

## 2.09 $\mu\text{m}$ 纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器

王 礼<sup>1</sup> 杨经纬<sup>1</sup> 蔡旭武<sup>1</sup> 王金涛<sup>1</sup> 吴海信<sup>1</sup> 吴先友<sup>1,2\*</sup> 江海河<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 高脉冲能量中红外激光在远程大气探测和目标识别中有着重要的应用,为了获得高脉冲能量的中红外激光输出,选用自主生长的  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP) 晶体作为中红外参量非线性晶体,晶体采用 I 型相位匹配,切割角度为  $55^\circ$ ,利用自行研制的 2.09  $\mu\text{m}$   $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  (LGS) 电光调 Q Cr, Tm, Ho: YAG 激光器作为 ZGP 光参量振荡器 (OPO) 的抽运源。光参量振荡器采用对抽运光具有反射的双程抽运结构以提高转换效率,采用脉宽约 35 ns 的 2.09  $\mu\text{m}$  调 Q 钬激光直接抽运 ZGP-OPO,在单谐振振荡结构下获得了脉冲能量为 5.9 mJ 的 4.8  $\mu\text{m}$  中红外激光输出,光-光转换效率为 13.1%,斜率效率为 17%;在双谐振振荡结构下获得了脉冲能量为 9 mJ 的 3.7  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$  中红外激光输出,光-光转换效率为 23.9%,斜率效率为 26.7%。

**关键词** 激光器; 中红外激光; 光参量振荡器;  $\text{ZnGeP}_2$ ; 电光调 Q Cr, Tm, Ho: YAG

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102008

## 2.09 $\mu\text{m}$ Nanosecond Holmium Laser Pumped $\text{ZnGeP}_2$ Optical Parametric Oscillator

Wang Li<sup>1</sup> Yang Jingwei<sup>1</sup> Cai Xuwu<sup>1</sup> Wang Jintao<sup>1</sup> Wu Haixin<sup>1</sup>

Wu Xianyou<sup>1,2</sup> Jiang Haihe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** High pulse energy mid-infrared laser has important applications in remote atmospheric detection and object recognition. To obtain high pulse energy mid-infrared laser radiation, a self-grown  $\text{ZnGeP}_2$  (ZGP) crystal is employed as the nonlinear crystal of optical parametric oscillator, and the cutting angle is  $55^\circ$  with the type I phase matching. A self-developed 2.09  $\mu\text{m}$   $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  (LGS) electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho: YAG laser is used to pump the ZGP optical parametric oscillator (OPO) directly. The OPO conversion efficiency can be improved with a round-trip pumping way which can reflect pump light. The 2.09  $\mu\text{m}$  Q-switched holmium laser radiation with pulse width of about 35 ns is used to pump the ZGP-OPO directly. Pulse energy of 5.9 mJ at 4.8  $\mu\text{m}$  with an optical-optical conversion efficiency of 13.1% and a slop efficiency of 17% is obtained by the singly resonate operation; pulse energy of 9 mJ at 3.7  $\mu\text{m}$  and 4.8  $\mu\text{m}$  with an optical-optical conversion efficiency of 23.9% and a slop efficiency of 26.7% is obtained by the doubly resonate operation.

**Key words** lasers; mid-infrared laser; optical parametric oscillator;  $\text{ZnGeP}_2$ ; electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho: YAG

**OCIS codes** 140.3070; 140.3538; 140.3580; 190.4410

收稿日期: 2013-07-27; 收到修改稿日期: 2013-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230131)、中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJ CX2-EW-NO7)

作者简介: 王 礼(1986—),男,博士研究生,主要从事激光物理方面的研究。E-mail: wli023@yeah.net

导师简介: 江海河(1961—),男,硕士,研究员,主要从事激光物理方面的研究。E-mail: hjjiang@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: xywu@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

中红外激光在军事、环境和科研等领域有着广泛的应用。中红外激光的两个波段处于大气传输的窗口,对雾和烟尘具有较强的穿透力,在军事领域中,中红外激光在生化战剂探测、遥感探测、激光测距、光电对抗等方面都有重要的应用。由于多数碳氢化合物气体及有毒有害气体分子在中红外波段存在较强的吸收特征谱线,所以在民用领域中,中红外激光在天然气管道泄露探测、煤矿瓦斯气体探测、大气温室气体探测等方面也有重要的应用<sup>[1-3]</sup>。与光电对抗需要发展高重复频率、高平均功率的中红外激光不同,在中红外远程大气探测和目标识别中,为获得高的分辨率以及保证激光远距离传输过程中能量密度或功率密度下降时的回波信号仍具有足够检测的强度,需要发展高能量的中红外激光技术和稳定可靠的光源。

光参量振荡器(OPO)是产生中红外可调谐激光的有效器件之一,相对于普通可调谐激光器,OPO不仅具有宽调谐、高功率、小型化的优点,而且可以利用非线性增益的瞬时性,选择合适的抽运源实现从飞秒最短脉冲到连续光的输出且不受激光跃迁寿命的限制<sup>[4]</sup>。高脉冲能量的OPO必须选择高效率、高损伤阈值的中红外非线性晶体,磷锆铍(ZGP)可人工生长出大尺寸晶体,因其损伤阈值高、非线性系数大、热导率高、物化性能稳定,是目前中红外OPO最优良的非线性晶体之一。近年来,随着ZGP生长技术的不断提高,在2 μm波长处的吸收系数已降到0.05 cm<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>,使得2 μm固体激光器直接抽运ZGP-OPO成为获得高能量中红外激光的有效手段。相比于级联OPO抽运方式,2 μm固体激光直接抽运ZGP-OPO具有转换效率高、结构简单、性能稳定等优点。

目前,国内外对ZGP-OPO在大输出功率<sup>[6-7]</sup>、低振荡阈值和宽调谐范围<sup>[8]</sup>上做了大量的研究,但由于缺乏高脉冲能量的2 μm抽运源,ZGP-OPO高脉冲能量输出的研究报道较少。2005年,Rustad等<sup>[9]</sup>采用磷酸钛氧钾光参量振荡器(KTP-OPO)抽

运ZGP-OPO获得了目前文献报道的ZGP-OPO最大脉冲能量为28 mJ的中红外激光输出。2008年,Dergachev等<sup>[10]</sup>采用声光调Q的Ho:YLF激光器抽运ZGP-OPO获得了脉冲能量为10 mJ的3.4 μm激光输出,经光参量放大器(OPA)放大获得了脉冲能量为30 mJ激光输出。2010年,郭剑<sup>[11]</sup>采用KTP-OPO抽运ZGP-OPO获得了脉冲能量为7 mJ中红外激光输出。上述研究报道中,由于缺乏高脉冲能量的2 μm抽运源,只能采用级联OPO或者OPA结构获得大能量输出,这种多级串联结构系统复杂、效率低且系统稳定性差。本文采用自行研制的2.09 μm高脉冲能量电光调Q的Cr,Tm,Ho:YAG激光器直接抽运ZGP-OPO,这种简单的结构有利于提高系统稳定性和转换效率。选用自主生长的ZGP晶体作为中红外参量非线性晶体,获得了脉冲能量为9 mJ的中红外激光输出。

# 2 实验装置

实验采用2.09 μm的电光调Q Cr,Tm, Ho:YAG激光器<sup>[12]</sup>直接抽运ZGP-OPO,实验装置如图1所示。采用Φ5 mm×125 mm的Cr,Tm, Ho:YAG作为激光介质,弧长100 mm的氙灯作为抽运源,灯和棒置于聚光腔内,用去离子水冷却,水温为287±0.3 K。1/4波片置于输出镜与激光棒之间,以补偿热退偏效应造成的损耗,从而获得较高的输出能量。由于该波长介质膜起偏器尚不成熟,起偏器采用自制的以布儒斯特角放置的两片1 mm厚的白宝石片堆。调Q晶体采用硅酸镓镧(LGS),该晶体在2~3 μm波段具有高的透射率,且损伤阈值高、物化性能稳定,是该波段理想的调Q晶体<sup>[12-13]</sup>。电光Q开关采用退压式工作,工作电压为3500 V,Q开关延时为750 μs。谐振腔为平平腔,几何腔长为360 mm,后腔镜(HR)反射率大于99%,输出耦合镜(OC)的反射率为40%。

OPO采用平平腔结构,M1和M2间距22 mm,M1为输入镜,镀有2.09 μm增透、3.6~4.8 μm高

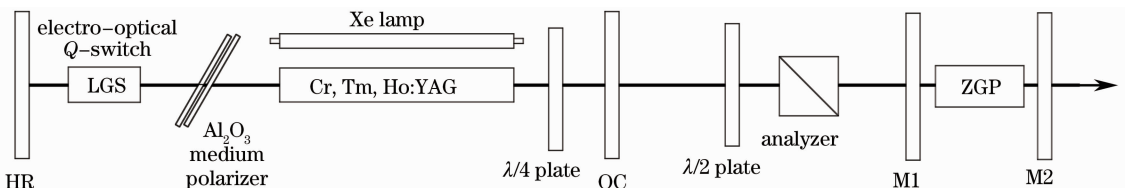


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

反膜。M2 为输出镜,当 OPO 采用单谐振(SRO)工作时使用镀有 2.09  $\mu\text{m}$  和 3.2~4  $\mu\text{m}$  高反、4.2~5  $\mu\text{m}$  高透膜的腔片;当 OPO 采用双谐振(DRO)工作时使用镀有 2.09  $\mu\text{m}$  高反、3.5~4.8  $\mu\text{m}$  透射率为 20%的腔片。OPO 采用对抽运光具有反射的抽运结构,在来回振荡过程中参量光都被放大,有利于增加抽运光的转换效率,并能有效抑制参量光到抽运光的逆转换。ZGP 晶体尺寸为 6 mm $\times$ 6 mm $\times$ 15mm,为了获得 3~5  $\mu\text{m}$  激光输出,采用 I 型相位匹配(o $\rightarrow$ e+e),ZGP 晶体切割角为 55°,晶体两端面镀 2.09  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$  增透膜。由于 2  $\mu\text{m}$  激光输出为水平偏振光,将一块 1/2 波片和检偏器置于抽运源输出镜与 OPO 输入镜之间,以保证参量过程模式匹配所需要的垂直偏振分量,通过 1/2 波片角度的旋转来调节入射到 OPO 抽运光能量的大小,并保持抽运光脉宽固定。2.09  $\mu\text{m}$  激光器为基模输出,在重复频率为 3 Hz 情况下,可获得脉冲能量为 90 mJ,脉宽约为 35 ns 激光输出。抽运源输出镜到 OPO 的距离为 540 mm,入射到 ZGP 晶体上的光斑直径约为 1.7 mm,较大的光斑直径可以减小晶体上的功率密度,有利于避免晶体损伤,获得较大的能量输出。

### 3 实验结果及分析

OPO 在 SRO 和 DRO 工作时获得的中红外激光输出能量与抽运能量关系曲线如图 2 所示,抽运光正入射到晶体端面,根据切割角度计算可知信号光和闲频光波长分别为 3.7  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$ 。从图中可以看出,SRO 获得了脉冲能量为 5.9 mJ 的 4.8  $\mu\text{m}$  中红外激光输出,光-光转换效率为 13.1%,斜率效率为 17%,振荡阈值约为 12 mJ;DRO 获得了脉冲能量为 9 mJ 的 3.7  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$  中红外激

光输出,光-光转换效率为 23.9%,斜率效率为 26.7%,振荡阈值约 5 mJ。DRO 输出为双波长同时振荡,腔内功率密度高,因此振荡阈值更低,实验中 DRO 的振荡阈值约为 SRO 的一半,且在相同抽运能量下可以获得比 SRO 更高的输出能量。对于 I 型相位匹配 ZGP-OPO,DRO 输出波长都在 3~5  $\mu\text{m}$  波段,使得抽运光到中红外激光的转换效率更高,但 DRO 振荡腔需要同时满足两个波长的谐振条件,这增加了输出光谱和功率的不稳定性,同时宽光谱范围的腔镜镀膜难度也较大,从而限制了其波长调谐范围。而 SRO 可利用信号光的谐振获得宽光谱范围的闲频光调谐输出,且反射镜与谐振腔设计容易、输出稳定,但振荡阈值高。

在抽运能量增加的过程中,输出能量不断增加,但是没有出现文献[14]报道的输出能量饱和现象。主要是由于抽运源脉宽较短,增加了功率密度并减小了 OPO 腔内激光振荡次数,减少了参量振荡的建立时间,同时采用对抽运光具有反射的谐振腔结构,使参量光在来回振荡的过程中都具有增益,提高了抽运光的转换效率,并抑制了因和频效应将参量光能量返回至抽运光的过程,使 2.09  $\mu\text{m}$  抽运光不断转化为参量光输出。2.09  $\mu\text{m}$  抽运光脉宽和中红外参量光脉宽如图 3 所示。

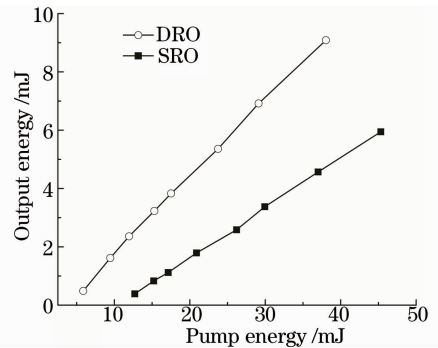


图 2 光参量振荡器 SRO 与 DRO 输出能量曲线  
Fig.2 SRO and DRO output energy curves of OPO

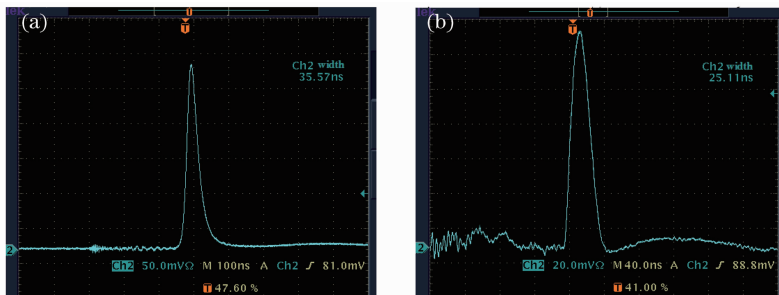


图 3 (a) 抽运光脉宽和(b) OPO 参量光脉宽  
Fig.3 Pulse widths of (a) pump pulse and (b) OPO pulse

当抽运脉冲能量约为 40 mJ 时, ZGP 端面出现轻微损伤, 此时晶体表面功率密度约为  $49.5 \text{ MW/cm}^2$ , 已经接近文献[10]所报道的 ZGP 损伤阈值( $50 \text{ MW/cm}^2$ ), 因此没有继续增加抽运光能量。文献[9-10]所获得的约 30 mJ 的高能量输出是在不超过晶体损伤阈值的情况下, 通过扩大抽运源光斑尺寸, 同时增加抽运能量的办法获得的。本实验中, 虽然输出能量没有出现饱和, 但因 ZGP 晶体损伤阈值的限制, 无法在目前实验所采用的光斑尺寸下通过增加抽运能量获得更高的能量输出。在与上述文献相近的功率密度下, 本实验系统的转换效率要低于上述文献所报道的值, 原因与 ZGP 晶体的质量或输出镜透射率有关。下一步拟通过对抽运光进行优化, 在不超过晶体损伤阈值的前提下增加光斑尺寸和抽运能量, 并使光斑能量呈平顶分布, 避免高斯光束中心强区对晶体造成损伤, 并优化输出镜透射率, 从而提高 OPO 输出能量和转换效率。

## 4 结 论

利用自行研制的  $2.09 \mu\text{m}$  LGS 电光调 Q Cr, Tm, Ho: YAG 激光器作为 ZGP-OPO 抽运源, 选用自主生长的 ZGP 晶体作为中红外参量非线性晶体, SRO 结构获得了脉冲能量为 5.9 mJ 中红外激光输出, 斜率效率为 17%; DRO 结构获得了脉冲能量为 9 mJ 的中红外激光输出, 斜率效率为 26.7%。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Li, Wu Xianyou, Li Zhe, *et al.*. Progress of the nonlinear crystal and device of the mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(4): 433-439.  
王 礼, 吴先友, 李 哲, 等. 中红外光参变振荡非线性晶体及器件研究进展[J]. *激光技术*, 2011, 35(4): 433-439.

- 2 S E Christensen, J Alford, J H Marquardt, *et al.*. Multi-line Doppler/ DIAL laser radar transmitter based on an OPO with high idler absorption[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, OSA, 2003. 65.
- 3 Y He, B J Orr. Self-adaptive, narrowband tuning of a pulsed optical parametric oscillator and a continuous-wave diode laser via phase-conjugate photorefractive cavity reflectors: verification by high-resolution spectroscopy[J]. *Appl Phys B*, 2009, 96(2-3): 545-560.
- 4 M Ebrahim-Zadeh, I Sorokina. *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications*[M]. Holland: Springer, 2008. 347-375.
- 5 K T Zawilski, P G Schunemann, S D Setzler, *et al.*. Large aperture single crystal ZnGeP<sub>2</sub> for high-energy applications[J]. *J Crystal Growth*, 2008, 310(7-9): 1891-1896.
- 6 A Hemming, J Richards, A Davidson, *et al.*. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 10062-10069.
- 7 G L Zhu, Y L Ju, T H Wang, *et al.*. A mid-IR 14.1 W ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2009, 26(3): 034208.
- 8 K L Vodopyanov, P G Schunemann. Broadly tunable noncritically phase-matched ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator with a 2  $\mu\text{J}$  pump threshold[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(6): 441-443.
- 9 G Rustad, S Nicolas, Ø Nordseth, *et al.*. High pulse energy mid-infrared laser source[C]. *SPIE*, 2005, 5989: 598904.
- 10 A Dergachev, D Armstrong, A Smith, *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.
- 11 Guo Jian. Research on the mid-infrared pulsed optical parametric oscillator based on ZGP crystal [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, (11): 17-19.  
郭 剑. 基于 ZGP 晶体中红外脉冲光参量振荡器研究[J]. *通信技术*, 2010, (11): 17-19.
- 12 L Wang, X Cai, J Yang, *et al.*. 520 mJ langasite electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho: YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 1986-1988.
- 13 L Wang, J Wang, J Yang, *et al.*. 2.79  $\mu\text{m}$  high peak power LGS electro-optically Q-switched Cr, Er: YSGG laser[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(12): 2150-2152.
- 14 A F Nieuwenhuis, C J Lee, P J M van der Slot, *et al.*. High-efficiency mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator directly pumped by a lamp-pumped, Q-switched Cr, Tm, Ho: YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(1): 52-54.

栏目编辑: 史 敏