

3~5  $\mu\text{m}$  光参量振荡技术进展研究董怡静<sup>1,2</sup> 马秀华<sup>1</sup> 李世光<sup>1</sup> 朱小磊<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 综合评述了产生中红外激光的主要方法,重点阐述了近年来国内外利用光参量振荡方法实现中红外激光输出的最新进展,分析了基于非线性晶体 ZnGeP<sub>2</sub>(ZGP)、KTiOAsO<sub>4</sub>(KTA)和周期性极化 LiNbO<sub>3</sub>(PPLN)的光参量振荡器(OPO)的技术特点和存在的问题,讨论了光参量振荡技术产生中红外激光的发展趋势。

**关键词** 非线性光学; 中红外激光; 光参量振荡器

**中图分类号** TN21 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.090004

3~5  $\mu\text{m}$  Optical Parametric Oscillator TechnologyDong Yijing<sup>1,2</sup> Ma Xiuhua<sup>1</sup> Li Shiguang<sup>1</sup> Zhu Xiaolei<sup>1</sup><sup>1</sup>Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The methods of producing mid-infrared laser are introduced, and the latest progress of the mid-infrared laser output obtained by optical parametric oscillation technology at home and abroad is expounded importantly. The technical characteristics and problems of the optical parametric oscillator (OPO) based on nonlinear crystals, including ZnGeP<sub>2</sub>(ZGP), KTiOAsO<sub>4</sub>(KTA) and periodically poled LiNbO<sub>3</sub>(PPLN), are analyzed. The developing tendency of the mid-infrared laser produced by optical parametric oscillator technology is discussed.

**Key words** nonlinear optics; mid-infrared laser; optical parametric oscillator

**OCIS codes** 190 4360; 140 3580

## 1 引言

3~5  $\mu\text{m}$  波段激光,对大雾、烟尘等具有较强的穿透力,在海平面上受大气气体分子吸收和悬浮物散射的影响较小,在大气中传输时具有较强的透射率,因而成为大气传输衰减最小的红外窗口。此外,该波段覆盖水分子和主要工业污染气体(CH<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、HCl、HF、H<sub>2</sub>S等)的吸收峰,使得激光在传输过程中受污染气体分子共振吸收的影响而衰减,由其衰减程度可判断污染气体的分子浓度,因此,该波段激光可以广泛应用于大气科学中痕量气体分析、大范围陆地与海洋污染分析、煤矿中甲烷气体探测、激光遥感等领域<sup>[1-2]</sup>。在医学应用中,因为生物细胞80%以上由水构成且水对中红外激光有很强的吸收特性,利用高能激光被组织吸收后产生的高热,可使病变组织凝固、碳化,进而使中红外激光治疗具有出血少、术后感染和后遗症少的特点,故该波段激光可广泛应用于生物检测与医疗手术中<sup>[3]</sup>。在军事应用领域,该波段的应用前景主要集中于成像激光雷达和激光定向红外干扰,由于飞机、导弹发动机尾焰光谱主要集中在3~5  $\mu\text{m}$  波段,利用中红外波段凝视成像制导技术可大大提高红外制导导弹的抗干扰能力和灵敏度<sup>[4-5]</sup>。

目前用来实现3~5  $\mu\text{m}$  波段的典型技术路线主要可分为直接产生受激辐射的方法和非线性频率转变两种<sup>[6]</sup>。直接产生受激辐射的器件主要包括半导体量子级联激光器<sup>[7-9]</sup>、光纤激光器<sup>[10-13]</sup>、化学激光器<sup>[14-15]</sup>、

**收稿日期:** 2016-04-20; **收到修改稿日期:** 2016-05-18; **网络出版日期:** 2016-08-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475170)、上海市自然科学基金(12ZR1435100)

**作者简介:** 董怡静(1991—),女,硕士研究生,主要从事中红外光参量振荡器方面的研究。E-mail: Yjdong@siom.ac.cn

**导师简介:** 朱小磊(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

气体激光器<sup>[16-17]</sup>和固体激光器<sup>[18-19]</sup>等。其中,1)半导体量子级联激光器通过多量子阱结构带内辐射可实现 $3\ \mu\text{m}$ 到太赫兹波段激光的输出,输出波长可通过温度或电流进行调谐。但是,目前常温下该类激光器转换效率在1%左右,且结构复杂,生长层次繁多,阈值电流密度大,散热性差,输出功率小,可调谐范围很窄。2)光纤激光器常用氟化物( $\text{ZrF}_4$ 、 $\text{BaF}_2$ 、 $\text{LaF}_3$ 、 $\text{AlF}_3$ 、 $\text{NaF}$ 等)或硫化物( $\text{As}_2\text{S}_3$ )光纤,在氟化物光纤中掺杂 $\text{Ho}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 时输出 $2.7\sim 3\ \mu\text{m}$ 激光,对波长超过 $3\ \mu\text{m}$ 的掺杂硫化物晶体,由于其热效应比较严重,无法获得高功率的激光输出,超过 $4\ \mu\text{m}$ 以后,通常则需要制冷到 $200\ \text{K}$ 以下的温度状态下才能实现高效运转。较高的量子亏损和较低的转换效率限制了光纤激光器的发展。3)化学激光器是利用工作物质本身化学反应释放的能量建立离子数反转进而实现中红外激光输出,主要有氟化氢(HF)和氟化氘(DF)激光器,DF激光器输出波长为 $3.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$ ,HF激光器输出波长为 $2.6\sim 3.3\ \mu\text{m}$ ,两者均可实现数兆瓦输出,但是存在输出光谱较宽、体积大、反应产物的处理难等问题。4)气体激光器主要为基于泛频技术的CO激光器,CO激光器的泛频波段为 $2.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$ ,连续工作时最大功率可达瓦量级,但由于产生的臭氧在高温时易发生爆炸,必须确保激光器低温运行且电光转换效率低。5)固体激光器主要通过掺杂稀土离子( $\text{Ho}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 等)和过渡族金属( $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 等)实现中红外激光输出,其中,以ZnSe为基质材料的掺 $\text{Fe}^{2+}$ 激光器已在室温( $T=300\ \text{K}$ )下可输出可调谐波段为 $3.95\sim 5.05\ \mu\text{m}$ 的中红外激光,但目前激光输出效率比较低<sup>[19]</sup>。

非线性频率转换主要借助于光学参量变化方法实现中红外激光输出,主要包括倍频技术<sup>[20-21]</sup>和中红外光学参量振荡技术<sup>[22-23]</sup>,其中基于 $\text{CO}_2$ 激光器的倍频技术研究最为广泛,技术核心是采用倍频晶体 $\text{AgGaSe}_2$ 、 $\text{ZnGeP}_2$ 等三元黄铜矿晶体输出中红外激光,利用晶体掺杂铜、硫等元素,多块拼接组成晶体阵列,优化光束质量,提高输出功率。该方法的缺点为高功率输出时,输出波长由于功率的增大,谱线范围会有所改变,激光器需要在低温下运行。利用光学参量振荡器(OPO)产生中红外激光是目前最普遍的方法,该方法可实现紫外到 $12\ \mu\text{m}$ 的宽调谐范围输出,且不受抽运光波长的限制。通过周期、温度、角度调谐等技术手段,可利用多种非线性晶体和相位匹配模式获得所需的中红外激光,结构简单、可实现全固化,大大增强了整个激光器系统的稳定性。尤其是近年来基于周期性极化晶体研究的快速发展,通过主动改变适当的极化周期、温度,可实现较宽范围的波长调谐。显然,利用非线性晶体的光学参量振荡技术,是实现高功率、高光束质量的中红外激光输出的有效技术途径,同时也是 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段激光器的研究热点之一。

鉴于光参量振荡产生中红外激光的诸多优势,本文将主要介绍应用最为广泛的 $\text{ZnGeP}_2$ 光参量振荡器(ZGP-OPO)、 $\text{KTiOAsO}_4$ 光参量振荡器(KTA-OPO)、 $\text{LiNbO}_3$ 光参量振荡器(PPLN-OPO)产生 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段激光的研究进展,并对比分析相关的技术特点和关键问题。

## 2 光学参量振荡器产生中红外激光的原理

光学参量振荡器是利用非线性晶体的混频特性来实现频率转换的器件,其工作原理是将特殊设计的非线性晶体放入谐振腔内,一束抽运光入射,同时产生两束新光波,即信号光和空闲光,并且满足 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 的关系,其中 $\omega_p$ 为抽运光频率, $\omega_s$ 为信号光频率, $\omega_i$ 为空闲光频率。根据OPO振荡类型可分为单共振参量振荡器(SRO)和双共振参量振荡器(DRO),如图1所示。SRO输出镜只对单一频率的光(如信号光)谐振输出;DRO镀有对信号光、闲频光的高反膜,即对信号光、闲频光都能形成振荡,其阈值相对较低但输出光的稳定性差。一般来说,影响OPO输出性能的主要因素是抽运光的光束质量和光谱性质,以及非线性晶体本身的理化特性。目前,可应用于中红外激光输出的非线性光学晶体有 $\text{KTiOPO}_4$ (KTP)/周期性极

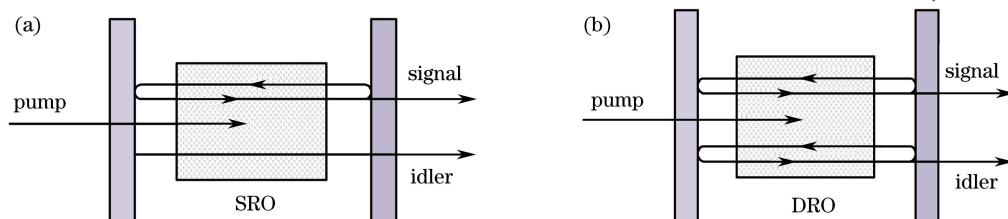


图1 光学参量振荡器(OPO). (a) SRO; (b) DRO

Fig. 1 Schematic of optical parametric oscillator. (a) SRO; (b) DRO

化 KTP(PPKTP)、KTA、ZGP、PPLN、周期性极化 LiTaO<sub>3</sub> (PPLT)、AgGaS<sub>2</sub> 等,表 1 列出了常用双折射相位匹配(BPM)和准相位匹配(QPM)实现光学参量振荡的各种晶体特性<sup>[24]</sup>,表中  $d_{\text{eff}}$  表示有效非线性系数。

表 1 常用的 BPM 和 QPM 非线性晶体特性总结

Table 1 Summary of the characteristics of the commonly used BPM and QPM nonlinear crystal

| Crystal                  | Pump / $\mu\text{m}$ | Transmitting          | $d_{\text{eff}}$          | Absorption                        | Damage threshold @10 ns,             |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                          |                      | range / $\mu\text{m}$ | /( $\text{pm}/\text{V}$ ) | @1~4 $\mu\text{m}/\text{cm}^{-1}$ | 1064 nm /( $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) |
| LiNbO <sub>3</sub> (LN)  | 1.0                  | 0.33~5.5              | 5.4                       | <0.06                             | 0.06                                 |
| KTA                      | 1.0                  | 0.35~5.3              | 3.2                       | <0.01                             | 0.6                                  |
| KTP                      | 1.0                  | 0.35~4.00             | 16.9                      | 0.45 @3.3 $\mu\text{m}$           | 1.3                                  |
| ZnGeP <sub>2</sub> (ZGP) | 2.1                  | 0.7~5.3               | 75                        | <0.01                             | 30                                   |
| AgGaS <sub>2</sub>       | 1.0                  | 0.5~13                | 13                        | <0.09                             | 0.025                                |
| AgGaSe <sub>2</sub>      | 1.55                 | 0.7~18                | 33                        | <0.09                             | 0.025                                |
| OPGaAs                   | 2.0                  | 1.0~13                | 52                        |                                   | 0.035                                |
| PPLN                     | 1.0                  | 0.4~5.5               | 16                        |                                   | 0.27                                 |
| PPLT                     | 1.0                  | 0.28~4.5              | 9                         |                                   | 0.58                                 |
| PPKTP                    | 1.0                  | 0.35~4.5              | 5.3                       |                                   | 1.0                                  |

### 3 光学参量振荡器产生中红外激光输出的研究进展

#### 3.1 3~5 $\mu\text{m}$ ZGP-OPO 产生中红外激光输出的研究进展

ZGP 晶体具有大的非线性系数( $d_{36}=75 \text{ pm}/\text{V}$ )、较高的抗激光损伤阈值( $30 \text{ GW}/\text{cm}^2$ )、高的热导率、好的机械性能以及宽的光谱透射范围,可适用于中红外波段高平均功率激光的输出。利用 ZGP 晶体产生中红外激光常用的抽运方法主要有两种:1)直接利用掺 Tm<sup>[25]</sup>、Ho 等元素的激光器得到  $2 \mu\text{m}$  激光;2)使用级联激光器得到  $2 \mu\text{m}$  激光,如以 Tm:YLF 或 Tm:YAG 输出的  $1.9 \mu\text{m}$  激光抽运 Ho:YAG<sup>[26]</sup>、Tm:YLF<sup>[27]</sup> 等掺杂晶体或采用  $1.06 \mu\text{m}$  激光抽运 KTP-OPO<sup>[28]</sup> 等实现  $2 \mu\text{m}$  激光输出。表 2 列出了近年来 ZGP 晶体产生中红外激光输出的研究进展,表 2 中  $\theta$  为入射光波矢与晶体  $z$  轴的夹角, $\phi$  为波矢在  $xoy$  平面内的投影与  $x$  轴的夹角,下同。从表中可以看出,ZGP-OPO 输出的信号光、闲频光都在中红外范围,并且中红外激光转换效率高、功率大,这主要是因为 ZGP-OPO 的抽运波长为  $2 \mu\text{m}$ ,比较接近输出的波长,量子转换效率高。目前利用 ZGP-OPO 是获得高功率中红外激光输出最有效的方法,但由于 ZGP 晶体生长比较困难,国内难以获得优质的 ZGP 晶体,且存在中红外镀膜工艺困难、高功率光参量振荡逆转换不易控制等技术瓶颈,因此,ZGP-OPO 输出中红外激光的功率难以得到明显的提升。但是,研究人员通过 OPO 与光参量放大器(OPA)的有效结合,实现了提高中红外激光输出功率的目的。2008 年,Dergachev 等<sup>[29]</sup>实现了主振荡功率放大(MOPA)的 Ho:YLF 的抽运源抽运 ZGP-OPO/OPA 中红外激光系统,抽运源为重复频率 500 Hz、单脉冲能量 150 mJ 的 Ho:YLF 激光器,此抽运光经能量比 1:2 分束,分别抽运 OPO 和 OPA 的晶体,由 OPO 获得的 10 mJ 左右的  $3.4 \mu\text{m}$  波长信号光经 OPA 放大后达到 30 mJ。2015 年,挪威的 Lippert<sup>[30]</sup>报道了采用连续的  $1.9 \mu\text{m}$  掺 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YLF 激光器获得 0.55 J 的  $2.05 \mu\text{m}$  脉冲激光,然后利用获得的激光抽运三镜 V 型环形腔 ZGP-OPO,再通过 ZGP-OPA 放大获得大于 200 mJ 的  $3\sim 5 \mu\text{m}$  激光输出。

#### 3.2 3~5 $\mu\text{m}$ KTA-OPO 产生中红外激光输出的研究进展

与 KTP 晶体相比,KTA 晶体克服了 KTP 在  $3\sim 5 \mu\text{m}$  波段吸收损耗大的问题,其透光范围为  $350\sim 5300 \text{ nm}$ ,双轴晶体具有损伤阈值高(大于  $500 \text{ MW}/\text{cm}^2$ )、导热系数小、物化性能稳定等优点,当利用 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub> 等激光器作为抽运源时,可以通过两块串联补偿的 KTA 晶体实现走离补偿,并利用非临界相位匹配实现高质量中红外激光输出<sup>[36]</sup>。在高功率抽运时,热效应小,适合高重复频率和高能量中红外激光输出<sup>[37]</sup>。但是,KTA 晶体对于波长大于  $3.6 \mu\text{m}$  的光波不存在有效的相位匹配角,且会导致大的走离角,因此,为了获得波长大于  $3.6 \mu\text{m}$  的激光输出,通常采用  $41.2^\circ$  切割的高损伤阈值 KTA 晶体<sup>[25]</sup>。但其非线性系数和增益较小,导致 KTA-OPO 的起振阈值较高,转换效率低。可以预见,在 KTA 晶体损伤阈值容许的范围内,优质的 KTA 晶体和中红外镀膜技术的提升,有望进一步增大 KTA-OPO 的输出功率。表 3

列出了近年来 KTA-OPO 产生中红外激光输出的研究进展。

表 2 ZGP-OPO 近年来研究进展

Table 2 Research development of the ZGP-OPO in recent years

| Research unit (year)   | Pump  | OPO   | Output   |
|--|---|---|--|
| China Academy of Engineering Physics <sup>[28]</sup> (2011)                | KTP-OPO 2.1 $\mu\text{m}$<br>15 W, 8 kHz                                | 8 mm $\times$ 6 mm $\times$ 18 mm<br>ZGP DRO<br>angle-tuned Type I      | 4.10 $\mu\text{m}$ , 4.32 $\mu\text{m}$ @ 5.7 W<br>slope efficiency 46.6%                      |
| Northchina Institute of Photoelectric Technology <sup>[31]</sup> (2012)    | Tm:YAP 1.99 $\mu\text{m}$<br>13.7 W 10 kHz                              | plane-plane<br>ZGP DRO Type I   | 3~5 $\mu\text{m}$ @ 7.16 W<br>slope efficiency 48.9%<br>efficiency 49.4%                       |
| Electro-Optic Technology Group, <i>et al</i> <sup>[26]</sup> (2013)        | Ho:YAG 2.1 $\mu\text{m}$<br>13.1 W 50 ns                                | ZGP length 16 mm<br>walk-off compensation                               | 3~5 $\mu\text{m}$ @ 27.1 W<br>slope efficiency 67%<br>efficiency 62%                           |
| University of Central Florida, <i>et al</i> <sup>[25]</sup> (2014)         | Tm <sup>3+</sup> :fiber<br>MOPA, ~1980 nm<br>~700 $\mu\text{J}$ , 4 kHz | 5 mm $\times$ 4 mm $\times$ 12 mm<br>ZGP DRO Type I                     | 3.7 $\mu\text{m}$ @ 90 $\mu\text{J}$<br>total energy 284 $\mu\text{J}$<br>slope efficiency 49% |
| Key Laboratory of Solid State Laser Technology <sup>[32]</sup> (2014)      | Tm:YAP 2 $\mu\text{m}$ , 32 W<br>10 kHz                                 | ZGP DRO Type I<br>$\theta=58.3^\circ$                                   | 3.45 $\mu\text{m}$ , 4.8 $\mu\text{m}$ @ 10.5 W<br>efficiency 33.8%                            |
| Harbin Institute of Technology <sup>[33]</sup> (2014)                      | Ho:LuAG 2.1 $\mu\text{m}$ , 13.1 W<br>5 kHz                             | ring cavity ZGP<br>length 18 mm $\theta=55^\circ$                       | 3~5 $\mu\text{m}$ @ 5.51 W<br>slope efficiency 59%   |
| Harbin Institute of Technology <sup>[34]</sup> (2014)                      | Ho:YAG 2.1 $\mu\text{m}$ , 107 W<br>20 kHz                              | 6 mm $\times$ 6 mm $\times$ 23 mm<br>ring cavity<br>two ZGP in parallel | 3.94 $\mu\text{m}$ , 4.5 $\mu\text{m}$ @ 41.2 W<br>efficiency 38.5%                            |
| French-German Research Institute of Saint-Louis ISL <sup>[35]</sup> (2015) | Tm fiber<br>1.98 $\mu\text{m}$ , 20 W<br>40 kHz, 65 ns                  | ZGP DRO<br>4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 18 mm                            | 3~5 $\mu\text{m}$ @ 6.5 W<br>slope efficiency 40%<br>efficiency 32%                            |
| Northchina Institute of Photoelectric Technology <sup>[27]</sup> (2015)    | Ho:YLF 2050 nm<br>53.7 W, 5 kHz   | ZGP DRO, angle-tuned<br>$\theta=56.5^\circ, \phi=0^\circ$               | 3750 nm, 4500 nm @ 26.9 W<br>efficiency 50%  |

表 3 KTA-OPO 近年来研究进展

Table 3 Research development of the KTA-OPO in recent years

| Research unit (year)  | Pump  | OPO   | Output  | Remarks                          |
|---|---|---|---|----------------------------------|
| Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences <sup>[26]</sup> (2011) | Q-switched Nd:YAG<br>8 ns, 10 Hz<br>71 mJ             | 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 20 mm<br>KTA, $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$<br>extracavity                      | 3.46 $\mu\text{m}$<br>@ 10.2 mJ<br>efficiency 14%     |                                  |
| Shandong University <sup>[36]</sup> (2012)  | Q-switched Nd:YVO <sub>4</sub><br>25.9 W<br>40~60 kHz | 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 20 mm<br>KTA, $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$<br>intracavity type II non-critical | 3467 nm @ 1.18 W<br>2.9 ns<br>efficiency 4.6%         |                                  |
| Tsinghua University <sup>[25]</sup> (2013)  | Q-switched Nd:YAG<br>1064 nm, 10 ns<br>10 Hz          | 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 20 mm<br>walk-off compensation<br>$\theta=41.2^\circ, \phi=0^\circ$             | 3.75 $\mu\text{m}$ @ 60 mJ<br>7 ns<br>efficiency 7.5% | threshold<br>450 mJ              |
| European Aeronautic Defense and Space <sup>[38]</sup> (2014)  | Nd:YAG, MOPA<br>1064 nm, 20 Hz<br>peak-power 400 W    | 6 mm $\times$ 8 mm $\times$ 15(20) mm<br>SRO, walk-off compensation<br>$\theta=74.3^\circ, \phi=0^\circ$      | 3.3 $\mu\text{m}$ @ 4.7 mJ<br>efficiency 9%           | laser ultrasound<br>measurements |
| Laser Zentrum Hannover, <i>et al</i> <sup>[39]</sup> (2015)   | Q-switched Nd:YAG<br>1064 nm, 21 ns<br>1 kHz          | 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 20 mm<br>SRO, walk-off compensation<br>$\theta=74.3^\circ, \phi=0^\circ$          | 3.3 $\mu\text{m}$ @ 1.7 mJ<br>efficiency 10%          | laser ultrasound<br>excitation   |

### 3.3 3~5 $\mu\text{m}$ PPLN-OPO 产生中红外激光输出的研究进展

$\text{LiNbO}_3$  晶体透射波长为 330~5500 nm, 具有较高的非线性系数( $d_{31} = 4.35 \text{ pm/V}$ ), 但由于其损伤阈值( $100 \text{ MW/cm}^2$ )较低, 不易实现较高能量的激光输出。近年来基于 PPLN 和 QPM 的发展, PPLN-QPM 光学参量振荡器成为中红外激光的一个研究热点。通过控制 PPLN 极化周期和温度, 可实现宽调谐范围高品质的中红外激光输出, 但 PPLN 在常温下抗光损伤能力较差, 需要加热到一定温度才能实现有效的光频转换, 限制了其应用。因此, 在 PPLN 晶体中掺入摩尔分数为 5% 的  $\text{MgO}$ , 可极大地降低其矫顽场, 提高材料的抗光损伤阈值, 从而实现常温下的光频转换。目前, 限制 PPLN/PPMgLN 的主要因素是: PPMgLN 因受电场击穿阈值的限制, 加工厚度较窄(均在毫米量级), 损伤阈值较低, 限制了抽运功率水平, 不易实现较高能量的输出。表 4 为近年来 PPLN 光参量放大技术获得中红外激光输出的研究进展, 表中 FWHM 为半峰全宽。

表 4 近年来 PPLN-OPO 的研究进展

Table 4 Research development of the PPLN-OPO in recent years

| Research unit (year)  | Pump  | OPO   | Output   |
|---|---|---|--|
| China Academy of Engineering Physics <sup>[42]</sup> (2010)   | Q-switched Nd:YAG<br>1064 nm<br>150 W, 10 kHz                 | 1 mm×5 mm×45 mm<br>grating period 29.2 $\mu\text{m}$<br>temperature tuning, SRO | 3.86 $\mu\text{m}$ @ 22.6 W<br>efficiency 17.8%<br>3.7~3.9 $\mu\text{m}$       |
| Zhejiang University <sup>[43]</sup> (2010)  | Q-switched Nd:YVO <sub>4</sub><br>1063 nm<br>48.2 W, 52 kHz   | 1 mm×10 mm×50 mm<br>grating period<br>tuning double-pass                        | 3.82 $\mu\text{m}$ @ 9.23 W<br>efficiency 19.2%                                |
| Tsinghua University <sup>[44]</sup> (2010)  | Q-switched Nd:YVO <sub>4</sub><br>1064 nm<br>25.1 W, 76.8 kHz | 5 mm×1 mm×30 mm<br>Type II  | 3.164 $\mu\text{m}$ @ 4.3 W<br>efficiency 17.1%<br>3.25~3.95 $\mu\text{m}$     |
| University of Southampton, <i>et al</i> <sup>[45]</sup> (2012)                                      | Yb <sup>3+</sup> fiber<br>1.06 $\mu\text{m}$<br>58 W, 100 kHz | 2 mm×2 mm×50 mm<br>PPMgLN, 29.4 $\mu\text{m}$<br>SRO                            | 3.82 $\mu\text{m}$ @ 5.5 W<br>efficiency 9.4%                                  |
| Xiamen University of Technology <sup>[46]</sup> (2015)  | Q-switched Nd:YAG<br>1064 nm<br>4~50 kHz                      | PPLN length 45 mm<br>grating period<br>tuning SRO                               | 2.95~4.16 $\mu\text{m}$<br>3.16 $\mu\text{m}$ @ 537 mW                         |
| Institute De Ciencias Fotoniques, <i>et al</i> <sup>[47]</sup> (2015)                               | mode-locked Yb-fiber<br>1.06 $\mu\text{m}$ , 20 W<br>80 MHz   | 35 mm×15 mm×5 mm<br>PPMgLN, 28 $\mu\text{m}$<br>ring-cavity, SRO                | 2418~4307 nm<br>1413~1900 nm<br>efficiency 45%                                 |
| Shenzhen University, <i>et al</i> <sup>[48]</sup> (2015)  | Q-switched Er:YAG<br>wavelength locked<br>1645 nm             | 5 mm×1 mm×50 mm<br>PPMgLN, 31.5 $\mu\text{m}$<br>SRO                            | 4.31 $\mu\text{m}$ FWHM 6 nm<br>efficiency 35.5%<br>4.17~4.31 $\mu\text{m}$    |
| The French Aerospace Laboratory, <i>et al</i> <sup>[41]</sup> (2011)                                | Q-switched Nd:YAG<br>1064 nm<br>16 $\mu\text{J}$ , 4.8 kHz    | PPMgLN length 48 mm<br>NesCOPO, DRO   | 3.8~4.3 $\mu\text{m}$<br>3.9 $\mu\text{m}$ @ 5.5 W<br>efficiency 6%            |
| Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences <sup>[49]</sup> (2012) | Q-switched Tm:YLF<br>1907.5 nm<br>2.9 W, 2 kHz                | 1 mm×3 mm×50 mm<br>PPMgLN, 30.5 $\mu\text{m}$                                   | DRO<br>3.6~4.1 $\mu\text{m}$ @ 900 mW<br>efficiency 31%                        |
| National Research University of Electronic Technology <sup>[40]</sup> (2013)                        | distributed feedback (DFB) laser<br>1064 nm<br>10~500 kHz     | 5 mm×5 mm×35 mm<br>PPMgLN, 29.9 $\mu\text{m}$<br>injection-seeding              | 3.4~3.2 $\mu\text{m}$<br>3.2 $\mu\text{m}$ @ 30 $\mu\text{J}$<br>efficiency 5% |

### 3.4 可调谐窄线宽 OPO 产生中红外激光输出的研究进展

目前, 基于准相位匹配的普通光学参量振荡器虽然具有可利用晶体最大非线性系数、采用多种方式调谐、无走离效应、结构紧凑、可实现室温运转等优点, 但宽的光参量增益范围和高功率抽运往往导致多模运转, 信噪比差, 不能满足对线宽和灵敏度要求比较高的光谱学、遥感、环境探测等应用领域的要求。因此, 探究可调谐窄线宽工作方式的 OPO 中红外输出极为重要。线宽压缩技术包括主动和被动两种形式。主动方式主要有注入种子法, 它是一种有效的线性压缩方法, 可提高 OPO 的运转性能, 降低谐振阈值, 但调谐范围

受单模种子源的制约。2013年,俄国的 Mer'Nikov<sup>[40]</sup>等利用分布反馈式(DFB)半导体激光器、两级光纤放大、光参量振荡腔以及单模 1538 nm 种子激光实现了中红外激光的输出,无种子注入时信号光带宽超过 10 nm,而有种子注入时信号光输出带宽降到了 0.2 nm。被动选模结构简单,通过在谐振腔内使用一个频率选择元件,如标准具、闪耀光栅、布拉格光栅等,获得单纵模输出。但是这种方法通常会增加损耗而降低 OPO 的性能,如增加振荡阈值和降低转换效率等。2011年,法国航空航天实验室的 Hardy 等<sup>[41]</sup>报道了一种采用复合腔、双谐振参量振荡结构(NesCOPO)实现宽调谐中红外激光输出。通过在光参量谐振腔内插入一块具有特定波长镀膜特性的镜片,实现信号光、闲频光双谐振输出,并利用压电陶瓷(PZT)精确调整谐振腔长,使其在参量增益带宽范围内,获得单模信号光、空闲光输出。

## 4 结 论

在利用 OPO 输出 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光的技术中,ZGP 晶体具有非线性系数高、导热性能好、透射频谱宽、损伤阈值高、转换效率大等特点,结合 OPA 放大技术,可实现高重复频率、高功率激光输出。但由于其抽运源为 2  $\mu\text{m}$  激光,结构复杂,转换效率低,因此高功率抽运源是限制其应用的主要问题。KTA 晶体具有良好的机械和光学性能,导热性好,高功率工作时不会产生热透镜效应,但由于角度匹配存在走离效应,需要两块 KTA 串联补偿,且非线性系数小,导致起振阈值高和转换效率低。目前,应用最广泛的 PPLN 晶体具有较高的非线性系数,并且由于准相位匹配的技术发展,无走离效应,起振阈值低,在简化激光器结构方面具有重要的潜在价值。可通过调谐 PPLN 晶体的周期、温度、角度来抽运高重复频率、高功率的激光二极管、光纤激光器以及固体激光器,整个装置可以做的小型化、全固化,在未来高功率、高重复频率、宽调谐、窄线宽中红外激光输出方面具有巨大的应用前景。

总之,OPO 的有效运作,都受到抽运光的光谱特性和光束质量、非线性晶体的质量和中红外膜层的抗损伤阈值以及对激光的透射谱等多个因素的限制。因此,目前的研究重点集中在改进抽运源的性能和抽运方式,改善其光束质量,提高转换效率,寻找新的非线性晶体,优化非线性晶体的性能,提高中红外晶体镀膜技术,优化谐振腔结构等方式,使其获得更高功率、更窄线宽、更宽调谐范围的激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 Numata K, Riris H, Li S X, *et al.* Ground demonstration of trace gas lidar based on optical parametric amplifier[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(5): 063561.
- 2 Moulton F, Dergachev A, Lsyanova Y, *et al.* Recent advances in solid state lasers and nonlinear optics for remote sensing [C]. *SPIE*, 2003, 4893: 193-202.
- 3 Guo B J, Wang Y, Peng C, *et al.* Laser-based mid-infrared reflectance imaging of biological tissues[J]. *Optics Express*, 2004, 12(1): 208-219.
- 4 Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 536-550.  
范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 536-550.
- 5 Gan Yuanliu, Xu Shilu. Current situation and development of the IR countermeasures system on America helicopter[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(1): 7-10.  
涂元柳, 徐世录. 美国直升机载红外干扰系统的现状与发展[J]. *激光与红外*, 2006, 36(1): 7-10.
- 6 Liu Zunyang, Bian Jintian, Shao Li, *et al.* Progress of mid-infrared laser technology[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 853-858.  
刘尊洋, 卞进田, 邵立, 等. 中红外激光技术研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(8): 853-858.
- 7 Gmachl C, Capasso F, Sivco D L, *et al.* Recent progress in quantum cascade lasers and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2001, 64(1): 1533-1601.
- 8 Garbuzov D Z, Lee H, Khalfin V, *et al.* 2.3-2.7  $\mu\text{m}$  room temperature CW operation of InGaAsSb-AlGaAsSb broad waveguide SCH-QW diode lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(7): 794-796.
- 9 Lenhardt T, Hümmer M, Röbner K, *et al.* Continuous wave single mode operation of GaInAsSb/GaSb quantum well lasers emitting beyond 3  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 183508.

- 10 Tokita S, Murakami M, Shimizu S. High power 3  $\mu\text{m}$  erbium fiber lasers[C]. Advanced Solid State Lasers, 2014, AM3A: AM3A.4.
- 11 Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fiber laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
- 12 Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J. Mid-infrared fiber lasers at and beyond 3.5  $\mu\text{m}$  using dual-wavelength pumping[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 493-496.
- 13 Bernier M, Fortin V, Caron N, *et al.* Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 127-129.
- 14 Wang Xu, Xie Jijiang, Pan Qikun, *et al.* Research progress of non-chain HF/DF laser[J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 340-349.  
王旭, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式 HF/DF 激光器的研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 340-349.
- 15 Yi Aiping, Liu Jingru, Tang Ying, *et al.* Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 360-366.  
易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 360-366.
- 16 Yu Qingxu, Li Hong, Lin Junxiu. A CO-overtone laser based photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2003, 14(7): 669-671.  
于清旭, 李红, 林钧岫. 基于泛频 CO 激光器的微量气体光声光谱仪[J]. 光电子·激光, 2003, 14(7): 669-671.
- 17 Lin Junxiu, Wang Xiaoxu, Yu Qingxu. 3.0~4.2  $\mu\text{m}$  low temperature cooled first overtone CO-laser[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(4): 617-624.  
林钧岫, 王晓旭, 于清旭. 低温 3.0~4.2  $\mu\text{m}$  波段第一泛频一氧化碳激光器[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(4): 617-624.
- 18 Zhang Liming, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.* Introduction of  $\text{Fe}^{2+}$  doped mid-infrared solid state laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 360-364.  
张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等.  $\text{Fe}^{2+}$  掺杂中红外固体激光器技术综述[J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 360-364.
- 19 Myoung N S, Miror M S, Fedorov V V, *et al.* High-energy gain-switched mid-infrared lasers based on Cr and Fe doped Zn Se[C]. CLEO: 2011-Laser Applications to Photonic Applications, 2011, CMY: CMY4.
- 20 Gu Xin'an, Zhu Weizhen, Luo Zhiwei, *et al.* Optical properties and application of GaSe:AgGaSe<sub>2</sub> crystal[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 57-63.  
古新安, 朱韦臻, 罗志伟, 等. GaSe:AgGaSe<sub>2</sub> 晶体的光学性能及应用[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 57-63.
- 21 Zhang Xingliang, Guo Lihong, Zhang Chuansheng, *et al.* Design of high-voltage pulse trigger system for CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 416-422.  
张兴亮, 郭立红, 张传胜, 等. CO<sub>2</sub> 激光器高压脉冲触发系统的设计[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 416-422.
- 22 Su Ning, Zhang Mao, Ren Gang, *et al.* Progress and applications of 3~5  $\mu\text{m}$  optical parametric oscillator[J]. Optical Technique, 2013, 39(4): 359-364.  
苏宁, 张茂, 任刚, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  光学参量振荡器研究进展及其应用[J]. 光学技术, 2013, 39(4): 359-364.
- 23 Ruan Peng, Xie Jijiang. The latest progress of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Laser Journal, 2010, 31(4): 1-3.  
阮鹏, 谢冀江. 中红外光参量振荡器的最新进展[J]. 激光杂志, 2010, 31(4): 1-3.
- 24 Wei Xingbin. Study on theoptical parametric oscillation technique of mid infrared PPLN[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010: 6.  
魏星斌. 中红外 PPLN 光参量振荡技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010: 6.
- 25 Gebhard M, Gaida C, Kadwani P, *et al.* High peak-power mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1212-1215.
- 26 Hemming A, Richards J, Davidsin A, *et al.* A 27 W mid-IR laser source[C]. Quantum Electronics Conference & Lasers and Electro-Optics, 2011, 16(2): 624-626.
- 27 Han Long, Yuan Ligang, Chen Guo, *et al.* 26 W mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302004.  
韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W 中波红外固体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302004.
- 28 Peng Y F, Wei X B, Wang W M. Mid-infrared optical parametric oscillator based on ZnGeP<sub>2</sub> pumped by 2  $\mu\text{m}$  laser[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 061403.

- 29 Dergachev A, Armstrong D, Smith A, *et al.* High-power, high-energy ZGP OPA Pumped by a 2.05  $\mu\text{m}$  Ho:YLF MOPA system[C]. SPIE, 2008, 6875: 687507.
- 30 Lippert E. High power and high energy infrared parametric sources[C]. 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2015, SW3O: SW3O.3.
- 31 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.* ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702006.  
魏磊, 肖磊, 韩隆, 等. Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光参量振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702006.
- 32 He Lijie, Hou Tianyu, Wei Lei, *et al.* Experimental study on mid-infrared ZGP optical parametric oscillator[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9): 991-993.  
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, 44(9): 991-993.
- 33 Shen Y J, Yao B Q, Cui Z, *et al.* A ring ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Ho:LuAG laser[J]. Applied Physics B, 2014, 117(1): 127-130.
- 34 Yao B Q, Shen Y J, Duan X M, *et al.* A 41-W ZnGeP<sub>2</sub> optical oscillator pumped by a Q-switched Ho:YAG laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6589-6592.
- 35 Kieleck C, Berrou A, Domelan B, *et al.* 6.5 W ZnGeP<sub>2</sub> OPO: Tm<sup>3+</sup> doped single-oscillator fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1101-1104.
- 36 Bai F, Wang Q P, Liu Z J, *et al.* Theoretical and experimental studies on output characteristics of an intracavity KTA OPO[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 807-815.
- 37 Liu Z J, Wang Q P, Zhang X Y, *et al.* Coexistent optical parametric oscillation and stimulated Raman scattering KTiOAsO<sub>4</sub> [J]. Optics Express, 2008, 16(21): 17902-17907.
- 38 Mahnke P, Peuser P, Huke P. Nd:YAG laser/KTiOAsO<sub>4</sub> (KTA) OPO system for laser ultrasound measurements on carbon-fiber-reinforced composite materials[J]. Applied Physics B, 2014, 116(2): 333-338.
- 39 Puncken O, Gandara D M, Damjanic M, *et al.* 1 kHz 3.3  $\mu\text{m}$  Nd:YAG KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator system for laser ultrasound excitation of carbon-fiber-reinforced plastics[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1310-1317.
- 40 Mel' Nikov I V, Machnev A A, Novozhylov P B, *et al.* Compact mid-IR source based on a DFB diode, fiber amplifier, and PPLN[J]. SPIE, 2013, 8601: 860132.
- 41 Hardy B, Berrou A, Guilbaud S, *et al.* Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 678-680.
- 42 Peng Y F, Wei X, Wang W M, *et al.* High-power 3.8  $\mu\text{m}$  tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN [J]. Optics Communications, 2010, 283(20): 4032-4035.
- 43 Wu B, Kong J, Shen Y H. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1118-1120.
- 44 Liu J, Liu Q, Yan X, *et al.* High repetition frequency PPMgOLN mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(9): 630-633.
- 45 Lin D J, Alam S, Shen Y H, *et al.* An all-fiber PM MOPA pumped high-power OPO at 3.82  $\mu\text{m}$  based on large aperture PPMgLN[C]. SPIE, 2012, 8237: 82371K.
- 46 Lin Hongyi, Huang Xiaohua, Xu Yingchao, *et al.* Mid-infrared tunable pulsed optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021402.  
林洪沂, 黄晓桦, 许英朝, 等. PPMgLN 中红外宽调谐脉冲光参变振荡器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021402.
- 47 Kumar S C, Wei J X, Debray J, *et al.* High-power, widely tunable, room-temperature picosecond optical parametric oscillator based on cylindrical 5% MgO:PPLN[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3897-3900.
- 48 Liu J, Tang P H, Chen X, *et al.* Highly efficient tunable mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a wavelength locked, Q-switched Er:YAG laser[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20812-20819.
- 49 Hardy B, Berrou A, Guilbaud S, *et al.* Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 678-680.