

## 2 $\mu\text{m}$ 单掺 Ho 固体激光器及 $\text{ZnGeP}_2$ 晶体 应用于中长波输出的研究进展 (特邀)

刘高佑, 魏迪生, 陈毅, 杨科, 密淑一, 李俊辉, 杨超,  
王瑞雪, 段小明, 戴通宇, 姚宝权\*, 鞠有伦, 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 2  $\mu\text{m}$ 、中波红外 3~5  $\mu\text{m}$  及长波红外 8~12  $\mu\text{m}$  波段的激光处于大气传输窗口, 在激光医疗、环境监测、激光雷达、化学遥感和红外对抗等领域有着非常广阔的应用前景。基于非线性频率转换技术, 采用非线性光学晶体在实现中长波红外固体激光输出方面具有结构简单、宽调谐和高功率等技术优势。尤其是使用 2  $\mu\text{m}$  单掺 Ho 固体激光器泵浦  $\text{ZnGeP}_2$  晶体, 在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~10  $\mu\text{m}$  中长波红外输出中性能优异。在平均输出功率方面, 目前可达到 102 W@3~5  $\mu\text{m}$ 、12.6 W@8.2  $\mu\text{m}$  以及 3.5 W@9.8  $\mu\text{m}$  的输出水平, 光束质量  $M^2$  均小于 3, 其中中波的光光转换效率可达 60%。文中针对 2  $\mu\text{m}$  单掺 Ho 固体激光器及  $\text{ZnGeP}_2$  晶体在中长波输出方面进行了总结。

**关键词:** 2  $\mu\text{m}$ ; 中长波红外; 非线性光学; 固体激光器

**中图分类号:** TN244      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201056

## Research progress of 2 $\mu\text{m}$ Ho single-doped solid laser and application of $\text{ZnGeP}_2$ on middle-long-wave infrared (*Invited*)

Liu Gaoyou, Wei Disheng, Chen Yi, Yang Ke, Mi Shuyi, Li Junhui, Yang Chao, Wang Ruixue,  
Duan Xiaoming, Dai Tongyu, Yao Baoquan\*, Ju Youlun, Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** 2  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\mu\text{m}$  and 8-12  $\mu\text{m}$  infrared lasers are located in the atmospheric transmission window, which have broad applications in laser medicine, laser imaging, environmental monitoring, lidar, chemical remote sensing and infrared countermeasure. Based on the optical nonlinear frequency conversion technology and nonlinear optical crystals, it has obvious advantages in achieving middle-long-wave infrared solid lasers, such as compact and simple structure, wide tunable wavelength range and high output power. Using  $\text{ZnGeP}_2$  crystal with 2  $\mu\text{m}$  Ho single-doped solid laser as pump especially has an outstanding performance in middle-long-wave infrared field. In the aspect of average output power, it has reached the level of 102 W@3-5  $\mu\text{m}$ , 12.6 W@8.2  $\mu\text{m}$  and 3.5 W@9.8  $\mu\text{m}$ . Moreover, they all have a beam quality factor  $M^2$  less than 3 and the corresponding optical-to-optical conversion efficiency of 3-5  $\mu\text{m}$  is about 60%. This paper reviewed the research progress of 2  $\mu\text{m}$  Ho single-doped solid laser and application of  $\text{ZnGeP}_2$  on middle-long-wave infrared in detail.

**Key words:** 2  $\mu\text{m}$ ; middle-long-wave infrared; nonlinear optics; solid laser

收稿日期: 2020-09-13; 修订日期: 2020-10-27

作者简介: 刘高佑 (1991-), 男, 博士生, 主要从事 2  $\mu\text{m}$  及中长波红外固体激光器方面的研究。Email: liugaoyou@126.com

通讯作者: 姚宝权 (1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事 2  $\mu\text{m}$  及中长波红外固体激光器方面的研究。Email: yaobq08@hit.edu.cn

## 0 引言

2  $\mu\text{m}$  激光在自由空间光通信、激光雷达、大气探测、激光医疗外科手术、激光医疗内科诊断、环境监测、材料加工和光谱学等领域有重要的应用。特别地, 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光器是中波红外 (3~5  $\mu\text{m}$ ) 和长波红外 (8~12  $\mu\text{m}$ ) 波段的光参量振荡 (optical parametric oscillator, OPO) 和光参量放大 (optical parametric amplification, OPA) 的理想并高效的泵浦源。中长波红外激光在军用激光测距、激光雷达、光电对抗以及红外制导技术等方面具有非常重要的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP) 晶体在热导率、非线性系数和损伤阈值方面都具有较为明显的优势, 机械强度高, 且近年来国内晶体的生长技术有了明显的提高, ZGP 晶体的尺寸和性能都有所保障。其在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~10  $\mu\text{m}$  中长波红外波段的非线性频率转换领域中的表现十分出色, 所以 ZGP 晶体是利用非线性频率转换技术获得中长波红外激光的首选非线性晶体。

文中将详细梳理 2  $\mu\text{m}$  固体激光器以及基于非线性频率转换技术将 ZGP 晶体应用于中长波固体激光器的情况, 介绍本领域固体激光器的研究进展。

## 1 2 $\mu\text{m}$ 单掺 Ho 固体激光器

在固体激光器方面, 实现 2  $\mu\text{m}$  激光输出方案主要包括: (1) 采用较为成熟的 1  $\mu\text{m}$  激光作为泵浦源, 通过非线性光学中的倍频手段来获得 2  $\mu\text{m}$  激光输出。这种激光器可以得到在 2  $\mu\text{m}$  附近可调的输出激光波长, 并且在常温下能够获得较高功率, 但是其体积大, 结构很复杂, 输出激光光束质量较差, 线宽较宽<sup>[6-7]</sup>; (2) 以单掺 Tm<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>和 Ho<sup>3+</sup>共掺以及单掺 Ho<sup>3+</sup>的物质为激光介质得到 2  $\mu\text{m}$  激光输出的固体激光器<sup>[8]</sup>。随着半导体激光器的发展, 通过半导体激光器泵浦单掺 Tm<sup>3+</sup>晶体得到 1.9  $\mu\text{m}$  固体激光输出, 进而泵浦单掺 Ho<sup>3+</sup>晶体得到 2  $\mu\text{m}$  固体激光输出的方案逐渐被研究工作者所青睐, 这种类型的激光器所获得的激光一般具有较高的光束质量和较窄的光谱宽度。能够在常温下实现高功率、窄线宽以及高光束质量的 2  $\mu\text{m}$  激光输出, 同时也可以实现高能量、稳定的 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光输出, 是近十年来国内外的研究热点。

### 1.1 2 $\mu\text{m}$ 泵浦源—1.9 $\mu\text{m}$ 单掺 Tm 固体激光器

在常温条件下, Tm<sup>3+</sup>离子具有天然的准三能级特

性, 广泛应用于 Tm 固体激光器的增益介质主要有 YAG、YAP 和 YLF 三种, 其连续输出功率已经从瓦量级发展到百瓦量级。受限于 Tm 能级自身的特点, 大部分单掺 Tm 固体激光器的波长在 1.9~2.0  $\mu\text{m}$  之间, 单掺 Tm 的固体激光器一般很难将波长调谐至 2  $\mu\text{m}$  以上。如 Tm:YAP 的输出波长在 1.94  $\mu\text{m}$  和 1.99  $\mu\text{m}$  附近, Tm:YLF 激光器的输出波长在 1.9  $\mu\text{m}$  附近。值得注意的是, 这些激光器的输出波长虽然没有达到 2  $\mu\text{m}$  波段范围, 但其输出波长一般处在单掺 Ho 晶体的吸收峰, 如 Ho:YLF 晶体的吸收峰在 1.94  $\mu\text{m}$  附近, Ho:YAG 晶体的吸收峰在 1.91  $\mu\text{m}$  附近, 因此 1.9  $\mu\text{m}$  单掺 Tm 固体激光器可作为单掺 Ho 固体激光器的理想泵浦源。

### 1.2 2 $\mu\text{m}$ 固体激光器

随着 1.9  $\mu\text{m}$  激光技术越来越成熟, 而且其处于单掺 Ho<sup>3+</sup>晶体的吸收峰, 所以以 1.9  $\mu\text{m}$  激光器为泵浦源的单掺 Ho<sup>3+</sup>激光器成为近十年来的研究热点。目前, 单掺 Ho 固体激光器的泵浦源主要有 1.9  $\mu\text{m}$  光纤激光器, 1.9  $\mu\text{m}$  半导体激光器和 1.9  $\mu\text{m}$  固体激光器等三类, 以上三种泵浦方式均可获得较好的 2  $\mu\text{m}$  激光输出。相比于其他泵浦方式, 1.9  $\mu\text{m}$  固体激光器泵浦的掺 Ho 固体激光器具有高效率、高稳定性、高功率以及高光束质量等优点。此外 2  $\mu\text{m}$  单掺 Ho 固体激光器为带内泵浦模式, 因此量子亏损较小, 能够改善增益介质内的热积累现象, 一般单掺 Ho 固体激光器在室温条件下就可以稳定的运行<sup>[9]</sup>。

对于 2  $\mu\text{m}$  单掺 Ho 固体激光器, 目前国内外已经开展了大量的研究, 主要采用的基质类型为氟化物基质<sup>[10-12]</sup>和氧化物基质<sup>[13-16]</sup>。其中, 以氟化物基质中的 YLF 基质和氧化物基质中的 YAG 基质生长工艺最为成熟, 并且这两类晶体具有上能级寿命长、发射截面大、热力学特性和光学特性优异等优点而备受关注。Ho:YLF 晶体的上能级寿命比 Ho:YAG 晶体的上能级寿命大, 更有利于能量的储能, 因此在调 Q 脉冲激光输出方面具有较大的优势, 但其偏振吸收特性比较明显, 一般采用单端泵浦模式; Ho:YAG 晶体对泵浦光没有明显的偏振吸收特性, 因此既可以采用单端泵浦的模式也可以采用偏振隔离技术的双端泵浦模式。且其机械性能要优于 Ho:YLF, 一般不会出现机械性损伤。因此, Ho:YLF 晶体是实现 2  $\mu\text{m}$  高能量脉

冲激光输出的良好选择;基于其良好的机械性能和泵浦吸收特性, Ho:YAG 晶体适合作为结构紧凑、高功率的 2 μm 激光器的增益介质<sup>[9]</sup>。

2012 年,以输出波长为 1.9 μm 的 LD 泵浦平平腔结构的 Ho:YAG 激光器,德国 LISA 的 Lamrini 等人,在连续波运转下获得了波长为 2.122 μm,输出功率最高为 55 W 的激光输出<sup>[17]</sup>。2012 年,以四台 1.91 μm 的 Tm:YLF 固体激光器作为泵浦源,采用双 Ho:YAG 晶体串联结构谐振腔,哈尔滨工业大学的 Shen 等人,在连续波运转下,获得了输出功率最高为 103 W 的 2097 nm 和 2122 nm 的激光输出<sup>[18]</sup>。2013 年,采用 1.94 μm 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YLF 主动调 Q 激光器,挪威的 Fonnum 等人获得了重频为 1 Hz、脉宽为 14 ns、单脉冲能量为 550 mJ 的 2.051 μm 激光输出<sup>[19]</sup>。2013 年,利用双通 Ho:YLF 放大器对 50 mJ 的单频 2.064 μm 脉冲激光进行放大,装置如图 1 所示, Strauss H J 等人获得了脉冲重复频率为 50 Hz,最高 330 mJ 的单脉冲能量,光束质量因子为 1.5<sup>[9]</sup>。

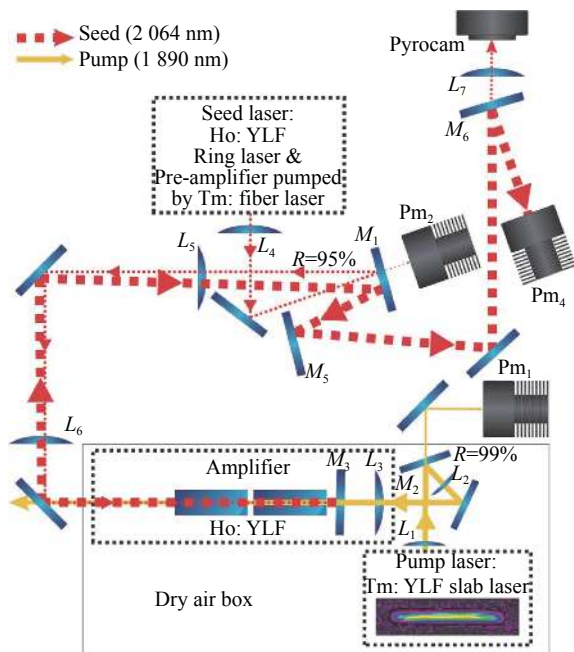


图 1 双通 Ho:YLF 放大器实验装置

Fig.1 Experimental setup of double-pass Ho:YLF amplifier

2018 年,以 1.91 μm 的 Tm:YLF 固体激光器作为泵浦源,哈尔滨工业大学的 Zhao 等人设计了双端泵浦 Ho:YAG MOPA 系统,装置如图 2 所示,经过两级放大后,在重复频率为 10 kHz 时,获得了平均功率为 231 W 的激光输出,对应单脉冲能量为 23.1 mJ,光束

质量因子小于 1.1,放大器的提取效率大于 60%<sup>[20]</sup>。2019 年,哈尔滨工业大学的 Qian 等人对称设计了 Tm:YLF 双端泵浦双晶体 Ho:YAG 振荡器,结构如图 3 所示。得到了在不同脉冲重复频率下激光器的输出结果。在 377.2 W 的泵浦功率和 10 kHz 的重复频率下,获得了最高平均功率 193 W 的连续和脉冲激光输出,水平方向光束质量因子为 2.3<sup>[21]</sup>。

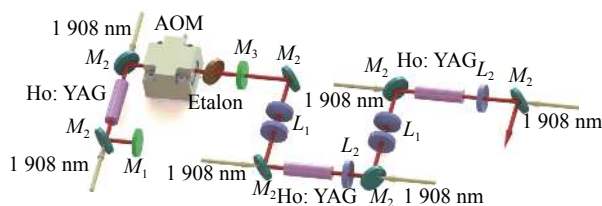


图 2 Ho:YAG 两级放大器结构图

Fig.2 Schematic diagram of two-stage Ho:YAG MOPA structure

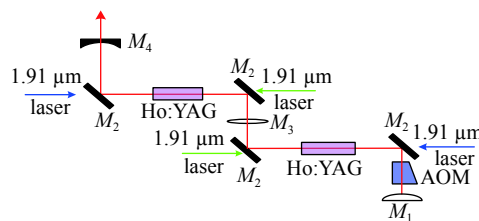


图 3 腔内热透镜补偿 Ho:YAG 振荡器结构图

Fig.3 Structure diagram of Ho:YAG laser with internal thermal lens compensation

综上可知,在 2 μm 激光输出的方案中,单掺 Ho<sup>3+</sup>基质有绝对的优势,较高的上能级寿命使得激光器调 Q 运转时易于存储能量,以 1.91 μm 激光为泵浦源,其量子损耗小,输出效率较高。近年来掺 Ho MOPA 的研究工作主要集中于 Ho:YAG 和 Ho:YLF 两种基质材料,其中以 Ho:YLF MOPA 的研究较早且较为丰富,已经能够实现百瓦级连续激光输出以及百毫焦级的脉冲激光输出,且在高功率泵浦情况下依然能够保持近基横模运转。Ho:YAG 晶体能够通过双端泵浦模式增加泵浦注入功率和简化实验装置,有潜力实现更高质量、更高功率的 2 μm 激光输出。

## 2 非线性频率转换及非线性光学晶体

非线性频率转换是利用非线性晶体的二阶非线性效应,通过非线性晶体中电磁场的相互作用来实现的。目前常用的非线性频率转换技术主要包括光参量产生 (optical parametric generation, OPG)、差频混合

(difference frequency mixing, DFM)、差频产生 (difference frequency generation, DFG)、光参量振荡 (OPO) 和光参量放大 (OPA) 等。基于非线性频率转换方法, 利用不同非线性晶体可以实现紫外 (200 nm) 到远红外 (12 μm) 宽光谱范围可调谐输出, 激光器结构简单, 且晶体本身并不参与能量的交换, 因此没有量子亏损, 产热很少。所以, 非线性频率转换技术是目前获取中长波红外激光的主要方法。

非线性频率转换对非线性晶体的要求主要包括: 双折射、机械强度、非线性系数、热导率、损伤阈值、

透过光谱等。由于二次非线性效应是光光转换过程, 要求非线性晶体对泵浦光的吸收系数尽可能小, 减少损耗。损伤阈值越高, 则晶体承载的最大能量密度越高, 这有利于产生大能量、高功率的激光。非线性系数反映了频率转换的难易程度, 其值越大则泵浦阈值更低, 频率转换越容易。热导率、吸收系数与热透镜效应直接相关, 更大的热导率以及更小的吸收系数的非线性晶体是产生高功率、大能量激光的关键。

目前用于中长波红外输出的有发展前景以及输出效果较好的部分非线性晶体的特性如表 1 所示<sup>[22]</sup>。

表 1 部分中长波红外非线性晶体的物理特性

Tab.1 Physical properties of some mid/long-wave infrared nonlinear crystals

Crystal	Nonlinear coefficient/pm·V <sup>-1</sup>	Transparency range/μm	Thermal conductivity/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Damage threshold/MW·cm <sup>-2</sup>
ZnGeP <sub>2</sub>	$d_{36}=75$	0.7-12	35	55.6 (1.064 μm, 10 ns)
BaGa <sub>4</sub> Se <sub>7</sub>	$d_{11}=24.3$ $d_{13}=20.4$	0.47-18	0.74//a 0.64//b 0.56//c	557 (1.064 μm, 5 ns)
KTiOPO <sub>4</sub>	$d_{15}=1.9, d_{24}=3.6$ $d_{33}=16.9$	0.35-4.0	2//a 3//b 3.3//c	500 (1.064 μm, 10 ns)
PPKTP	$d_{33}=16.8$	0.28-4.5	2//a 3//b 3.3//c	900 (1.064 μm, 5 ns)
KTiOAsO <sub>4</sub>	$d_{15}=4.2, d_{24}=2.8$ $d_{33}=16.2$	0.35-5.2	1.8//a 1.9//b 2.1//c	>500 (1.064 μm, 10 ns)
LiNbO <sub>3</sub>	$d_{22}=2.1, d_{31}=4.3, d_{33}=27.2$	0.35-4.5	5.6	120 (1.064 μm, 10 ns)
PPLN	$d_{33}=27.2$	0.33-5.5	5	200 (1.064 μm, 10 ns)
MgO:PPLN	$d_{13}=14.8$	0.36-5	4.4	600 (1.064 μm, 9 ns)
AgGaS <sub>2</sub>	$d_{36}=12.6$	0.47-13	1.4//c 1.5⊥c	34 (1.064 μm, 15 ns)
AgGaSe <sub>2</sub>	$d_{36}=39.5$	0.76-18	1.0//c 1.1⊥c	13 (2.0 μm, 30 ns)
LiGaS <sub>2</sub>	$d_{31}=5.8$	0.32-11.6	6-8	>240 (1.064 μm, 14 ns)
LiInSe <sub>2</sub>	$d_{31}=11.78$	0.46-14	6.74//x 8.54⊥z	40 (1.064 μm, 10 ns)
CdSe	$d_{31}=18$	0.75-25	6.9//c 6.2⊥c	56 (2.09 μm, 46 ns)
GaSe	$d_{22}=54$	0.62-20	16.2	30 (1.064 μm, 10 ns)
CdSiP <sub>2</sub>	$d_{36}=84.5$	0.52-9	13.6	41 (1.064 μm, 8 ns)
OP-GaP	$d_{14}=70.6$	0.5-12	110	>104 (2.09 μm, 12 ns)
OP-GaAs	$d_{14}=94$	0.86-18	55	>38 (2.09 μm, 50 ns)

### 3 ZGP 晶体应用于中长波输出

ZGP 晶体结构为正方晶系, 为正单轴晶体 ( $n_e > n_o$ ), 是一种黄铜矿型半导体化合物晶体。ZGP 晶体的生长方法主要有垂直布里奇曼法 (vertical Bridgman, VB)

和水平梯度冷凝法 (horizontal gradient freezing, HGF) 等, 经过多年的发展国内外均已能够生长出 2.1 μm 吸收系数小于 0.05 cm<sup>-1</sup> 的 ZGP 晶体。可透光光谱范围为 0.74~12 μm<sup>[23-24]</sup>, 如图 4 所示<sup>[21]</sup>, 晶体非线性系数为  $d_{36}=75$  pm/V。ZGP 晶体在 3~8 μm 范围的透过率

很高;在小于 3 μm 时,其透过率急剧下降。一般通过退火和辐照的手段进一步提高其透过率,使其更加适合于应用,但泵浦波长一般要求在 2 μm 及以上。由 Ho:YLF 和 Ho:YAG 激光器输出的 2.1 μm 激光是作为 ZGP 晶体的优质泵浦源。在 8~10 μm 之间,由于晶体的多声子吸收导致透过率下降,但在 10 μm 附近由于声子吸收凹陷的存在导致存在一个透过率高峰,因此 ZGP 晶体在 10 μm 附近也可以有较为可观的输出。同时 ZGP 晶体的双折射随温度的变化较小,能够在高泵浦功率情况下保持稳定的功率输出和波长调谐,而且 ZGP 晶体具有较大的热导率和较高的损伤阈值,能够承受较高的泵浦能量和泵浦功率,其在 3~5 μm 和 8~10 μm 中长波红外波段的非线性频率转换领域中的表现十分出色<sup>[21]</sup>。

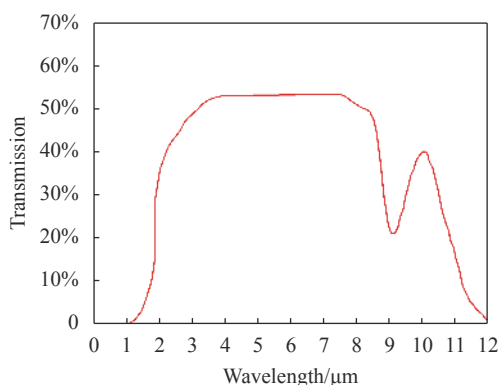


图 4 ZGP 晶体在红外波段透过率曲线

Fig.4 Transmission curve of ZGP crystal in infrared band

其中, ZGP OPO 和 ZGP OPA 是目前国内外实现中长波红外激光的研究热点。2014 年,日本的 Kenji 等人用 Nd:YAG 脉冲激光器泵浦 KTP OPO 产生的 1 820~1 945 nm 信号光和 2 561~2 335 nm 闲频光经过 ZGP 晶体差频后,得到了输出波长范围为 6.3~12 μm 的 ZGP 差频激光器。在波长 6.3~7.0 μm 范围,单脉冲能量大于 135 μJ<sup>[25]</sup>。2014 年, Magnus W. Haakestad 等人采用 ZGP OPO 和 ZGP OPA 结合的 MOPA 结构,装置如图 5 所示。利用重复频率为 1 Hz、输出波长为 2.05 μm、单脉冲能量最大为 0.5 J 的 Ho:YLF 脉冲激光器泵浦大通光口径的 ZGP 晶体,最终可以输出脉宽为 15 ns,单脉冲能量为 212 mJ 的 3~5 μm 中波激光,光束质量为 3<sup>[26]</sup>。

2016 年,基于三镜环形腔 ZGP OPO,以最大输出

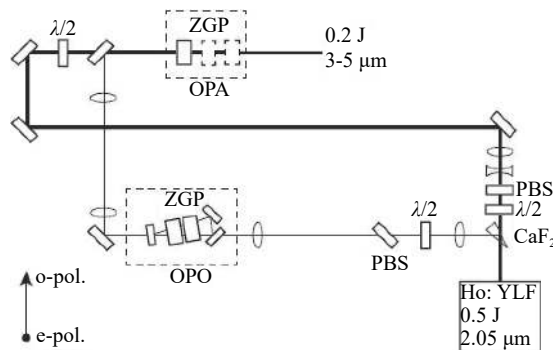


图 5 大能量的 ZGP MOPA 系统示意图

Fig.5 Schematic of high-energy ZGP MOPA system

单脉冲能量 550 mJ、波长为 2.05 μm、重频为 1 Hz、脉冲宽度 14 ns 的 Ho:YLF 激光器作为泵浦源,挪威的 H. Fonnum 等人得到了最高输出单脉冲能量为 1.8 mJ 的 8 μm 长波红外激光<sup>[27]</sup>。2016 年,以 Ho:YLF 啁啾脉冲放大器输出的 2 μm 激光作为泵浦,种子光为掺 Er 光纤激光器和掺 Tm, Ho 光纤激光器输出的 1.5 μm 和 2 μm 激光进行差频产生 7 μm 激光,西班牙的 D. Sanchez 等人利用 ZGP 啁啾脉冲放大器得到了 7 μm 激光最大单脉冲能量为 200 μJ,重复频率和脉冲宽度分别为 100 MHz 和 180 fs,对应的峰值功率达 1.1 GW<sup>[28]</sup>。

2019 年,使用高重复频率 (10 kHz) 的波长为 2097 nm 的 Ho:YAG 脉冲激光器作为泵浦源,采用 ZGP MOPA 结构,结构如图 6 所示,哈尔滨工业大学的 Qian 等人得到了平均输出功率为 102 W 的 3~5 μm 中波激光,水平和垂直方向的光束质量分别为 2.7 和 2.8,光光转换效率约为 60%<sup>[29]</sup>。同年,哈尔滨工业大学的 Liu 等人,使用高重复频率 (10 kHz) 的波长为 2091 nm 的 Ho:YAG 脉冲激光器作为泵浦源抽运 ZGP 晶体,采用级联 ZGP OPA 结构,结构如图 7 所示,得到了中心波长为 8.2 μm,最高平均输出功率为 12.6 W 的长波红外激光,并对比了一类和二类相位匹配类型的 ZGP 晶体在 OPO 和 OPA 中的输出特性<sup>[30]</sup>。2020 年,该课题组采用 ZGP OPO 结构,经过系统优化后,得到了中心波长为 9.8 μm,最高平均输出功率为 3.5 W 的长波红外激光,并得到了 9.2~11.1 μm 的可调谐长波外红输出<sup>[31]</sup>。

综上所述,目前在波长 ≥ 2 μm 光源泵浦的实现中长波激光输出方面, ZGP 晶体是综合性能较为优异的非线性光学晶体,拥有非常广阔的应用前景。

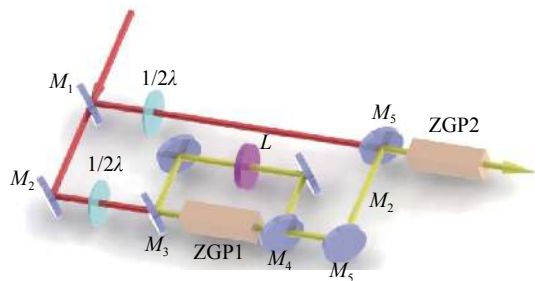


图 6 100 W 中波 ZGP OPA 系统结构图

Fig.6 Structure diagram of 100 W middle wave ZGP OPA system

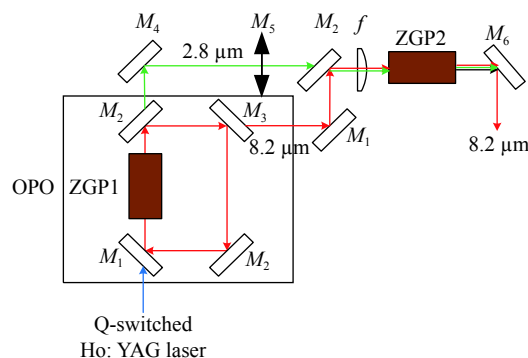


图 7 长波级联 ZGP OPA 系统结构图

Fig.7 Structure diagram of long-wave infrared subsequent ZGP OPA system

### 4 结束语

文中回顾了不同类型的 2 μm 固体激光器,并介绍总结了 ZGP 晶体在中长波输出方面的应用。从中可以看出以 1.9 μm 激光器为泵浦源的单掺 Ho<sup>3+</sup>激光器更具有发展潜力。其中在大能量方面, Ho:YLF 晶体是实现 2 μm 高能量脉冲激光输出的良好选择,已能够实现百毫焦级的脉冲激光输出; Ho:YAG 晶体能够通过双端泵浦模式增加泵浦注入功率和简化实验装置,有潜力实现更高功率、更高质量的 2 μm 激光输出。在中长波输出方面, ZGP 晶体具有较大的非线性系数、热导率和较高的损伤阈值等优异的性能,可以稳定输出百毫焦级和百瓦级的中波;同时在长波方面也可以实现较高功率和较大能量的输出。因此 ZGP 晶体在中长波红外波段的非线性频率转换领域中的表现十分出色。未来 2 μm 固体激光器的发展以及 ZGP 晶体生长工艺的提高都将成为今后一定时期的研究热点。

### 参考文献:

- [1] Boyd D S, Petitcolin F. Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0–5.0 μm) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(17): 3343-3368.
- [2] Godard A. Infrared (2–12 μm) solid-state laser sources: a review [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [3] Vaicikauskas V, Kabelka V, Kuprionis Z, et al. Infrared DIAL for remote sensing of atmospheric pollutants[C]//Proc of SPIE, 2005, 5958: 59581K.
- [4] Vaicikauskas V, Kuprionis Z, Kaucikas M, et al. Mid-infrared all solid state DIAL for remote sensing of hazardous chemical agents[C]//Proc of SPIE, 2006, 6214: 62140E.
- [5] Mitev V, Babichenko S, Bennes J, et al. Mid-IR DIAL for high-resolution mapping of explosive precursors[C]//Proc of SPIE, 2013, 8894: 88940S.
- [6] Jiao Z, He G, Guo J, et al. High average power 2 μm generation using an intracavity PPMgLN optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(1): 64-66.
- [7] Guo J, He G Y, Zhang B F, et al. Compact efficient 2.1 m intracavity MgO: PPLN OPO with a VBG output coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(6): 573-576.
- [8] Yu H, Zheng X, Yin K, et al. Nanosecond passively Q-switched thulium/holmium-doped fiber laser based on black phosphorus nanoplatelets [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 603-609.
- [9] Zhao Benrui. Study on high power Ho: YAG MOPA and long infrared OPO laser system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)  
赵本瑞. 高功率Ho: YAG MOPA及长波红外OPO激光系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [10] Coluccelli N, Lagatsky A, Di Lieto A, et al. Passive mode locking of an in-band-pumped Ho:YLiF<sub>4</sub> laser at 2.06 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3209-3211.
- [11] Taczak T M, Killinger D K. Development of a tunable, narrow-linewidth, cw 2.066-μm Ho:YLF laser for remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(36): 8460-8476.
- [12] Gibert F, Pellegrino J, Edouard D, et al. 2-μm double-pulse single-frequency Tm: fiber laser pumped Ho:YLF laser for a space-borne CO<sub>2</sub> lidar [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(36): 10370-10379.
- [13] Duan X, Yuan J, Cui Z, et al. Resonantly pumped actively mode-locked Ho:YAG ceramic laser at 2122.1 nm [J]. *Applied*

- Optics*, 2016, 55(8): 1953-1956.
- [14] Cui Z, Duan X M, Yao B Q, et al. Doubly Q-switched Ho:LuAG laser with acoustic-optic modulator and  $\text{Cr}^{2+}$ :ZnS saturable absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10272-10276.
- [15] Budni P A, Pomeranz L A, Miller C A, et al. CW and Q-switched Ho: YAG pumped by Tm: YALO[C]//Advanced Solid State Lasers, 1998: ML4.
- [16] Bollig C, Hayward R A, Clarkson W A, et al. 2 W Ho:YAG laser intracavity pumped by a diode-pumped Tm: YAG laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(22): 1757-1759.
- [17] Lamrini S, Koopmann P, Schafer M, et al. Efficient high-power Ho:YAG laser directly in-band pumped by a GaSb-based laser diode stack at 1.9  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(2): 315-319.
- [18] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, et al. 103W in-band dual-end-pumped Ho:YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3558.
- [19] Fonum H, Lippert E, Haakestad M W. 550 mJ Q-switched cryogenic Ho:YLF oscillator pumped with a 100 W Tm fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1884-1886.
- [20] Zhao B R, Yao B Q, Qian C P, et al. 231 W dual-end-pumped Ho:YAG MOPA system and its application to a mid-infrared ZGP OPO [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5989-5992.
- [21] Qian Chuanpeng. Research on the high power Ho: YAG laser and its application to pump the mid-and long-wave infrared laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)  
钱传鹏. 高功率Ho: YAG振荡器及泵浦的中长波红外固体激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [22] Yi Chen, Liu Gaoyou, Wang Ruixue, et al. Research progress of nonlinear crystal applied in mid and long-wave infrared solid-state laser [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(8): 1379-1395. (in Chinese)  
陈毅, 刘高佑, 王瑞雪, 等. 非线性晶体应用于中长波红外固体激光器的研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(8): 1379-1395.
- [23] Zelmon D E, Hanning E A, Schunemann P G. Refractive-index measurements and Sellmeier coefficients for zinc germanium phosphide from 2 to 9  $\mu\text{m}$  with implications for phase matching in optical frequency-conversion devices [J]. *J Opt Soc Am B*, 2001, 18(9): 1307-1310.
- [24] Vodopyanov K, Voevodin V. Type I and II ZnGeP<sub>2</sub> travelling-wave optical parametric generator tunable between 3.9 and 10  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Communications*, 1995, 117(3-4): 277-282.
- [25] Kenji F, Michael T H, Azusa O, et al. Tunable mid-infrared (6.3–12  $\mu\text{m}$ ) optical vortex pulse generation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26351-26357.
- [26] Haakestad M W, Fonnum H, Lippert E. Mid-infrared source with 0.2 J pulse energy based on nonlinear conversion of Q-switched pulses in ZnGeP<sub>2</sub> [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8556-8564.
- [27] Fonnum H, Bakklund A, Haakestad M W. Optical parametric oscillator at 8  $\mu\text{m}$  with high pulse energy and good beam quality[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2016: paper MS4C.5.
- [28] Sanchez D, Hemmer M, Baudisch M, et al. 7  $\mu\text{m}$ , ultrafast, sub-millijoule-level mid-infrared optical parametric chirped pulse amplifier pumped at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optica*, 2016, 3(2): 147-150.
- [29] Qian C P, Yao B Q, Zhao B R, et al. High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP<sub>2</sub> master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 715-718.
- [30] Liu G, Chen Y, Yao B, et al. Study on long-wave infrared ZnGeP<sub>2</sub> subsequent optical parametric amplifiers with different types of phase matching of ZnGeP<sub>2</sub> crystals [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(12): 233.
- [31] Liu G, Chen Y, Yao B, et al. 3.5 W long-wave infrared ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator at 9.8  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2347-2350.