

## PPSLT 皮秒中波红外光参量发生器

邹跃, 秘国江, 庞庆生, 毛小洁, 王建军

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要:** 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光在光电对抗领域有着重要的应用前景。如果中红外激光进入皮秒量级, 将使其具有更高的峰值功率和作战效能。文中采用 1.06  $\mu\text{m}$  皮秒激光器泵浦单周期极化化学计量比钽酸锂晶体(周期为 29.5  $\mu\text{m}$ )光参量产生器的方案, 来获得皮秒中红外激光输出。其中皮秒泵浦源为自制的侧面泵浦结构 1.06  $\mu\text{m}$  皮秒再生放大器。该激光器在 1 kHz 重复频率下, 输出功率最高为 2.02 W, 脉冲宽度为 13.6 ps。光参量发生器采用温度调谐方式, 获得了 3.98~3.68  $\mu\text{m}$ (晶体从 40~200  $^{\circ}\text{C}$ )皮秒中波红外可调谐激光输出。在最高泵浦功率泵浦, 晶体温度为 120  $^{\circ}\text{C}$  时, 获得最大中红外激光输出(闲频光) 190 mW, 光光转换效率达 9.4%, 充分验证了采用 OPG 的方式获得瓦级皮秒中红外激光输出的可行性。

**关键词:** 皮秒激光; 中红外; 光参量发生器; 周期极化化学计量比钽酸锂

**中图分类号:** O437.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0712-04

## Picosecond mid-infrared parametric generator based on periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>

Zou Yue, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, Mao Xiaojie, Wang Jianjun

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Mid-infrared laser at 3–5  $\mu\text{m}$  has very important application in opto-electronic countermeasure. If the infrared laser is pico-second pulse, as it has much higher peak-power, it will be much more powerful in countermeasure field. In this paper, tunable optical parametric generator (OPG) pumped by a 1.06  $\mu\text{m}$  picosecond laser based on periodically poled stoichiometric lithium tantalate (PPSLT) was reported to get pico-second mid-infrared laser. The periodically poled Lithium niobate crystal was a single structure (29.5  $\mu\text{m}$ ). The pumping source was a home-made pico-second laser, which used a LD side-pumped regenerative amplifier. The maximum output power was 2.02 W at a frequency of 1 kHz, and pulse-width was 13.6 ps. A continuous tunable middle-infrared (mid-IR) spectrum (idler wave) of 3.98–3.68  $\mu\text{m}$  was obtained by changing the crystal temperature from 40  $^{\circ}\text{C}$  to 200  $^{\circ}\text{C}$ . When the maximum available average pump power was 2.02 W, the idler output power of OPG was 190 mW at 120  $^{\circ}\text{C}$ , the optical-optical efficiency was 9.4%. This experimental research shows the possibility to get a output of picosecond mid-infrared laser by OPG at several watts level.

**Key words:** pico-second pulse; mid-infrared; OPG; PPSLT

收稿日期: 2013-07-12; 修订日期: 2013-08-13

基金项目: 固体激光技术重点实验室资助项目(9140C040111110C0403)

作者简介: 邹跃(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事大功率固体激光器、皮秒激光器、光参量产生及放大等方面的研究。

Email: bj\_laser@126.com

## 0 引言

目前, 红外制导导弹已从第一代的红外寻的制导发展到第四代采用  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外波段凝视成像制导, 该技术大大提高了红外制导导弹的灵敏度和抗干扰能力, 使其获得了更远的作战距离, 在战争中威胁极大。而  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外激光作为最有效的光电对抗手段, 也随之成为研究的热点<sup>[1-2]</sup>。但现有的研究多半集中在纳秒激光领域, 主要采用调 Q 激光泵浦 OPO 方式获得<sup>[3-4]</sup>。如果中红外激光脉宽进入皮秒量级, 将大大提高激光脉冲的峰值功率, 增强其对抗效能。此外, 中红外超短激光脉冲是研究分子、固体、表面界面、等离子体以及光化学的有力工具。尤其有利于进行分子振动、窄带半导体和多量子阱超晶格中动力学过程的时间分辨研究。但目前, 国内对超短脉冲的中红外激光研究还比较少。文中采用  $1.06\ \mu\text{m}$  皮秒激光器泵浦周期极化铌酸锂晶体(PPSLT)光参量发生器(OPG)的方式, 最终获得了皮秒中红外可调谐激光输出。

## 1 方案设计

### 1.1 泵浦激光

目前, 还没有成熟的直接采用固体激光介质获得中红外输出的方案, 中红外激光一般通过两步获得。首先获得泵浦源激光, 然后通过非线性转换, 获得  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外激光, 通常的方案有采用  $2\ \mu\text{m}$  激光泵浦 ZnGeP 晶体和  $1.06\ \mu\text{m}$  激光泵浦 PPLN、PPSLT 等晶体<sup>[5-6]</sup>。因此, 中红外激光的脉宽取决于泵浦激光的脉宽。目前, 一定功率的  $2\ \mu\text{m}$  皮秒激光还比较难获得, 因此文中选择具有成熟锁模技术的  $1.06\ \mu\text{m}$  皮秒激光作为泵浦源。

### 1.2 非线性转换

由于皮秒激光的特性, 当采用皮秒激光泵浦 OPO 时, 需要采用同步泵浦结构—即 OPO 腔长需要与皮秒激光种子的腔长(通常为  $1\ \text{m}$  多甚至更长)精确的一致或成倍数关系。这势必导致整体结构的庞大且复杂, 并不利于现实的工程应用。因此文中回避了同步泵浦 OPO, 采取了直接泵浦 PPSLT 晶体的 OPG 结构。虽然 OPG 的效率相比 OPO 会低很多, 但皮秒泵浦光的高峰值功率和 PPSLT 晶体较高的非线性

系数会在一定程度上弥补这个弱势。

## 2 实验装置

整体实验装置如图 1 所示。该实验采用的  $1.06\ \mu\text{m}$  皮秒激光泵浦源为之前自己研究设计的皮秒激光器<sup>[7]</sup>。该激光器采用 SESAM 被动锁模技术获得皮秒激光种子源, 再通过再生放大器获得千赫兹放大的皮秒激光脉冲。采用侧面泵浦腔作为再生腔的泵浦源, 再生腔为平-平腔。由于整个晶体棒都是泵浦区, 这种结构易于使种子和再生光路获得很好的耦合, 调试方便, 结构简单; 同时, 侧泵腔又能提供很高的增益, 使种子激光获得高达  $10^5\sim 10^6$  的放大倍率, 输出脉冲达到 mJ 量级, 且光束质量下降较小。皮秒量级的脉宽、较大的单脉冲能量和良好的光束质量都保证了泵浦光聚焦在非线性晶体上的峰值功率密度, 进而保证了 OPG 较高的转换效率。

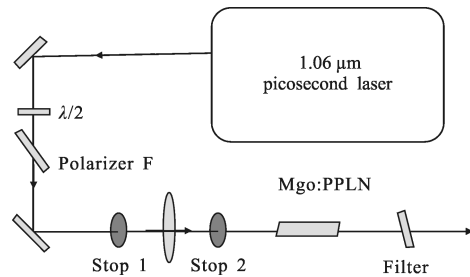


图 1 PPSLT OPG 光路图

Fig.1 Setup of PPSLT OPG

该皮秒激光器在  $1\ \text{kHz}$  重复频率下, 最大功率为  $2.02\ \text{W}$ , 脉冲宽度为  $13.6\ \text{ps}$ , 光束质量  $M^2 < 1.9$ 。

$1.06\ \mu\text{m}$  皮秒激光通过两个  $45^\circ$  镜调节方向, 入射 PPSLT-OPG。  $\lambda/2$  波片用来改变泵浦光的偏振方向。后面偏振片的输出偏振方向与 PPSLT 晶体大平面的方向平行, 它与  $\lambda/2$  波片一起, 用来调控入射 OPG 的泵浦光功率。聚集透镜焦距  $f=200\ \text{mm}$ , 将泵浦光聚焦进 PPSLT 晶体。

文中采用的 PPSLT 晶体为南京大学提供的单周期极化晶体, 尺寸为  $10\ \text{mm} \times 1\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$ , 极化周期为  $29.5\ \mu\text{m}$ 。由于 PPSLT 晶体为长薄片形状, 泵浦光很容易从晶体侧面出射, 造成 PPSLT 晶体的损坏。因此, 加入两个事先用 HeNe 激光精确定位的光阑来限制光路, 以确保泵浦光精确入射 PPSLT 晶体中心, 不会从侧面出射。为避免峰值功率非常高的泵

浦光对晶体造成的损伤,将聚焦泵浦光的焦点放在晶体后端面以外的位置。在 PPSLT 晶体后面,放置一个滤光片(1064nmHR,1400~1500nmHR,3700~4200nmHT),将泵浦光和信号光滤掉,从而获得 3~5  $\mu\text{m}$  的闲频光输出。

### 3 实验结果

把晶体温度设定为 120  $^{\circ}\text{C}$  时,通过  $\lambda/2$  波片调节入射泵浦光功率,PPSLT-OPG 出光阈值约为 240 mW。输出功率曲线如图 2 所示。

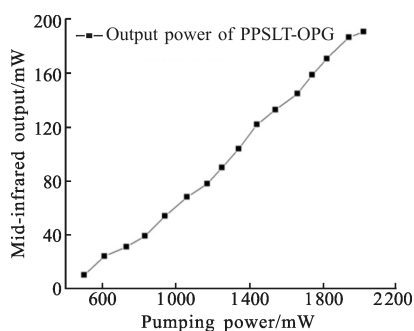


图 2 输出中红外闲频光随泵浦功率变化曲线

Fig.2 Output power of mid-infrared versus pumping power

当功率计可以观测到有中红外激光输出时,肉眼可以观察到有绿光、红光以及微弱的紫光输出,均是由于高峰值功率的皮秒激光的各种非线性转换产生的。

采用 YOKOGAMA 公司的 AQI6317C 型光谱仪测波长,红光为 617 nm,735 nm,834 nm(如图 3 所示)。

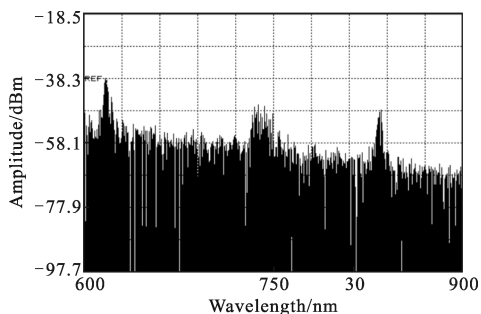


图 3 输出激光的部分光谱

Fig.3 Part of spectrum of the output light

根据非线性频率变换理论,这些光应分别为 1471 nm 信号光与泵浦光的和频光、信号光的倍频光、3845 nm 闲频光和泵浦光的和频光。之后,用 HORIBA JOBIN YVON 公司的 iHR550 光谱仪(响应范围 1.8~14  $\mu\text{m}$ )

对输出中红外波长进行直接测量,结果为 3900 nm,与前者测量结果略有偏差。因为后者测量时需要液氮冷却,操作不便,所以选择采用第一个光谱仪来观测 PPSLT-OPG 温度调谐时的输出光谱变化。由于滤波片对信号光的透过率很低,因此选择通过测量闲频光与泵浦光的和频光来推算输出闲频光的波长变化。

当晶体温度从 40~200  $^{\circ}\text{C}$  调节时,光谱仪测得和频光由 839.7~825.3 nm 变化,对应闲频光由 3983.2~3678.8 nm 变化,温度调谐曲线如图 4 所示。当泵浦功率最高为 2.02 W 时,在 120  $^{\circ}\text{C}$  附近转换效率最高,获得中红外输出达 190 mW,光-光转换效率为 9.4%,与同步泵浦结构 20%~30% 左右的转换效率相比较<sup>[8-9]</sup>,还是略低。但与参考文献[10]纳秒激光泵浦 OPG 相比,由于大的单脉冲能量和更高的峰值功率,转换效率高出一倍多。尽管无法测得中红外输出脉冲的脉宽,但根据非线性转换性质,脉宽应该比泵浦源更窄。

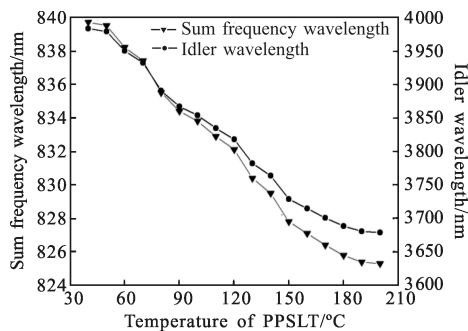


图 4 温度调谐曲线

Fig.4 Wavelength change of output versus temperature

### 4 总结

文中采用经过再生放大的 1.06  $\mu\text{m}$  皮秒激光器作为泵浦源,泵浦单周期极化铌酸锂晶体(周期 29.5  $\mu\text{m}$ )光参量发生器,采用温度调谐方式,获得了 3.98~3.68  $\mu\text{m}$ (晶体从 40~200  $^{\circ}\text{C}$ )皮秒中波红外可调谐激光输出。当泵浦功率最高为 2.02 W 时,在 120  $^{\circ}\text{C}$  下,获得中红外激光输出(闲频光)190 mW,光光转换效率达 9.4%,虽然采用 OPG 的方式获得中红外输出比 OPO 的转换效率要低,但不需要腔长很长且精确匹配的同步泵浦结构,单次耦合通过的简单结构更有利于工程化,提高系统的稳定性和可靠性,使该方案具有一定的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Ren Gang, Zhong Ming, Li Tong, et al. Application of optical parametric oscillator in the infrared countermeasures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 207-210. (in Chinese)  
任钢, 钟鸣, 李彤, 等. 光参量振荡器在红外对抗中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 207-210.
- [2] Wang Ping, Chai Jinhua. Comparison and analysis for the parameters of mid-infrared zinc germanium phosphide optical parametric oscillator [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(2): 123-127. (in Chinese)  
王平, 柴金华. 中红外磷锗锌光参量振荡器的参量对比与分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 123-127.
- [3] Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, et al. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 1-5. (in Chinese)  
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): 1-5.
- [4] Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang, et al [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s): 82-85. (in Chinese)  
彭跃峰, 王卫民, 谢刚, 等. 11.2 W 中红外 3.8  $\mu\text{m}$  激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s): 82-85.
- [5] Li Jian, Wang Yanzi, Fu Dianling, et al. Theoretical analysis on the property of PPLN-OPO in the process of nonlinear frequency conversion [J]. *Journal of Shandong Normal University(Natural Science)*, 2004, 19(2): 47-49. (in Chinese)  
李健, 王衍子, 傅殿岭, 等. PPLN-OPO 非线性变频特性的研究 [J]. 山东师范大学学报 (自然科学版), 2004, 19(2): 47-49.
- [6] Fabian Rotermund, Chang Jun Yoon. Application of periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub> for efficient optical parametric chirped pulse amplification at 1 kHz [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6421-6427.
- [7] Zou Yue, Mao Xiaojie, Bi Guojiang, et al. LD side-pumped 10 kHz pico-second regenerative amplifier [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9): 983-985. (in Chinese)  
邹跃, 毛小洁, 秘国江, 等. 二极管侧面泵浦 10 kHz 皮秒激光再生放大器[J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 983-985.
- [8] Kokabee O, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Efficient high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3210-3212.
- [9] Gregor Anstett, Felix Ruebel, and Johannes A L'huillier. Generation of powerful tunable mid-infrared picosecond laser radiation using frequency conversion in periodically poled Lithium niobate [C]//OSA/ASSP/LACSEA/LS & C, 2010, AWD3.
- [10] Nittmann M, Bauer T, J A L'huillier, et al. Powerful high repetition rate nanosecond optical parametric generator in MgO: PPLN tunable from 3.5  $\mu\text{m}$  to 4.6  $\mu\text{m}$  [C]//OSA/CLEO, 2007, JWA44.