

中国激光

10 瓦级 3.5 μm 中红外全光纤激光器研究

3 μm 波段光纤激光因在环境监测、医疗成像、科学研究和工业加工等多个领域中的应用潜力而备受关注。近年来,国际研究机构在 3 μm 波段光纤激光器的大功率、全光纤化等方面取得了显著的研究进展。2022 年,加拿大拉瓦尔大学基于增益光纤中直接刻写的光纤光栅实现了全光纤结构,获得了最大输出功率达到 14.9 W 的 3.5 μm 光纤激光。由于中红外光栅刻写技术(耐高功率性能、光栅对的波长匹配性能等)相对落后,国内在 3 μm 波段光纤激光器功率提升和集成化方面的研究明显滞后。目前国内公开报道的该波段激光的最高输出功率为天津大学团队采用空间光路结构实现的 7.2 W,尚无 10 W 级 3.5 μm 全光纤激光输出的研究报道。近期,中国科学院西安光学精密机械研究所基于自制的中红外氟化物光纤光栅,在优化异质光纤熔接与热管理技术的基础上,实现了 3.5 μm 全光纤激光输出,功率为 10.1 W,斜率效率达 41.7%。

3.5 μm 中红外全光纤激光器的结构如图 1(a) 所示,其中 S1 为异质光纤熔接点。系统采用双波长泵

浦技术,利用 2×1 石英光纤合束器对输出波长分别为 1976 nm 和 981 nm 的激光进行合束后,对 Er^{3+} 掺杂氟化物光纤(双包层光纤, Er^{3+} 的摩尔分数为 7%,长度为 2.5 m)进行泵浦。采用非对称加热方法实现了石英光纤与氟化物光纤间的低损耗熔接,获得了高效的纤芯泵浦效率($\sim 66\%$)。采用飞秒激光直写技术在增益光纤中刻写了一对反射率分别为 98% @ 3549 nm 和 30% @ 3549 nm 的光栅,其组成谐振腔。采用高折射率匹配涂层作为包层光剥离器,并选用 AlF_3 光纤作为激光器端帽,对其进行切斜角处理,防止寄生激光的产生。整个光路系统均被放置在铝盘上进行冷却处理,确保激光器的稳定运行。如图 1(b) 所示,在充足的 981 nm 包层泵浦光(功率为 16 W)条件下,随着 1976 nm 纤芯泵浦光功率(阈值功率约为 3 W)的增加,3.5 μm 激光的输出功率呈线性增长。当 1976 nm 泵浦光功率增至最大 27 W 时,激光输出功率达到 10.1 W,激光斜率效率为 41.7% (相较于 981 nm 激光的斜效率为 $\sim 62.5\%$),显示出

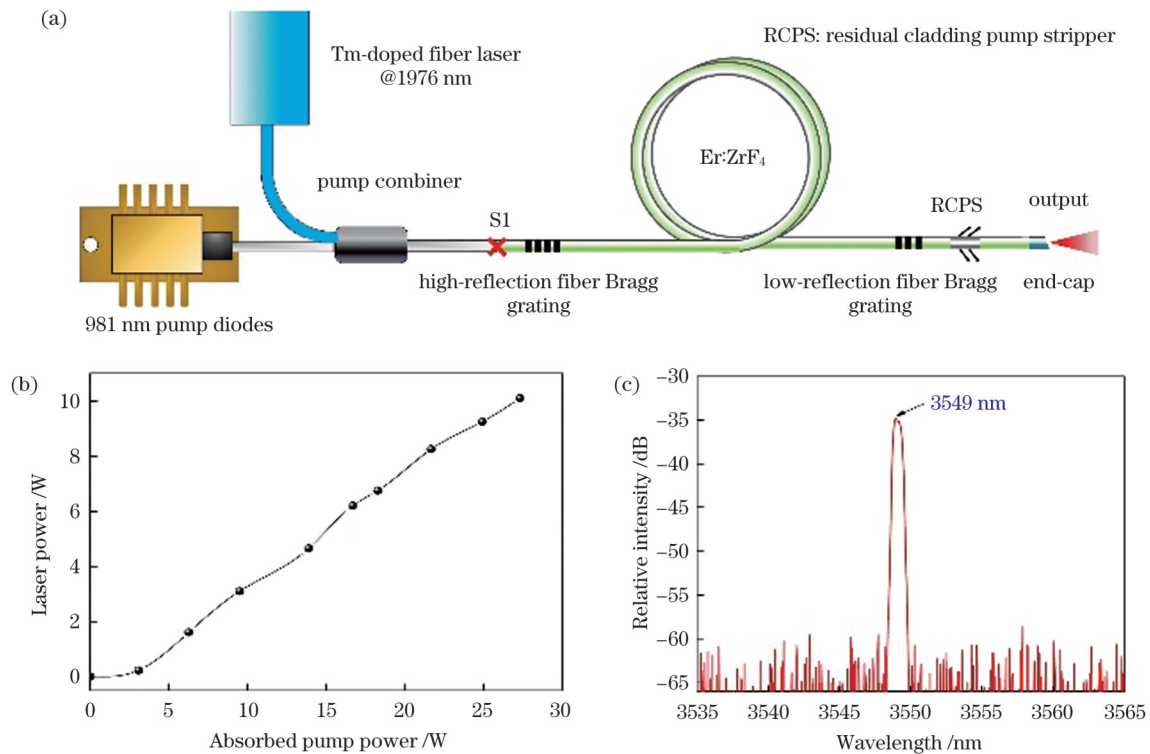


图 1 激光输出特性。(a) 激光器的结构示意图; (b) 激光斜效率; (c) 激光输出光谱

Fig. 1 Laser output characteristics. (a) Schematic of laser structure; (b) laser slope efficiency; (c) laser output spectrum

未饱和的增长趋势。由于泵浦光功率的限制,激光功率没有进一步提升。如图 1(c)所示,输出激光波长为 3549 nm,与光纤光栅的工作波长匹配。后续工

作将继续提升泵浦光功率及优化异质光纤熔接和光栅刻写技术,以进一步提高 3.5 μm 全光纤激光效率和功率。

肖旭升¹, 湛业威², 何文涛¹, 何宇轩², 梁文涛¹, 肖扬¹, 郭海涛^{1*}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

²哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 山东 青岛 266000

通信作者: *guoht_001@opt.ac.cn

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-02-01; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-12