

铌酸锂薄膜微腔激光器研究进展 (特邀)

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)

摘 要: 绝缘体上铌酸锂薄膜凭借铌酸锂晶体优异的光学性能和薄膜器件的易加工和可集成特性, 被视为理想的集成光学平台。除了波导、调制器等传输、控制器件方面的研究之外, 最近铌酸锂薄膜激光器的研究也取得了显著的进展。文中将对最近快速发展的铌酸锂薄膜微腔激光器的研究现状进行综述。首先, 介绍铌酸锂晶体和铌酸锂薄膜稀土离子掺杂的主要技术方案, 以及近期有关于稀土离子掺杂铌酸锂薄膜微纳光学器件制备方面的探索; 其次, 总结近年来掺铒铌酸锂薄膜微盘腔、微环腔激光器方面的研究进展; 然后, 阐述微腔激光器体系几种常见的实现单模激光器方法的工作机理, 介绍研究者们利用“游标效应”调制模式损耗等方式实现掺铒铌酸锂薄膜单模激光器的研究进展; 最后, 基于目前报导的铌酸锂薄膜激光器研究成果, 对目前研究存在的局限性以及未来的研究方向进行了探讨。

关键词: 铌酸锂薄膜; 微腔激光器; 集成光学

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210546

Research progresses of microcavity lasers based on lithium niobate on insulator (*Invited*)

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)

Abstract: Lithium niobate on insulator (LNOI) was regarded as a competitive integrated optical platform due to the excellent optical performance of lithium niobate crystal and integration characteristics of thin-film devices. In addition to the research on transmission and control devices, such as waveguides and modulators, significant progress has been made in LNOI lasers recently. The research status of the rapidly developing LNOI microcavity laser was reviewed in this paper. Firstly, the main technical schemes of rare-earth ion doping of bulk lithium niobate and LNOI, as well as the recent exploration on the preparation of rare-earth ion doped LNOI micro-/nano-optical devices, were introduced; Secondly, the research progresses on Erbium-doped lithium niobate on insulator (Er-LNOI) microdisk and microring cavity lasers were summarized; Then, the working mechanism of several common methods to realize single-mode laser in microcavity laser system were described. The research progresses on Er-LNOI single-mode lasers utilizing "Vernier effect" and mode-loss modulation were introduced in the following; Finally, based on the reported research results of LNOI lasers, the limitations of the current

收稿日期: 2021-07-10; 修订日期: 2021-08-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFA0705000); 国家自然科学基金 (11734009, 12004197, 12034010, 12074199, 1774182, 92050111, 92050114)

作者简介: 罗强, 男, 博士生, 主要从事铌酸锂薄膜微腔激光器方面的研究。

导师简介: 薄方, 男, 教授, 博士, 主要从事非线性光学、微纳光学方面的研究。

research and the future research directions were discussed.

Key words: lithium niobate on insulator; microcavity laser; integrated optics

0 引言

由于具有宽的透明窗口,优异的电光性质,大的非线性系数以及良好的声光特性,铌酸锂晶体被誉为光子学硅。铌酸锂电光调制器在现代光通信中应用广泛^[1],周期极化铌酸锂常用于实现纠缠光子对的产生和调控等^[2]。铌酸锂很早就被视为可能的集成光学平台。传统上,主要是通过质子交换、钛扩散等工艺在铌酸锂体材料基片上制备波导、分束器、定向耦合器等集成光学器件。钛扩散和质子交换波导的折射率对比度小,模场束缚弱,弯曲半径大。与目前较为成熟的硅、氮化硅、磷化铟等集成光学平台相比,基于钛扩散和质子交换技术制备集成光学器件不利于在同一基片上进行大规模集成。

近年来,研究人员通过“智能切片”(smart cut)技术制备出绝缘体上铌酸锂薄膜(Lithium-niobate-on-insulator, LNOI),有效解决了紧束缚波导制备的问题^[3]。基于 LNOI,人们可以通过成熟的微纳制备工艺,制备出高折射率对比度的波导,高品质因子的微腔等集成光学器件,结构单元的尺寸大大减小,有效地提高了系统的集成度^[4-5]。完整的集成光学平台包括光源、传输控制器件和探测器三类器件。国内外学者基于 LNOI 平台,开展了电光调制器^[6-8]、周期极化波长转换器^[9-14]、频率梳^[15-20]、混合集成硅探测器^[21]等传输控制类和探测器类集成光子学器件方面的研究工作。

光源是集成光学系统不可或缺的组成部分,LNOI 激光器研究在最近两年也取得了显著的进展。文中将对 LNOI 激光器研究现状进行综述。首先,介绍铌酸锂晶体稀土离子掺杂的几种常用技术及其适用场景。其次,介绍稀土离子掺杂 LNOI 微盘腔、微环腔激光器的研究工作。再次,介绍实现单模激光器的几种技术路径,以及 LNOI 单模激光器方面的研究进展。最后,总结近年来 LNOI 微腔激光器的研究进展,指出当前研究的局限性,对 LNOI 激光器相关研究的发展进行展望。

1 稀土掺杂铌酸锂薄膜微纳光学器件的制备

铌酸锂晶体属于间接带隙材料,要实现电泵浦发光很困难,所以一般通过稀土离子掺杂的方式实现光

致发光。早期基于铌酸锂体材料进行稀土离子掺杂主要有以下几种方式:第一种是在生长铌酸锂晶体时,添加稀土离子氧化物进行掺杂,通过极化高温退火后,得到离子浓度均匀分布的铌酸锂单晶^[22-23];第二种是热扩散的方法,主要是通过真空沉积稀土离子层,之后通过高温扩散的方法进行选择掺杂。热扩散方式掺杂中,稀土离子的扩散深度满足高斯分布特征。由于稀土离子扩散速率低,要求扩散温度接近铌酸锂的居里温度,一般高达 1 100 °C,并需要长达 150 h 的扩散时间,扩散时间具体取决于基片的晶相^[24];第三种是通过离子注入的办法对铌酸锂晶体进行掺杂^[25]。室温下通过范德格拉夫加速器或晶体管加速器对离子进行加速,注入到铌酸锂晶体中,离子浓度分布为近高斯分布。要完全消除注入的缺陷和恢复单晶铌酸锂的质量,需要通过 1 000 °C 以上的高温退火才能实现。

近年来,仿照早期在铌酸锂晶体体材料掺杂的研究思路,多个研究组基于 LNOI 平台开展稀土掺杂微纳光学器件方面的研究^[26-31]。例如,耶鲁大学 H. Tang 研究组首先通过电子束曝光-氩离子刻蚀工艺制备出 LNOI 波导和环结构。然后通过离子注入的方式进行 Er³⁺掺杂,注入能量为 350 keV,离子流量为 1.14×10^{14} ions/cm²^[27]。通过在 500 °C 高温下退火 5 h,微环腔的平均 Q 值为 5×10^5 ,光学性能有所恢复,制备的结构和 Er³⁺分布如图 1(a) 所示。在低温下测量了掺杂 Er³⁺的荧光寿命为 3.2 ms,比体材料中 2 ms 要高一些。此外,通过测量共振模式的线宽,观察到了离子与腔的耦合导致模式展开现象,对应自发辐射共振增强 Purcell 因子 (P) 为 3.8。

同期,普渡大学 M. Hosseini 研究组采取类似的方法,先制备微环腔结构,以离子注入方式对微环结构进行 Yb³⁺离子掺杂,注入能量为 100 keV,离子流量为 1×10^{12} ions/cm²,对应峰值浓度为 0.000 2%,图 1(b) 为制备得到的波导结构示意图和描述了 Yb³⁺离子随注入深度的浓度变化关系图^[28]。掺杂后样品在氮气氛围中,在 500 °C 高温下退火处理 8 h 以修复离子注入带来的晶格损伤。微环腔的负载 Q 值在 908 nm 处约为 2×10^5 。测试掺 Yb³⁺铌酸锂微环结构的光谱特性,发现共振泵浦时的发光寿命比非共振泵浦时要短一些,对应 Purcell 增强因子 P 为 0.45。前面提及,若

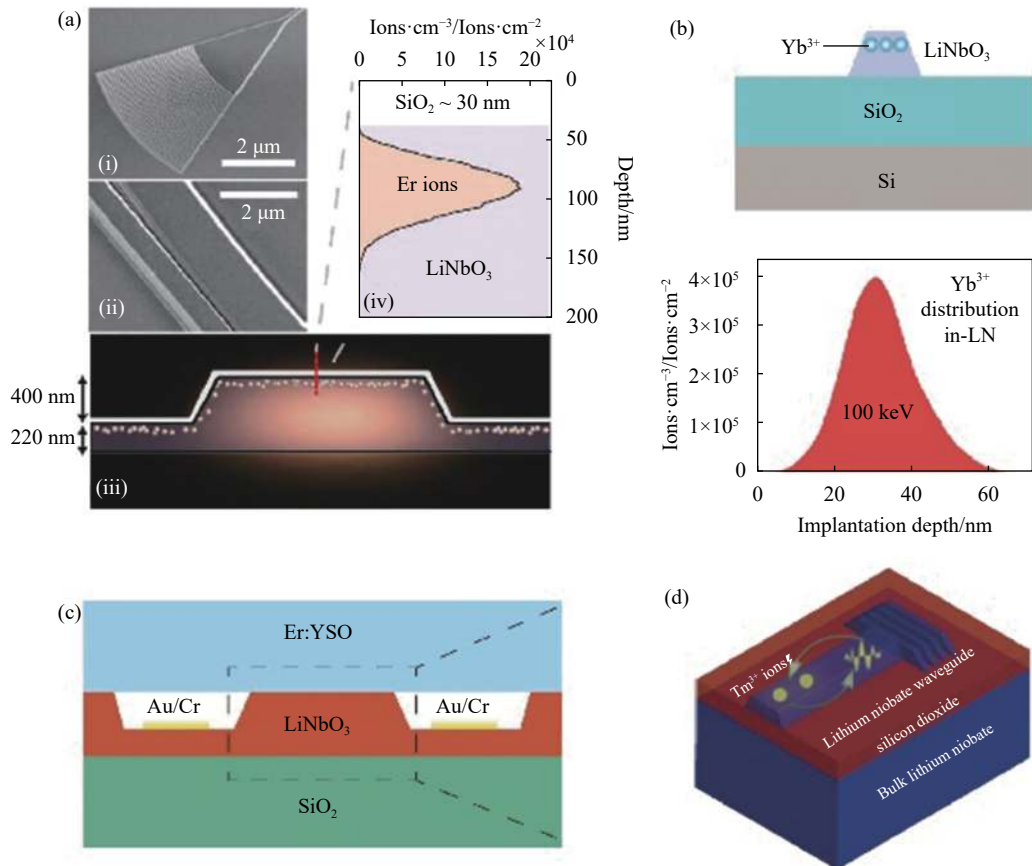


图 1 (a) 离子注入方式掺铒的结构和浓度分布^[27]; (b) 离子注入方式掺镱的结构和浓度分布^[28]; (c) Er-YSO 键合掺杂结构示意图^[30]; (d) 掺铥结构示意图^[26]

Fig.1 (a) Structure and concentration distribution of erbium doped by ion implantation^[27]; (b) Structure and concentration distribution of ytterbium doped by ion implantation^[28]; (c) Schematic diagram of Er-YSO bonding doping structure^[30]; (d) Schematic diagram of thulium doped structure^[26]

要完全消除注入的缺陷和恢复单晶铌酸锂的质量, 500 °C 退火温度还远远不够, 需要 1 000 °C 以上退火温度来改善。但是 LNOI 平台的退火温度最高仅在 500 °C 左右, 更高的温度会导致薄膜破裂。

此外, L. Yang 等通过将制备好的铌酸锂微环结构和掺铒浓度为 50 ppm 的 YSO 基片键合, 构建了 Er-LNOI 体系, 如图 1(c) 所示^[30]。测量 Er³⁺ 的荧光寿命为 11.5 ms, 与体材料 11.4 ms 基本一致, 同时也观测到了由于离子-腔耦合导致的共振展宽现象, 离子-腔耦合强度因子 C=0.36。另外, S. Dutta 等利用“智能切片”技术将 0.1% Tm³⁺ 掺杂的铌酸锂体材料基片制备成离子浓度分布均匀的掺铥铌酸锂薄膜, 再基于电子束曝光、氩离子刻蚀工艺制备了图 1(d) 中掺 Tm³⁺ 铌酸锂波导结构^[26]。实验上测量不同偏振光泵浦时 Tm³⁺ 的吸收和发光特性。结果与掺 Tm³⁺ 铌酸锂体材料结果基本一致, 证实该技术能够保留铌酸锂晶体体材料稀土掺杂的光谱特性。

可以看出上述有关 LNOI 稀土掺杂微纳器件的研究由于受掺杂浓度的限制或制备工艺的局限性, 都没实现激光输出, 更适用于要求低掺杂浓度的量子效应方面研究。要实现稀土离子掺杂材料的高效发光, 需要对稀土离子的掺杂浓度进行优化。当稀土离子掺杂浓度过低时, 无法满足激光辐射的阈值条件。由于 LNOI 掺 Tm³⁺ 的研究结果表明采用该工艺制备的薄膜具有良好的光学质量, 稀土离子的发光特性与体材料中几乎没有区别。因此, 通过在晶体生长过程中改善稀土离子的掺杂浓度, 然后利用“智能切片”技术制备成合适浓度的掺杂 LNOI 薄膜, 将有望实现铌酸锂薄膜激光器。近年来, 先后有多个研究组基于该思路开展了 Er-LNOI 激光器的研究。

图 2 展示了 Er-LNOI 的制备流程。首先, 通过提拉法生长出合适浓度, 高光学质量的掺铒铌酸锂晶体, 经切片、抛光成亚毫米厚的掺铒铌酸锂晶圆; 然后, 通过氩离子注入导致氩离子停留的位置形成缺陷



图 2 “智能切片”技术制备 Er-LNOI 晶圆示意图

Fig.2 Schematic diagram of preparation of Er-LNOI wafer by "smart cut" technology

层。接着与带有氧化层的基底 (Si 或 LiNbO₃) 进行键合,再通过退火处理,掺铒铌酸锂层沿着注入层剥离,形成掺铒铌酸锂薄膜。最后通过退火和化学机械抛光,以消除注入带来的晶格损伤,得到厚度合适、光学质量优良的 Er-LNOI。在此基础上开展 LNOI 微腔制备和激光器研究。

2 铌酸锂薄膜微盘腔激光器

构成激光器三要素为泵浦源,增益介质和谐振腔。增益介质和泵浦波长通过选定掺杂稀土离子的种类来确定。传统激光器的谐振腔主要由两个或多个反射镜构成。光在腔镜中以一密闭路径前后往返多次,当往返对应的光程等于光波长的整数倍时,光将在腔内发生相干干涉相长,即所谓的共振增强。与传统的谐振腔相比,回音廊模式微腔具有品质因子 (Q) 高,模

式体积 (V) 小等特点,因此光在腔内传输的光具有很高的光功率密度,极大地增强了光与物质的相互作用,是实现低阈值激光器的理想平台^[32]。此前有研究组已在二氧化硅微腔中实现了 660 nW 超低阈值微腔激光器^[33]。目前,基于 LNOI 的回音廊模式谐振腔 Q 值最高可以达到 10^8 , 接近体材料的本征吸收上限,在超低阈值激光器应用方面具有很大的潜能^[20]。下面将介绍基于 Er-LNOI 的微盘腔激光器方面的研究进展。

华东师范大学程亚课题组通过飞秒激光光刻辅助化学机械抛光 (PLACE) 的工艺制备出了直径 200 μm 的掺铒铌酸锂微盘腔^[34]。制备流程如图 3 (a) 所示,基于 Cr-Er-LNOI 晶圆,首先通过飞秒激光直写工艺,在 Cr 掩膜层定义了微盘腔的形状,接着通过化学机械抛光 (CMP) 辅助的工艺,将定义的图案转移至铌酸锂层,得到光滑的铌酸锂微盘腔侧壁,后续通过湿法刻

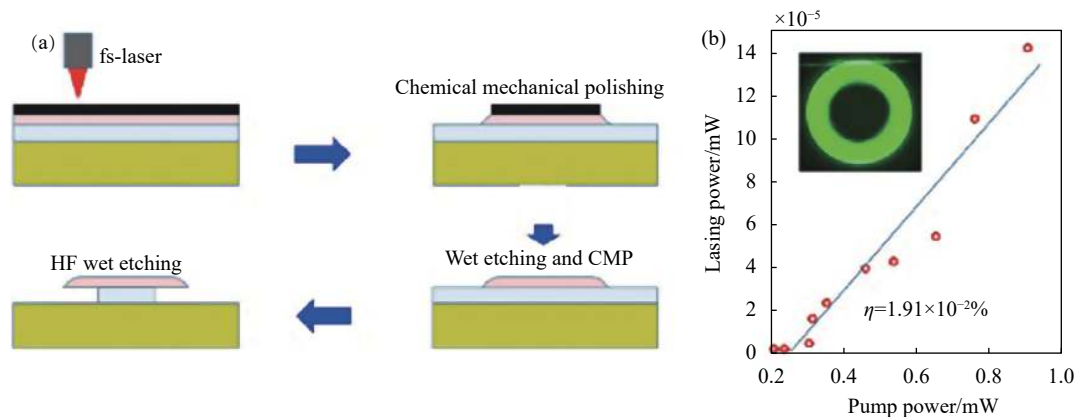


图 3 (a) 飞秒激光光刻辅助化学机械抛光制备 Er-LNOI 微盘腔流程示意图; (b) 激光功率和 976 nm 泵浦功率的变化关系^[34]

Fig.3 (a) Schematic diagram of Er-LNOI microdisk cavity prepared by femtosecond laser photolithography assisted chemo-mechanical etching technique;

(b) Relationship between the emitted laser power and the 976 nm pump power^[34]

蚀,将 Cr 掩膜层去除以及 HF 湿法刻蚀形成独立的掺铒铈酸锂微盘腔,便于后续实验利用锥形光纤进行耦合。通过扫描透射谱的办法测得掺铒铈酸锂微盘腔在 1 563 nm 处的 Q 值为 1.8×10^6 。

通过 976 nm 激光泵浦,1 560 nm 波段可观察到激光输出并伴随强的绿色上转换荧光(如图 3(b)插图所示),探测到的激光信号的阈值低于 400 μW ,对应转化效率为 $1.92 \times 10^{-2}\%$ 。通过增加泵浦功率,观察到激光信号出射波长先蓝移 (-17.03 pm/mW) 后红移

(10.58 pm/mW) 的调谐过程。原因可能是低泵浦功率下铈酸锂的光折变效应或者高泵浦功率下铈酸锂的热光效应。

上海交通大学陈险峰、陈玉萍课题组基于 1 mol% 的 Er-LNOI 晶圆,通过聚焦离子束切削工艺制备了直径 150 μm 的掺铒铈酸锂微盘腔, Q 值为 1.05×10^5 ^[35]。随后分别在 974 nm 和 1 460 nm 波段激光泵浦下,观察到 1 550 nm 波段的激光出射,信号光谱及信号功率与泵浦功率的关系如图 4 所示。激光信号的线宽约

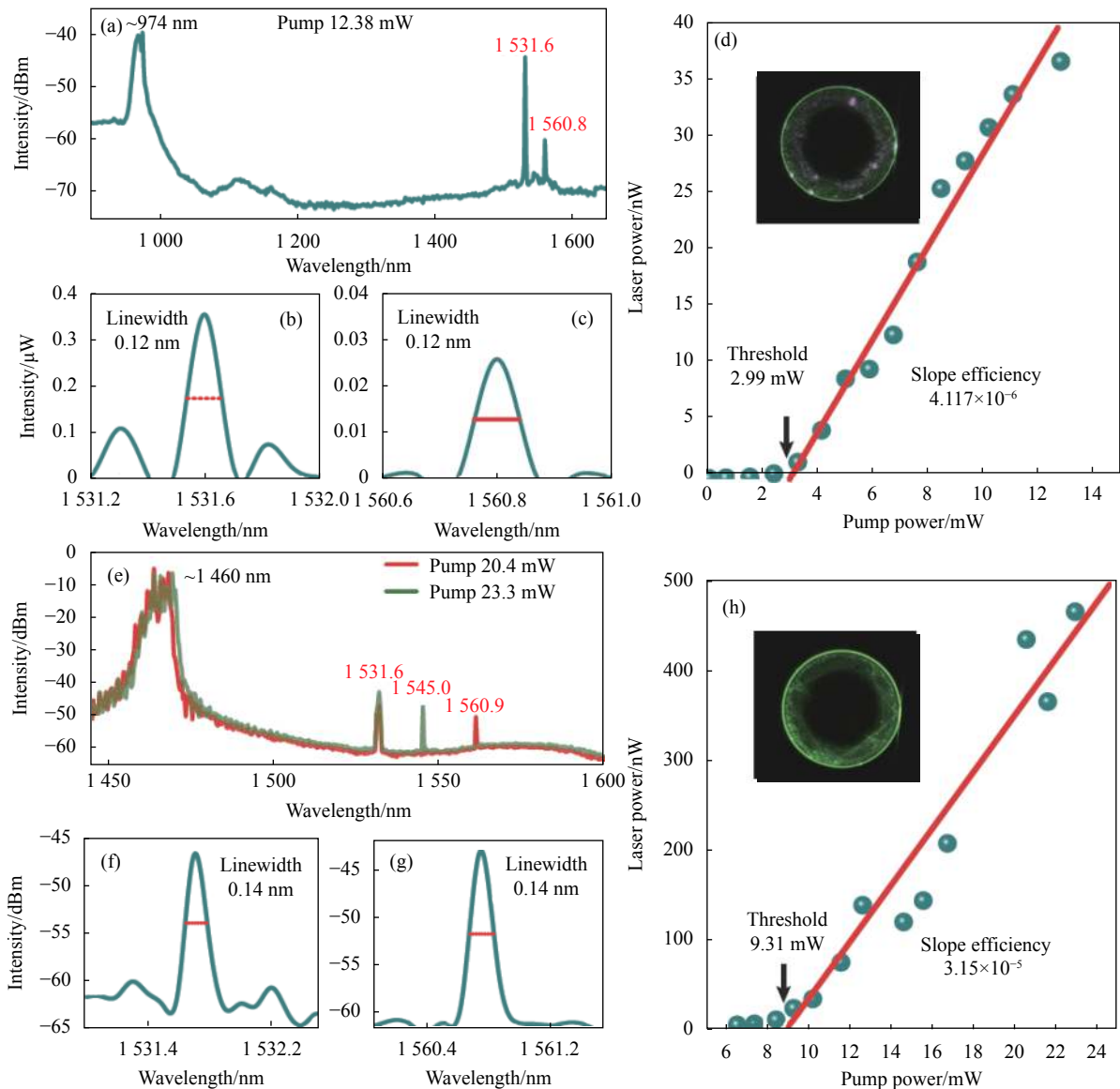


图 4 (a)~(c) 974 nm 泵浦下观察到的激光信号与线宽; (d) 激光功率和 974 nm 泵浦功率的变化关系 (插图: 观察到的绿色上转换荧光图像); (e)~(g) 1460 nm 泵浦下观察到的激光信号与线宽; (h) 激光功率和 1460 nm 泵浦功率的变化关系 (插图: 观察到的绿色上转换荧光图像)^[35]

Fig.4 (a)~(c) Observed laser signal and linewidth with the 974 nm pump; (d) Relationship between the emitted laser power and the 974 nm pump power (Inset: the observed green up-conversion fluorescence); (e)~(g) Observed laser signal and linewidth with the 1 460 nm pump; (h) Relationship between the emitted laser power and the 1 460 nm pump power (Inset: the observed green up-conversion fluorescence)^[35]

为~0.1 nm, 在 974 nm 波段泵浦的阈值和转换效率分别为 2.99 mW 和 4.117×10^{-6} 。1 460 nm 波段泵浦的阈值和转换效率为 9.31 mW 和 3.15×10^{-5} 。由于铈酸锂微腔的热效应, 随着泵浦功率增加, 出射激光波长发生红移, 在 974.6 nm 激光泵浦下, 波长的漂移量约为 47.9 pm/mW, 1 460 nm 激光泵浦下, 信号的波长漂移量约为 22.5 pm/mW, 激光在 1 460 nm 波段泵浦更稳定。

同期, 笔者课题组通过紫外光刻-氟离子刻蚀-CMP

的制备工艺实现了 Er-LNOI 微盘腔激光器的批量制备, 971.3 nm 处共振模式的 Q 值高达 1.25×10^6 。随后在 980 nm 波段的连续激光泵浦下, 观察到了 1 530 nm 波段的激光信号^[36]。图 5(a) 为光谱分析仪 (OSA) 观察到的信号光谱, 随着泵浦功率的增加, 信号模式的功率逐渐增加, 线宽逐渐减小。如图 5(b) 所示, 微腔激光器的阈值为 292 μ W, 转换效率为 $6.5 \times 10^{-5}\%$ 。同时, 由于铈酸锂的光折变效应, 也观察到了信号模式的波长随泵浦功率的增加而蓝移的现象。

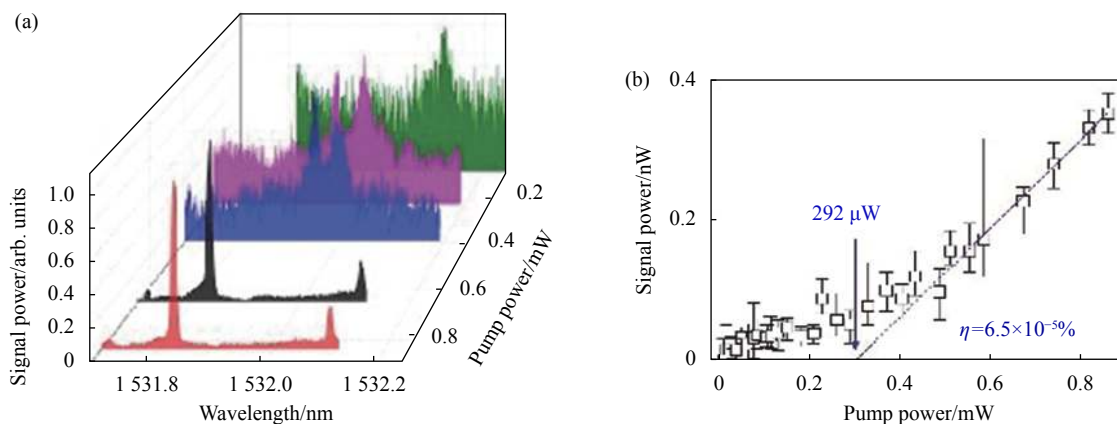


图 5 (a) 不同泵浦功率下信号模式的频谱演化; (b) 信号功率和泵浦功率的变化关系^[36]

Fig.5 (a) Spectrum evolution of the signal mode at different pump power; (b) Relationship between the signal power and the pump power^[36]

3 铈酸锂薄膜微环腔激光器

前文介绍的 Er-LNOI 激光器研究工作都是基于微盘腔开展的。微盘腔主要通过锥形光纤耦合的方式进行泵浦和信号的提取, 这存在耦合的不稳定、后期与其他功能器件无法集成到同一片上的局限性。一个有效的解决方案是利用微环腔耦合波导的结构代替微盘腔与锥形光纤耦合, 提升系统的稳定性和可拓展性。此外, 与微盘腔相比, 微环腔具有更小的模式体积, 同样的泵浦功率下, 产生的腔内的光场功率密度更大, 从而可以进一步降低激光器阈值。

笔者课题组通过电子束光刻, 氟离子刻蚀的工艺成功制备了掺铒铈酸锂微环腔与波导耦合结构, 制备工艺如图 6(a) 所示^[37]。首先, 利用电子束抗蚀剂 (HSQ), 通过电子束曝光的办法, 定义了微环和波导耦合结构的掩膜图案, 然后通过氟离子刻蚀, 将定义图案转移至铈酸锂层, 最后通过湿法刻蚀去除电

子束抗蚀剂以及机械应力处理波导端面, 完成 Er-LNOI 微环腔与波导耦合结构的制备。图 6(b)~(d) 为制备结构的扫描电镜图, 可以看到微环结构具有光滑的表面和侧壁。

通过扫描波长的办法得到掺铒微环腔在 970 nm 波段和 1 530 nm 波段的 Q 值分别为 1.25×10^6 和 4.26×10^5 。在 1 530 nm 附近 Q 值较低的原因主要是由于在该波段存在较强的 Er^{3+} 吸收。在 980 nm 波段可调谐激光泵浦下, 观察到了 1 550 nm 波段的激光信号。图 7(a) 为 OSA 上观察到的信号功率谱, 其中红点标记的为采集数据的标定的信号模式, 其信号功率和模式线宽随泵浦功率的变化关系如图 7(c) 和图 7(d) 所示, 可以看到激光器的阈值约为 20 μ W, 拟合得到转换效率约为 $6.61 \times 10^{-5}\%$ 。得益于微环腔的小模式体积和高的光功率密度, 激光阈值相比于微盘腔降低了一个量级。此外, 如图 7(b) 展示了在高泵浦功率下 (~1 mW) 观察到了 1 510~1 580 nm 范围内的多峰信

号,后续通过锁模等技术,将可能实现超短脉冲和频率梳的产生。

同期,华东师范大学程亚课题组,利用 PLACE 工艺分别制备出片上的掺铒铌酸锂微环腔和未掺杂的铌酸锂波导,然后通过紫外固化胶封装工艺,成功地制备了掺铒铌酸锂微环腔和波导耦合结构^[38]。同样基于扫描泵浦波长方式,得到掺铒微环腔在 1 542 nm 附近的 Q 值为 1.54×10^5 。为了便于集成电极,研究组

在一“跑道形”微环腔中开展了激光器的研究。在 980 nm 激光泵浦下,也观察到了宽带的梳状信号,如图 8(a) 所示。图 8(b) 为激光信号随泵浦功率的变化关系,可以看出激光的阈值约为 3.5 mW, 阈值较高的可能原因是由于该制备工艺对准误差较大,未能实现波导和环的有效耦合。此外,利用铌酸锂的电光效应,实现了激光波长的电调谐,调制速率约为 0.33 pm/V, 如图 8(c) 所示。

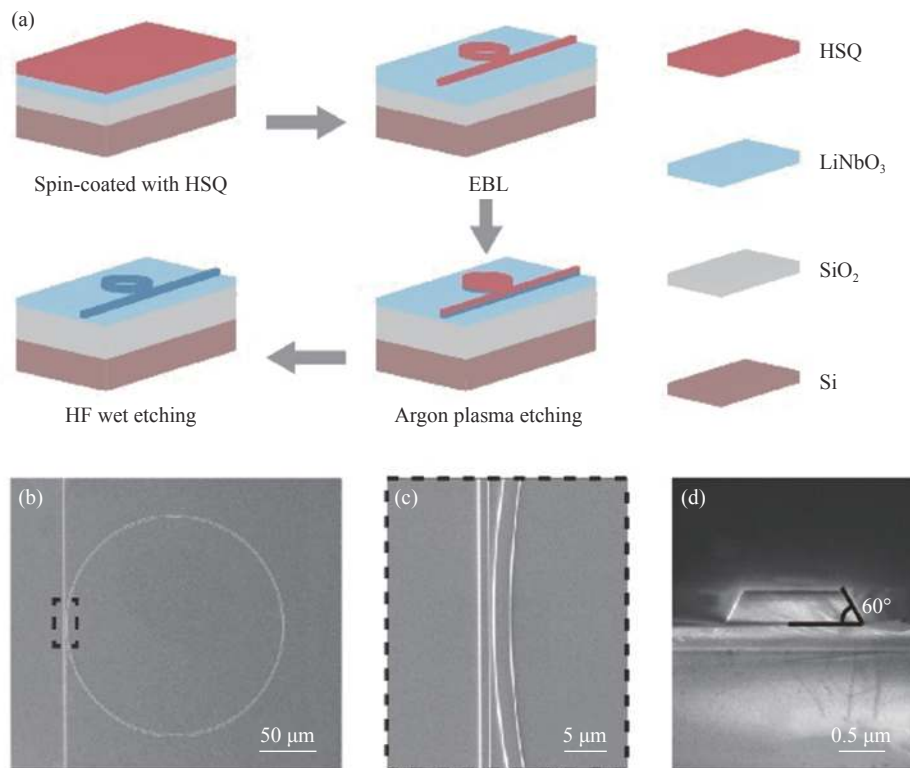
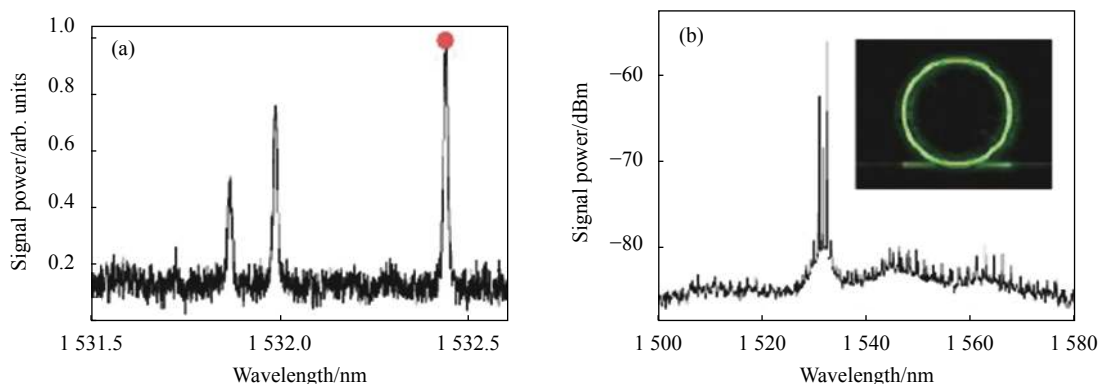


图 6 (a) Er-LNOI 微环腔与波导耦合结构的制备流程示意图; (b)~(d) 微环与波导耦合结构的扫描电镜图^[37]

Fig.6 (a) Schematic diagram of the preparation process of the Er-LNOI micro-ring cavity and waveguide coupling structure; (b)-(d) Scanning electron microscope image of the coupling structure of microring and waveguide^[37]



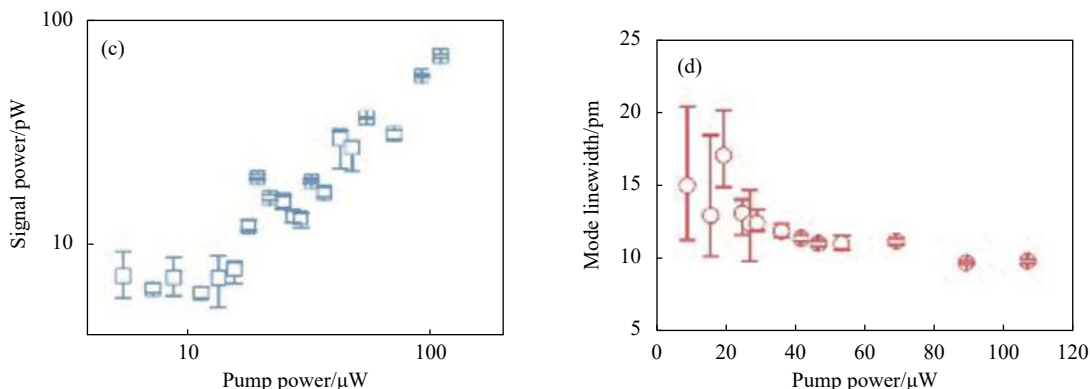


图 7 (a) 在 1 531.50~1 532.65 nm 内的信号频谱, 泵浦功率为 46.4 μW; (b) ~1 mW 泵浦功率时观察到的多峰激光信号 (插图: 观察到的绿色上转换荧光图像); (c) 信号模式功率和 (d) 线宽随泵浦功率的变化关系^[37]

Fig.7 (a) Collected signal spectrum in the range of 1 531.50-1 532.65 nm at 46.4 μW pump power; (b) Multi-peak lasing signal observed at a pump power of ~1 mW (Inset: the observed green up-conversion fluorescence); (c) Power and (d) linewidth of the signal mode under different pump powers^[37]

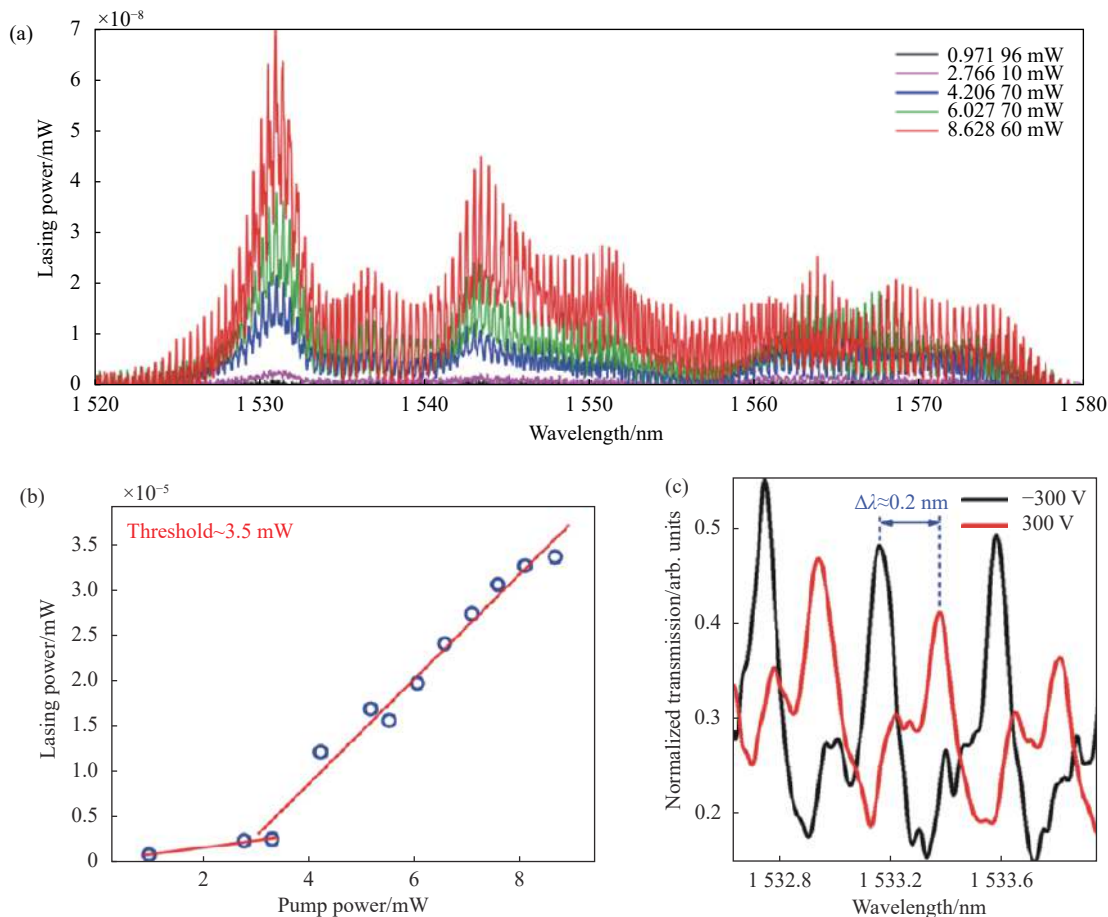


图 8 (a) Er-LNOI“跑道形”微环腔随着输入泵浦功率的增加, 观测到的光谱演化; (b) 激光输出功率与输入泵浦功率的关系; (c) 施加 -300 V 和+300 V 电压时激光信号波长的漂移^[38]

Fig.8 (a) Spectral evolution of the Er-LNOI racetrack microring resonator with increasing input pump powers; (b) Relationship between the emitted laser output power and the input pump power; (c) Laser signal wavelength by varying the electric voltage between -300 V and +300 V^[38]

4 单模激光器

由于 Er^{3+} 在 1 550 nm 波段的增益有一定的带宽, 前文介绍的掺铒铈酸锂微腔激光器都是在多模状态下工作, 存在虚信号、随机起伏和不稳定性等问题, 阻碍了其实际应用。单模激光器具有单色性、高稳定性、输出波长可控等特点, 在片上光通信等实际应用中具有巨大潜力, 因而实现单模激光器的研究备受关注。目前实现单模激光的方式主要有以下四种^[39]: (1) 减小谐振腔的尺寸以扩大自由光谱范围 (FSR), 使得谐振腔在增益带内单纵模共振; (2) 利用布拉格反射镜结构或分布反馈式谐振腔结构实现单模选模; (3) 级联多个谐振腔通过游标效应实现单纵模共振; (4) 利用空间选择性泵浦抑制高阶模或增加高阶模式

的损耗。一般来说, 减小谐振腔的尺寸会增加腔内光场的辐射损耗导致激光器的阈值增加, 所以一般不采用该方案。下面介绍目前在 Er-LNOI 微腔单模激光器方面的研究进展。

中国科学院上海光学精密机械研究所的程亚、林锦添课题组, 利用 PLACE 工艺制备了两直径分别为 30.3 μm 和 23.6 μm 耦合在一起的 Er-LNOI 微盘腔, 两微盘满足泵浦波段 977.7 nm 和信号波段 1 550.5 nm 同时共振。由于游标效应有效地抑制了铒增益带宽内的模式数^[40]。在 977.7 nm 激光泵浦下, 首次观察到 Er-LNOI 单模激光, 其阈值为 200 μW , 如图 9 所示。通过 3×3 光纤耦合器构成的迈克尔逊干涉仪测得激光器的线宽为 348 kHz。

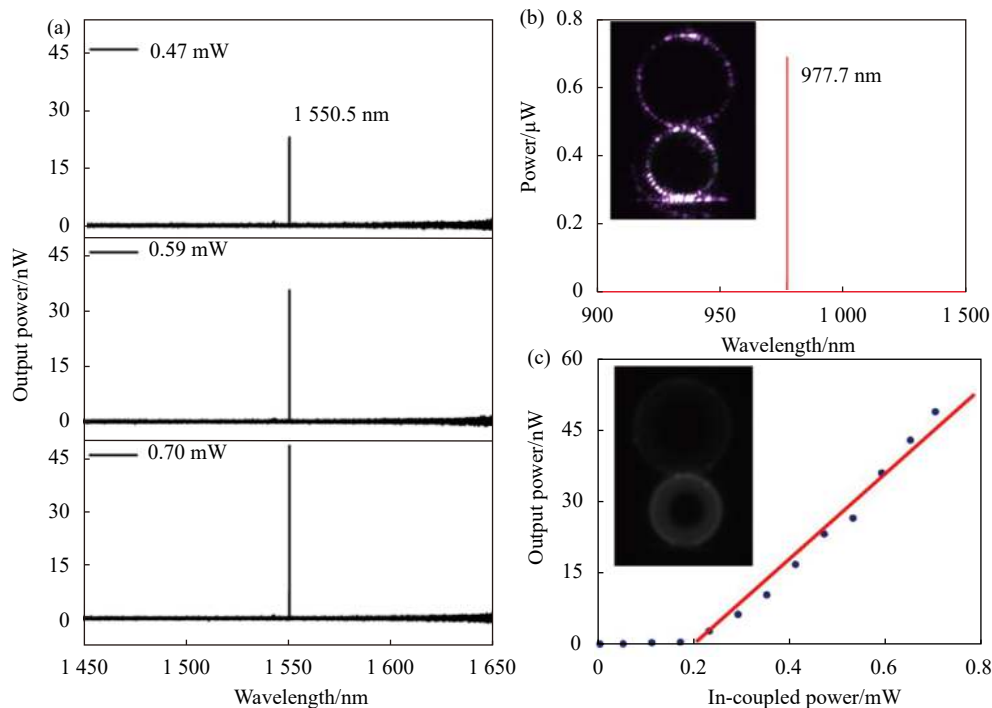


图 9 (a) 单模激光信号随着泵浦功率的增加而增加; (b) 泵浦激光光谱 (插图为泵浦光在耦合微盘腔内的光学显微镜照片); (c) 信号输出功率随泵浦功率的变化关系 (插图为出射激光时耦合微盘的显微镜照片)^[40]

Fig.9 (a) Increasing single-mode lasing signal with increasing pump power; (b) Spectrum of pump laser (Inset: optical micrograph of coupled microdisks with pump laser); (c) Relationship between signal output power and pump power (Inset: optical micrograph of coupled microdisks when lasing)^[40]

随后, 笔者课题组设计了两半径分为 85 μm 和 100 μm 的微环构成的光学分子, 基于游标效应, 光学分子相邻的共振模式间隔波长增大到 11 nm, 并让一个共振波长位于 Er^{3+} 最强增益波长 (~1 532 nm)

附近。利用电子束曝光、氩离子刻蚀等工艺制备了品质因子为 2.97×10^5 的 Er-LNOI 微环光学分子。在 980 nm 波段泵浦下, 1 500~1 600 nm 波段范围内实现了稳定的 Er-LNOI 单模激光, 激光器的单模抑制比和阈

值分别为~26.3 dB 和~200 μW , 如图 10 所示^[41]。该工作提高了 Er-LNOI 单模激光器的集成度和可拓展性。

同期, 上海交通大学陈建平课题组设计了图 11(a) 中直径 200 μm 短微环腔和 1.2 cm 的长腔耦合系统^[42],

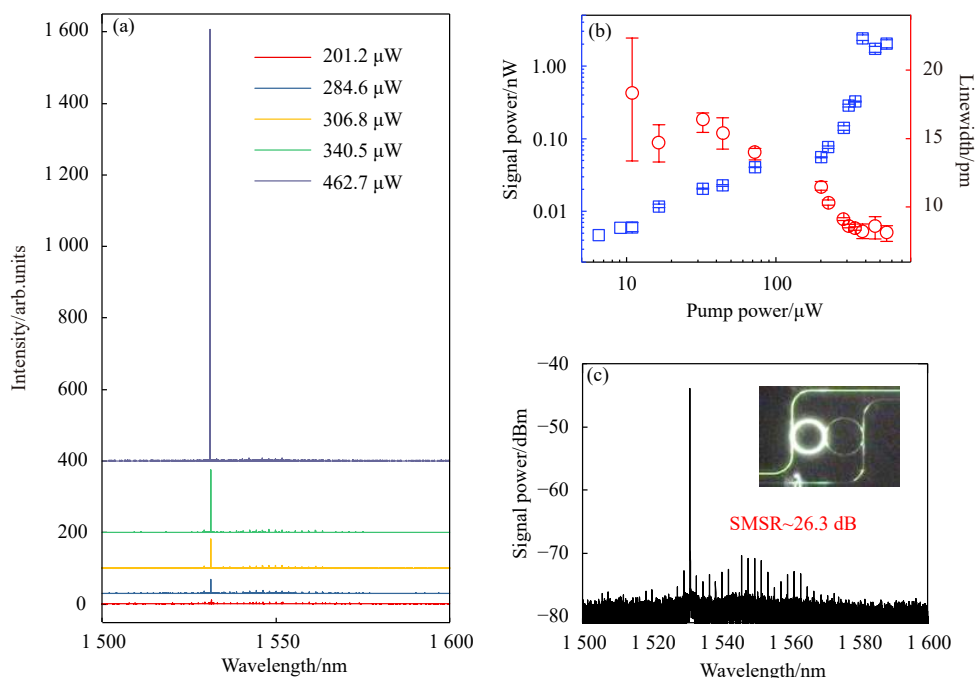


图 10 (a) 不同泵浦功率下 Er-LNOI 光学分子在 1500~1560 nm 范围内实现单模出射; (b) 不同泵浦功率下的单模激光输出功率和模式线宽; (c) 900 μW 泵浦功率下观察到的高边模抑制比信号 (~26.3 dB)(插图为观测到的绿色上转换荧光)^[41]

Fig.10 (a) Single mode emission of Er-LNOI optical molecules in the range of 1500-1560 nm under different pump powers; (b) Output power and mode linewidth of single-mode laser at different pump powers; (c) Observed high side-mode suppression ratio signal (~26.3 dB) at a pump power of 900 μW (Inset: the observed green up conversion fluorescence)^[41]

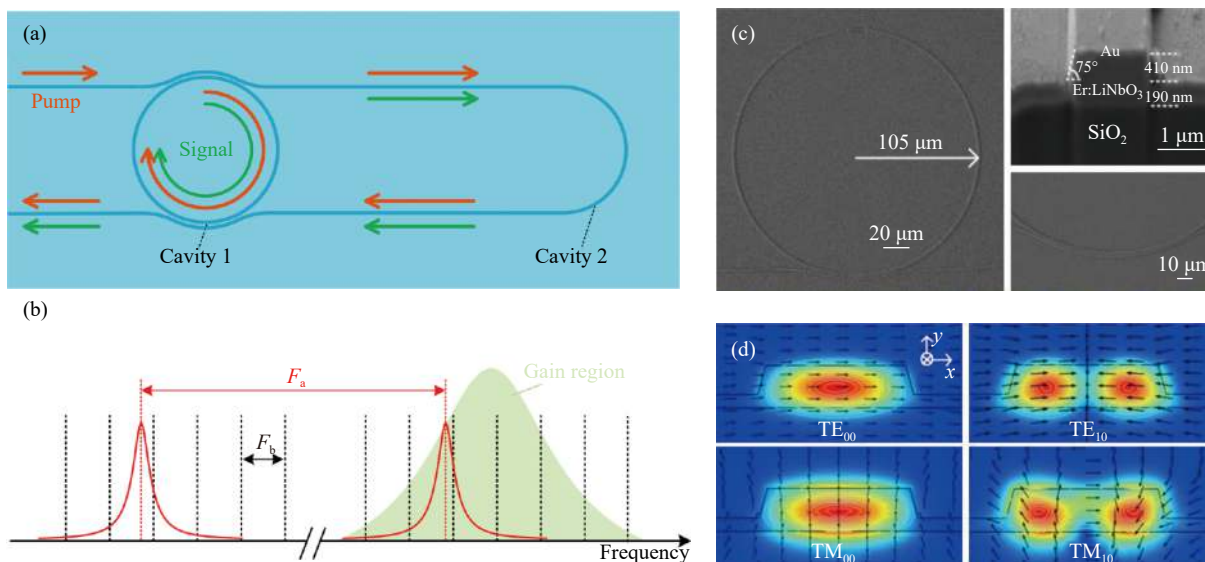


图 11 (a)-(b) Er-LNOI 双腔结构示意图和游标效应原理图^[42]; (c) 制备的 Er-LNOI 单环腔 SEM 图; (d) 微环腔波导中支持的前四个模式的模场分布图^[43]

Fig.11 (a)-(b) Schematic diagram of Er-LNOI dual cavity structure and vernier effect^[42]; (c) SEM of prepared Er-LNOI single microring cavity; (d) Mode field distribution of the first four modes supported in microring cavity waveguide^[43]

两腔的 FSR 分别为 $F_a \sim 200$ GHz 和 $F_b \sim 10$ GHz。基于游标效应,使得两个腔的共振模式在铟增益带内仅能够存在单个共振峰可以匹配。通过电子束曝光-氩离子刻蚀工艺制备的掺铒微环腔的 Q 值在 1 531.1 nm 处为 5×10^4 。在 1 480 nm 波段泵浦下,观察到了激光的单模输出,单模抑制比为 31 dB。通过自外差探测法测得激光器的线宽约为 ~ 1.2 MHz。激光器的阈值和转换效率分别为 13.54 mW 和 1.45×10^{-4} 。

随后,该课题组在单个掺铒铈酸锂微环中也实现了单模激光^[43]。图 11(c) 为制备的微环腔的 SEM 图,半径为 105 μm ,对应 1 531.49 nm 和 1 484.45 nm 的 Q 值分别为 2.13×10^4 和 0.89×10^5 。实现单模的机制为,通过合理设计微环环宽 (2 μm),理论上支持 TE_{00} , TM_{00} , TE_{10} , TM_{10} 四个模式。图 11(d) 为通过 COMSOL 模拟得到的四个模式在微环波导中的电场分布图,可见,除 TE_{00} 模式外,其余高阶模都与波导侧壁有较大的模场交叠。由于制备的微环波导的侧壁有一定的粗糙度,导致除 TE_{00} 模式外,其余模式在微腔内传输的损耗较大,从而有效地抑制了高阶模式的增益,只让 TE_{00} 模式获得较大增益,实现单模工作。实验上证实单模抑制比高达 35.5 dB,激光器的线宽为 1.27 MHz。单模激光器的阈值和

转换效率分别为 14.5 mW 和 1.2×10^{-4} ,最高输出功率为 2.1 μW 。

近期,中国科学院上海光学精密机械研究所的程亚、林锦添课题组,通过 PLACE 工艺制备了单个直径为 29.8 μm 的 Er-LNOI 微盘腔,在 968 nm 激光泵浦下,观察到了出射波长为 1 546 nm 的单模激光^[44]。其基本原理是通过调整锥形光的耦合位置,泵浦激发回音廊模式微腔中的多边形模式,利用泵浦波段和信号波段多边形模式具有高的模式交叠 ($I=0.75$) 和对应的 FSR (11 nm) 大的特点,有效抑制了传统回音廊模式信号的增益,从而实现了单模激光。图 12(a) 为不同泵浦功率下对应的单模激光输出功率光谱,通过外差法测得输出激光的线宽为 98 Hz,是目前报导的线宽最窄 Er-LNOI 激光器。图 12(b) 为通过 CCD 捕获到的腔内出射四方形信号模式光学显微镜图像,图中分别为绿色上转换荧光(左)和泵浦光(右)的光学显微镜图像。该单模激光器的工作阈值和最高输出功率分别为 25 μW 和 2 μW 。表 1 总结了目前报导的 LNOI 微腔激光器的主要性能参数,可见,在过去的短短两年中,LNOI 微纳激光器经历了从无到有,从盘到环,从多模到单模的快速发展过程。

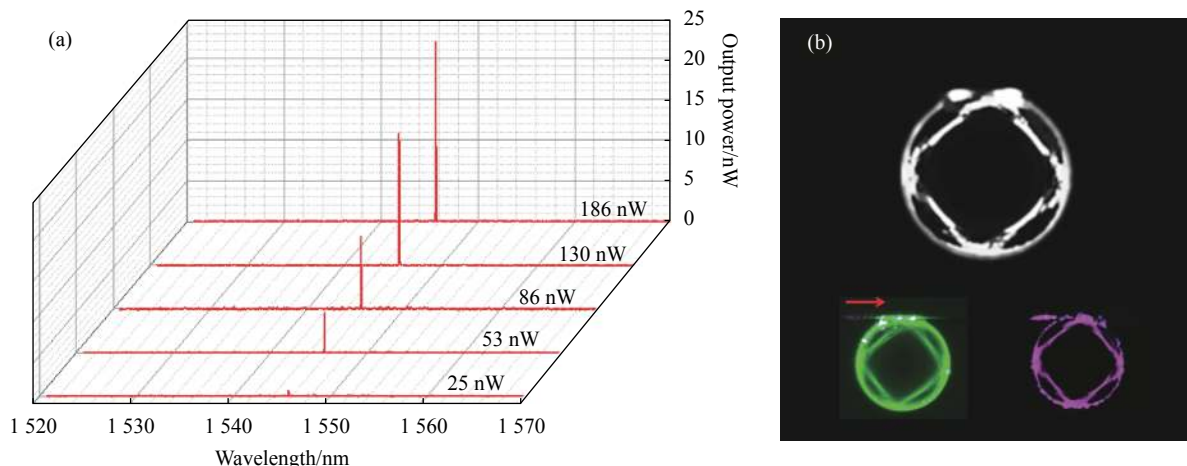


图 12 (a) 不同泵浦功率下的 Er-LNOI 单模激光器的输出功率变化光谱; (b) 1 546 nm 波长方形激光模式的光学显微镜图像 (插图: 550 nm 波长上转换荧光(左)和泵浦光(右)的方形模式的光学显微镜图像)^[44]

Fig.12 (a) Spectra of the output power of the Er-LNOI single mode laser at different pump powers; (b) Optical micrograph of the square lasing modes at 1 546 nm wavelength (Inset: the optical micrographs of the square modes of the up-conversion fluorescence around 550 nm wavelength (Left) and the pump light (Right))^[44]

表 1 报导的 LNOI 微腔激光器性能参数对比

Tab.1 Comparison of performance parameters of the reported LNOI microcavity lasers

Structure	Pump wavelength/nm	Threshold	Conversion efficiency	Maximum power	Linewidth	Model	References
Microdisk	974	2.99 mW	$4.117 \times 10^{-4}\%$	~40 nW	0.12 nm	Multimode	[35]
	1460	9.31 mW	$3.15 \times 10^{-3}\%$	~500 nW	0.14 nm	Multimode	
Microdisk	976	<400 μ W	$1.92 \times 10^{-2}\%$	~140 nW	0.024 nm	Multimode	[34]
Microdisk	974	292 μ W	$6.5 \times 10^{-5}\%$	~0.4 nW	~0.01 nm	Multimode	[36]
Microring	974	~20 μ W	$6.61 \times 10^{-5}\%$	~0.1 nW	~0.01 nm	Multimode	[37]
Microring	~980	~3.5 mW	$4.38 \times 10^{-3}\%$	~35 nW	-	Multimode	[38]
Coupling microrings	977.7	~200 μ W	$7 \times 10^{-3}\%$	~50 nW	348 kHz	Single mode	[40]
Coupling microrings	979.6	~200 μ W	$4.4 \times 10^{-3}\%$	~40 nW	~0.005 nm	Single mode	[41]
Coupling microrings	1484	13.54 mW	$1.45 \times 10^{-2}\%$	0.31 μ W	1.2 MHz	Single mode	[42]
Microring	1484	14.5 mW	$1.2 \times 10^{-2}\%$	2.1 μ W	1.27 MHz	Single mode	[43]
Microdisk	968	~25 μ W	$1.3 \times 10^{-2}\%$	2 μ W	98 Hz	Single mode	[44]

5 结 论

文中介绍了稀土离子掺杂 LNOI 微纳激光器的研究进展。尽管在 LNOI 微纳激光器研究方面取得了系列重要进展,但还有一些问题亟待解决。例如,LNOI 微腔激光器的理论模型尚不全面;激光器的输出功率、阈值、转换效率、可调谐性等性能指标和其它材料体系相比还有很大的提升空间。未来将有望通过改善制备工艺、集成其它器件和结合新的原理和机制来优化激光器性能,例如设计 DBR、DFB 型谐振腔,以提高激光器的输出功率和转换效率。通过掺杂不同的稀土离子,拓展激光器的发光波段也是重要的研究方向。此外,在基础物理研究方面,基于稀土离子掺杂 LNOI 增益特性构造增益-损耗体系是开展 PT-对称破缺等物理现象研究的良好平台。同时,随着输出效率、功率、模式特性等性能的不断提高,LNOI 激光器在片上激光传感、自泵浦非线性、光频梳等方面也将具有广阔的应用前景,这将有效拓展 LNOI 集成光学平台的功能和应用领域。

参考文献:

[1] Courjal N, Bernal M-p, Caspar A, et al. Lithium niobate optical waveguides and microwaveguides [OL/M].[2018-08-15]http://www.intechopen.com/chapters/61408.
 [2] 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.
 [3] 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.
 [4] Lin J, 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.
 [5] 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): 1806452.
 [6] Li M, Ling J, He Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4123.
 [7] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbits⁻¹ and beyond [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
 [8] 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.
 [9] Lu J, Al Sayem A, Gong Z, et al. Ultralow-threshold thin-film lithium niobate optical parametric oscillator [J]. *Optica*, 2021, 8(4): 539-544.
 [10] Zhang L, Hao Z, Luo Q, et al. Dual-periodically poled lithium niobate microcavities supporting multiple coupled parametric processes [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3353-3356.
 [11] Hao Z, Zhang L, Mao W, et al. Second-harmonic generation using d_{33} in periodically poled lithium niobate microdisk resonators [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 311-317.
 [12] Lu J, Surya J B, Liu X, et al. Periodically poled thin-film lithium niobate microring resonators with a second-harmonic generation efficiency of 250, 000%/W [J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1455-1460.
 [13] Chen J Y, Ma ZH, Sua Y M, et al. Ultra-efficient frequency conversion in quasi-phase-matched lithium niobate microrings [J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1244-1245.

- [14] Hao Z, Zhang L, Gao A, et al. Periodically poled lithium niobate whispering gallery mode microcavities on a chip [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 61(11): 114211.
- [15] He Y, Yang Q F, Ling J, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO₃ soliton microcomb [J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1138-1144.
- [16] Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator [J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 373-377.
- [17] Wang C, Zhang M, Yu M, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 978.
- [18] Gong Z, Liu X, Xu Y, et al. Soliton microcomb generation at 2 μm in z-cut lithium niobate microring resonators [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 3182-3185.
- [19] Gong Z, Liu X, Xu Y, et al. Near-octave lithium niobate soliton microcomb [J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1275-1278.
- [20] 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 10⁸ [J]. arXiv, 2021: 00399.
- [21] Desiatov B, Lončar M. Silicon photodetector for integrated lithium niobate photonics [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(12): 121108.
- [22] Izabella P, Surma B, Marek S, et al. Single crystal growth and optical properties of LiNbO₃ doped with Er³⁺, Tm³⁺ and Mg²⁺[C]/Proc SPIE, 1995: 65-73.
- [23] Palatnikov M, Biryukova I, Sidorov N, et al. Growth and concentration dependencies of rare-earth doped lithium niobate single crystals [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 291(2): 390-397.
- [24] Sohler W, Das B K, Dey D, et al. Erbium-doped lithium niobate waveguide lasers [J]. *IEEE Transactions On Electronics*, 2005, 88(5): 990-997.
- [25] Fleuster M, Buchal C, Snoeks E, et al. Optical and structural properties of MeV erbium - implanted LiNbO₃ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(1): 173-180.
- [26] Dutta S, Goldschmidt E A, Barik S, et al. Integrated photonic platform for rare-earth ions in thin film lithium niobate [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(1): 741-747.
- [27] Wang S, Yang L, Cheng R, et al. Incorporation of erbium ions into thin-film lithium niobate integrated photonics [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(15): 151103.
- [28] Pak D, An H, Nandi A, et al. Ytterbium-implanted photonic resonators based on thin film lithium niobate [J]. *Journal Of Applied Physics*, 2020, 128(8): 084302.
- [29] Xia K, Sardi F, Sauerzapf C, et al. High-speed tunable microcavities coupled to rare-earth quantum emitters [J]. *arXiv*, 2021, 2104: 00389.
- [30] Yang L, Wang S, Shen M, et al. Photonic integration of Er³⁺: Y₂SiO₅ with thin-film lithium niobate by flip chip bonding [J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15497-15504.
- [31] Jia Y, Yao Y, Wang S, et al. Dual-color upconversion luminescence emission from Er: LiNbO₃ on-chip ridge waveguides [J]. *Results in Physics*, 2021, 27: 104526.
- [32] He L, Özdemir Ş K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 60-82.
- [33] Yang L, Carmon T, Min B, et al. Erbium-doped and Raman microlasers on a silicon chip fabricated by the sol-gel process [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(9): 091114.
- [34] Wang Z, Fang Z, Liu Z, et al. On-chip tunable microdisk laser fabricated on Er³⁺-doped lithium niobate on insulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 380-383.
- [35] Liu Y, Yan X, Wu J, et al. On-chip erbium-doped lithium niobate microcavity laser [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 64(3): 234262.
- [36] Luo Q, Hao Z, Yang C, et al. Microdisk lasers on an erbium-doped lithium-niobate chip [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 64(3): 234263.
- [37] Luo Q, Yang C, Zhang R, et al. On-chip erbium-doped lithium niobate microring lasers [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3275-3278.
- [38] Yin D, Zhou Y, Liu Z, et al. Electro-optically tunable microring laser monolithically integrated on lithium niobate on insulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2127-2130.
- [39] Yang Z, Lu J, Zhuge M, et al. Controllable growth of aligned monocrystalline CsPbBr₃ microwire arrays for piezoelectric-induced dynamic modulation of single-mode lasing [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 1900647.
- [40] Gao R, Guan J, Yao N, et al. On-chip ultra-narrow-linewidth single-mode microlaser on lithium niobate on insulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3131-3134.
- [41] Zhang R, Yang C, Hao Z, et al. Integrated lithium niobate single-mode lasers by the Vernier effect [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 64(9): 294216.
- [42] Xiao Z, Wu K, Cai M, et al. Single-frequency integrated laser on erbium-doped lithium niobate on insulator [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 432921.
- [43] Li T, Wu K, Cai M, et al. A single-frequency single-resonator laser on erbium-doped lithium niobate on insulator [J]. *APL Photonics*, 2021, 6(10): 101301.
- [44] Lin J, Farajollahi S, Fang Z, et al. Coherent mode-combined ultra-narrow-linewidth single-mode micro-disk [J]. *arXiv*, 2021, 2104: 08843.