

# 中国激光

## 高效紧凑型 Tm:YLF 抽运的中红外 ZGP 光参量振荡器

效率一直是制约中红外固体激光器发展的瓶颈因素,起始的激光二极管(LD)波长( $\lambda_{LD}$ )与中红外激光(MIR)波长( $\lambda_{MIR}$ )之间的巨大差异产生了难以逾越的量子亏损( $1-\lambda_{LD}/\lambda_{MIR}$ ),低效率直接导致废热的增加,中红外激光功率或能量降低、光束质量变差,甚至出现材料和器件的损伤。因此,通过各种技术途径(近带泵浦、交叉弛豫、能量上转换、非线性级联变换等)提高中红外固体激光器的效率成为了研究的热点。目前,通过 2  $\mu\text{m}$  的 Ho:YAG 激光器抽运磷锗锌(ZGP)光参量振荡器(OPO)和放大器(OPA)是最主流和最成熟的方案。2021年,哈尔滨工业大学报道了最高功率为 161 W 的中红外 ZGP OPO+OPA,但其光学系统过于

复杂、整体效率不高,不便于实际应用。

随着 ZGP 晶体生长和加工工艺的进步,吸收边界不断向短波方向拓展, $\sim 1.9 \mu\text{m}$  处的吸收系数降至  $0.032 \text{ cm}^{-1}$ ,可以与传统 2  $\mu\text{m}$  基频光的吸收系数相比拟,为采用  $\sim 1.9 \mu\text{m}$  的掺 Tm 激光直接抽运 ZGP OPO 提供了可能。Tm 离子间的交叉弛豫效应有利于实现高效率的  $\sim 1.9 \mu\text{m}$  基频光输出。由于避免了 Tm 抽运 Ho 的中间环节和能量损失,可设计出更高效、紧凑的中红外 OPO,如图 1(a)所示,其中 HT 为高透射,HR 为高反射,VBG 为体布拉格光栅, $R$  为反射率。基频光为声光调 Q 的 Tm:YLF 激光器,锁波长的 793 nm LD 通过尾纤进行端泵浦,光学器件紧贴直线腔放置,

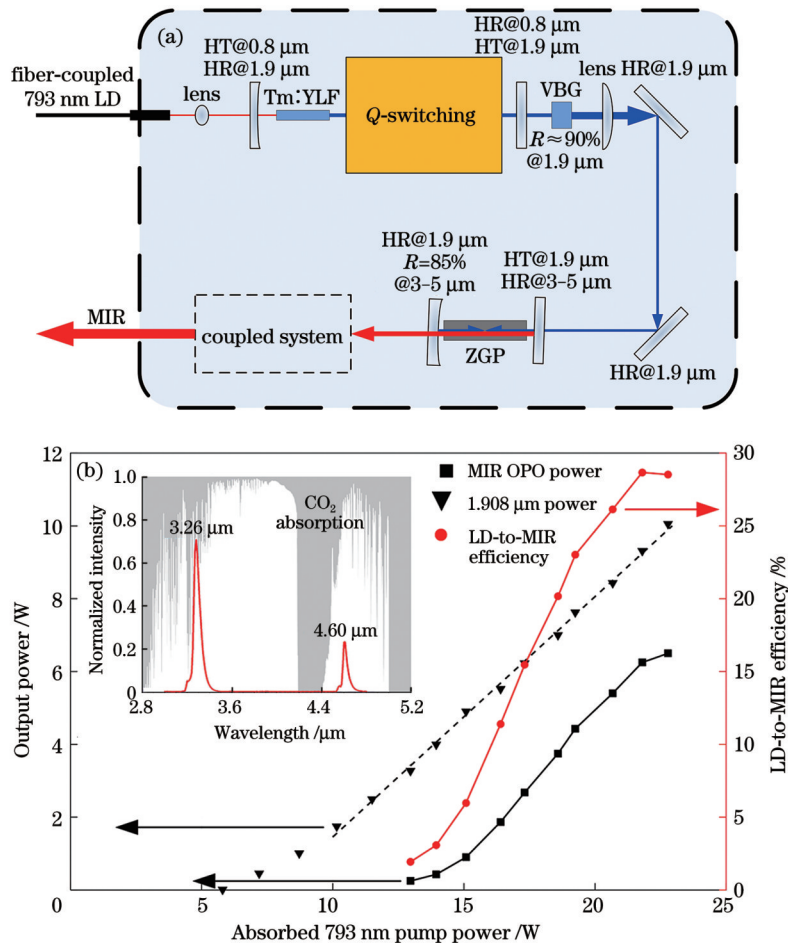


图1 实验装置和输出结果。(a)紧凑型 Tm:YLF 直接抽运 ZGP OPO 的光路图;(b)输出功率、效率与吸收 LD 功率的关系曲线(插图为 OPO 输出光谱图)

Fig. 1 Experimental setup and output results. (a) Optical path diagram of compact Tm:YLF directly-pumped ZGP OPO; (b) output power and efficiency versus absorbed LD power with OPO output spectrum shown in inset

VBG 作为输出镜可实现中心波长为  $1.908\ \mu\text{m}$  的稳定输出,避免水汽吸收的不利影响。基频光通过单透镜,沿折叠光路抽运短腔 ZGP OPO,全部光学器件(不含 LD 泵浦模块)可安装在  $180\ \text{mm} \times 120\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$  的箱体内部。

中红外激光输出功率和效率、 $1.908\ \mu\text{m}$  基频光功率与吸收的  $793\ \text{nm}$  LD 功率的关系曲线如图 1(b) 所示。当 Tm:YLF 晶体吸收了  $22.79\ \text{W}$  的 LD 功率时(注入的  $793\ \text{nm}$  功率为  $26\ \text{W}$ ), $1.908\ \mu\text{m}$  基频光在  $10\ \text{kHz}$  重复频率下的平均功率为  $10.05\ \text{W}$ ,ZGP OPO 输出的中红外功率为  $6.5\ \text{W}$ ,光束质量因子  $M^2 < 3$ ,LD 到中红外的光光效率为  $28.5\%$ , $1.908\ \mu\text{m}$  基频光的平均脉冲宽度为  $104\ \text{ns}$ ,中红外 OPO 的平均脉冲宽度为  $70\ \text{ns}$ 。调整 ZGP 晶体角度,使输出波长为简并波长  $\sim 3.82\ \mu\text{m}$ ,此时光子效率为  $137\%$ ,即吸收的一个  $793\ \text{nm}$  光子平均转换成了  $1.37$  个  $3.82\ \mu\text{m}$  中红外光子。通过调节 ZGP 晶体角度,实现了输出波长为

$3.26\sim 4.60\ \mu\text{m}$  的连续调谐,典型的输出光谱如图 1(b) 中的插图所示。在波长调谐过程中,应使信号光和闲频光均处于高透过率的大气窗口内。作为升级,在基频光折叠腔中采用两个 Tm:YLF 增益晶体,ZGP OPO 的输出功率提升至  $15\ \text{W}$ 。

后续将采用可饱和吸收体进行被动调 Q,替换目前的声光 Q 开关,以减少驱动电源功耗和缩小激光器体积。2022 年底,美国 Livermore 实验室报道了平均功率为  $3.6\ \text{kW}$ 、单脉冲能量为  $108\ \text{J}$ 、峰值功率为  $1.1\ \text{GW}$  的 Tm:YLF 放大器,验证了 Tm:YLF 在获取高平均功率、高峰值功率和高脉冲能量方面的可行性和发展潜力,为新一代掺 Tm 激光器直接抽运中红外 ZGP OPO+OPA 提供了参考,中红外激光功率有望实现跨量级提升。为此,还需在控制基频光光谱和优化其光束质量,增加 ZGP 晶体尺寸,降低吸收损耗,提高损伤阈值,改进抛光镀膜工艺等方面开展更深入的研究。

魏星斌<sup>1</sup>,尹文龙<sup>2</sup>,张淞<sup>3</sup>,刘政邑<sup>3\*</sup>,任怀瑾<sup>1</sup>,康彬<sup>2</sup>,袁泽锐<sup>2</sup>,王卫民<sup>1</sup>,邬映臣<sup>1</sup>,尚建力<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所,四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621900;

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生院,四川 绵阳 621900

通信作者: [luoxw1003@163.com](mailto:luoxw1003@163.com)

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-11-07; 录用日期: 2023-11-09; 网络首发日期: 2023-11-16

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金(CX20210022)、国家自然科学基金(62105313)