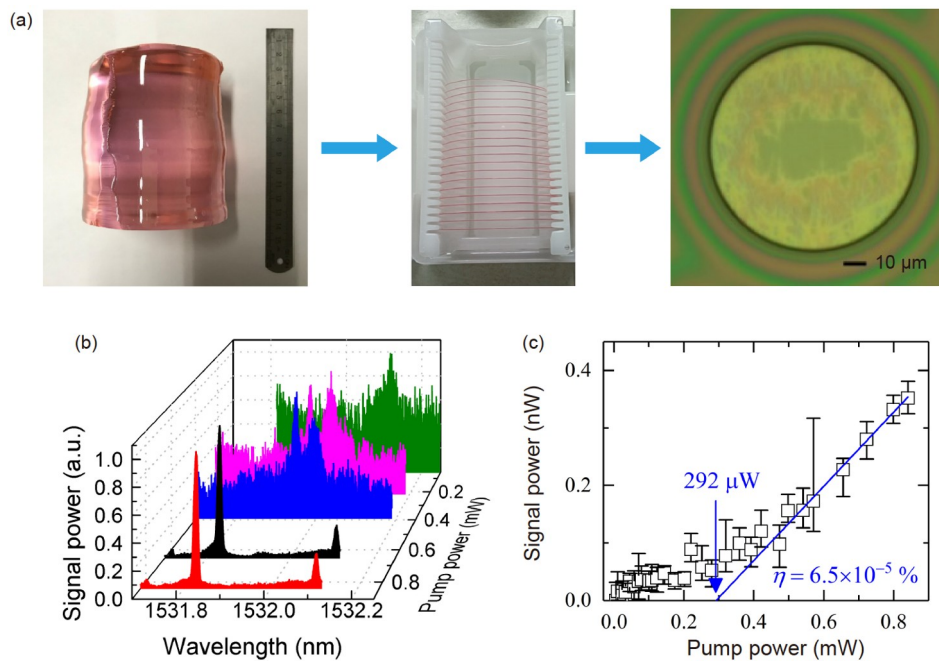


图1 (网络版彩图) (a) 掺铒铌酸锂微盘腔的制备流程示意图; (b) 不同泵浦功率下的信号模式的光谱演化; (c) 信号功率对泵浦功率的依赖关系^[6]

Figure 1 (Color online) (a) Schematic diagram of preparation process of erbium doped lithium niobate microdisk cavities; (b) spectrum evolution of the signal mode at different pump power; (c) the dependence of the signal power on pump power [6].

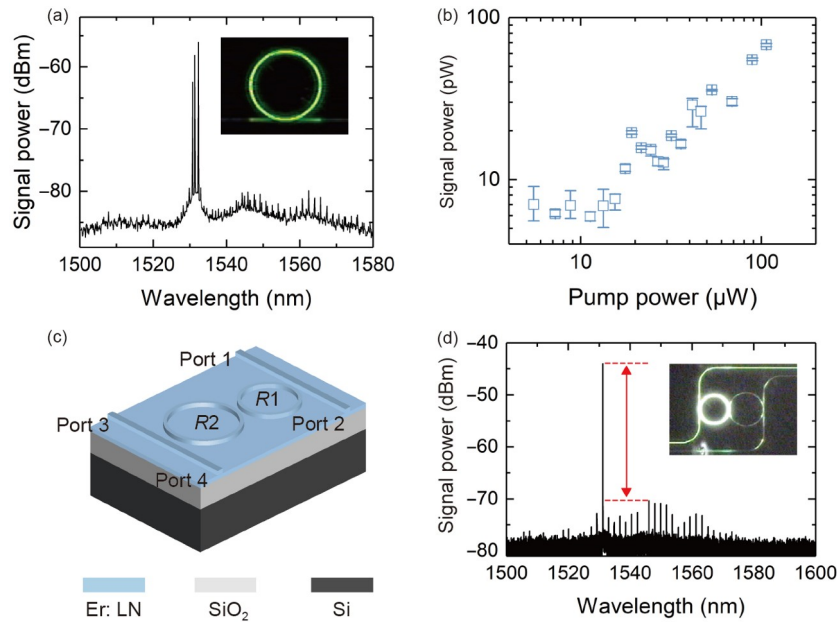


图2 (网络版彩图) (a) 泵浦功率约1 mW时观察到的多峰激光信号(插图: 微环腔绿色上转换荧光图像); (b) 不同泵浦功率下的激光信号功率^[9]; (c) 铒酸锂薄膜光学分子结构示意图; (d) 泵浦功率约900 μ W时观察到的高边模抑制比激光信号(插图: 光学分子中观察到的绿色上转换荧光图像)^[11]

Figure 2 (Color online) (a) Multi-peak laser signal observed at a pump power of ~ 1 mW (Inset: the observed green up-conversion fluorescence); (b) laser signal power at different pump power [9]; (c) schematic diagram of the LNOI photonic molecule; (d) a high side-mode suppression ratio lasing signal was observed at a pump power of about 900 μ W (Inset: the observed green up-conversion fluorescence in the photonic molecule) [11].

环激光器的阈值和稳定性得到有效改善, 并具有与各种LNOI功能器件集成的前景. 同期, 华东师范大学研究组^[10]将制备好的Er-LNOI微环和非掺杂的LNOI波导通过紫外固化胶封装的办法构建了掺铒铌酸锂微环腔激光器体系. 在980 nm波段激光泵浦下, 也观察到梳状的光谱信号, 激光器的阈值约为3 mW. 此外, 他们还在微环两侧集成了电极, 演示了激光信号的可调谐性.

由于铒离子在1550 nm波段具有宽带增益, 上述报道的激光器都是在多模状态工作, 这在一定程度上限制了LNOI激光器的应用场景. 另一方面, 单模激光器凭借低噪声、好的单色性及长的相干性等优异特性, 在光通信、精密测量、全息影像等领域有着重要的应用. 为解决这一问题, 本课题组^[11]设计并通过氩离子干法刻蚀工艺制备了如图2(c)所示的Er-LNOI耦合微环光学分子结构, 两微环的半径分别为85和100 μ m. 基于游标效应, 在1531.6 nm附近两微环满足双共振条件, 形成稳定存在的超模, 而增益带宽内的其余模式被有效抑制. 在980 nm波段激光泵浦下, 基于游标效应实

现了稳定的单模激光工作, 对应激光器的阈值为200 μ W. 图2(d)为900 μ W泵浦功率时, 激光器实现26.3 dB的单模抑制比. 后续通过在微环两侧集成电极, 有望实现大范围调谐的单模激光, 提升实际应用的便捷性^[12]. 同期, 中国科学院上海光学精密机械研究所和上海交通大学的研究组分别在Er-LNOI微盘-微盘^[13]、短微环-长微环^[14]、微盘-微环^[15]等耦合结构中, 基于游标效应证实了Er-LNOI激光器的单模状态工作. 此外, 相关研究组通过调控高阶模式的损耗方式, 分别在单个Er-LNOI微盘腔和微环腔中也实现了单模激光, 最大输出激光功率约为2 μ W^[16,17].

在过去两年里, LNOI激光器的发展在结构方面逐渐丰富, 历经了微盘、微环以及微盘和微环耦合等多类结构. 同时, 激光器的工作状态也实现从多模到单模的改善, 激光信号波长的调谐也通过集成电极或温度调谐的方式得以展示. 但是, 目前报道的基于LNOI稀土离子掺杂方式实现的激光器还存在工作波段单一、输出功率和转换效率偏低的局限性, 这对基于主动LNOI平台开展其他波段的应用和非线性研究存在

一定的限制. 未来有望通过掺杂不同的稀土离子、合理设计稀土离子掺杂浓度, 调整谐振腔的耦合设计与制备以及在实验上引入反馈机制等措施来有效提高激光器的性能和拓展LNOI激光器的应用场景. 近期, 华

东师范大学程亚研究组和本课题组^[18–20]分别实现了镱离子掺杂LNOI微腔激光器, 利用镱离子发光效率较高的特点, 提高了LNOI微腔激光器的输出功率和转换效率.

参考文献

- 1 Lin J, Bo F, Cheng Y, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator. *Photon Res*, 2020, 8: 1910–1936
- 2 Kong Y, Bo F, Wang W, et al. Recent progress in lithium niobate: Optical damage, defect simulation, and on-chip devices. *Adv Mater*, 2020, 32: 1806452
- 3 Wang S, Yang L, Cheng R, et al. Incorporation of erbium ions into thin-film lithium niobate integrated photonics. *Appl Phys Lett*, 2020, 116: 151103
- 4 Pak D, An H, Nandi A, et al. Ytterbium-implanted photonic resonators based on thin film lithium niobate. *J Appl Phys*, 2020, 128: 084302
- 5 He L, Özdemir Ş K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers. *Laser Photon Rev*, 2013, 7: 60–82
- 6 Luo Q, Hao Z Z, Yang C, et al. Microdisk lasers on an erbium-doped lithium-niobate chip. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 234263
- 7 Wang Z, Fang Z, Liu Z, et al. On-chip tunable microdisk laser fabricated on Er^{3+} -doped lithium niobate on insulator. *Opt Lett*, 2021, 46: 380–383
- 8 Liu Y A, Yan X S, Wu J W, et al. On-chip erbium-doped lithium niobate microcavity laser. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 234262
- 9 Luo Q, Yang C, Zhang R, et al. On-chip erbium-doped lithium niobate microring lasers. *Opt Lett*, 2021, 46: 3275–3278
- 10 Yin D F, Zhou Y, Liu Z, et al. Electro-optically tunable microring laser monolithically integrated on lithium niobate on insulator. *Opt Lett*, 2021, 46: 2127–2130
- 11 Zhang R, Yang C, Hao Z Z, et al. Integrated lithium niobate single-mode lasers by the Vernier effect. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 294216
- 12 Han Y, Zhang X, Huang F, et al. Electrically pumped widely tunable O-band hybrid lithium niobate/III-V laser. *Opt Lett*, 2021, 46: 5413–5416
- 13 Gao R, Guan J, Yao N, et al. On-chip ultra-narrow-linewidth single-mode microlaser on lithium niobate on insulator. *Opt Lett*, 2021, 46: 3131–3134
- 14 Xiao Z, Wu K, Cai M, et al. Single-frequency integrated laser on erbium-doped lithium niobate on insulator. *Opt Lett*, 2021, 46: 4128–4131
- 15 Liu X, Yan X, Liu Y, et al. Tunable single-mode laser on thin film lithium niobate. *Opt Lett*, 2021, 46: 5505–5508
- 16 Lin J, Farajollahi S, Fang Z, et al. Coherent mode-combined ultra-narrow-linewidth single-mode micro-disk laser. arXiv: [2107.08843](https://arxiv.org/abs/2107.08843)
- 17 Li T, Wu K, Cai M, et al. A single-frequency single-resonator laser on erbium-doped lithium niobate on insulator. *APL Photon*, 2021, 6: 101301
- 18 Zhou Y, Wang Z, Fang Z, et al. On-chip microdisk laser on Yb^{3+} -doped thin-film lithium niobate. *Opt Lett*, 2021, 46: 5651–5654
- 19 Luo Q, Yang C, Hao Z, et al. On-chip ytterbium-doped lithium niobate microdisk lasers with high conversion efficiency. *Opt Lett*, 2022, 47: 854–857
- 20 Luo Q, Yang C, Hao Z, et al. Integrated ytterbium-doped lithium niobate microring lasers. *Opt Lett*, 2022, 47: 1427–1430

Research progress in lithium niobate on insulator lasers

LUO Qiang, BO Fang^{*}, KONG YongFa, ZHANG GuoQuan & XU JingJun

MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, TEDA Institute of Applied Physics and School of Physics, Nankai University, Tianjin 300457, China

Lithium niobate on insulator (LNOI) is considered one of the most competitive integrated photonics platforms due to the excellent optical properties of lithium niobate crystal and their compatibility with semiconductor micro/nano processing. Based on the continuous improvement of micro-nano fabrication technology, various transmission and control devices, such as low-loss waveguides and high-quality factor micro-cavities, showing better performance than traditional bulk materials devices, have been realized on LNOI. However, as an essential part of integrated photonics, the research of LNOI laser has made a breakthrough recently. Lithium niobate is an indirect bandgap material and thus tough for electroluminescence. It is a feasible and straightforward scheme to realize optically pumped laser based on rare-earth ion doping. This paper summarizes our research group's recent research progress on realizing microdisk, microring, and single-mode lasers based on rare-earth-ion-doped LNOI and related works from other groups. We hope this review could benefit the related research on the active devices on LNOI.

lithium niobate on insulator, microcavity laser, integrated optics

PACS: 42.55.Sa, 42.55.Rz, 77.55.+f, 42.82.-m

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0045](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0045)