

激光与光电子学进展

飞秒激光直写光波导放大器与激光器(特邀)

孙翔宇¹, 陈智^{1*}, 王宇莹², 陈道远², 刘小峰³, 马志军¹, 钟理京^{4**}, 邱建荣^{2,4}¹之江实验室, 浙江 杭州 311100;²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;³浙江大学材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;⁴宁波大学信息科学与工程学院光+X交叉科学与技术研究院, 浙江 宁波 315211

摘要 飞秒激光直写技术因其精度高、效率高、脉冲持续时间短、峰值功率高且能在多种材料中加工的优点,已被广泛应用于制备各种集成光电器件、光学传感器件。近几年,飞秒激光直写光波导放大器与激光器已经被越来越多的人关注。本文主要介绍飞秒激光直写光波导放大器与激光器的最新研究进展,包括:Type-I型、Type-II型、脊型和可变截面光波导放大器和激光器的波导传输和插入损耗、光放大增益特性,以及波导激光输出特性。最后,对该技术及其相关研究进展进行总结、分析、归纳,并展望该领域未来研究、应用和发展方向。

关键词 飞秒激光直写; 光波导; 波导放大器; 波导激光器

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232213

Femtosecond Laser Direct-Writing Optical Waveguide Amplifiers and Lasers (Invited)

Sun Xiangyu¹, Chen Zhi^{1*}, Wang Yuying², Chen Daoyuan², Liu Xiaofeng³, Ma Zhijun¹,
Zhong Lijing^{4**}, Qiu Jianrong^{2,4}¹Zhejiang Lab, Hangzhou 311100, Zhejiang, China;²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;³School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;⁴Institute of Light+X Science and Technology, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China

Abstract Femtosecond laser direct-writing technology is being increasingly employed in the fabrication of integrated optoelectronic and optical sensor devices. This technology is popular due to its precision, efficiency, brief pulse duration, substantial peak power, and versatility in material processing. In recent years, the advancements in femtosecond laser direct writing, specifically in the context of optical waveguide amplifiers and lasers have garnered increasing research attention. This article mainly introduces the latest research progress of femtosecond laser direct writing optical waveguide amplifiers and lasers, including waveguide transmission and insertion losses, optical amplification gain characteristics, and waveguide laser output characteristics of Type-I, Type-II, ridge, and variable cross-section optical waveguide amplifiers and lasers. Finally, the paper concludes with a synthesis and analysis of the current technological progress, along with a prospective outlook on the future research, applications, and development trends within this domain.

Key words femtosecond laser direct-writing; optical waveguide; waveguide amplifier; waveguide laser

1 引言

光波导放大器是一种将输入光信号放大的器件,光波导激光器是一种利用光波导结构实现激光放大和

发射的器件^[1]。光波导放大器和激光器在集成光子、光子芯片、生物医学、传感、集成量子通信等领域具有重要的应用价值^[2-3]。制备光波导放大器和激光器可以采用多种方案,传统上主要基于紫外(UV)光刻、电

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-10-27; 录用日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2802001)、国家自然科学基金(62105297, 62375246)、浙江省自然科学基金(LZ23F050002, LQ22F050022)

通信作者: *zhichen@zhejianglab.edu.cn; **zlight.optics@gmail.com

子束光刻(EBL)、聚焦离子束刻蚀(FIB)等方法。但是,这些传统方法存在很多问题^[4-6],例如:1)UV光刻、EBL和FIB等方法需要昂贵的设备和材料,制备成本较高;2)通常需要多个步骤和多次处理,制备周期较长;3)工艺复杂,操作技术要求高;4)限制了材料的选择范围。而通过激光直写光波导放大器和激光器,则能够有效解决上述传统加工方案所面临的大多数问题。因此近年来,通过飞秒激光直写技术制备光波导放大器和激光器已引起人们的广泛关注。

飞秒激光直写光波导是一种新型的光波导制备方法,其原理是利用飞秒激光的高能量、高功率和短脉冲宽度,通过非线性吸收和局部加热的方式,在光波导材料表面或内部形成微小的折射率变化区域,从而形成光波导结构^[7]。具体来说,飞秒激光在光波导材料表面或内部形成的局部加热区域会导致材料的折射率发生变化,形成微小的折射率变化区域^[8]。通过控制飞秒激光的脉冲宽度、能量和聚焦位置等参数,可以在光波导材料中形成复杂的三维(3D)光波导结构^[9-10]。与传统光波导制造技术相比,飞秒激光直写光波导表现出许多优点:1)飞秒激光直写系统相对更简单,工作环境包容性更大,且不需要光刻和洁净室等设施;2)能够实现快速的原型设计,通过简单的软件控制可以很容易地改变器件图案,与使用光刻步骤并需要生产掩模的标准技术相比,成本显著降低;3)它本质上是一种3D技术,因为在距离表面给定深度(100 μm~1 mm)内,材料本体中的任何点都可能引起折射率变化。

可以利用这种特性来实现新的器件功能,这在传统光波导制造方法中是不可能的^[11]。基于飞秒激光直写技术所具有的高精度、高效率 and 可重复性等特点,能够快速在透明增益介质中制备出高增益和低损耗的光波导器件^[12-14]。近年来,科研人员通过飞秒激光直写光波导技术在稀土掺杂的透明玻璃和晶体中实现了各种复杂结构,如:Type-I型、Type-II型等光波导放大器和激光器^[15-17]。国际上,意大利米兰理工大学 Osellame 等^[18]在 Er³⁺-Yb³⁺共掺的磷酸盐玻璃中,成功通过飞秒激光直写技术制备出 Type-I型光波导放大器和激光器。西班牙萨拉曼卡大学 Burghoff 等^[19]在 LiNbO₃中,通过飞秒激光直写技术成功制备出 Type-II型波导放大器。国内,山东大学陈峰教授团队^[2, 20-24]通过飞秒激光直写技术,在各种稀土掺杂的透明晶体中制备出不同的 Type-II型光波导放大器和激光器。山东师范大学蔡阳健团队^[25]通过飞秒激光直写技术,在 Pr:LiYF₄(YLF)晶体中制备了 Type-II型光波导放大器,并且在 Nd,Gd:CaF₂晶体中通过飞秒激光直写技术制备出了凹陷包层光波导激光器^[26]。华东师范大学程亚教授团队^[3, 27-34]通过飞秒激光直写辅助化学机械抛光技术,在薄膜 LiNO₃晶体中实现了各种复杂结构,如微盘形、微环形等高 Q 值的光波导放大器和激光器。近期,本团队^[35]通过可变截面波导结构设计,成功在 Er 掺

杂的磷酸盐玻璃中直写出高阶模波导放大器。同时,山东大学陈峰教授团队^[7]通过波导截面形状控制,成功在 Nd:YVO₄晶体中直写出了精细控制的叉型光栅波导,并最终实现了不同阶数的涡旋激光输出。在短短的十几年时间里,基于飞秒激光直写技术制备光波导放大器和激光器发展非常迅猛。因此,本课题组认为,此刻非常有必要提供一篇综述论文对该研究领域进行归纳总结,以帮助初学者快速地进入该研究领域。

本综述中:首先,简要介绍飞秒激光直写光波导放大器和激光器的研究现状;其次,简要介绍近年来通过飞秒激光制备光波导放大器和激光器的光波导类型和直写技术;然后,重点总结、概括并分析飞秒激光直写制备的不同类型光波导放大器和激光器的技术特点、光波导结构特点、器件性能、独特优势,以及其发展所存在的问题;最后,对该研究领域进行总结,并展望未来发展趋势。

2 飞秒激光直写技术

飞秒激光直写技术是一种利用飞秒脉冲激光作为光源的微纳加工技术,具有空间分辨率高、加工精度高、热影响小等特点^[36-37]。此外,它还具有无需光刻、蚀刻等复杂工艺,直接在材料内部进行三维微纳加工的优点^[21]。它的出现,为微纳制造技术的发展开辟了新的道路,引发了科研界和工业界的广泛关注和热烈讨论。

飞秒激光直写技术的基本原理是,通过聚焦飞秒脉冲激光在材料内部产生高强度的电磁场,使材料在极短的时间内发生电离,形成等离子体。等离子体的快速冷却和固化,使材料内部形成永久性的微纳结构^[38-40]。这种微纳结构可以是点、线、面等不同形状,通过控制激光的聚焦位置和扫描路径,可以在材料内部“直写”出所需的微纳结构。而飞秒技术直写光波导是一种利用飞秒激光脉冲对光波导进行直接加工的方法。飞秒激光脉冲通过光学透镜或光纤耦合到光波导材料表面。在飞秒激光脉冲作用下,材料表面的局部区域会发生光化学反应或熔融,形成微小的孔洞或通道,从而形成具有特定形状和尺寸的光波导结构,如图 1(a)所示^[41]。飞秒激光器输出脉冲激光后,通过移动平台控制运动路径来进一步控制光波导的直写路径。图 1(b)展示了飞秒激光直写用于制备光波导放大器和激光器的 4 种光波导的结构。

2.1 Type-I型光波导

Type-I型光波导通常指激光作用区域未出现损伤且出现正折射率变化的光波导。飞秒激光作用区域折射率增大有多重原因,与不同材料及加工参数下折射率改变机理的差异有关,包括:致密化、粘流化、色心形成、光折变、离子重新分布等^[22]。在 Type-I型光波导中,由于波导的折射率高于周围介质,光在波导中传播时会不断发生全反射,从而被限制在波导中传播^[15, 42-43]。Type-I型光波导具有传输效率高、损耗小、

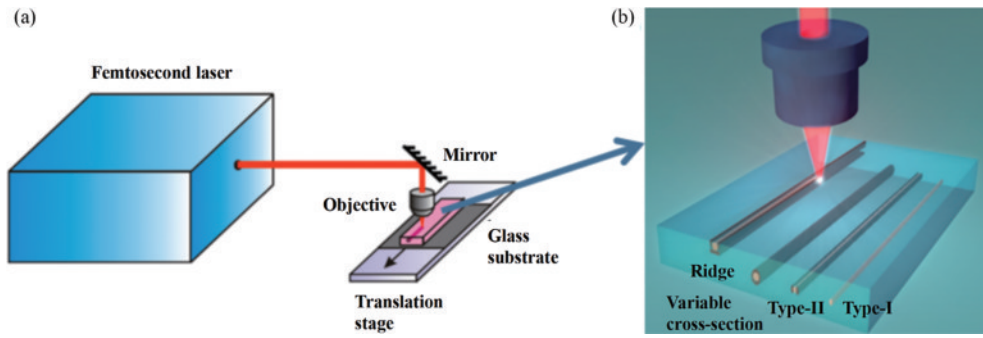


图 1 飞秒激光直写光波导系统。(a)飞秒激光直写光波导平台示意图^[18];(b)用飞秒激光器在透明介质中制备的 4 种光波导结构,包括:Type-I 型光波导、Type-II 型光波导、脊形光波导和可变截面光波导^[21]

Fig. 1 Femtosecond laser direct-writing optical waveguide system. (a) Schematic diagram of femtosecond laser direct-writing optical waveguide platform^[18]; (b) four types of optical waveguide structures prepared by using femtosecond lasers in transparent media, including Type-I, Type-II, ridge, and variable cross-section optical waveguide^[21]

模式分布均匀等优点。理论上,Type-I 型光波导由于具备这些优点,有利于高增益波导放大器和高斜率效率波导激光器的制备。通常情况下,Type-I 型光波导主要通过飞秒激光直写技术在玻璃中实现。但这并不是普适的。甚至在一些玻璃内,如磷酸盐、硅酸盐、钠钙硅玻璃^[44]等,激光直接作用区域的密度和折射率会减小,周围区域的折射率反而增加。在陶瓷和聚合物中直写 Type-I 型光波导也存在困难^[45-47]。事实上,在晶体中直写 Type-I 型光波导比在玻璃中更加困难,目前只在少数晶体中实现了 Type-I 型光波导的直写,如 LiNbO_3 ^[48-50]、 ZnSe 多晶^[51] 和硼酸盐晶体 $[\text{Nd}^{3+}(\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3)]$ ^[52],且这些晶体中的 Type-I 型光波导只能传输 TM 偏振模式(偏振垂直于晶体表面)。图 2(a) 明亮区域展示的是飞秒激光在 LiNbO_3 晶体中直写产生的 Type-I 型光波导,图 2(b) 为该光波导在波长为 633 nm 时的模场。只有沿着晶体 z 轴的线偏振光才能在该光波导中导光,因为折射率的增加只发生在 n_e 中。据报道,在 1550 nm 的波长下,传播损耗为

$2.25 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$,并且这种波导在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的温度下不稳定,不适合高功率应用^[28, 31, 53]。

2.2 Type-II 型光波导

Type-II 型光波导一般指激光在直接照射区域引起负折射率变化,而邻近的周围区域具有相对高的折射率的光波导。飞秒激光作用区域折射率减小是由于激光的高能量脉冲作用在介质上引起了非线性光学效应,主要包括电子激发、离子运动、晶格膨胀,以及光的自聚焦效应等。具体来说,飞秒激光的高能量脉冲会导致介质中的电子被激发到高能级,形成等离子体。这个等离子体区域的电子密度较高,导致局部区域的折射率降低。同时,激光脉冲也会引起介质中的离子运动,导致晶格畸变和膨胀,进一步引起折射率的降低^[54]。此外,由于介质的非线性光学性质,飞秒激光的高能量脉冲还会引起光的自聚焦效应。当光自聚焦时,光束的强度在轴向方向上增加,导致局部区域的折射率降低。

Type-II 型光波导具有许多优点和性能特点^[55]。它具有两个不同的折射率区域,使得 TE 模式和 TM 模式的光在波导中具有不同的传播速度和传播路径。这种结构可以实现 TE 和 TM 模式的有效分离,使得光在波导中的传输更加稳定和可靠,损耗低、耦合效率高,还可以实现紧凑的光学器件和集成电路。由于 TE 和 TM 模式的光可以在同一个波导中传输^[56],因此可以将多个功能集成到一个波导结构中,从而实现更小型化和高度集成的光学器件。

一般来说,使用飞秒激光制造 Type-II 型光波导的材料包括但不限于以下几种:

1) 石英玻璃(SiO_2):石英玻璃是一种常用的材料,具有良好的光学性能和化学稳定性。飞秒激光可以在石英玻璃中产生局部改变,形成 Type-II 型光波导。

2) 其他玻璃材料:除了石英玻璃,其他类型的玻璃材料也可以通过飞秒激光制造 Type-II 型光波导。

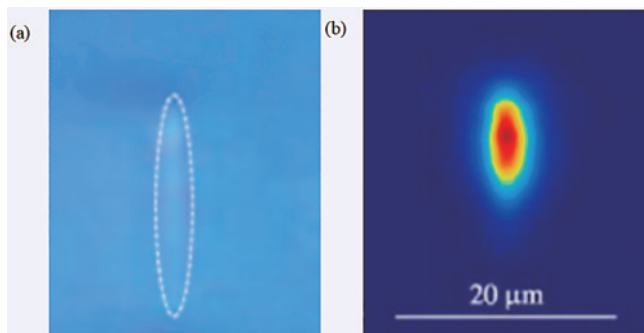


图 2 Type-I 型光波导的结构和模场特性^[21]。(a)Type-I 型光波导的显微镜下端面图像;(b)Type-I 型光波导在波长为 633 nm 时的模场

Fig. 2 Structure and mode field images of Type-I optical waveguide^[21]. (a) Microscopic end face image of Type-I optical waveguide; (b) mode field of Type-I optical waveguide at a wavelength of 633 nm

例如,硼硅酸盐玻璃和磷酸盐玻璃等。

3) 半导体材料:一些半导体材料也可以通过飞秒激光制造 Type-II 型光波导。例如,砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)和砷化锗(GeAs)等。

4) 除了上述材料,还有其他一些材料也可以通过飞秒激光制造 Type-II 型光波导,如聚合物材料、聚合物玻璃材料、氮化硅材料等。

到目前为止,晶体中的大多数 Type-II 型波导都是用双线几何结构构造的^[57]。图 3 展示了在一些材料中使用飞秒激光直写各种结构的 Type-II 型光波导的研究进展。图 3(a)是飞秒激光直写 Type-II 型光波导示意图。图 3(b)是在 LiNbO₃ 晶体中激光直写产生的 Type-II 型光波导^[21],LiNbO₃ 晶体是一种多功能材料,由于其具有许多优良的性能,利用飞秒激光直接写入,在 LiNbO₃ 晶体中基于折射率变化、表面形貌变化或畴结构,制备了 Type-II 型光波导。图 3(c)是苏格兰大学 Beecher 团队^[58]在 BiB₃O₆ (BiBO) 晶体中加工的 Y 型 Type-II 型光波导。该团队设计了一种 Y 型的四线结构,这种结构支持沿着引导光的两个正交偏振^[59],测量

到的传输损耗为 5 dB/cm。德国汉堡大学 Müller 等^[60]在 Pr:YLF 中进行了激光直写 Type-II 型光波导的最新工作,如图 3(d)所示。其中,应用菱形几何的“8 线”方法在中心限制波导核心。沿 x 轴极化方向,传输损耗为 2.3 dB/cm。这种 8 线结构也是一种 Type-II 型结构形状。图 3(e)是山东大学陈峰教授团队^[2]2019 年报道的一种利用多层扫描技术获得的伴随 TE 极化的水平轨道,而普通的双线波导只支持 TM 极化。在该设计中,波导层由多个修改点组成,形成一条虚线,总长度可以通过激光扫描来控制。理论上,利用这种方法可以获得更多的波导层。图 3(f)是来自西班牙马德里自治大学科学院 Benayas 教授团队^[21]的工作,他们报道并总结了单线结构 Type-II 型 Cr 掺杂的蓝宝石波导。图 3(g)是西班牙萨拉曼卡大学激光中心在 Nd:YAG 晶体中制备的“包层+双线”混合结构。图 3(h)是 2020 年山东大学陈峰教授团队在 Nd:YAP 晶体中制备的类光子晶格状波导,六边形光子晶格状波导的波导核心位于未损伤区域,周围有 4 层激光书写轨迹。需要注意的是,不同材料对飞秒激光的响应和制造过

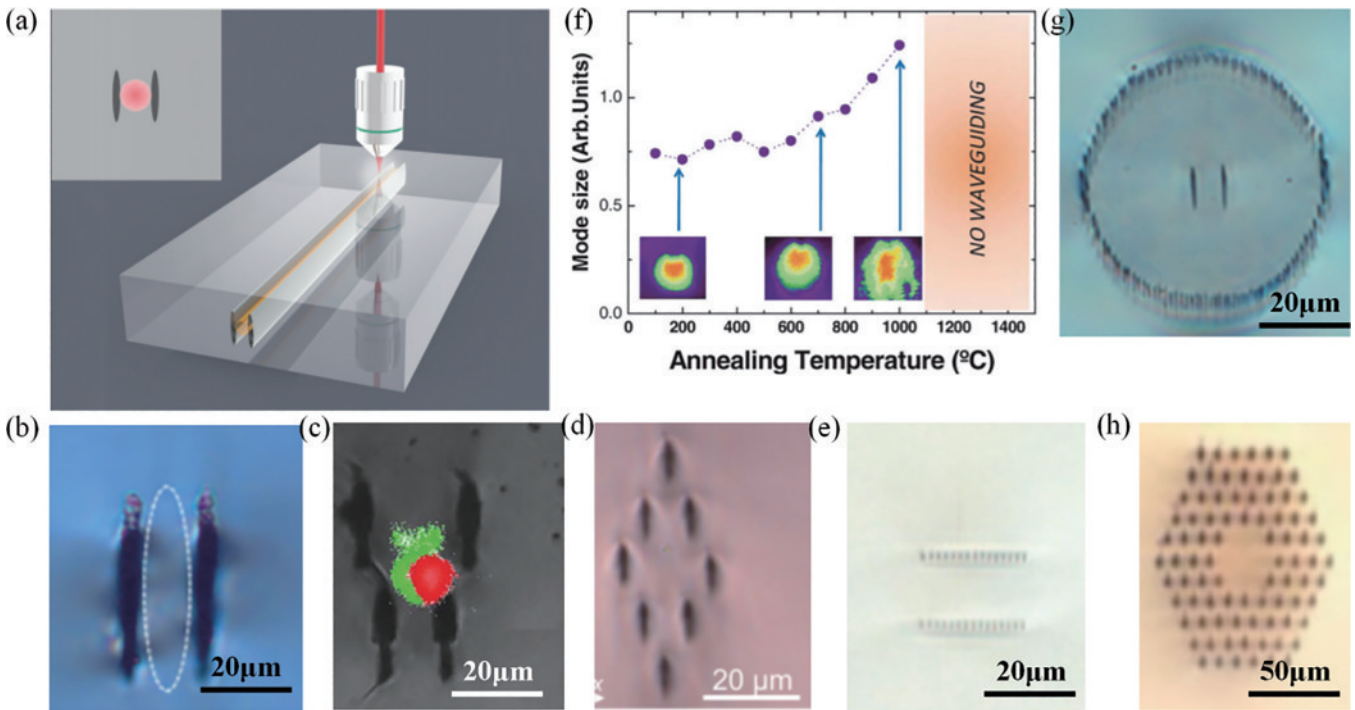


图 3 各种 Type-II 型光波导结构示意图^[21, 58-59]。(a) 飞秒激光直写 Type-II 型光波导示意图;(b) LiNbO₃ 晶体中激光直写产生的双线 Type-II 型光波导及模场;(c) 飞秒激光在 BiB₃O₆ 晶体中直写的 Y 型 Type-II 型光波导;(d) 具有 8 轨道菱形结构的显微镜图像;(e) 飞秒激光在 LiTaO₃ 中的诱导多焦点相应的水平波导;(f) 不同退火温度下单线结构 Type-II 型 Cr 掺杂蓝宝石波导在 632 nm 处的传播模式,插图显示了波导在 3 种不同温度下 632 nm 的传播模式;(g) “包层+双线”波导;(h) 类光子晶格波导

Fig. 3 Schematic diagrams of various Type-II optical waveguide structures^[21, 58-59]. (a) Schematic diagram of Type-II optical waveguide directly-written by femtosecond laser; (b) double line Type-II optical waveguide and mode field generated by laser direct-writing in LiNbO₃ crystal; (c) Y-type Type-II optical waveguide directly-written by femtosecond laser in BiB₃O₆ crystal; (d) microscopic images with an 8-orbit diamond structure; (e) the induction of multifocal corresponding horizontal waveguides by femtosecond laser in LiTaO₃; (f) propagation modes of Type-II type Cr doped sapphire waveguides with single wire structure at 632 nm under different annealing temperatures, the inset shows the propagation mode of the waveguide at 632 nm at three different temperatures; (g) “cladding+dual-line” waveguide; (h) photonic lattice waveguide

程可能存在差异,因此在选择材料和制造过程时需要考虑材料的特性和飞秒激光的参数。此外,飞秒激光直写 Type-II 型光波导的具体方法和工艺也可能因材料的不同而有所差异。根据目前的研究,Type-II 型光波导能够使传输损耗低至 0.16 dB/cm,波导中双线结构的间隔为 22 μm ,波导模场截面长 28.3 μm 、宽 23.6 μm 。

2.3 飞秒激光辅助化学机械抛光制备的脊型光波导

对于 Type-I 型和 Type-II 型光波导,飞秒激光束一般只在聚焦处或周围产生材料损伤。飞秒激光器的高强度脉冲也可用于通过超快烧蚀机制蚀刻选定区域中的晶体。这为在平面波导衬底上构建脊形波导提供了途径^[61]。脊型光波导由两部分组成:一个高折射率的区域,通常是半导体材料;包围高折射率区域的低折射率部分。其通常是一个矩形或梯形的凸起,高度通常在几百纳米到几微米的范围内。在晶体中,脊型光波导已经可在离子辐照的平面波导表面中制备,如 Nd:YAG、Nd:GGG、Nd:GdCOB、LiNbO₃ 和二氧化钛晶体,实现了作为波导激光器或变频器的应

用。制备脊型光波导的主要问题是飞秒激光烧蚀会产生粗糙的侧壁。华东师范大学程亚教授团队^[3]报道了飞秒激光辅助化学机械抛光制备脊型光波导,如图 4 所示。他们利用光刻辅助化学机械蚀刻技术,演示了在掺铒薄膜铌酸锂 (TFLN) 上制备的集成光波导。制备流程如图 4(a) 所示,主要有 4 个步骤:

- 1) 在铌酸锂薄膜表面蒸镀一层金属铬 (Cr) 薄膜。
- 2) 利用飞秒激光刻蚀技术选择性地去除部分 Cr 膜,得到与光子器件构型对应的 Cr 掩模图案,在这一过程中,由于飞秒激光的功率被设置在铌酸锂晶体的破坏阈值之下,刻蚀 Cr 膜时铌酸锂薄膜没有受到损伤。飞秒激光刻蚀留下的 Cr 膜的莫氏硬度高于铌酸锂材料,可以作为掩模在接下来的化学机械抛光步骤中保护下方的铌酸锂薄膜。
- 3) 利用化学机械抛光 (CMP) 技术将 Cr 掩模图案转移到铌酸锂薄膜层。
- 4) 在 Cr 腐蚀液中去掉残余的 Cr 膜。接下来,可以根据器件设计需要,利用湿法腐蚀、薄膜沉积等手段实现悬空微纳结构、介质包层及微纳电极等。

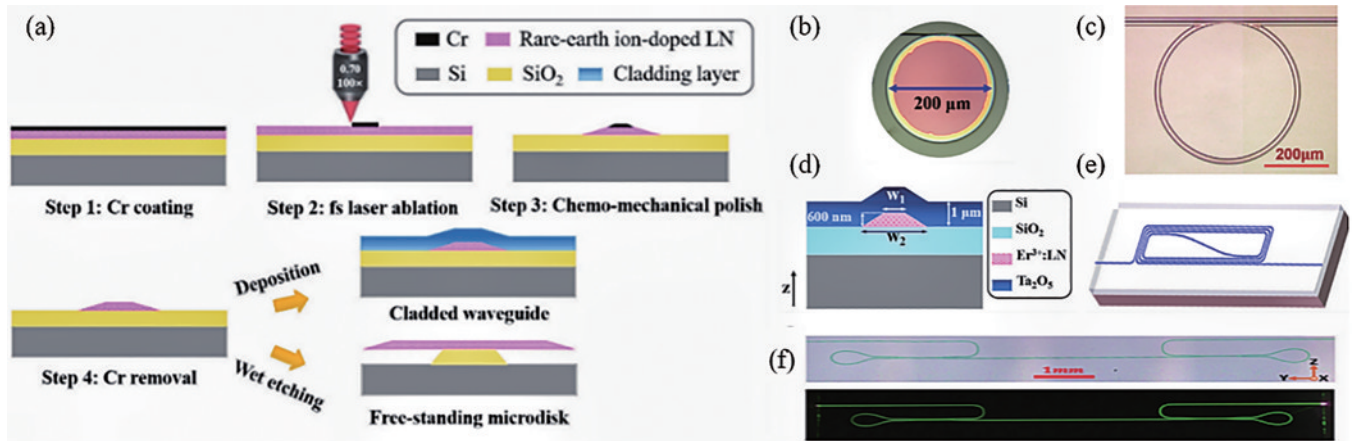


图 4 脊型光波导制备及各类型示意图^[3]。(a)激光光刻辅助化学机械蚀刻技术;(b)掺铒铌酸锂薄膜微盘结构;(c)片上集成微环结构的光学显微图;(d)顶部沉积 Ta₂O₅包层的 Z 切向掺铒 TFLN(Er³⁺:TFLN)铌酸锂包层波导横截面示意图;(e)单片集成掺铒铌酸锂波导;(f)基于 Sagnac 环形反射器的 Er³⁺:TFLN FP 谐振腔显微图像

Fig. 4 Preparation and schematic diagrams of different ridge-type optical waveguides^[3]. (a) Laser lithography assisted chemical mechanical etching technology; (b) micro-disk structure of erbium doped lithium niobate thin film; (c) optical micrograph of integrated micro-ring structure on chip; (d) cross section diagram of Z-cut Er³⁺:TFLN lithium niobate cladding waveguide with Ta₂O₅ cladding deposited on top; (e) monolithic integrated erbium doped lithium niobate waveguide; (f) microimage of Er³⁺:TFLN FP resonant cavity based on Sagnac ring reflector

华东师范大学程亚教授团队^[32]利用飞秒激光辅助化学机械抛光技术在薄膜铌酸锂片上实现了各种适合制备高质量波导放大器和激光器的脊型光波导。图 4(b)为掺铒铌酸锂薄膜微盘结构,微腔直径为 200 μm ,在 1563.86 nm 附近通过洛伦兹曲线拟合透射光谱,得到的光学品质因子 Q 值约为 1.8×10^6 。片上集成微环结构,这种微米尺寸的圆对称非悬空微环结构在微腔侧面集成脊形光波导,优点是窄线宽、输出功率大、 Q 值可达 10^6 量级,如图 4(c) 所示。此外,没有包

层的裸露波导,可能会导致放大器在长期运行时因外部扰动而出现性能波动和不稳定的情况。因此,对器件最直接的保护措施是在波导的顶部沉积一层包层,波导中的光学模式也可以通过包层进行控制,便于进一步优化放大器性能,如图 4(d) 所示。图 4(e) 展示了单片集成掺铒铌酸锂波导,该器件由 600 nm 厚的 Z 切向的掺铒铌酸锂波导组成,波导截面上表面宽度约为 1.2 μm ,底部宽度约为 4 μm 。波导中铒离子掺杂摩尔分数为 1%。螺旋盘绕的波导部分可以减小放大器的

总体尺寸,弯曲半径为 $800\ \mu\text{m}$ 时,器件的总体增益长度为 $3.6\ \text{cm}$,内部净增益最高可达 $18\ \text{dB}$ 。Sagnac 环反射器的尺寸为 $1.8\ \text{mm} \times 0.4\ \text{mm}$,包含一个定向耦合器,其中,两个输出端链接构成一个环路。定向耦合器的耦合长度约为 $300\ \mu\text{m}$,波导间距约为 $3.3\ \mu\text{m}$ 。环路设计为遵循贝塞尔曲线,以最小化波导弯曲损耗。TFLN 上脊波导的顶部宽度约为 $1\ \mu\text{m}$,脊的蚀刻深度约为 $210\ \text{nm}$,在 $1544\ \text{nm}$ 波长处观测到一个侧模抑制比(SMSR)大于 $25\ \text{dB}$ 的激光模式峰值^[3]。

这几类脊型波导都很适合制作片上集成光波导放大器 and 激光器^[62],它有很多优点:

1) 高速传输:片上集成光波导技术可以实现高速传输,传输速度可以达到数十 Gbit/s 以上,比传统的电缆传输速度快几个数量级。

2) 低损耗:片上集成光波导技术可以实现低损耗传输,光波导的损耗可以控制在 $0.1\ \text{dB/km}$ 以下,比传统的电缆传输损耗低几个数量级。

3) 抗干扰:片上集成光波导技术可以实现抗干扰传输,由于光波导传输信号不会受到电磁干扰,因此可以在复杂的电磁环境下进行稳定的传输。

4) 体积小、质量轻:片上集成光波导技术可以大大减小设备的体积和质量,方便携带和安装^[53]。

2.4 可变截面光波导

可变截面光波导是一种基于多次扫描堆叠形成的光波导结构,可以通过调节或控制其截面形状来实现对光的传输特性的调节^[63]。通过改变波导的截面形状,可以调整波导的模式分布、色散特性、传输损耗等光学性质。使用飞秒激光直写技术可以在各类透明材料中更加简单地制备出各种可变截面波导。

近年来,本课题组在透明玻璃内部通过飞秒激光直写可变截面光波导方面开展了一些研究^[35, 44, 64-65]。通过改进的多次扫描激光直写技术基于亚微米级别的单次扫描轨迹,实现波导的制备,为亚微米分辨率波导的设计和制造提供了一种新的自由度^[64]。因此,该技术方案不仅能设计制备 Type-I 型高阶模光波导,还能设计制备 Type-II 型高阶模光波导等,如图 5(a) 所示。利用这种技术制备的可变截面光波导具有较低的传输损耗,减少了光的损耗,使其在长距离光通信中具有更好的传输性能。图 5(b)、(c) 展示了通过多次扫描飞秒激光直写技术在掺 Er^{3+} 磷酸盐玻璃中制备的 LP_{01} 和 LP_{11} 模的光波导结构。通过改进的多次扫描方法精细调控波导的截面以匹配模场强度分布。本课题组利用飞秒激光直接写入技术在 Er^{3+} 掺杂的照相玻璃中设计并制作了 LP_{01} 模和 LP_{11} 模光波导,从图 5(d) 可以看出,其模场与设计结构基本一致,且其模式提取因子高达 $24\ \text{dB}$,插入损耗低至 $1.88\ \text{dB}$ 。

同时,山东大学陈峰教授团队^[7]报道了一种基于飞秒激光直写的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的可变截面的叉型光栅复合光波导涡旋激光器。其波导部分主要由复合包

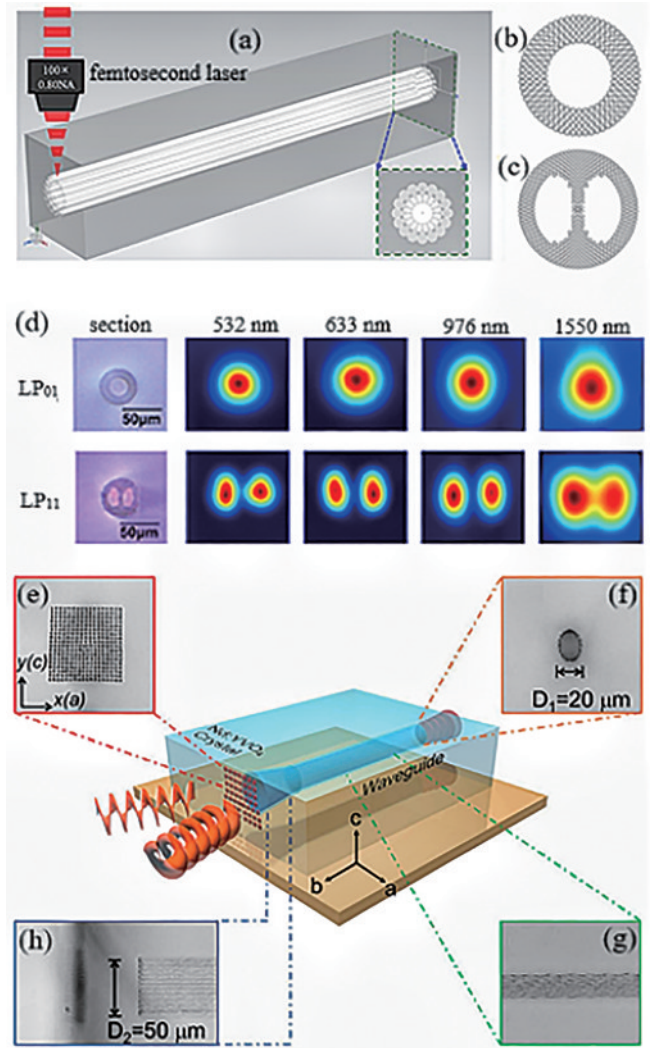


图 5 飞秒激光直写可变截面光波导^[7, 35]。(a) 飞秒激光直写可变截面光波导示意图; (b) (c) LP_{01} 模和 LP_{11} 模的光波导结构示意图; (d) 波长分别为 $532\ \text{nm}$ 、 $633\ \text{nm}$ 、 $976\ \text{nm}$ 、 $1550\ \text{nm}$ 时的 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的光波导模场图; (e)~(h) 叉型光栅光波导在输入输出端的端面图和俯视图

Fig. 5 Femtosecond laser direct-writing of variable cross-section optical waveguides^[7, 35]. (a) Schematic diagram of femtosecond laser direct-writing variable cross-section optical waveguide; (b) (c) schematic diagrams of the optical waveguide structure of LP_{01} mode and LP_{11} mode; (d) the optical waveguide mode field diagrams of LP_{01} mode and LP_{11} mode at wavelengths of $532\ \text{nm}$, $633\ \text{nm}$, $976\ \text{nm}$, and $1550\ \text{nm}$, respectively; (e)~(h) end face and top view of fork grating optical waveguide at input and output terminals

层波导和一个内表面叉状光栅波导组成。该波导具有出色的单模导引性能。叉型光栅波导具有较高的加工精度,且具有优异的涡旋衍射性能。图 5(e) 为内表面叉型光栅波导示意图,图 5(f) 为直柱包层波导的输入端面示意图,图 5(g) 为直包层波导的横向视图,图 5(h) 为锥形波导的输出端示意图。 x 轴和 y 轴分别对应于晶体的 a 轴和 c 轴。

可变截面光波导提供了一种对波导尺寸、截面形状、模场分布和波导损耗进行亚微米尺度精细控制的新自由度,使波导具有更高的灵活性和可调节性,可以实现对光的传输和调制的精确控制。波导损耗更低,更有利于光波导放大器和激光器的实现。

3 光波导放大器

光波导放大器是一种利用光波导结构实现光信号放大的器件,在许多领域拥有极大的应用价值。光波导放大器可以用于光纤通信系统中,增强光信号的传输距离和质量,提高通信系统的传输速率和容量。特别是在光纤通信的长距离传输中:光波导放大器可以用作信号的中继站,增强信号强度,降低信号衰减;它还可以用于光网络中的信号放大和转换,提高网络的传输效率和可靠性;在传感器方面,光波导放大器可以用于光传感器中,增强传感器对光信号的检测灵敏度和范围,提高传感器的性能和应用范围。基于飞秒激光直写技术,近年来已经实现了多种结构的光波导放大器。一般来说,这些光波导放大器可以简单分为以波导种类为区别的几种类型,包括:基于 Type-I 型的波导放大器、基于 Type-II 型的波导放大器、基于脊型的波导放大器,以及基于可变截面的波导放大器。这些基于飞秒激光直写技术实现的光波导放大器具有微纳尺度特征和优异性能^[66]。

3.1 基于 Type-I 型的光波导放大器

Type-I 型光波导放大器是一种基于非线性光学效应的光学放大器。这种放大器经常使用的材料是基于各类稀土掺杂的玻璃^[44]。理论上,Type-I 型光波导的插损最小,因此 Type-I 型光波导放大器具有高增益、低噪声和宽带特性,适用于光通信、光传感和光计算等领域。它可以用于光放大器、光放大芯片、光放大模块等光学器件中,提高光信号的强度和传输距离。

通常情况下,飞秒激光在玻璃中能直写出 Type-I 型光波导,这对于制备 Type-I 型光波导放大器非常有利。然而受限于有源增益玻璃,科学家们对 Type-I 型光波导放大器的研究报道并不是很多。截至目前,只有团队在磷酸盐玻璃中实现了飞秒激光直写 Type-I 型光波导放大器。2008 年,米兰理工大学的 Osellame 团队^[18]通过飞秒激光直写技术,成功在 Er-Yb 掺杂的磷酸盐玻璃内实现了 Type-I 型光波导放大器,如图 6 所示,他们通过优化制造参数,在 Er-Yb 掺杂的磷酸盐玻璃内直写出了 22 mm 长的 Type-I 光波导,获得了耦合损耗低至 0.1 dB、传播损耗低于 0.4 dB/cm 的波导,并且波导在整个 C 波段(1530~1565 nm)具有~6 dB 的净增益。尽管如此,长期以来人们普遍认为飞秒激光在磷酸盐玻璃中只能直写 Type-II 型光波导,这一反常结果引起科研人员的关注。

3.2 基于 Type-II 型的光波导放大器

Type-II 型光波导放大器是一种特殊类型的光波

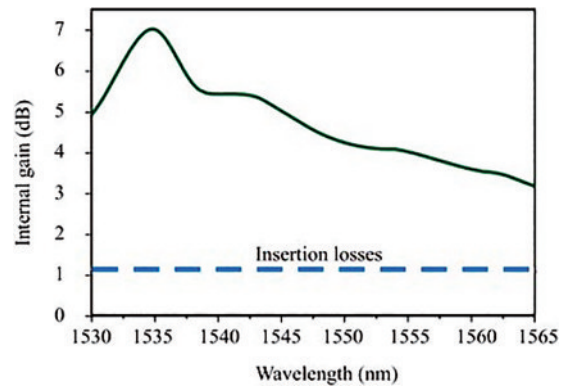


图 6 基于 Type-I 型的光波导放大器,885 kHz 的 KYW 激光器直写的 22 mm 波导在 1530~1565 nm 范围内的净增益曲线(红色实线),蓝色虚线表示波导插入损耗^[18]

Fig. 6 Amplifier based on Type-I optical waveguide, the net gain curve (red solid line) in the range of 1530 nm to 1565 nm of a 22 mm waveguide directly-written by a 885 kHz KYW laser, the blue dashed line represents the insertion loss of the waveguide^[18]

导放大器,其波导结构由两种不同材料的波导层组成。这两种材料在光学性质上具有不同的折射率,从而形成了一个能够导引和放大光信号的波导结构。Type-II 型光波导放大器具有以下几个优点^[67]:

- 1)高增益:Type-II 型光波导放大器利用自频移效应,可以实现高增益,将输入信号光的强度放大。
- 2)宽带宽:Type-II 型光波导放大器可以实现带宽的放大,适用于多种光信号的放大需求。
- 3)温度稳定性:Type-II 型光波导放大器有很好的温度稳定性,可以在广泛的温度范围内保持稳定的性能。

图 7(a)展示了 Type-II 型光波导放大器的测试原理图。在使用 980 nm 的激光泵浦后,传输损耗逐步下降,如图 7(b)所示。图 7(c)展示了输出 SH 功率(峰值)和 SHG 转换效率与基波长输入功率的关系^[26]。

截至目前,科学家们已对 Type-II 型光波导放大器开展了许多研究。其中,2020 年,山东大学陈峰教授团队^[22]在铈酸锂中制备了双线结构的 Type-II 型光波导,其传输损耗为 0.6 dB/cm,并且在 C 波段实现了光放大,净增益为 16 dB。2023 年,他们进一步通过激光直写技术、光波导结构设计和优化,获得了净增益高达 27 dB 的 Type-II 型光波导放大器。此外,山东师范大学蔡阳健教授团队^[25]在 2020 年采用飞秒激光在 Pr:LiYF₄(YLF)晶体中制备了 Type-II 型光波导。在优化后的参数下,其传输损耗约为 0.79 dB/cm,且在 C 波段实现了 10 dB 的开关增益。国际上,瑞士洛桑理工学院 Borca 等^[68]在 KGW 和 Yb:KGW 中采用双线方法制备了 Type-II 型光波导。双线结构在两个轨道之间有制导,传输损耗在 1 μm 波长下为 2~2.5 dB/cm,并实现了 7 dB 的开关增益。

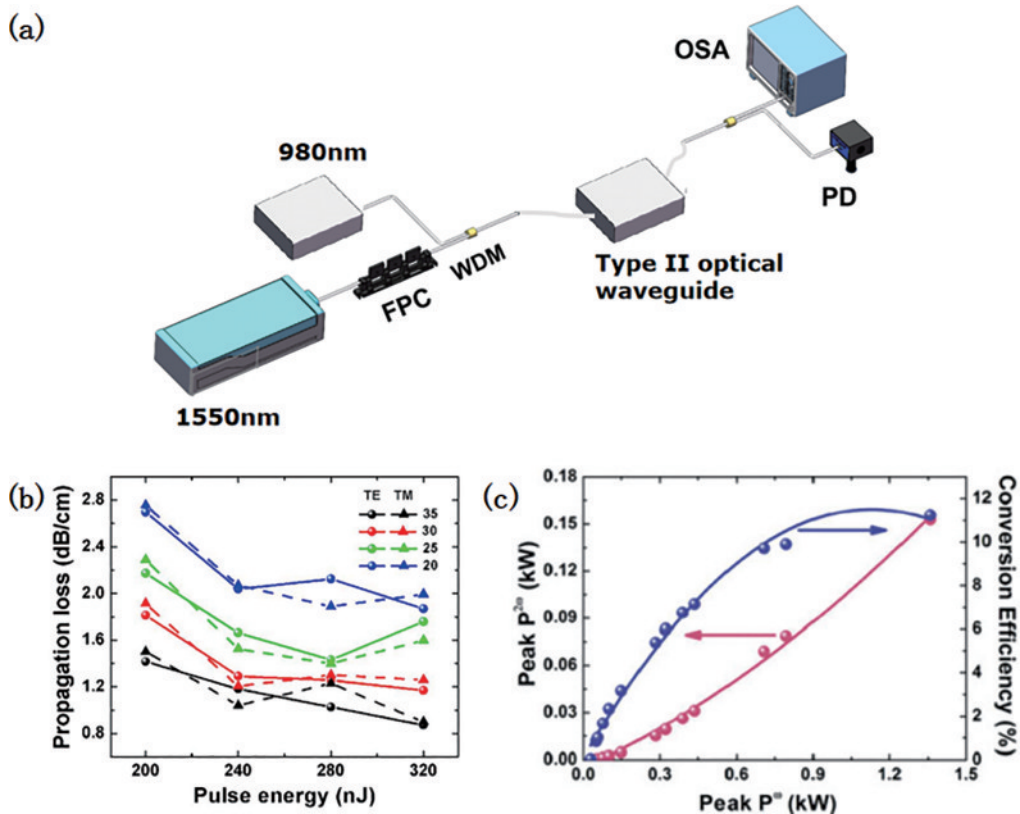


图7 Type-II型光波导放大器^[26]。(a)Type-II型光波导放大器的测试系统示意图;(b)传输损耗;(c)输出SH功率(峰值)和SHG转换效率与基波长输入功率的变化曲线

Fig. 7 Type-II optical waveguide amplifier^[26]. (a) Schematic diagram of the testing system for Type-II optical waveguide amplifier; (b) transmission loss; (c) the variation curve of output SH power (peak) and SHG conversion efficiency with fundamental wavelength input power

3.3 基于脊型的光波导放大器

脊型光波导放大器采用脊型波导结构来实现光信号的放大,通过控制波导芯层尺寸和折射率分布,可以实现高增益、低损耗、宽工作波长范围的片上集成光放大器。它可以应用于光通信系统、光传感器和光放大器等领域,提高光信号的强度和传输距离。

华东师范大学程亚教授团队^[29]在制备脊型光波导放大器方面有着独特的技术和经验。他们使用的超快激光光刻辅助化学机械刻蚀技术(PLACE)作为一种新兴微纳加工技术,得益于飞秒激光微纳加工技术、高重复频率高稳定性激光器、大行程高精度高速运动平台等相关设备系统的快速发展,飞秒激光光刻技术在保持其超高精度加工品质的同时,显著提高加工效率且未来提升空间巨大。经过近几年的发展,该技术已实现传输损耗小于 $3 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 、总长度大于 1.1 m 的脊形波导,是一项具有晶圆级集成能力的光子器件制造技术。得益于该技术的独特优势,所制备的脊型光波导传输损耗可以逼近衬底材料的吸收极限,净增益可以达到 7 dB 以上且工作波长覆盖范围更广^[28]。

PLACE技术相比于传统工艺要简单,能够绕过复杂的对准和接合。在晶片表面只需要沉积一层 $200 \mu\text{m}$ 的Cr膜作为化学机械抛光环节的硬质掩模。

两片TFLN晶片的两个接触端面需要经过抛光处理,方便后续的无缝拼合。其次将两个TFLN晶片固定在特制夹具上进行拼合。在两块晶片底部加入紫外胶,并盖上一块石英晶片用紫外光照射固化。随后,沿着两片TFLN晶片边缘进行激光熔融焊接,保证两者稳定键合在石英晶片上。最后,利用飞秒激光光刻将掩模图案刻蚀到Cr膜上,经过化学机械抛光,图案转移到TFLN层^[3]。

图8(a)展示了脊型波导放大器的测试原理图^[3]。可以看出,这是一个掺铈铋酸锂波导放大器,在使用 980 nm 的激光泵浦后,沿着光波导发出强烈的上转换绿色荧光,肉眼清晰可见。随着泵浦光的加强,在 1530 nm 和 1560 nm 波长处光信号也出现了快速增益,并在高泵浦功率($>20 \text{ mW}$)处达到增益饱和。特别是 1530 nm 处,当泵浦光功率为 40 mW 时,信号光的内部净增益达到了 18 dB 。图8(b)为利用有源无源拼合集成与PLACE技术演示的四通道光波导放大器,它由3个制备在无源TFLN上的多模干涉(MMI)耦合器和4个制备在掺铈TFLN上的波导放大器组成。图8(c)展示了制备在TFLN拼合芯片上的四通道放大器整体实物图。从图8(d)的伪彩色插图中可以看到, 1550 nm 波长的信号光经过分束和掺铈波导放大后保

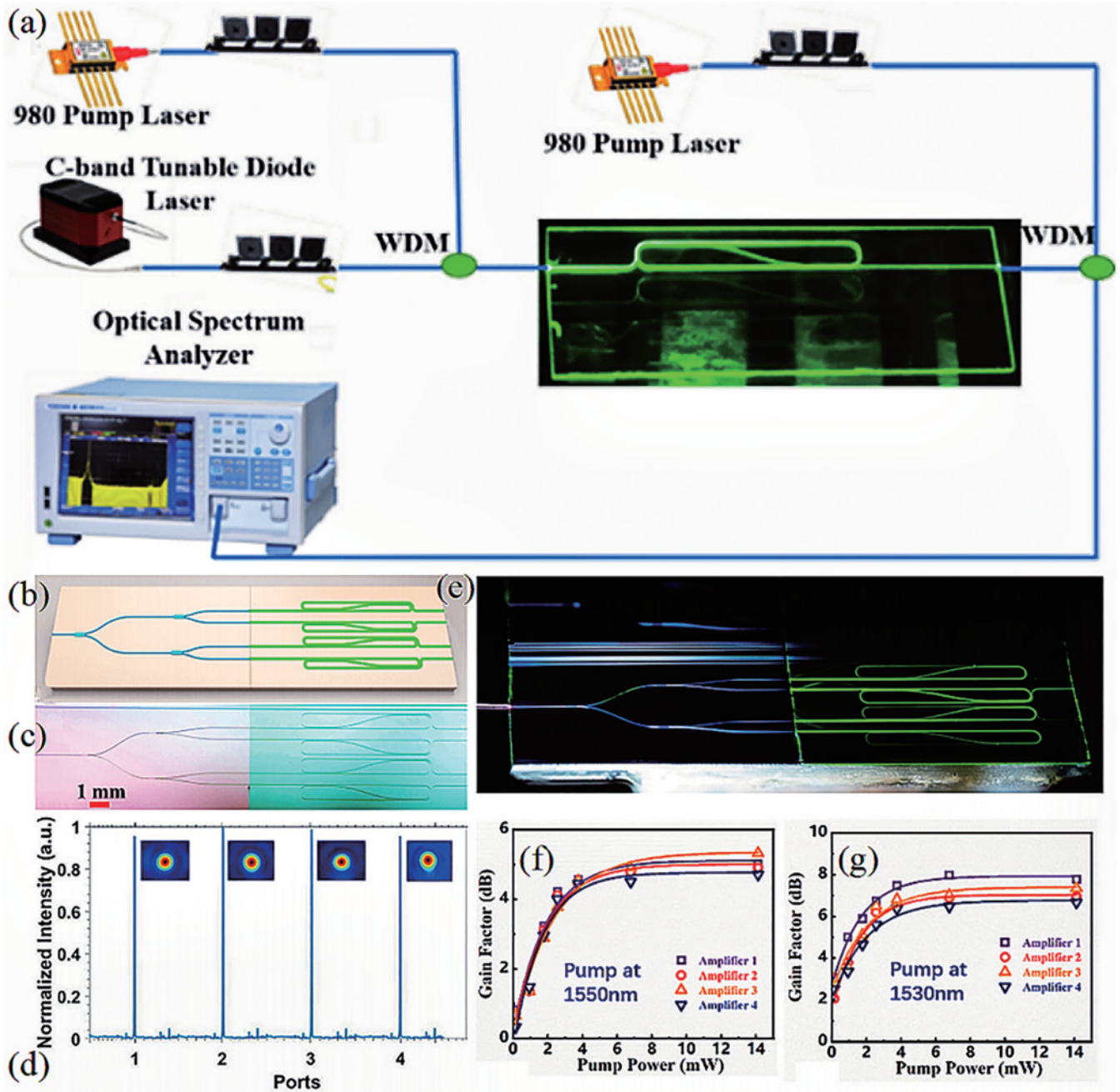


图 8 基于 Er^{3+} 掺杂的铌酸锂薄膜的脊型光波导放大器^[3]。(a)波导增益测试系统示意图；(b)四通道光波导放大器示意图；(c)四通道光放大器整体实物图；(d)1550 nm 波长信号光在四通道掺 Er^{3+} 光波导内的模式分布 (插图)与强度分布图；(e)四通道阵列光波导放大器受 976 nm 激光泵浦时的实物照片；(f)1550 nm 时的增益特性曲线；(g)1530 nm 时的增益特性曲线

Fig. 8 Ridge type optical waveguide amplifier based on Er^{3+} doped lithium niobate thin film^[3]. (a) Schematic diagram of waveguide gain measurement system; (b) schematic diagram of a four-channel optical waveguide amplifier; (c) overall physical diagram of a four-channel amplifier; (d) the mode distribution and intensity distribution of 1550 nm signal light in a four-channel Er^{3+} doped waveguide (inset); (e) optical images of a four-channel array optical waveguide amplifier pumped by a 976 nm laser; (f) gain characteristic curves at 1550 nm; (g) gain characteristic curves at 1530 nm

持了光场强度分布均匀的基模状态。图 8(e)中,器件在泵浦光激励下,沿着放大波导阵列发出强烈的绿色上转换荧光。图 8(f)、(g)展示了信号光波长分别在 1550 nm 与 1530 nm 时,集成光放大器的净增益与泵浦光功率的关系。1550 nm 信号光的最大内部净增益为 5 dB,而 1530 nm 信号光的最大内部净增益可达 8 dB。

实际上,程亚教授团队^[69]之所以取得这样的成果,

是因为他们对这项技术和以此技术为基础制备脊型光波导进行了长期的研究和报道。早在 2018 年的时候,他们就使用这种超快激光光刻辅助化学机械刻蚀技术,成功制备了掺 Er 铌酸锂薄膜脊型微盘波导,获得 Q 值的数量级突破,达到 10^7 ,在 1480 nm 时传输损耗为 1 dB/cm,在 C 波段实现了光放大,且获得了高达 3 dB 的净增益。2022 年,他们在掺铒薄膜铌酸锂高增

益微盘结构的包层波导放大器上得到了 18 dB 的净增益^[70],并在 2023 年突破到了 20 dB 的净增益^[71]。能够看出,这项技术可以实现优良脊型光波导放大器的制备。此外,光子结构经过化学机械抛光,留下了光学级的光滑表面,这些独特优势对于发展大规模集成乃至未来的超大规模集成光子芯片而言至关重要。

3.4 高阶模波导放大器

高阶模波导放大器是一种利用高阶模式进行光信号放大的器件。在传统的单模光波导中,只有一种模式可以传播,而在高阶模波导中,除了基本模式外,还存在多种高阶模式。高阶模波导放大器的工作原理是通过激发高阶模式来实现光信号的放大^[72]。这些高阶模式具有较大的模场面积,可以容纳更多的光能量,从而实现较高的增益。高阶模波导放大器在光通信和光传感领域具有广泛的应用,如可用于实现少模光纤高容量的光通信系统,提供更大的带宽和更远的传输距离。

最近,本团队利用改进后的多次扫描激光直写技术成功在掺铒磷酸盐玻璃内制备出了高阶模光波导放大器^[35]。单次扫描的波导尺寸被控制在亚微米尺度,通过多次扫描即可制备高阶模光波导,插入损耗低至

1.88 dB,模式提取因子高达 24 dB。

图 9(a)为高阶模光波导放大器的测试原理图^[35]。使用 Santec Tsl-550 可调谐光纤激光器(1500~1630 nm)作为种子光,采用 976 nm 光纤激光器作为泵浦光。利用 976/1550 波分多路复用器(WDM)连接种子光并将光注入同一光纤中。光学放大信号由物镜[50×,数值孔径(NA)为 0.42,焦距为 200 mm]采集,最终由光谱仪(Yokogawa AQ6370D)结合单模光纤记录。其中,图 9(a)中的插图展示了在掺铒磷酸盐玻璃中设计的两种光波导结构,分别为 LP₀₁ 模光波导和 LP₁₁ 模光波导。在不同位置进行相同间距的多次扫描,相邻轨道之间的距离为 0.8 μm。在此条件下,利用 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的模式场设计了两个不同截面形状的波导,LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式的波导直径分别为 ~17 μm 和 ~23 μm。包层的宽度为 3.2 μm。在 1500~1600 nm 的光通信窗口内成功实现了 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模光波导放大。图 9(b)~(d)分别展示了 LP₁₁ 模光波导放大信号光增益随泵浦光功率变化、不同波长信号光有无施加泵浦光的强度变化,以及不同波长信号光最大增益曲线,LP₁₁ 模光波导获得了开关增益为 3.52 dB 的光放大。

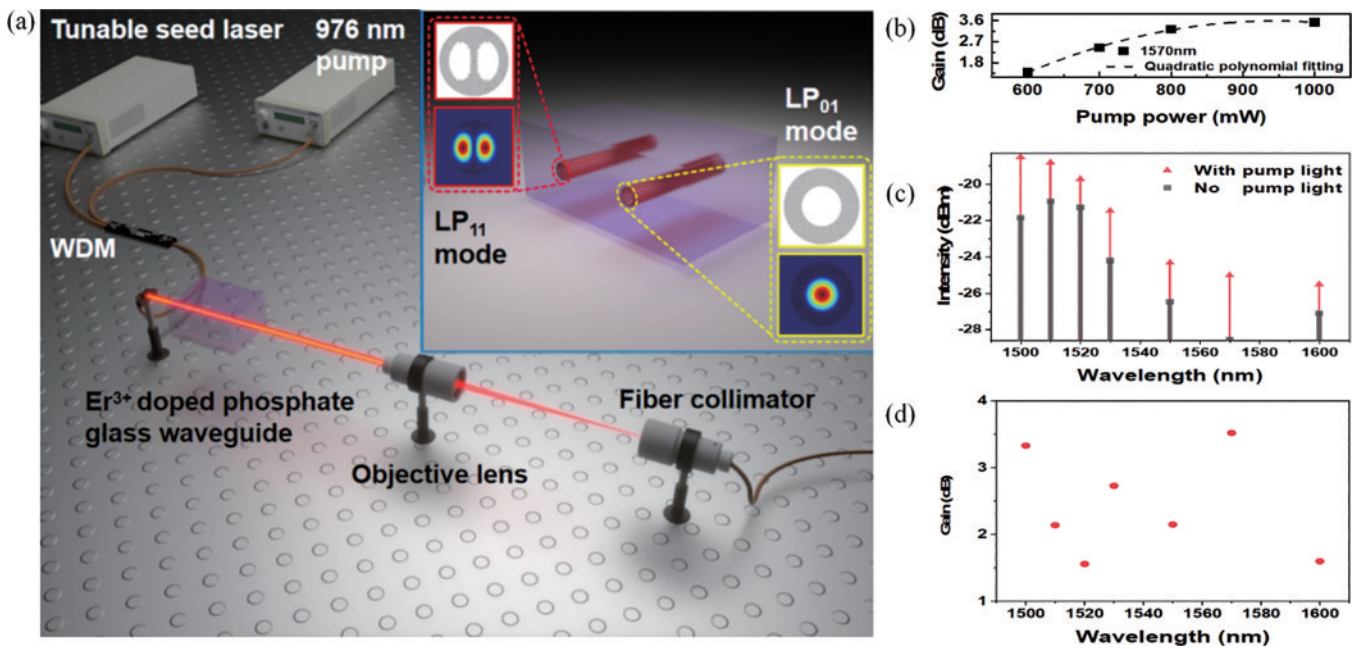


图 9 高阶模光波导放大器^[35]。(a)高阶模光波导放大器的光学测试系统。插图为 LP₀₁ 和 LP₁₁ 光波导结构和模拟相应的模场轮廓; (b)LP₁₁ 高阶模光波导的增益与泵浦功率的关系; (c)LP₁₁ 高阶模光波导中有无泵浦激光的峰值强度对比图; (d) LP₁₁ 高阶模光波导在 1500~1600 nm 窗口内的净增益谱

Fig. 9 High-order mode optical waveguide amplifier^[35]. (a) An optical measurement system for high-order mode optical waveguide amplifiers, insets are designed LP₀₁ and LP₁₁ optical waveguide structures and corresponding mode field simulations; (b) the relationship between the gain of LP₁₁ high-order mode optical waveguide and pump power; (c) the peak intensity plots of LP₁₁ high-order mode optical waveguide with or without pumped laser; (d) net gain spectrum of LP₁₁ high-order mode optical waveguide in a window of 1500–1600 nm

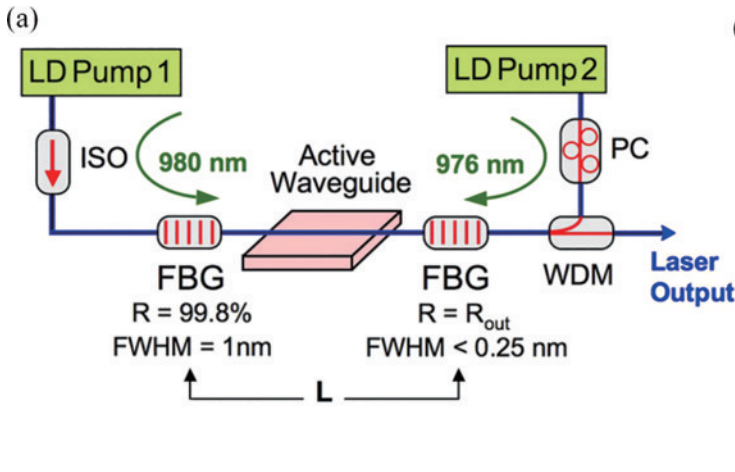
4 光波导激光器

光波导激光器是一种利用光波导结构实现激光输

出的器件,具有高效率、高功率、高稳定性和小尺寸等优点,在光通信、光存储、光传感、光医学和光计算等领域有着广泛的应用。在光通信领域,光波导激光器被

广泛应用于光纤通信、光纤传感和光子计算等方面。光波导激光器可以提供高品质的激光输出,使得光信号的传输距离更远、传输速率更快、传输容量更大。在光存储领域,光波导激光器可以用于光存储器件中,实现高速、高密度的数据存储和读取。在光医学领域,光波导激光器可以用于光疗和激光手术等方面^[73]。光波导激光器可以提供高功率、高稳定性和高质量的激光输出,使得光疗和激光手术具有更好的治疗效果和更少的副作用。在光计算领域,光波导激光器可以用于光量子计算和光量子通信等方面。光波导激光器可以提供高效率、高速度和高品质的激光输出,使得光量子计算和光量子通信具有更高的计算速度、更大的计算容量和更高的通信质量。

基于飞秒激光直写技术,可以实现多种类型的光波导激光器,一般来说可以将其根据波导类型进行大概的分类:Type-I型光波导激光器、Type-II型光波导激光器、脊型光波导激光器、光波导涡旋激光器等。



4.1 基于 Type-I 型的光波导激光器

Type-I型光波导激光器是一种特殊类型的光波导激光器,其工作原理是将泵浦光注入光波导材料中,通过电子与空穴的复合过程产生激光辐射。在较低的泵浦功率下,Type-I型光波导激光器可以实现激光输出,并且可以通过调节泵浦功率来实现激光波长的调谐。这些特性使得 Type-I型光波导激光器在光通信、光传感和光谱分析等领域具有广泛的应用潜力。

图 10(a)是 Er-Yb 掺杂磷酸盐玻璃光波导的激光输出测试系统示意图^[18],其中,波导在两侧对接耦合到在标准单模光纤中制造的光纤布拉格光栅(FBG)。带宽为 1 nm 的宽带平顶 FBG 在一侧提供了高反射率(99.8%),0.25 nm 带宽的 FBG 用作输出耦合器。在波导和光纤端部之间插入能够支持 980 nm 的高功率密度的折射率匹配流体。具有双向传播泵浦方案的两个光纤尾纤 InGaAs 激光二极管提供高达 510 mW 的入射泵浦功率(来自泵浦 1 的 980 nm 激光功率为 260 mW,来自泵浦 2 的 976 nm 激光功率为 250 mW)。

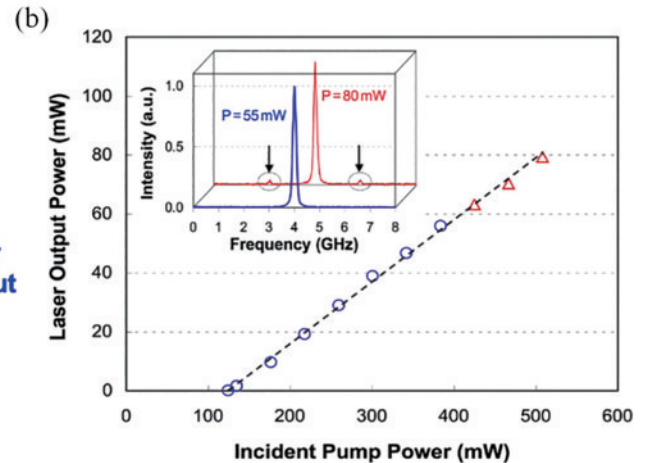


图 10 采用双向泵浦方案实现的波导激光器^[18]。(a)采用双向泵浦方案实现波导激光输出的测试系统;(b)波导激光器在 1534 nm 时的输入和输出特性曲线,插图为泵浦功率分别在 55 mW 和 80 mW 下的激光输出光谱图

Fig. 10 Waveguide laser output using a bidirectional pumping scheme^[18]. (a) A measurement system for achieving waveguide laser output using a bidirectional pumping scheme; (b) waveguide laser input and output characteristic curves at 1534 nm, inset shows laser output spectra at pump power of 55 mW and 80 mW, respectively

为了消除反向传播的泵浦光束之间的寄生相互作用,将一个单级光隔离器连接到泵浦 1 上,并沿着光纤连接泵浦 2 向波导上插入一个半波光纤极化控制器。通过旋转偏振控制器的轴将反向传播的抽运光束的偏振设置为正交,避免了对泵浦效率不利的干扰。输出功率由光谱分析仪测量。测量的泵浦功率阈值约为 110 mW,斜率效率为 8.4%,在 500 mW 入射泵浦功率下,最大输出功率超过 30 mW。在输出耦合效率为 15% 的情况下,得到的泵浦功率阈值为 90 mW,斜率效率为 6.6%,最大输出功率为 23 mW,图 11(b)展示了 1534 nm 输出功率的典型相对强度噪声(RIN)轨迹,通过连接到电频谱分析仪的快速光电二极管记录。RIN 的峰值约为 -105 dB/Hz,位于 200 kHz 处,与空

腔的弛豫振荡频率相对应。这也证明了飞秒激光写入技术能够以一种非常简单和廉价的方式提供一个能够并行产生 WDM 传输的所有信道的集成波导激光源。

4.2 基于 Type-II 型的光波导激光器

Type-II型光波导激光器与常规的类型-I型光波导激光器不同,Type-II型光波导激光器利用了光波导中的两个不同材料的能带结构来实现激光发射。它的工作原理如下:在光波导中引入两个具有不同的能带结构的材料,其中一个材料的导带和价带是不重叠的,而另一个材料的导带和价带是重叠的,当外加电场激励时,电子从重叠的导带跃迁到不重叠的价带,产生光子的发射,从而实现激光输出。Type-II型光波导激光器具有较高的量子效率和较低的阈值电流,能够实

现高效率的激光输出^[74]。其在光通信、光存储和光信息处理等领域具有广泛的应用。表 1 总结了基于飞秒

激光直写技术制备的不同波长、不同结构的波导激光器的报道结果。

表 1 基于不同激光腔、不同激光波长的 Type-II 型光波导激光器的已报道结果

Table 1 Summary of reported results for Type-II optical waveguide lasers emitting at different wavelengths based on various laser-cavity

Wavelength band	Gain media	Working wavelength / nm	Cavity configuration	Operation regime	Lasing threshold / mW	Maximum output power / mW	Slope efficiency / %	Reference		
Visible	Nd:YCOB	531	Cladding	CW		5	0.1	[75]		
		532	Dual line	CW		0.032		[76]		
	Pr: SrAl ₁₂ O ₁₉	634.5	Dual line	CW		190	28.1	8	[74]	
		Pr; Mg: SrAl ₁₂ O ₁₉	525.3	Dual line	CW		1088	36		[77]
			644				516	1065	37	[60]
		724.9				885	504	25	[78]	
	Pr: LiYF ₄	604	Rhombic cladding	CW		360	25	5.60	[79]	
		720				243	12	2.00	[80]	
	Ti: sapphire	700 to 870	Dual line	CW		84	143	23.50	[81]	
			Dual line	CWML (21.25 GHz)		1160.1	87.48		[82]	
NIR	Yb; Na: CaF ₂	1013.9 and 1027.9	Cladding	CW and Q-switched		152.2	26.6	10	[83]	
		Yb: YAG	1030	S-curved dual line	CW		141	1 W	79	[84]
			Y-branch dual line	CW		271	2.29 W	52	[85]	
			Dual line	Q-switched		102	5.6 W	74	[86]	
			Dual line	QML (2 GHz)		1800	322	11.30	[87]	
			Double cladding	CW		401.7	45.8	38	[88]	
	Yb: KLuW	1040	Surface cladding	Q-switched		491	680	61	[89]	
			Annular ring shaped	CW		191	84	20	[90]	
	Nd: YAG	1064	Ear-like cladding	CW and Q-switched		10	327	34.40	[91]	
			Cladding	Q-switched		287	102.3	11.90	[92]	
				QML (8.8 GHz)		74	127	26	[93]	
				CWML (9.8 GHz)			530		[92]	
				Y-branch cladding	CW		231	172	22.40	[94]
			1×2 splitters	CW		90	333	34	[95]	
			1×4 splitters	CW		90	217	22	[96]	
			Ring shaped	CW and Q-switched		148	224	22	[16]	
		Nd: YVO ₄	1064	Cladding	CW		10.3 W	3.4 W	36	[97]
Q-switched						57.4	275	37	[98]	
QML (6.5 GHz) CWML (6.5 GHz)					65	424	56	[99]		
		CWML (6.5 GHz)		19.3	259	30.60	[100]			

续表

Wavelength band	Gain media	Working wavelength / nm	Cavity configuration	Operation regime	Lasing threshold / mW	Maximum output power / mW	Slope efficiency / %	Reference
			Double cladding	Q-switched	59	397	46	[101]
			Optical-lattice like	Q-switched		85	20	[102]
	Nd:YAP	1064 and 1079	Cladding	CW	243	199.8	33.40	[103]
			S-curved cladding	QML (7.9 GHz)	196	77	14.10	[104]
			S-curved optical-lattice like		228	57	10.69	[105]
		1072 and 1079	Optical-lattice like	CW	384.5	101.3	30.90	[106]
	Nd:GdVO ₄	1063.6	Dual line	CW	52	256	70	[107]
		1064.5	Cladding	CW and Q-switched	178	570	68	[22]
	Nd:GGG	1061	Dual line	CW	29	11	25	[104]
		1063	Cladding	CW	270	209	44.40	[108]
	Nd:YSAG	1062	Optical-lattice like	Q-switched	58.5	133.8	28.30	[109]
	Nd:LuVO ₄	1066.4	Dual line	CW	98	30	14	[105]
	Nd:KGW	1065	Dual line	CW	141	33	52.30	[106]
		1067	Cladding	CW	120	198.5	39.40	[107]
MIR	Tm:KLu(WO ₄) ₂	1847.4	Surface cladding	CW	52	171.1	37.80	[110]
		1846.8		Q-switched	500	150	34.60	
		1849.6	Cladding	CW	45	247	48.70	[111]
		1844.8		Q-switched		24.9	9.30	
		1847	Optical-lattice like	CW	21	46	9.90	[112]
		1841 to 1848	Y-branch cladding	CW	280	460	40.60	[113]
	Tm:YLF	1877	Cladding	Q-switched		421.6	19	[22]
	Tm:YAG	1943.5	Cladding	QML (7.8 GHz)	665	6.5	2	[114]
	Ho:KGd(WO ₄) ₂	2055	Cladding	CW	180	212	67.30	[115]
	Tm:MgWO ₄	2080	Surface cladding	CW	120	132	38.90	[116]
	Ho:YAG	2091	Cladding	QML (5.9 GHz)		170	6.80	[17]
		2096		CW	100	1775	16%	[117]
	Cr:ZnS	2333	Cladding	CW	450	101	20	[118]
	Cr:ZnSe	2522	Cladding	CW		5200	41	[119]
	Fe:ZnSe	4070	Cladding	CW		995	58	

山东大学陈峰教授团队^[2]针对 Type-II 型光波导激光器进行了详细的研究,如图 11 所示,近红外光谱范围是最常见的激光发射波段,它是将 Type-II 型有源波导通过飞秒激光直写技术在 Nd³⁺ 和 Yb³⁺ 掺杂晶体中获得的。除了普通的 FP 激光腔之外,由于波导激光器的光学增益增强,还可以实现用于弯曲和分支腔几

何形状中的激光振荡的有效光学反馈。在飞秒激光写入的 3D 结构中,已经提出了具有不同功能的 1 μm 紧凑波导激光器,如 S 曲线、Y 分支、1×2 和 1×4 分束、环形光束变换和光学晶格状激光,如图 11(a)~(e) 所示。这些报道中的激光性能可与直波导相媲美,这表明使用飞秒激光直写原型的激光光源更加简便快捷。

通过进一步集成合适的吸收器,实现了被动 Q 开关激光技术。例如,使用一个高增益的 Yb:YAG 信道波导,一个高效的 Q 开关激光器在没有任何反射镜的单通光泵浦中,平均功率高达 5.6 W,且有 74% 的激光输出斜率效率。同时,在千兆赫状态下运行的锁模波导激光器也有相关报道。例如,6.5 GHz 调 Q 开关锁

模 (QML) 激光器已经在飞秒激光直写的 Nd:YVO₄ 包层波导中获得演示。他们最近的实验样品是 Nd:YAP 晶体,在 31.6 GHz QML 激光器 S 弯曲波导中进行展示,如图 11(f) 所示。特别是,单波长和双波长 (1064、1079 nm) 的激光都可以通过调整泵浦偏振来实现,如图 13(g)、(h) 所示。

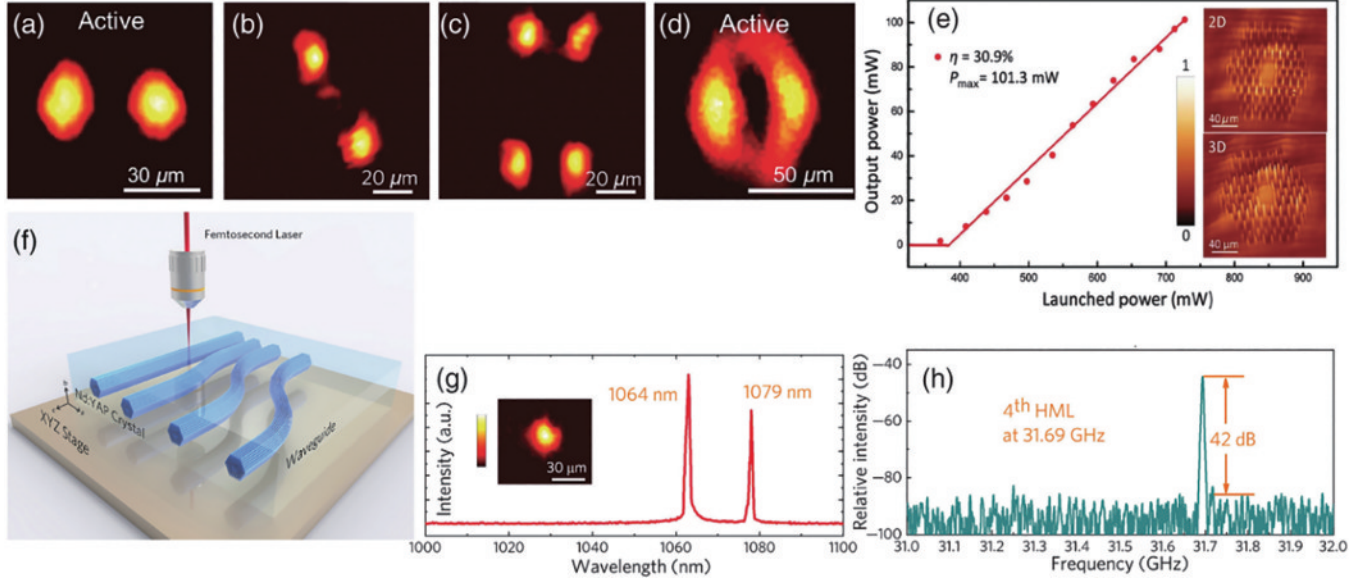


图 11 基于 Type-II 型的光波导激光器^[2]。(a)~(e) 基于 Type-II 型的光波导在 1 μm 处的激光模式分布,包括:(a)(b) y 型;(c) 1×4 型;(d) 环型;(e) 类光子晶格;(f) Type-II 型 S 弯曲光波导的激光直写示意图;(g) 1064 nm 和 1079 nm 的双波长激光光谱;(h) 输出激光在 31.69 GHz 的频谱图

Fig. 11 Lasers based on Type-II optical waveguide^[2]. (a)–(e) Lasing mode distribution at 1 μm based on Type-II optical waveguide, including: (a) (b) y-type; (c) 1×4 type; (d) circular shape; (e) photonic lattice; (f) laser direct-writing schematic diagram of Type-II S curved optical waveguide; (g) dual wavelength lasing spectra at 1064 and 1079 nm; (h) frequency spectrum of the output laser at 31.69 GHz

4.3 基于脊型光波导激光器

通常情况下,脊型光波导激光器是一种常见的半导体激光器结构,其中,激光波导的形状呈现脊状。脊型光波导激光器通常由一层半导体材料(如 GaAs、InP 等)构成,其中,激光波导被定义在材料表面上,而脊状结构则通过在波导区域周围形成高折射率的材料层来实现。近年来,华东师范大学程亚教授团队^[71]使用的超快激光光刻辅助化学机械刻蚀技术可以在稀土离子掺杂的铌酸锂薄膜上制备高品质微腔波导,从而实现各类高性能片上微腔波导激光器。这样有很多优点:狭窄的激光光束、高功率输出、较低的阈值电流、较低损耗。图 12(a) 为程亚教授团队^[3]通过 PLACE 技术制备的典型紧凑型混合铌酸锂微环波导激光器的示意图,由商用 CoS 封装的半导体激光器和高 Q 值 Er³⁺:FLN 微环波导组成。半导体激光器泵浦的铌酸锂微环波导激光器中的 Er³⁺:TFLN 微环的周长约为 1.256 mm,如图 12(b) 所示。图 12(c) 表示的是 Er³⁺:TFLN 微环的输入端口与 CoS 封装的半导体激光管的输出端口对齐,通过调节精度为 10 nm 的 6 轴对准系统实现高效的光耦合。为了实现稳定和紧密的键合,在点胶机涂上紫外线胶水,通

过紫外线照射来固定两个芯片。图 12(d) 为不同泵浦功率下微环波导激光器的激光谱线。片上激光功率与片上泵浦功率的关系如图 12(e) 所示,线性拟合后得到激光阈值约为 6 mW,转换效率为 0.0039%。图 12(f) 是片上激光功率与电驱动功率的关系图,驱动电功率阈值为 0.82 W,斜率效率为 0.25%。

近年来,程亚教授团队^[33]一直对脊型波导激光器有着深入的研究。2017 年,他们展示了一种具有 Er³⁺ 掺杂高质量的铌酸锂微盘谐振器,对于 976 nm 连续波泵浦激光器,在室温下低于 400 μW 的泵浦功率阈值下可以观察到激光输出。在低于 13 mW 的低泵浦功率下显示出约 17.03 pm/mW 的调谐效率,在高于 13 mW 时显示出 10.58 pm/mW 的调谐效率,激光输出斜率效率高达 0.15%。2019 年,他们报道了一种单片集成高 Q 值铌酸锂微盘^[69],调谐效率为 38 pm/100 V, Q 值达到 7.1×10⁶。2021 年,他们展示了一种 Yb³⁺ 掺杂的铌酸锂微盘激光器^[120],Q 值为 1.1×10⁶,在 984 nm 激光泵浦下在 1020~1070 nm 波段获得了多模态激光发射,阈值低至 10³ μW,室温下斜率效率为 0.53%。2022 年,他们又报道了一种窄带宽微盘激光

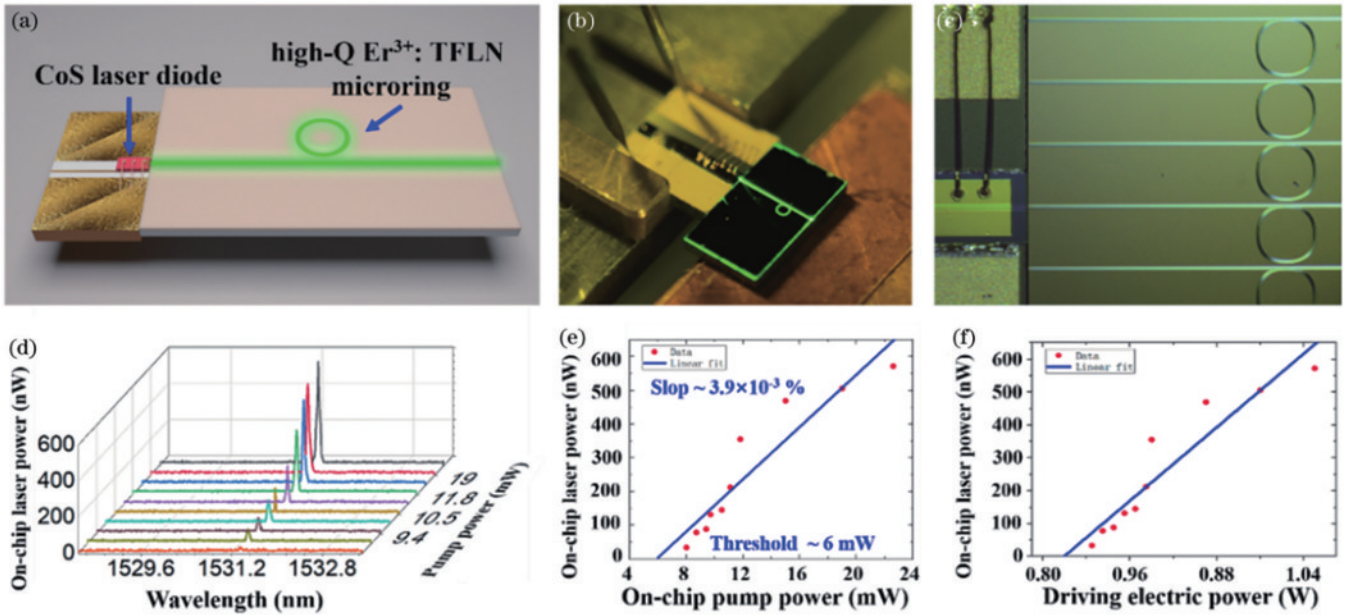


图 12 激光二极管泵浦的紧凑型混合铌酸锂微环波导激光器^[3]。(a)集成微环波导激光器结构示意图,由 CoS 封装的半导体激光器和高 Q 值 Er^{3+} : TFLN 微环激光器组成;(b)紧凑型混合铌酸锂微环波导激光器的光学照片;(c)CoS 封装的半导体激光器和 Er^{3+} : TFLN 微环之间界面的光学显微照片;(d)微环波导激光器激光光谱;(e)微环波导激光器的激光输出功率与泵浦功率的关系曲线;(f)微环波导激光器的激光输出功率与驱动电功率的关系曲线

Fig. 12 A compact hybrid lithium niobate micro-ring waveguide laser pumped by a laser diode^[3]. (a) Schematic diagram of the integrated micro-ring waveguide laser structure, consisting of a CoS packaged semiconductor laser and a high-Q-value Er^{3+} : TFLN micro-ring laser; (b) optical image of a compact hybrid lithium niobate micro-ring laser; (c) optical micrographs of the interface between the semiconductor laser packaged with CoS and the Er^{3+} : TFLN microring waveguide; (d) lasing spectra of the micro-ring waveguide laser; (e) the relationship curve between the laser output power and pump power of a micro ring waveguide laser; (f) the relationship curve between laser output power and driving electrical power of micro ring waveguide laser

器^[121],线宽低至 0.11 MHz,在室温下实现了高达 $62.1 \mu\text{W}$ 的激光输出功率。2023 年,他们制备了一种高 Q 活性铌酸锂微盘^[3],实现了窄带宽双波长微激光输出,调谐效率为 -1.66 MHzV^{-1} ,Q 值达到 10^7 ,激光斜率效率为 0.18%。最近,他们还报道了一种 Yb 掺杂的薄膜铌酸锂片上微环波导激光器^[71],且观察到由 980 nm 半导体激光管泵浦的微环谐振器约 1025 nm 的多波长激光发射,激光阈值为 10 mW。通过实验,从制造的 Yb: TFLN 微环激光器获得了多达 14 种纵向模式。另外,他们还制备了基于 Sagnac 环形反射器的单模波导激光器,实现了在 1550 nm 波长左右的单纵模和单横模激光发射,激光阈值约为 6 mW,斜率效率为 0.18%,当泵浦功率为 19.2 mW 时,实现了两个输出端口总功率 $44.7 \mu\text{W}$ 的最大激光输出。

4.4 光波导涡旋激光器

光波导涡旋激光器是一种利用光波导结构产生和操控涡旋光束的激光器^[7]。涡旋光束是一种具有自旋角动量的光束,其光场呈现出螺旋形的相位结构。光波导涡旋激光器通过在光波导中引入特殊的相位调制结构,从而产生并控制涡旋光束。

光波导涡旋激光器的工作原理是通过在光波导中引入相位调制结构,使得光波导中的光场呈现出螺旋形的相位结构。这种相位结构可以通过光波导中的非

线性效应进行放大,从而实现涡旋光束的产生和放大。光波导涡旋激光器在光通信、光存储和光信息处理等领域具有广泛的应用。它可以用于实现高容量的光通信系统,提供更多的自旋角动量维度,增加信息传输的容量。此外,光波导涡旋激光器还可以用于光存储和光信息处理等应用,实现更复杂的光场控制和处理功能。科研人员已经在半导体材料中实现了涡旋激光输出^[67,69]。近期,通过飞秒激光直写技术制备光波导涡旋激光器引起了人们的高度关注。

2022 年,山东大学陈峰教授团队^[7]通过飞秒激光直写技术在 Nd:YVO₄ 晶体中制备了一种混合波导-光栅涡旋激光发射器。图 13(a)展示了测试涡旋激光性能的光泵浦系统。使用一个可调谐的 Ti:sapphire 激光器作为泵浦源。在实验中,泵浦激光器的偏振通过半波片沿 TM 偏振。采用平凸透镜 L1($f=25 \text{ mm}$)将泵浦激光器耦合到波导中。泵镜(M1)和激光镜(M2)对接在 Nd:YVO₄ 晶体的两个面上,形成一个紧凑的法布里-珀罗腔提供所需的光学反馈,并耦合到波导的泵浦激光器中在 1064 nm 激发高斯基模激光。图 13(b)~(g)展现了环形结构涡旋激光输出强度分布,表明叉形光栅的衍射性能优异。此外,零阶衍射显示了一个对激光振荡和涡旋激光衍射至关重要的高斯模式。在衍射光束中出现的同心圆条纹是由波导输出端面的衍射

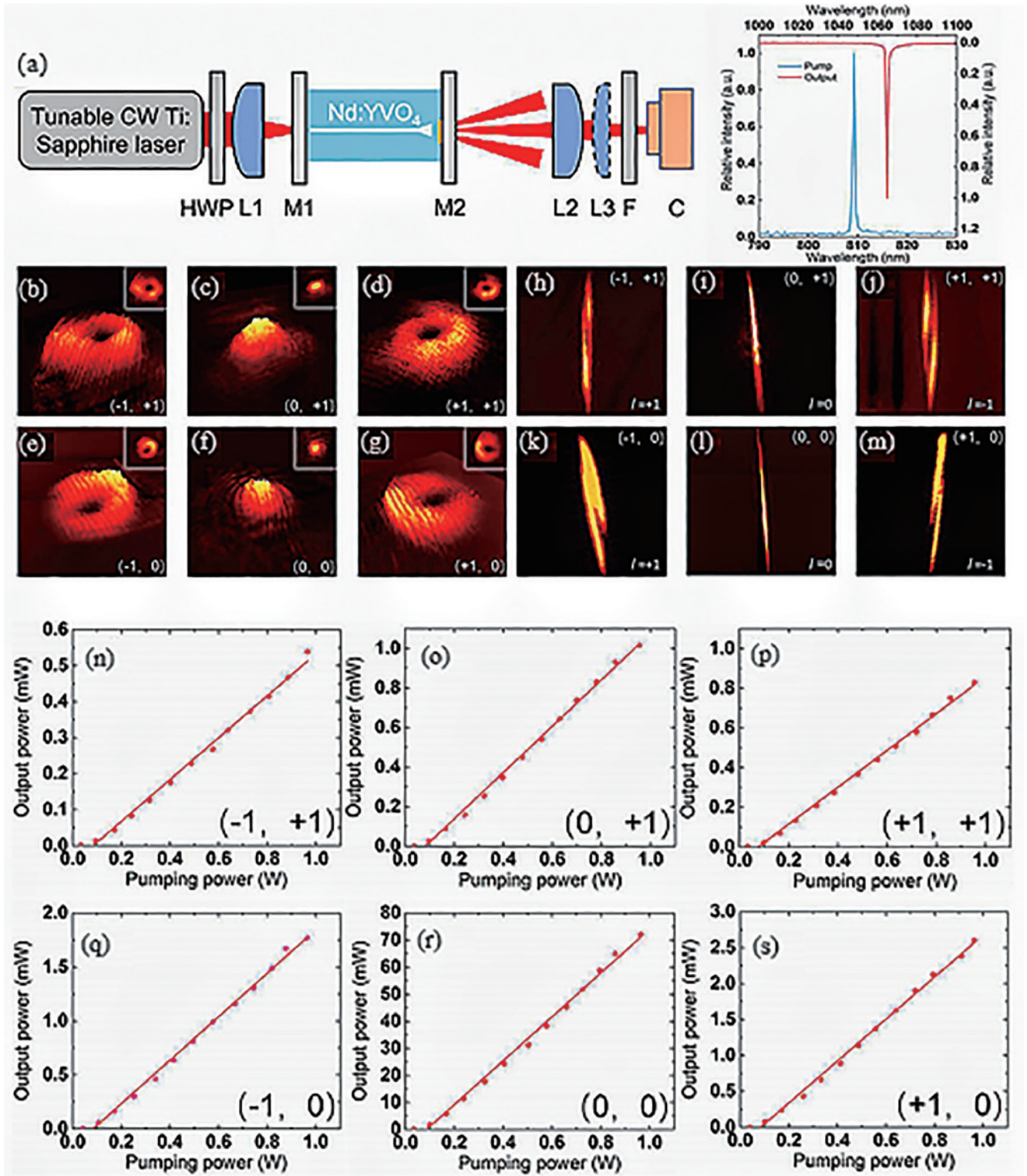


图 13 可变截面光波导涡旋激光器^[7]。(a) 可变截面光波导涡旋激光器的产生和测量的实验装置示意图, 插图是泵浦激光和输出涡旋激光的光谱; (b)~(g) 远场输出激光的模式强度分布, 插图是相应的二维强度分布, 括号内的数字表示衍射的阶数; (h)~(m) 在圆柱形透镜的焦点处获得的输出激光模式强度分布, l 表示拓扑荷数; (n)~(s) 可变截面光波导涡旋激光输出功率与泵浦功率的关系曲线

Fig. 13 A variable cross-section optical waveguide vortex laser^[7]. (a) Schematic diagram of the experimental setup for generation and measurement of a variable cross-section optical waveguide vortex laser, inset shows the pump laser and the output vortex laser spectra; (b)~(g) mode intensity distribution of far-field output laser, inset shows the corresponding two-dimensional intensity distribution, the numbers in parentheses represent the order of diffraction; (h)~(m) the mode intensity distribution of the output laser obtained at the focal point of the cylindrical lens, l represents topological charge; (n)~(s) relationship curve between output power and pump power of vortex laser with variable cross-section optical waveguide

引起的。采用圆柱透镜聚焦($f=50\text{ mm}$)方法测量涡旋光束的拓扑荷数,结果如图 13(h)~(m)所示。图 13(n)~(s)展示的是泵浦激光输入功率与不同阶数涡旋激光输出功率的关系曲线,进一步研究了涡旋光束的激光输出特性。计算结果表明,平均激光输出阈值为 83 mW ,理论斜率效率为 2.61% 。该波导具有出色的单模导引性能。叉形光栅具有较高的加工精度,优异的涡旋衍射性能。

5 结论与展望

光波导放大器和激光器能够飞速发展,很大一部分得益于飞秒激光直写技术的出现和完善。近几年来,人们对高质量多类型的波导放大器和激光器有了更多的需求,通过飞秒激光直写光波导放大器,激光器已经逐渐成为研究的重中之重。而通过传统的 UV 光刻、电子束光刻和离子束刻蚀等方法制备光波导放大器和激光器有着诸多缺点,已经很难再满足人们的需要。通过飞秒激光直写技术,可以更加便捷、更加高效地在多种材料中制备高性能光波导放大器和激光器,这是传统方法无法做到的。

本文简单介绍了飞秒激光直写光波导放大器和激光器的研究现状以及近来通过飞秒激光制备光波导放大器和激光器的光波导类型和直写技术,主要总结了飞秒激光直写制备的不同类型光波导放大器和激光器的研究进展。

尽管通过飞秒激光直写技术制备的光波导放大器和激光器近年来取得了显著的进展,但是依然存在很多问题。激光直写的光波导损耗依旧比较大,性能方面与传统的光纤器件相比存在数量级的差距,制备的光波导放大器净增益大部分都低于 20 dB ,而光波导激光器的激光输出功率较低,激励斜率效率普遍低于 1% 。因此,将飞秒激光直写的光波导放大器和激光器应用于高效、稳定的集成光子芯片跟实际应用需求还存在一定的差距,需要材料、激光直写、光波导器件研发等各个领域的不懈努力和突破。

我们相信,飞秒激光直写光波导放大器和激光器在多个领域都会有广阔的应用前景,如生物医学应用方面的光学传感和激光治疗、集成光子芯片方面的高灵敏度、高精度的微型器件,以及光通信、光学传感与检测等领域。未来基于飞秒激光直写技术,结合波导结构设计的优化与材料的进一步发展,有望在大幅提升所制备器件性能的同时有效控制器件成本。这将为光波导放大器和激光器的大规模制造且在多领域广泛应用奠定坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] Huang Q D, Chiang K S. Polarization-insensitive ultra-broadband mode filter based on a 3D graphene structure buried in an optical waveguide[J]. *Optica*, 2020, 7(7): 744-745.
- [2] Li L Q, Kong W J, Chen F. Femtosecond laser-inscribed optical waveguides in dielectric crystals: a concise review and recent advances[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(2): 024002.
- [3] 汪旻, 乔玲玲, 方致伟, 等. 基于超快激光光刻的有源铌酸锂光子集成[J]. *光学学报*, 2023, 43(16): 1623014. Wang M, Qiao L L, Fang Z W, et al. Active lithium niobate photonic integration based on ultrafast laser lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(16): 1623014.
- [4] Kong Y F, Bo F, Wang W W, et al. Recent progress in lithium niobate: optical damage, defect simulation, and on-chip devices[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(3): 1806452.
- [5] Long X W, Bai J. Laser action from a femtosecond laser written Yb: phosphate glass waveguide[J]. *Optik*, 2022, 249: 168308.
- [6] Xu M Y, He M B, Zhang H G, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3911.
- [7] Zhuang Y, Wang S X, Chen Z X, et al. Tailored vortex lasing based on hybrid waveguide-grating architecture in solid-state crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(21): 211101.
- [8] Rönj J, Zhang W W, Autere A, et al. Ultra-high on-chip optical gain in erbium-based hybrid slot waveguides[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 432.
- [9] 王磊, 张栩, 王熠, 等. 飞秒激光永久光存储的发展及挑战[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002504. Wang L, Zhang X, Wang Y, et al. Femtosecond laser direct writing for eternal data storage: advances and challenges[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002504.
- [10] Li M, Li C, Li Y. Glass-based integrated quantum photonic chips: from 2D to 3D[J]. *Physics*, 2023, 52(8): 542-551.
- [11] Veenhuizen K, McAnany S, Vasudevan R, et al. Ferroelectric domain engineering of lithium niobate single crystal confined in glass[J]. *MRS Communications*, 2019, 9(1): 334-339.
- [12] Li K F, Zhang G, Wang X, et al. Tm^{3+} and Tm^{3+} - Ho^{3+} co-doped tungsten tellurite glass single mode fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10115-10121.
- [13] Chen D Y, Xu B B, Fang Z J, et al. Broadband optical amplification of PbS quantum-dot-doped glass fibers[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(9): 2200097.
- [14] 赵小枫, 张晓霞. 1060 nm 掺钕磷酸盐波导放大器的特性研究[J]. *红外*, 2007, 28(11): 33-37. Zhao X F, Zhang X X. Research on characteristics of neodymium-doped phosphate waveguide amplifier[J]. *Infrared*, 2007, 28(11): 33-37.
- [15] Chan J W, Huser T R, Risbud S H, et al. Waveguide fabrication in phosphate glasses using femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(15): 2371-2373.

- [16] Li Z Q, Zhang Y X, Cheng C, et al. 6.5 GHz Q-switched mode-locked waveguide lasers based on two-dimensional materials as saturable absorbers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11321-11330.
- [17] Thorburn F, Lancaster A, McDaniel S, et al. 5.9 GHz graphene based Q-switched modelocked mid-infrared monolithic waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 26166-26174.
- [18] Osellame R, Della Valle G, Chiodo N, et al. Lasing in femtosecond laser written optical waveguides[J]. *Applied Physics A*, 2008, 93(1): 17-26.
- [19] Burghoff J, Nolte S, Tünnermann A. Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured LiNbO₃[J]. *Applied Physics A*, 2007, 89(1): 127-132.
- [20] Chen F, de Aldana J R V. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): 251-275.
- [21] Zhang B, Wang L, Chen F. Recent advances in femtosecond laser processing of LiNbO₃ crystals for photonic applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(8): 1900407.
- [22] Xiong Y J, Wang S X, Chen Z X, et al. Femtosecond laser direct writing of compact Tm: YLF waveguide lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109786.
- [23] Wu B, Zhang B, Wang L, et al. 3D polarization-dependent waveguide arrays in LiNbO₃ crystal produced by femtosecond laser writing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 3988-3993.
- [24] He R Y, An Q, Vázquez de Aldana J R, et al. Femtosecond-laser micromachined optical waveguides in Bi₄Ge₃O₁₂ crystals[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(16): 3713-3718.
- [25] Ren Y Y, Cui Z M, Sun L F, et al. Laser emission from low-loss cladding waveguides in Pr: YLF by femtosecond laser helical inscription[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(12): 122201.
- [26] Li R N, Sun L F, Cai Y J, et al. Near-infrared lasing and tunable upconversion from femtosecond laser inscribed Nd, Gd: CaF₂ waveguides[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(8): 081301.
- [27] Guan J L, Li C T, Gao R H, et al. Monolithically integrated narrow-bandwidth disk laser on thin-film lithium niobate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109908.
- [28] Liang Y T, Zhou J X, Liu Z X, et al. A high-gain cladded waveguide amplifier on erbium doped thin-film lithium niobate fabricated using photolithography assisted chemo-mechanical etching[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 1033-1040.
- [29] Bao R, Song L B, Fang Z W, et al. On-chip coherent beam combination of waveguide amplifiers on Er³⁺-doped thin film lithium niobate[EB/OL]. (2023-08-17)[2023-09-04]. <https://arxiv.org/abs/2308.08740>.
- [30] Lin J T, Farajollahi S, Fang Z W, et al. Electro-optic tuning of a single-frequency ultranarrow linewidth microdisk laser[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 036001.
- [31] 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[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(8): 2100030.
- [32] Yin D F, Yu S P, Fang Z W, et al. On-chip electro-optically tunable Fabry-Perot cavity laser on erbium doped thin film lithium niobate[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(9): 2644-2650.
- [33] 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 Optomechanics*, 2017, 11(1): 47-54.
- [34] 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.
- [35] Sun X Y, Wang Y Y, Zhong L J, et al. High-order mode waveguide amplifier with high mode extinction ratio written in an Er³⁺-doped phosphate glass[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 5812-5819.
- [36] 苏柏缙, 钟立熙, 许鸥, 等. 多芯光纤光栅写入技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(3): 0300004. Su B J, Zhong L X, Xu O, et al. Multicore fibre gratings inscription technology research developments[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(3): 0300004.
- [37] 刘云启, 姜晨, 刘祖耀, 等. 长周期光纤光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0900001. Liu Y Q, Jiang C, Liu Z Y, et al. Long-period fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0900001.
- [38] Will M, Nolte S, Chichkov B N, et al. Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(21): 4360-4364.
- [39] Cerullo G, Osellame R, Taccheo S, et al. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1938-1940.
- [40] Bhardwaj V R, Simova E, Corkum P B, et al. Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(8): 083102.
- [41] Gebremichael W, Dorrer C, Qiao J. Guiding and lasing comparison of Nd: YAG waveguide lasers fabricated by femtosecond laser inscription at 515 and 1030 nm[J]. *Journal of Laser Applications*, 2023, 35(3): 032014.
- [42] Thomson R R, Bookey H T, Psaila N D, et al. Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications[J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11691-11697.
- [43] Kowalevicz A M, Sharma V, Ippen E P, et al. Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(9): 1060-1062.
- [44] 陈智, 钟理京, 陈梦佳, 等. 飞秒激光在柔性 PDMS 中

- 直写光波导器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(13): 1316016.
- Chen Z, Zhong L J, Chen M J, et al. Development of femtosecond laser direct-writing optical waveguide devices in flexible PDMS[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(13): 1316016.
- [45] Ramsay E, Thomson R R, Psaila N D, et al. Laser action from an ultrafast laser inscribed Nd-doped silicate glass waveguide[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 742-744.
- [46] Pätzold W M, Demircan A, Morgner U. Low-loss curved waveguides in polymers written with a femtosecond laser[J]. Optics Express, 2017, 25(1): 263-270.
- [47] Pätzold W M, Reinhardt C, Demircan A, et al. Cascaded-focus laser writing of low-loss waveguides in polymers[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1269-1272.
- [48] Thomson R R, Campbell S, Blewett I J, et al. Optical waveguide fabrication in z-cut lithium niobate (LiNbO₃) using femtosecond pulses in the low repetition rate regime [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(11): 111109.
- [49] Gui L, Xu B X, Chong T C. Microstructure in lithium niobate by use of focused femtosecond laser pulses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(5): 1337-1339.
- [50] Bookey H T, Thomson R R, Psaila N D, et al. Femtosecond laser inscription of low insertion loss waveguides in Z-cut lithium niobate[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(12): 892-894.[LinkOut]
- [51] MacDonald J R, Thomson R R, Beecher S J, et al. Ultrafast laser inscription of near-infrared waveguides in polycrystalline ZnSe[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 4036-4038.
- [52] Rodenas A, Kar A K. High-contrast step-index waveguides in borate nonlinear laser crystals by 3D laser writing[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17820-17833.
- [53] Brüske D, Sunstov S, Rüter C E, et al. Efficient ridge waveguide amplifiers and lasers in Er-doped lithium niobate by optical grade dicing and three-side Er and Ti in-diffusion[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29374-29379.
- [54] Heinrich M, Rademaker K, Nolte S. Waveguides in crystalline materials[M]//Osellame R, Cerullo G, Ramponi R. Femtosecond laser micromachining. Topics in applied physics. Heidelberg: Springer, 2012, 123: 295-313.
- [55] Chen F, de Aldana J R V. Direct femtosecond laser writing of optical waveguides in dielectrics[M]//Hu A M. Laser micro-nano-manufacturing and 3D microprinting. Springer series in materials science. Cham: Springer, 2020, 309: 185-210.
- [56] Ródenas A, Torchia G A, Lifante G, et al. Refractive index change mechanisms in femtosecond laser written ceramic Nd: YAG waveguides: micro-spectroscopy experiments and beam propagation calculations[J]. Applied Physics B, 2009, 95(1): 85-96.
- [57] Li S L, Ye Y K, Shen C Y, et al. Femtosecond laser inscribed cladding waveguide structures in LiNbO₃ crystal for beam splitters[J]. Optical Engineering, 2018, 57(11): 117103.
- [58] Beecher S J, Thomson R R, Reid D T, et al. Strain field manipulation in ultrafast laser inscribed BiB₃O₆ optical waveguides for nonlinear applications[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4548-4550.
- [59] Jia Y C, de Aldana J R V, Romero C, et al. Femtosecond-laser-inscribed BiB₃O₆ nonlinear cladding waveguide for second-harmonic generation[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(7): 072701.
- [60] Müller S, Calmano T, Metz P, et al. Femtosecond-laser-written diode-pumped Pr: LiYF₄ waveguide laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5223-5225.
- [61] Lin J T, Xu Y X, Fang Z W, et al. Fabrication of high-Q lithium niobate microresonators using femtosecond laser micromachining[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8072.
- [62] Li M H, Gao R H, Li C T, et al. Erbium-ytterbium co-doped lithium niobate single-mode microdisk laser with an ultralow threshold of 1 uW[EB/OL]. (2023-09-19) [2023-09-23]. <https://arxiv.org/abs/2309.10512>.
- [63] Liu C X, Shen X L, Guo H T, et al. Proton-implanted optical waveguides fabricated in Er³⁺-doped phosphate glasses[J]. Optik, 2017, 131: 132-137.
- [64] Wang Y Y, Zhong L J, Chen Z, et al. Photonic lattice-like waveguides in glass directly written by femtosecond laser for on-chip mode conversion[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(3): 031406.
- [65] Yang Y, Zhong L J, Cui Y D, et al. Low-loss skimming waveguides with controllable mode leakage for on-chip saturable absorbers[J]. Nanophotonics, 2023, 12(15): 3069-3076.
- [66] Shao L B, Maity S, Zheng L, et al. Phononic band structure engineering for high-Q gigahertz surface acoustic wave resonators on lithium niobate[J]. Physical Review Applied, 2019, 12: 014022.
- [67] Pertsch T, Peschel U, Lederer F, et al. Discrete diffraction in two-dimensional arrays of coupled waveguides in silica[J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 468-470.
- [68] Borca C N, Apostolopoulos V, Gardillou F, et al. Buried channel waveguides in Yb-doped KY (WO₄)₂ crystals fabricated by femtosecond laser irradiation[J]. Applied Surface Science, 2007, 253: 8300-8303.
- [69] Wu R B, Zhang J H, Yao N, et al. Lithium niobate micro-disk resonators of quality factors above 10⁷[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4116-4119.
- [70] Guan J L, Li C T, Gao R H, et al. Monolithically integrated high-power narrow-bandwidth microdisk laser [EB/OL]. (2022-12-21) [2023-03-02]. <https://arxiv.org/abs/2212.10892>.
- [71] Gao R H, Fu B T, Yao N, et al. Electro-optically tunable low phase-noise microwave synthesizer in an active lithium niobate microdisk[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(5): 2200903.
- [72] Mondal K, Chaudhuri P R. Designing high performance

- Er⁺³-doped fiber amplifier in triangular-lattice photonic crystal fiber host towards higher gain, low splice loss[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(8): 1436-1441.
- [73] Wang Z, Fang Z W, Liu Z X, et al. On-chip tunable microdisk laser fabricated on Er³⁺-doped lithium niobate on insulator[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 380-383.
- [74] Calmano T, Siebenmorgen J, Reichert F, et al. Crystalline Pr: SrAl₁₂O₁₉ waveguide laser in the visible spectral region[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4620-4622.
- [75] Ren Y Y, Chen F, Vázquez de Aldana J R. Near-infrared lasers and self-frequency-doubling in Nd: YCOB cladding waveguides[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11562-11567.
- [76] Dong N N, Martínez de Mendivil J, Cantelar E, et al. Self-frequency-doubling of ultrafast laser inscribed neodymium doped yttrium aluminum borate waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(18): 181103.
- [77] Reichert F, Calmano T, Müller S, et al. Efficient visible laser operation of Pr, Mg: SrAl₁₂O₁₉ channel waveguides [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2698-2701.
- [78] Grivas C, Corbari C, Brambilla G, et al. Tunable, continuous-wave Ti: sapphire channel waveguide lasers written by femtosecond and picosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4630-4632.
- [79] Grivas C, Ismael R, Corbari C, et al. Generation of multi-gigahertz trains of phase-coherent femtosecond laser pulses in Ti: sapphire waveguides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(11): 1800167.
- [80] Ren Y Y, Cheng C, Jia Y C, et al. Switchable single-dual-wavelength Yb, Na: CaF₂ waveguide lasers operating in continuous-wave and pulsed regimes[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(6): 1633-1641.
- [81] Calmano T, Paschke A G, Müller S, et al. Curved Yb: YAG waveguide lasers, fabricated by femtosecond laser inscription[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25501-25508.
- [82] Calmano T, Kränkel C, Huber G. Laser oscillation in Yb: YAG waveguide beam-splitters with variable splitting ratio[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1753-1756.
- [83] Hakobyan S, Wittwer V J, Hasse K, et al. Highly efficient Q-switched Yb: YAG channel waveguide laser with 5.6 W of average output power[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4715-4718.
- [84] Choi S Y, Calmano T, Rotermund F, et al. 2-GHz carbon nanotube mode-locked Yb: YAG channel waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5140-5145.
- [85] Liu H L, Chen F, Vázquez de Aldana J R, et al. Femtosecond-laser inscribed double-cladding waveguides in Nd: YAG crystal: a promising prototype for integrated lasers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3294-3297.
- [86] Bae J E, Park T G, Kifle E, et al. Carbon nanotube Q-switched Yb: KLuW surface channel waveguide lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 216-219.
- [87] Wu P F, He S, Liu H L. Annular waveguide lasers at 1064 nm in Nd: YAG crystal produced by femtosecond laser inscription[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5420-5424.
- [88] Sun X L, Sun S, Romero C, et al. Femtosecond laser direct writing of depressed cladding waveguides in Nd: YAG with “ear-like” structures: fabrication and laser generation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 4296-4307.
- [89] Cheng C, Li Z Q, Dong N N, et al. Tin diselenide as a new saturable absorber for generation of laser pulses at 1 μm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6132-6140.
- [90] Li Z Q, Li R, Pang C, et al. 8.8 GHz Q-switched mode-locked waveguide lasers modulated by PtSe₂ saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8727-8737.
- [91] Ponarina M V, Okhrimchuk A G, Rybin M G, et al. Dual-wavelength generation of picosecond pulses with 9.8 GHz repetition rate in Nd: YAG waveguide laser with graphene[J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(4): 365-370.
- [92] Liu H L, Vázquez de Aldana J R, Hong M H, et al. Femtosecond laser inscribed Y-branch waveguide in Nd: YAG crystal: fabrication and continuous-wave lasing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 227-230.
- [93] Jia Y C, Cheng C, Vázquez de Aldana J R, et al. Three-dimensional waveguide splitters inscribed in Nd: YAG by femtosecond laser writing: realization and laser emission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(4): 1328-1332.
- [94] Jia Y C, Cheng C, Vázquez de Aldana J R, et al. Monolithic crystalline cladding microstructures for efficient light guiding and beam manipulation in passive and active regimes[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5988.
- [95] Salamu G, Pavel N. Power scaling from buried depressed-cladding waveguides realized in Nd: YVO₄ by femtosecond-laser beam writing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 84: 149-154.
- [96] Li Z Q, Cheng C, Dong N N, et al. Q-switching of waveguide lasers based on graphene/WS₂ van der Waals heterostructure[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 406-410.
- [97] Li Z Q, Li R, Dong N N, et al. Gigahertz mode-locked waveguide lasers modulated by PtSe₂ saturable absorber [C]//Laser Congress 2018 (ASSL), Boston, November 4-8, 2018, Massachusetts. Washington, DC: OSA, 2018: AM6A.10.
- [98] Jia Y C, He R Y, Vázquez de Aldana J R, et al. Femtosecond laser direct writing of few-mode depressed-cladding waveguide lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30941-30951.
- [99] Li Z Q, Pang C, Li R, et al. Near-infrared all-optical switching based on nano/micro optical structures in YVO₄ matrix: embedded plasmonic nanoparticles and laser-written waveguides[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(1): 2000064.
- [100] Nie W J, Cheng C, Jia Y C, et al. Dual-wavelength waveguide lasers at 1064 and 1079 nm in Nd: YAP crystal by direct femtosecond laser writing[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2437-2440.
- [101] Nie W J, He R Y, Cheng C, et al. Optical lattice-like cladding waveguides by direct laser writing: fabrication,

- luminescence, and lasing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2169-2172.
- [102] Tan Y, Rodenas A, Chen F, et al. 70% slope efficiency from an ultrafast laser-written Nd: GdVO₄ channel waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24994-24999.
- [103] Liu H L, Tan Y, Vázquez de Aldana J R, et al. Efficient laser emission from cladding waveguide inscribed in Nd: GdVO₄ crystal by direct femtosecond laser writing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4553-4556.
- [104] Zhang C, Dong N N, Yang J, et al. Channel waveguide lasers in Nd: GGG crystals fabricated by femtosecond laser inscription[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12503-12508.
- [105] Ren Y Y, Dong N N, MacDonald J, et al. Continuous wave channel waveguide lasers in Nd: LuVO₄ fabricated by direct femtosecond laser writing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 1969-1974.
- [106] Liu H L, An Q, Chen F, et al. Continuous-wave lasing at 1.06 μm in femtosecond laser written Nd: KGW waveguides[J]. *Optical Materials*, 2014, 37: 93-96.
- [107] Li S L, Ye Y K, Wang H L. Cladding waveguide lasers in femtosecond laser written Nd: KGW waveguides[J]. *Optical Materials*, 2020, 110: 110517.
- [108] Liu H L, Jia Y C, Chen F, et al. Continuous wave laser operation in Nd:GGG depressed tubular cladding waveguides produced by inscription of femtosecond laser pulses[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(2): 278-283.
- [109] Gao S Y, Chen Z X, Xiong Y J, et al. Nd:YSAG waveguide-grating vortex laser: design and implementation [J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 31634-31643.
- [110] Kifle E, Loiko P, Vázquez de Aldana J R, et al. Passively Q-switched femtosecond-laser-written thulium waveguide laser based on evanescent field interaction with carbon nanotubes[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(10): 971-980.
- [111] Kifle E, Loiko P, Vázquez de Aldana J R, et al. Fs-laser-written thulium waveguide lasers Q-switched by graphene and MoS₂[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8745-8755.
- [112] Kifle E, Mateos X, Vázquez de Aldana J R, et al. Femtosecond laser-written Tm: KLu(WO₄)₂ waveguide lasers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1169-1172.
- [113] Kifle E, Loiko P, Romero C, et al. Ultrafast laser inscription and ~2 μm laser operation of Y-branch splitters in monoclinic crystals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4374-4384.
- [114] Ren Y Y, Brown G, Mary R, et al. 7.8-GHz graphene-based 2-μm monolithic waveguide laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 21(1): 395-400.
- [115] Kifle E, Loiko P, Romero C, et al. Femtosecond-laser-written Ho: KGd(WO₄)₂ waveguide laser at 2.1 μm[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1738-1741.
- [116] Kifle E, Loiko P, Vázquez de Aldana J R, et al. Low-loss fs-laser-written surface waveguide lasers at >2 μm in monoclinic Tm³⁺: MgWO₄[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 4060-4063.
- [117] McDaniel S, Thorburn F, Lancaster A, et al. Operation of Ho: YAG ultrafast laser inscribed waveguide lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3251-3256.
- [118] MacDonald J R, Beecher S J, Lancaster A, et al. Compact Cr: ZnS channel waveguide laser operating at 2333 nm[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7052-7057.
- [119] McDaniel S A, Lancaster A, Evans J W, et al. Power scaling of ultrafast laser inscribed waveguide lasers in chromium and iron doped zinc selenide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3502-3512.
- [120] Zhou Y, Wang Z, Fang Z W, et al. On-chip multi-color microdisk laser on Yb³⁺-doped thin-film lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5651-5654.
- [121] Zhou J X, Huang T, Fang Z, et al. Laser diode-pumped compact hybrid lithium niobate microring laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(21): 5599-5601.