

文章编号 2095-1531(2016)06-0615-10

中红外光学参量振荡器技术进展

李 充^{1,2}, 谢冀江^{1*}, 潘其坤¹, 陈 飞¹, 何 洋¹, 张 阔¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 3 ~ 5 μm 中红外激光器在环境污染检测、医疗、工业等领域具有重要的应用价值。本文总结了基于 ZnGeP_2 、 MgO:PPLN 晶体的光参量振荡器(OPO)的国内外发展现状,分析了其各自不同结构系统设计的优势和发展前景。指出高功率、小体积、轻重量的光学参量振荡器是未来重要发展方向,发展的技术核心是生长更大尺寸的中红外激光晶体以及研制更高性能指标的 OPO 泵浦源,并对中红外激光器的发展趋势进行了展望。

关键词: 中红外;光参量振荡器(OPO); ZnGeP_2 ; MgO:PPLN

中图分类号:TN248.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160906.0615

Progress of mid-infrared optical parametric oscillator

LI Chong^{1,2}, XIE Ji-jiang^{1*}, PAN Qi-kun¹, CHEN Fei¹, HE Yang¹, ZHANG Kuo¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: laserxjj@163.com

Abstract: Applications of 3 ~ 5 μm mid-infrared lasers in many fields such as environmental pollution detection, medical treatment and industry are introduced. The development of typical mid-infrared optical parametric oscillator(OPO) based on ZnGeP_2 and MgO:PPLN at home and abroad is summarized in this paper, and the respective advantages and development prospects with different structure of the lasers designed on the two crystals are analyzed. It is indicated that high power and small size OPO is a significant developing direction in the future, and bigger-size infrared crystal and higher performance index of pump sources are the core of the

收稿日期:2016-06-17;修订日期:2016-07-28

基金项目:中国科学院长春光机所创新基金资助项目(No. Y44222C150);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140203010GX)

Supported by Innovation foundation Project of CIOMP, CAS(No. Y44222C150); Jilin provincial Science and Technology Development Project(No. 20140203010GX)

development of OPO. Finally, the development trend of the mid-infrared laser is forecast.

Key words: mid-infrared; optical parametric oscillator(OPO); ZnGeP₂; MgO:PPLN

1 引言

近年来,3~5 μm 中红外波段激光的研究炙手可热。一方面由于此波段内存在众多分子振动谱线,在光谱学及医学方面具有广阔的应用前景,另一方面因为其在氮气、氧气中传输衰减很低,是良好的大气传输窗口,因而可用于民用环境污染检测、红外激光雷达以及红外激光通信等^[1-3]。

目前,中红外激光光源的主要实现方式有光纤激光器、量子级联激光器、Fe:ZnSe 激光器、光学参量振荡器(OPO)。其中,光纤激光器输出光束质量好,可实现全光纤输出,但在中红外波段仅能达到毫瓦量级。量子级联激光器和 Fe:ZnSe 激光器可达瓦级功率输出,前者光束质量一般较差,后者在室温下运转效率较低^[4-5]。而 OPO 功率输出高达数十瓦,且具有体积小、稳定性高、波长可调谐的技术特点,是中红外光源的重要技术实现方式^[6-7]。目前用于 OPO 的非线性晶体主要包括:LiNbO₃(LN)、KTiOAsO₄(KTA)、ZnGeP₂(ZGP)、AgGaS₂、AgGaSe₂、KTiOPO₄(KTP)等,其中,国内外研究最热门的是 ZGP 和 PPLN(周期性畴极化反转铌酸锂)晶体。ZGP 有效非线性系数最大,损伤阈值高,是中红外激光领域应用最广泛的晶体^[8]。而 PPLN 晶体虽然一直被广泛研究,但其损伤阈值低。近年来掺氧化镁 PPLN 晶体,即 MgO:PPLN,其有效非线性系数大,同轴输出无走离且损伤阈值相对 PPLN 晶体有了很大的提高,已成为目前国内外研究的热点^[9-10]。但基于 ZGP 和 PPLN 的两种中红外激光光源相比较,PPLN-OPO 激光器结构更紧凑,而 ZGP-OPO 激光器输出波长的调谐范围更大,在 4 μm 以上的波段更具有优势。

本文主要对 ZGP 和 PPLN 晶体在 OPO 中红外激光器中实现途径及研究进展进行总结,分析其各自的优势和不足,并对 OPO 的发展前景进行展望。

2 国内外研究现状

OPO 通过非线性晶体的准相位匹配,可将高频率的光(ω_p)转换成两束低频率的激光,频率较高的一束为信号光(ω_s),频率较低的为闲频光(ω_i)。泵浦光、闲频光、信号光的频率满足能量守恒条件: $\omega_p = \omega_s + \omega_i$,利用非线性晶体的频率下转换,能将 1 μm 或 2 μm 激光波长转换为所需要的 3~5 μm 波长。OPO 的泵浦源目前主要有光纤激光器和固体激光器两种,固体激光器泵浦的激光器多采用腔内 OPO 的形式,泵浦激光谐振腔与 OPO 的谐振腔共享输出镜,但由于晶体热效应对腔模的影响很大,其稳定输出需仔细优化设计;光纤激光器作为泵浦源多采用腔外 OPO 的形式,泵浦源 OPO 中间加有隔离器,由于二者相互独立,调节方便,能实现泵浦源与 OPO 的单独优化^[11-12]。近年来,ZGP 和 PPLN 晶体在 OPO 应用中发展,两种晶体的生长技术也越来越成熟,目前 OPO 功率输出达到数十瓦,能够实现宽波长调谐,并且输出水平在逐渐提升,两种激光器均有较大的发展空间。

2.1 中红外 ZGP-OPO 的国内外研究现状

ZGP 是获得中红外光源的重要非线性晶体,采用双折射相位匹配技术,其非线性系数 d_{36} 高达 75 pm/v、损伤阈值高达 30 GW/cm,并且热透镜效应相对较弱,易于温度精密控制,最近几年相关科研人员在 ZGP 晶体的生长水平上有着不可小觑的进步。ZGP-OPO 的泵浦源通常为波长 2 μm 的光源,目前能够产生 2 μm 激光的技术途径主要有 3 种:1 064 nm 激光泵浦 KTP-OPO 技术;掺杂 Ho³⁺ 激光晶体直接输出;以及掺杂 Tm³⁺ 激光晶体直接输出^[13-14]。

2008 年,David G. Lancaster 等人采用低脉冲能量的 Nd:YAG 激光器泵浦级联 KTP-OPO 和 ZGP-OPO,其结构如图 1 所示。KTP-OPO 部分采用 4 块 4 mm × 4 mm × 10 mm 的 KTP 晶体串接,

6.3 W 的 Nd:YAG 激光器对其泵浦得到 2.2 W 波长 2.13 μm 的激光输出,用其泵浦长度为 16 mm 的 ZGP,获得 0.5 W 的 3.8 ~ 4.8 μm 的中红外激光输出,输出光经过后面的 OPA 进行放大,最终得到输出功率为 0.84 W^[15]。

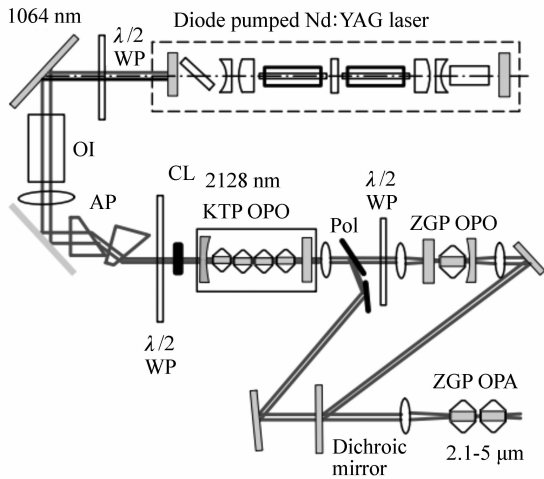


图 1 Nd:YAG 泵浦级联 KTP 和 ZGP

Fig. 1 Cascaded KTP and ZGP pumped by Nd:YAG

由于采用 KTP-OPO 技术途径的输出光束质量较差,并且采用级联方式整体结构较为复杂,稳定性较差,调试也相对困难,现在已经逐渐淡出国内外相关研究人员的视线,应用也越来越少。相比之下,掺杂 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 晶体直接输出 2 μm 波长激光技术途径发展迅速,以此种方式作为 ZGP-OPO 的泵浦源的研究越来越广泛。由于掺杂 Ho^{3+} 的激光晶体吸收谱峰值在 1.9 μm 波长处,目前还不能用 LD 直接泵浦,而采用 Tm 光纤激光器泵浦掺杂 Ho^{3+} 的激光晶体产生 2 μm 波长光源作为 OPO 泵浦源的研究广泛且发展迅速。

2013 年,澳大利亚报道采用 Ho:YAG 作为泵浦源的 ZGP-OPO,其实验原理图如图 2 所示。他们采用两个 Tm 光纤激光器对 Ho:YAG 泵浦,输出的激光对两块长度为 16 mm 的 ZGP 晶体泵浦, OPO 部分采取线型腔结构,通过分析得出腔长越短对出光效率更有利,最终设计腔长 36 mm 时,在 62 W 的功率泵浦下得到在波长 3 ~ 5 μm 的输出功率为 27 W,光光转换效率为 62%,斜效率为 69%^[16]。该中红外激光器的出光效率高,并且在大功率输出上仍有很大的潜力,由于 ZGP-OPO 采

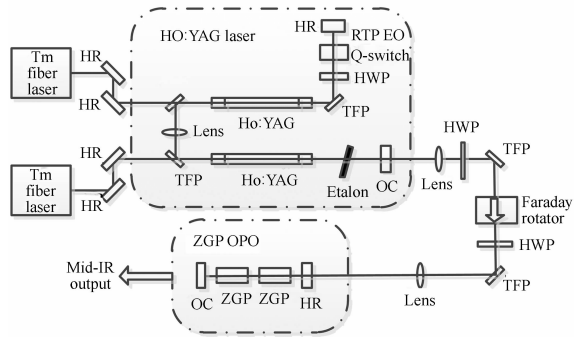


图 2 Ho:YAG 泵浦的 ZGP-OPO

Fig. 2 ZGP-OPO pumped by Ho:YAG

用线型腔结构, Ho:YAG 与 ZGP-OPO 之间需使用隔离器避免回光耦合对泵浦源的损伤,这种腔型结构虽简单易装调,但隔离器的损伤阈值较低,限制了更高功率输出,若采取非线性腔 OPO 在激光器的功率上可望有更大的提升空间。

2014 年,中科院安徽光机所选用自主生长的 ZGP 晶体,用自制的 2.09 μm 波长的 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 电光调 Q, Cr, Tm, Ho:YAG 激光器作为 ZGP-OPO 的泵浦源,结构如图 3 所示。OPO 采用对泵浦光具有双程泵浦的结构以提高转换效率。在单谐振下获得了脉冲能量为 5.9 mJ 的 4.8 μm 波长中红外激光输出,光-光转换效率为 13.1%,斜率效率为 17%;在双谐振振荡下获得了脉冲能量为 9 mJ 的 3.7 μm 波长和 4.8 μm 中红外激光输出,光-光转换效率为 23.9%,斜效率为 26.7%^[17]。该实验发现双谐振模式的出光稳定性较单谐振结构要差,但出光功率更高,所以在激光器的实际应用上,需要考虑需求的侧重点进行设计。

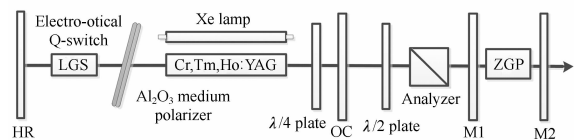


图 3 2.09 μm 调 Q 钬激光泵浦 ZGP-OPO

Fig. 3 ZGP-OPO pumped by Q-switch Ho laser at 2.09 μm

2014 年,哈尔滨工业大学采用 2.1 μm 波长的 Ho:YAG 激光器作为泵浦源,其光路图如图 4 所示。在室温下,采用正交偏振的 Tm:YLF 激光器

在端面泵浦两个 Ho:YAG 晶体,4 个二极管端面抽运 Tm:YLF 激光器的最大输出功率约为 60 W。ZGP-OPO 部分设计为四镜环形腔结构,泵浦光斑尺寸大约为 1 mm,入射在长度为 6 mm × 6 mm × 23 mm 的 ZGP 晶体上,谐振腔采取单通双谐振的形式。该课题组在最高泵浦功率 107 W 时,得到波长 3.94 μm 的信号光以及波长 4.5 μm 的闲频光,出光功率为 41.2 W,转换斜效率为 44.6%^[18]。该课题组在中红外波段的激光输出功率方面处于国内外领先水平,该实验也验证了四镜环形腔结构在大功率器件设计上的优势。另外,晶体长度与泵浦光斑尺寸间的匹配有很大的影响,对其深入分析,有望在功率、效率上有所提高。

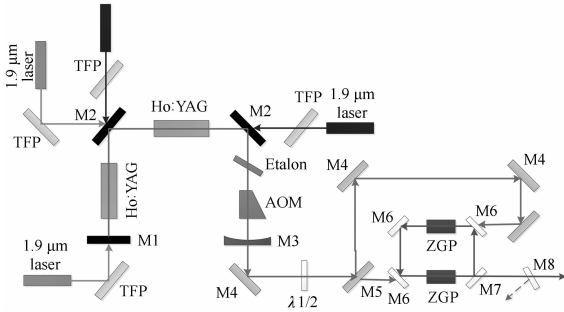


图4 Ho:YAG 激光器泵浦四镜环形腔 OPO

Fig. 4 Four-mirror ring cavity OPO pumped by Ho:YAG laser

采用 Tm 激光器泵浦掺 Ho³⁺ 的激光晶体产生 2 μm 波长光源作为 OPO 泵浦源的技术成熟、应用广泛,但是其自身结构复杂使其在工程应用上受到限制,所以结构紧凑化、简单化是未来的必然发展趋势。目前,单掺 Tm³⁺ 激光器直接泵浦 OPO 也是国内外研究的重要方向。

2008 年,美国 Daniel Creeden 等人首次报道出其设计的采用脉冲掺 Tm 光纤激光器直接泵浦 ZGP-OPO 的中红外激光器。其原理如图 5 所示,增益开关部分为 150 ns、1.55 μm 波长的种子光通过掺铒光纤放大器进行放大,再通过光纤光栅以及一段掺 Tm 光纤使得输出波长为 1.995 μm,使得 OPO 部分与泵浦光得到最佳波长匹配效果,其在 30 Hz 重复频率下输出 30 ns 的脉冲,输出光脉冲通过掺 Tm 光纤放大器,其对输入光增益为

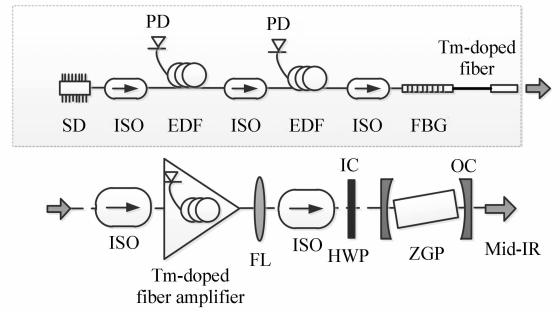


图5 掺 Tm³⁺ 光纤激光器泵浦的 ZGP-OPO

Fig. 5 ZGP-OPO pumped by Tm³⁺ doped fiber

18 dB,放大后的光经聚焦后对 ZGP 进行泵浦,晶体尺寸为 6 mm × 6 mm × 15 mm,谐振腔采用双凹腔结构,ZGP-OPO 同时在 3.4 ~ 3.9 μm 和 4.1 ~ 4.7 μm 波段输出 20 ns 中红外脉冲激光,输出功率超过 658 mW,中红外转换效率为 22%,OPO 总体斜效率为 35%^[19]。

2011 年,光电信息控制和安全技术重点实验室报道了其设计的调 Q 运转掺 Tm 晶体的脉冲激光器泵浦的中红外 OPO 激光器。其实验原理如图 6 所示,Tm:YAG 激光器采用二极管泵浦,激光工作物质 Tm:YAG 晶体为圆柱体,单掺 Tm³⁺ 离子。采用平凹腔结构,有效抑制热效应带来的影响,最终获得大于 10 W 的激光输出,激光脉宽小于 200 ns,散角约为 8 mrad,峰值波长为 1.991 μm。Tm 激光器输出的 2 μm 波长激光经透镜聚焦后入射到 ZGP 晶体上,OPO 腔为平平腔,OPO 输出波长为 3 ~ 5 μm 激光,OPO 信号光和闲频光输出功率达到瓦级,斜效率为 21%,光光转换效率为 23%。

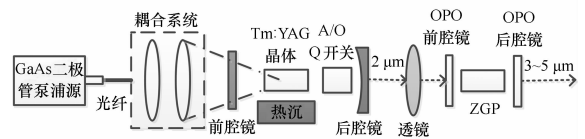


图6 二极管泵浦调 Q Tm:YAG 晶体泵浦 ZGP

Fig. 6 ZGP pumped by diode-pumped Q-switch Tm:YAG

2015 年,美国 French-German 研究所报道了采用波长为 1.98 μm 的调 Q 掺 Tm³⁺ 光纤激光器

泵浦的单通双谐振 OPO,原理如图 7 所示。采用对称的激光二极管泵浦掺 Tm 光纤,激光二极管发射最大功率为 100 W,口径为 200 μm ,发射波长为 792 nm。泵浦光通过 AOM 调整脉冲频率,通过光栅调整发射波长范围在 1.88 ~ 2.06 μm ,ZGP 晶体口径为 4 mm \times 4 mm \times 18 mm,切割角度 54 $^\circ$ 。最终该实验在泵浦功率为 20 W 时,得到波长 3 ~ 5 μm 、6.5 W 的出光功率,光光转换效率为 32%,斜效率为 40%^[21]。该实验采用二极管直接泵浦掺 Tm 光纤激光器作为 OPO 的泵浦源,其结构更精简,LD 泵浦掺杂 Tm³⁺ 光纤激光器已逐步成为 2 μm 波长激光源的主要途径之一,在今后中红外激光器的研究中有很好的前景。

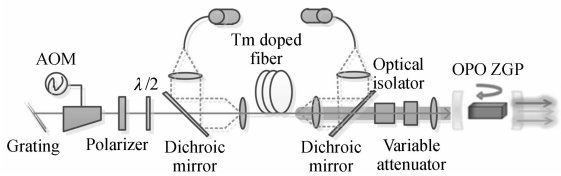


图 7 调 Q 掺 Tm³⁺ 光纤激光器泵浦单通双谐振 OPO
Fig. 7 Single pass double resonant OPO pumped by Q-switch Tm³⁺ doped fiber laser

2.2 中红外 PPLN-OPO 的国内外研究现状

由于 ZGP 晶体采用双折射相位匹配技术,在满足双折射相位匹配的情况下,虽然其有效非线性系数很高,但是对通光方向要求比较精准,光的偏振方向也会对性能有较大影响,并且存在走离效应,限制了它的应用。而准相位匹配技术的出现,可以说是该领域一项重要的技术突破,通过对晶体进行周期极化反转实现频率的转换,显著提高了晶体的非线性转换效率。PPLN 晶体的出现使得准相位匹配技术的发展得到飞跃。其有效非线性系数高,同轴输出无走离。随着氧化镁掺杂技术的出现,又解决了晶体损伤阈值低的问题,所以近年来 MgO:PPLN 晶体在光学参量振荡器中有着越来越广泛的应用^[22-25]。目前基于 PPLN 的 OPO 比较常用的泵浦模式包括光纤激光器泵浦,固体激光器泵浦和半导体激光器泵浦。

采用光纤激光器直接进行外腔泵浦的方式结

构紧凑,易于实现激光器的小型化,应用更便捷,目前国内外的研究较广泛,发展较快。2005 年 Da-Wun Chen 等人报道了使用 50 W 连续线偏振 YDFL ($M^2 = 1.1$) 泵浦 OPO,其系统光路设计图如下图 8 所示。在 OPO 部分采用典型的四镜环形腔结构,5% 掺杂的 MgO:PPLN 晶体置于光纤激光器的束腰处,束腰大小为 70 μm ,晶体尺寸为 0.5 mm \times 5 mm \times 50 mm,极化周期为: $\Lambda = 31.5 \mu\text{m}$,在室温下泵浦 OPO 获得 10 W 的 2.9 μm 波长激光输出^[26]。

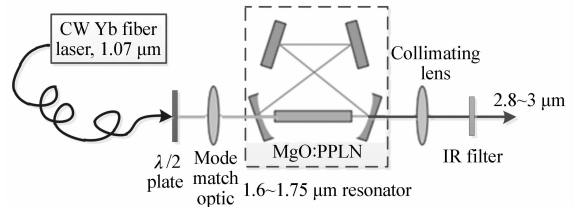


图 8 Yb 光纤激光器泵浦四镜环形腔 OPO
Fig. 8 Four-mirror ring cavity OPO pumped by Yb fiber laser

2014 年,浙江大学课题组用自制线偏振脉冲 YDFL 激光器泵浦 MgO:PPLN 晶体进行 OPO 实验,如图 9 所示。采用双凹腔结构,这种结构简单紧凑,在装调上更方便。他们在 DPSR(双通单谐振)型的 OPO 实验研究中,在 3.83 μm 波长得到 3.3 W 的功率。为了提高功率的稳定性,该课题组还研究了 SPSR(单通单谐振)型的 OPO,在实验中获得平均功率 3.27 W、波长 3.82 μm 的中波红外输出,其稳定性较高,竖直与水平方向的 M^2 值分别为 1.98 和 1.44^[27]。

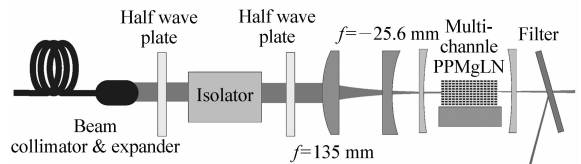


图 9 光纤激光器泵浦 DPSR 型 OPO 实验原理图
Fig. 9 DPSR OPO pumped by fiber laser

近几年采用光纤激光器泵浦实现 PPLN-OPO 输出的典型研究成果总结如表 1 所示。

表1 光纤激光器泵浦中红外 PPLN-OPO 国内外研究现状

Tab.1 Development of mid-infrared PPLN-OPO pumped by fiber laser at home and abroad

年份	研究单位	泵浦源参数	晶体尺寸	中红外输出参数
2008年	University of Helsinki 光纤激光器 20 W	1 064 nm 50 mm × 1 mm	MgO:PPLN 瓦级的中红外输出 ^[28]	2.7 ~ 3.45 μm
2010年	E. L. Ginzton Laboratory, Stanford University	Yb 光纤激光器 20 W	PPLN 50 mm	3.8 μm 附近 1.8 ~ 2W ^[29]
2010年	ICFO-Institut de Ciencies Fotoniques	Yb 光纤激光 30 W	MgO:PPLN 50 mm × 1 mm	3.07 μm 闲频光 9.8 W, $M^2 < 1.28$ 光-光转换效率 61% ^[30]
2014年	山东大学	Yb 光纤激光器 20 W 50 mm × 1 mm	MgO:PPLN 多极化周期 波长可调谐 ^[31]	3.8 μm 处 1 W 光-光转换效率高于 10%
2014年	浙江大学	线偏振脉冲 YDFL 平均 25 W	MgO:PPLN 50 mm × 1 mm × 10 mm	3.83 μm 处 3.3 W M^2 为 1.98 和 1.44 ^[27]

固体激光器泵浦 PPLN-OPO 实现高性能激光输出也有很多研究。2010 年,中国工程物理研究院彭跃峰课题组采用 Nd:YAG 侧泵模块制作 1 064 nm 波长的声光调 Q 固体激光器,泵浦基于 MgO:PPLN 晶体的 OPO,其结构图如图 10 所示。采用平平腔结构,晶体尺寸为 1 mm × 4 mm × 40 mm,为了匹配晶体的口径,他们把泵浦光斑变为椭圆形,使泵浦光能量更好地被吸收,提高晶体

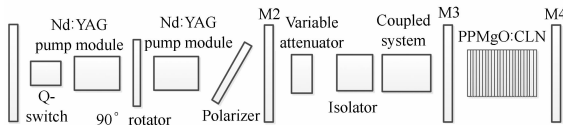


图 10 声光调 Q 固体激光器泵浦 MgO:PPLN-OPO 实验装置

Fig. 10 MgO:PPLN-OPO pumped by Q-switch solid laser

的利用面积,进而得到更高的输出功率。该课题组在平均功率为 105 W 的泵浦下,得到了 22.6 W 的 3.86 μm 波长中红外激光输出。2012 年,该课题组又使用 3 mm 厚度的 MgO:PPLN 晶体,在平均功率 151 W 的 1.06 μm 波长光泵浦下获得了 27.4 W 的 3.91 μm 波长中红外激光输出。显然,更厚的晶体可以进一步提高功率转换效率以及输出的 3 ~ 5 μm 波长激光功率,所以发展更大尺寸的晶体对未来大功率中红外激光器的实现有重要

的作用。但由于采用椭圆光斑,其不对称性必然造成两个方向的光束质量相差很大,需要进一步的完善^[32-33]。

固体激光器作为泵浦源的 OPO,还一种典型的 V 型腔结构。2012 年,天津大学丁欣课题组采用了这种腔形结构实现参量光的振荡增益,实验装置如图 11 所示。用波长为 880 nm 的光纤模块对 Nd:YVO₄ 进行直接泵浦,PPLN 晶体长 24 mm,这种腔的优点在于参量光振荡与泵浦光不共线,避免了回光耦合,保护泵浦源的同时,能够实现参量光振荡光斑可调谐,进而使 OPO 得到更好的匹配效果,实现更高的输出功率。最终在 21.4 W 的泵浦功率下,得到闲频光功率 1.54 W,其波长在 3.66 ~ 4.22 μm 可调谐^[34]。

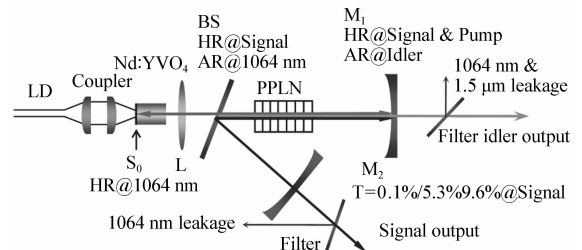


图 11 1.06 μm 连续泵浦 V 形 PPLN-OPO 实验装置
Fig. 11 Schematic diagram of V cavity PPLN-OPO pumped by CW-laser at 1.06 μm

2013 年,法国 Kemlin 等人报道了他们在大体

积 MgO:PPLN 晶体制备技术上的飞跃,晶体尺寸已达到 $5\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ 的水平。该晶体端面制备成柱面,周期为 $28\text{ }\mu\text{m}$,并能够通过改变晶体旋转角度,实现周期可调谐,在室温下实现了 $1.4\text{ }\sim\text{ }4.3\text{ }\mu\text{m}$ 全波段可调谐输出^[35]。该成果为今后国内外中红外 OPO 的研究和发展奠定了基础,可见,随着 MgO:PPLN 晶体制备技术的不断成熟。中红外 OPO 激光技术正逐步走上更高的台阶。

2015 年,华中光电技术研究所设计了一种高功率固体激光器泵浦单谐振 PPLN-OPO,实验装置如图 12 所示,采用半导体双端泵浦 Nd:GdVO₄ 激光振荡器+放大器结构实现高功率、高重复频率脉冲激光输出,其中,LD 为光纤芯径 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\text{NA}=0.22$ 的最大功率 40 W 的光纤耦合输出半导体激光器。由于输出波长存在小范围的波动,通过温度调谐对波长进行精调,得到在泵浦光功率为 34 W 时,OPO 输出闲频光波长 $3.81\text{ }\mu\text{m}$,其平均功率为 5.4 W ,闲频光的光光转换效率为 15.88% ^[36]。

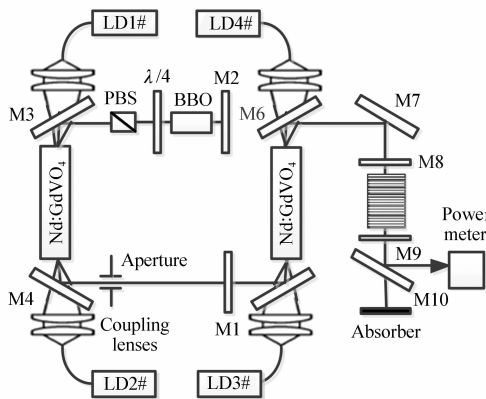


图 12 高功率 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光泵浦单谐振 PPLN-OPO 结构图

Fig. 12 Schematic diagram of single-oscillator PPLN-OPO pumped by high power $1.06\text{ }\mu\text{m}$ laser

目前,在不断追求高功率、波长可调谐的中红外激光输出可实现的前提下,亦有科研人员将目光转向跨周期参量光输出的多参量振荡器。2015 年,长春理工大学报道了基于 MgO:APLN 晶体实现跨周期输出的多参量振荡器,其结构如图 13 所示。泵浦源是中心波长 808 nm 、输出功率 80 W

的光纤耦合模块,经耦合镜组聚焦后泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,采用内腔泵浦的形式。腔镜 M1、M2 构成 1064 nm 激光谐振腔,M2、偏转镜 BS 和 M3 构成多光参量振荡腔,最终得到了波长 $1.57\text{ }\mu\text{m}$ 信号光 3.13 W 、 $3.84\text{ }\mu\text{m}$ 的闲频光 0.85 W 功率的稳定输出^[37]。该实验通过折叠支路的引入,使多光参量振荡腔内的参量光光斑尺寸可调谐,并且实现了跨周期光参量振荡输出,在今后的研究中具有指导作用。

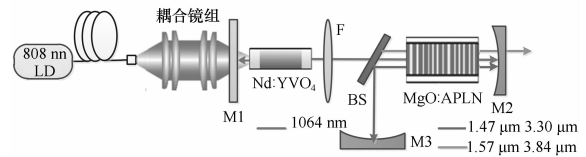


图 13 跨周期参量光输出的多参量振荡器实验装置图

Fig. 13 Schematic diagram of multi-OPO output cross-periods

3 中红外光学参量振荡器展望

3.1 ZGP-OPO 的发展前景

就目前 ZGP-OPO 的发展形势看,ZGP 晶体的生长技术越来越成熟,它具有波长调谐范围宽的特点,使该晶体在 OPO 领域的应用越来越广泛。由于高非线性系数的优势,使其在中红外波段得到非常高的功率输出,是中红外激光光源获得技术上最重要的晶体之一。

经研究发现,大尺寸晶体在大功率的实现上具有重大贡献,所以制备更大、更优质的晶体是未来的发展趋势。另外,在泵浦源上,采用掺杂 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 晶体直接输出 $2\text{ }\mu\text{m}$ 波长激光泵浦 ZGP-OPO 的发展前景非常可观,其在功率输出上有着很大的发展潜力。在效率上,通过光斑尺寸的匹配,有望得到更高的效率。

由于 ZGP-OPO 采用三级泵浦的模式,结构相对复杂,使其在转换效率上还有待提高。对于该晶体在 OPO 的研究上,实现结构简单化、高效率、宽调谐范围是未来的发展方向。

3.2 PPLN-OPO 的发展前景

纵观国内外 PPLN-OPO 的发展现状,此项技

术研究的重点归为以下几点:

(1)更好地改良周期性倏极化反转晶体的生产制备技术。随着生长晶体技术的成熟,我们能够得到透光孔径更大、品质更高的非线性晶体,使 OPO 技术得到更好的推动,使 OPO 输出的参量指标更高。

(2)通过深入的理论研究,不断探索对系统设计的改良,泵浦源是实现高性能 OPO 的重点研究部分。基于 PPLN 的 OPO 目前正向着工程化方向发展,高性能的中红外激光在民用、医疗以及工业上具有重要应用,发展全固化、紧凑型 OPO 是重要的趋势。而光纤激光器外腔泵浦技术由于体积小、寿命长、效率高、重量轻、重复频率高等特点使其更具优势。

(3)由于较长波长的闲频光更容易被 MgO:PPLN 晶体吸收,实验表明,这种吸收会使 OPO 转换效率下降,输出功率受限。因此设计新型 OPO 复合腔及散热结构,缓解热不稳定性,提升输出光束质量是今后研究的重点。另外,因为晶体中存在热透镜效应,会对非线性转换过程造成一定影响,补偿热透镜效应、提高闲频光转换效率是未来重要的研究方向。

PPLN-OPO 理论目前已经比较成型,一些波

段已经出现了定型的产品,而提高中红外波段的功率输出及改善光束质量值得深入研究。

4 结束语

中红外激光光源在民用、工业、医疗等领域应用广泛,本文对近几年国内外发展较快的典型 OPO 技术原理以及系统方案进行了归纳和总结,对不同设计采用的关键技术优势做出了分析。目前,采用 ZGP 和 PPLN 这两种典型晶体的 OPO 激光器的输出功率已达到数十瓦,光光转换效率也不断提高,并且实现了波长可调谐的激光输出,其中采用 ZGP 晶体实现了 3~8 μm 波长宽调谐范围的中红外激光输出,采用 PPLN 晶体实现了 1.4~5 μm 波长可调谐激光输出。新型晶体性能的提升使 OPO 不断向大输出功率、宽波长调谐方向发展。另外,泵浦源及谐振腔的新型结构设计,使 OPO 系统更紧凑,更易于实现工程化,这将是 OPO 未来发展的必然趋势。相信随着晶体制备技术的不断完善,以及泵浦源性能的不不断提高,以 ZGP-OPO 和 PPLN-OPO 为代表的小型、高性能中波红外光参量振荡器技术将迎来快速的发展阶段。

参考文献:

- [1] 任钢. 中红外光参量振荡器及其应用技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
REN G. Research of mid-infrared optical parametric oscillator and applications[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- [2] 谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.
TAN G J, XIE J J, ZHANG L M, et al.. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512. (in Chinese)
- [3] 盛泉. 中近红外连续波可调谐内腔 PPLN 光学参量振荡器研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
SHENG Q. Research on continuous-wave tunable intra-cavity PPLN-OPO operating at mid and near infrared[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [4] KUMAR S, DAS R, SAMANTA G, et al.. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 31-35.
- [5] 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2015(4): 557-566.
PAN Q K. Progress of mid-infrared solid-state laser[J]. *Chinese Optics*, 2015(4): 557-566. (in Chinese)
- [6] ESPEN L, HELGE F, GUNNAR A, et al.. A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26475-26483.
- [7] QUAN S, XIN D, CE S, et al.. Continuous-wave intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator with resonant wave output coupling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27953-27958.
- [8] 何利杰, 侯天禹, 魏磊, 等. 中红外磷锗锌光参量振荡器实验研究[J]. 激光与红外, 2014(9).

- HE L J, HOU T Y, WEI L, *et al.*. Experimental study on mid-infrared ZGP optical parametric oscillator[J]. *Laser Infrared*, 2014, 21(9). (in Chinese)
- [9] LIU S D, WANG Z W, ZHANG B T, *et al.*. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters: English Edition*, 2014, 31(2): 55-58.
- [10] 苏辉,李志平,段延敏,等. 基于掺镁周期极化钽酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光学参量振荡器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1404-1409.
- SU H, LI Z P, DUAN Y M, *et al.*. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1404-1409. (in Chinese)
- [11] 赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZHAO J Q. Study on mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator technique based on MgO:PPLN crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 赵婧. 基于 MgO:PPLN 晶体级联光参量振荡与放大技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- ZHAO J. Study on tandem optical parametric oscillator and amplification technology based on MgO:PPLN crystal [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] MARTIN G, CHRISTIAN G, PANKAJ K, *et al.*. High peak-power mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1212-5.
- [14] SHEN Y J, YAO B Q, CUI Z, *et al.*. A ring ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Ho: LuAG laser[J]. *Applied Physics B Lasers & Optics*, 2014, 117(1): 127-130.
- [15] LANCASTER D G. Efficient Nd: YAG pumped mid-IR laser based on cascaded KTP and ZGP optical parametric oscillators and a ZGP parametric amplifier[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 272-275.
- [16] ALEXANDER H, ALAN D, *et al.*. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10062-9.
- [17] 王礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. 2.09 μm 纳秒钛激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2014(1): 37-40.
- WANG L, YANG J W, CAI X W, *et al.*. 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2014(1): 37-40. (in Chinese)
- [18] YAO B Q, SHEN Y J, DUAN X M, *et al.*. A 41-W ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Ho: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6589-6592.
- [19] DANIEL C, KETTERIDGE P A, BUDNI P A, *et al.*. Mid-infrared ZnGeP₂ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 microm Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 315-7.
- [20] 张晓娟, 蔡军, 许宏, 等. Tm 脉冲激光器泵浦的中红外固体激光器[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(2): 15-17.
- ZHANG X J, CAI J, XU H, *et al.*. Tm pulse laser pumped mid-IR solid state laser[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(2): 5-17. (in Chinese)
- [21] CHRISTELLE K, ANTOINE B, BRENDA D, *et al.*. 6.5W ZnGeP₂ OPO directly pumped by a Q-switched Tm³⁺-doped single-oscillator fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1101-1104.
- [22] HIDEKI I, ICHIRO S, TAKUNORI T. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a 3-mm-thick periodically poled MgO:LiNbO₃ device[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(21): 2527-2529.
- [23] HIDEKI I, TAKUNORI T. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a periodically poled MgO:LiNbO₃ device with a 5 mm × 5 mm aperture[J]. *Optics Letters*, 2005, 30: 2918-2920.
- [24] 吕新杰, 赵刚, 李桂君, 等. 基于 PPLT 晶体的瓦级中红外光参量振荡器研究[J]. *中国科学*, 2009(11): 1594-1598.
- LV X J, ZHAO G, LI G J, *et al.*. Mid-infrared laser with 1.2 W output power based on PPLT[J]. *Science China*, 2009(11): 1594-1598. (in Chinese)
- [25] 魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 基于周期极化钽酸锂晶体的光参变振荡器技术研究[J]. *光学学报*, 2011(6): 145-149.
- WEI X B, PENG Y F, WANG W M, *et al.*. Research on optical parametric oscillator based on periodically poled LiTaO₃ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(6): 145-149. (in Chinese)

- [26] CHEN D W, ROSE T S. Low noise 10-W cw OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005 (CLEO), Baltimore, USA, 2005: 1829-1831.
- [27] 陈滔. 基于准相位匹配技术的高性能光参量振荡器研究[D]. 浙江大学, 2014.
CHEN T. Investigation on the advanced quasi-phase-matching optical parametric oscillators[D]. Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [28] MARKKU V, JARI P, STEFAN P, *et al.*. Singly resonant cw OPO with simple wavelength tuning[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11141-11146.
- [29] IOAKEIMIDI K, SCHWESYG J R, PHILLIPS C R, *et al.*. Singly resonant CW mid-IR optical parametric oscillator pumped by a tunable c-band source for free space coherent optical communications[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, USA, 2010: CThH1.
- [30] KUMAR S, DAS R, SAMANTA G, *et al.*. Stable, 17.5 W, optimally-output-coupled, Yb-fiber-pumped mid-infrared optical parametric oscillator[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, USA, 2010: CThP6.
- [31] LIU S D, WANG Z W, ZHANG B T, *et al.*. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2014, 31(2): 024204.
- [32] PENG Y F, WANG W M, WEI X B, *et al.*. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2897-9.
- [33] PENG Y F, WEI X B, LI D M, *et al.*. High-power mid-infrared tunable optical parametric oscillator based on 3-mm-thick PPMgCLN[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 87-90.
- [34] 于永吉. 基于多重准相位匹配技术的光学参量振荡器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
YU Y J. Study on optical parametric oscillator based on multiple quasi-phase matching techniques[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [35] VINCENT K, DAVID J, JEROME D, *et al.*. Widely tunable optical parametric oscillator in a 5 mm thick 5% MgO:PPLN partial cylinder[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 860-2.
- [36] 李海速, 刘在洲, 郑建奎, 等. 高功率中红外 MgO:PPLN 光参量振荡器[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1).
LI H S, LIU Z ZH, ZHENG J K, *et al.*. High power mid-infrared MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(1). (in Chinese)
- [37] 于永吉, 陈薪羽, 成丽波, 等. 基于 MgO:APLN 的 1.57 μm /3.84 μm 连续波内腔多光参量振荡器研究[J]. 物理学报, 2015(22).
YU Y J, CHEN X Y, CHENG L B, *et al.*. Continuous-wave 1.57 μm /3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015(22). (in Chinese)

作者简介:



李 充(1992—),女,吉林长春人,硕士研究生,2014年于吉林大学获得学士学位,主要从事中红外固体激光器方面的研究。E-mail:18843109663@163.com



谢冀江(1959—),男,江苏镇江人,学士,研究员,硕士生导师,1983年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。E-mail:laserxjj@163.com