

基于光学超晶格的四波长近-中红外光参量振荡器

赵 刚 蒋旭东 吕新杰* 秦亦强

南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093

摘要 利用波长为 1064 nm 的光纤激光器作为抽运光源, 采用具有双通道(极化周期分别为 30 μm 和 30.5 μm) 的化学计量比钽酸锂超晶格(PPSLT)晶体作为非线性工作介质, 在 PPSLT 晶体温度为 190 $^{\circ}\text{C}$ 时, 获得了 1568.4、1625.9、3078.8、3231.1 nm 四波长近-中红外激光同时输出。在抽运功率为 37 W, 重复频率为 50 kHz 时, 获得了 14.9 W 近-中红外激光输出, 四波长激光的功率分别为 3.71、4.36、3.21、3.62 W。通过调节 PPSLT 晶体温度, 可以实现可调谐输出。进一步优化光参量振荡器谐振腔, 可以实现四波长相同功率输出。

关键词 激光器; 光学超晶格; 中红外; 光参量振荡

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0502004

Four-Wavelength Near & Mid-Infrared Optical Parameter Oscillator Based on Superlattice

Zhao Gang Jiang Xudong Lv Xinjie Qin Yiqiang

College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract Four-wavelength near&mid-infrared laser (1568.4, 1625.9, 3078.8, 3231.1 nm) based on stoichiometric LiTaO₃ superlattice (PPSLT) crystal is reported. The pump source is an optical fiber laser at 1064 nm wavelength. PPSLT has a dual-channels grating of 30 μm and 30.5 μm . When the pump power is 37 W, and repetition frequency is 50 kHz, the total output power reaches 14.9 W. The powers of the four wavelength lasers are 3.71, 4.36, 3.21 and 3.62 W, respectively. By adjusting the temperature of the PPSLT crystal, tunable output can be realized. Further optimization of optical parameter oscillator (OPO) resonant cavity will realize the equivalent output power of the four wavelength lasers.

Key words lasers; optical superlattice; mid-infrared; optical parametric oscillation

OCIS codes 140.3580; 140.3070; 190.4400; 260.1180

1 引 言

3~5 μm 波段中红外激光在遥感、探测、医疗和生物成像中有重要应用。具有中等平均功率(数瓦到数十瓦)的中红外固体激光器, 由于其所具有的各种优点, 如高重复频率、高稳定性、结构紧凑等, 特别是以其高亮度、良好的相干性和极高的空间分辨率, 在光电对抗和反恐方面有广泛应用^[1-2]。例如, 第四代红外制导导弹工作波长为 3~5 μm , 具有更远的攻击距离, 并使一些传统的红外对抗手段如闪光灯、红外干扰弹等效能大减, 甚至完全无效。对民航客机等目标明显、机动性差的飞机具有非常大的威胁。工作于 3~5 μm 波段的中红外激光器, 能够对中红外成像元件形成干扰, 有效减小恐怖分子对民航客机的威胁。除此以外, 中红外波段激光已经成功应用于激光测距、大气污染检测和生物环境等领域^[3-6], 越来越受到研究人员的重视。

中红外波段相干光源可以通过 Ho³⁺、Er³⁺、Tm³⁺、Dy³⁺ 等稀土离子发射跃迁直接产生^[7]。但对于适合于上述激

收稿日期: 2014-10-31; 收到修改稿日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11204128)

作者简介: 赵 刚(1977—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光学超晶格材料及激光技术方面的研究。

E-mail: zhaogang@nju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: myxinjie@gmail.com

活离子的氧化物和氟化物玻璃或晶体基体,由于其声子能量较高,掺杂的稀土离子在中红外区域的能级结构复杂,无辐射跃迁几率较大,导致发光效率很低,所以,通过激光工作物质直接产生的波段目前被限制在 $3\ \mu\text{m}$ 以下。对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段其他激光器,虽然中红外铅盐激光器和半导体量子级联激光器已经有产品,但是这些激光器的输出功率较低,调谐范围较窄,光束质量较差,有的还需在低温下工作,限制了其在远距离遥感探测和光电对抗等领域的应用。从技术上来说,一种可行的解决办法是利用非线性晶体的光参量振荡器(OPO),将技术上十分成熟的 $1\ \mu\text{m}$ 波段固体激光转换成覆盖 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段光源,从而实现中红外固体相干辐射输出。

目前,利用 ZnGeP_2 和 AgGaS_2 等非线性材料也可以获得 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 固体中红外激光^[8-10]。但是这些晶体生长困难,目前国内还难以得到高质量的晶体,更重要的是由于对 $2\ \mu\text{m}$ 激光存在着很强的吸收,不能使用常用的近红外激光抽运。光学超晶格材料[如周期极化铌酸锂(PPLN)、钽酸锂(PPLT)晶体]具有非线性系数大、调谐范围宽、波长调谐方式多样化和结构紧凑等优点,透明波段覆盖 $0.3\sim 5\ \mu\text{m}$,能够使用近红外激光抽运。将其与光参量振荡技术相结合,可实现宽调谐、窄线宽、高功率的中红外激光输出,是中红外大功率激光器件的最佳选择。自从1995年基于PPLN的OPO实现以来^[11],研究人员相继实现了脉宽为纳秒(ns)、皮秒(ps)、飞秒(fs)和连续(CW)运转的OPO输出^[12-17]。国内对中红外OPO研究起步较晚,中科院物理所于2004年用超晶格OPO在 $3.14\ \mu\text{m}$ 输出 $466\ \text{mW}$ 激光^[18],浙江大学于2007年利用超晶格OPO实现了信号光和闲频光总输出为 $4.8\ \text{W}$ ^[19]。中国工程物理研究院于2008年利用超晶格OPO实现了 $11.2\ \text{W}$ 的中红外输出^[20]。2013年,西南技术物理研究所采用PPMgLN晶体实现了低阈值的 $2\ \mu\text{m}$ 光参量振荡激光输出^[21]。2014年,中航工业洛阳电光设备研究所采用光纤激光器作为抽运源实现了 $6.2\ \text{W}$ 的 $3.8\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出^[22]。 LiNbO_3 是目前最为普遍的准相位匹配材料,技术也最为成熟。 LiTaO_3 作为 LiNbO_3 的同族材料,作为中红外准相位匹配光学材料, LiTaO_3 更有优势。SLT晶体由于组分趋于化学计量比,很多物理光学性能发生改变。更为重要的是SLT晶体的畴结构呈六边形,相对于同成分晶体的三角形畴结构,基于SLT晶体的周期结构正负畴的边界更加光滑,能够极大地提高光转换效率^[23-24],2014年邹跃等^[25]利用化学计量比钽酸锂超晶格(PPLT)晶体采用光参量产生(OPG)方式获得了瓦级的皮秒中红外激光输出,南京大学利用PPLT超晶格OPO实现了信号光和闲频光总输出超过 $4.2\ \text{W}$,闲频光波长可调谐范围超过 $200\ \text{nm}$ ^[26]。魏星斌等^[27]利用PPLT晶体采用信号光单谐振和闲频光单谐振结构分别实现了 $5.78\ \text{W}$ 和 $5.07\ \text{W}$ 的 $3.9\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出。以上工作多是采用温度调谐的方式对输出波长进行调节,对于一个固定的周期(通道),其温度调谐的范围有限,尚未有超晶格晶体材料多通道同时OPO输出多波长中红外激光的报道。另外,基于PPLT或PPLN晶体的OPO需采用偏振光进行抽运。

本文采用非偏振输出的光纤激光器作为抽运源,将抽运光进行偏振分束,然后将水平偏振分量转换为竖直偏振,最后将两束光耦合进入同一块PPLT晶体的两个不同通道(具有不同周期),这样就避免了抽运光能量浪费。同时,在同一个OPO谐振腔中,实现了四波长近-中红外激光同时输出。在总的抽运功率为 $37\ \text{W}$,重复频率为 $50\ \text{kHz}$ 时,获得了 $14.9\ \text{W}$ 的近-中红外激光输出。

2 实验装置

本实验采用IPG公司生产的 $50\ \text{W}$ 非偏振的光纤激光器作为抽运光源,中心波长为 $1064\ \text{nm}$,重复频率选定为 $50\ \text{kHz}$,脉冲宽度为 $200\ \text{ns}$ 。实验装置如图1所示。其中 f_1 和 f_2 为聚焦透镜,构成望远镜系统,对光纤激光器输出光束进行缩束;PBS为偏振分束器; M_3 、 M_4 、 M_5 为 $45^\circ 1064\ \text{nm}$ 反射镜; W_1 、 W_2 、 W_3 为 $1/2$ 波片; f_3 和 f_4 为聚焦透镜,焦距均为 $150\ \text{mm}$; M_1 和 M_2 (平-平镜)分别为OPO腔的输入和输出镜。为了避免选偏造成的能量浪费,先将非偏振光进行偏振分束,将水平偏振的分量经隔离器之后再经过 $1/2$ 波片旋转为竖直偏振,然后与竖直偏振分量同时聚焦入射到PPLT晶体的两个不同的通道。两束光经透镜聚焦之后最终形成的焦点半径约为 $120\ \mu\text{m}$ 。相比PPLN晶体,PPLT晶体虽然非线性系数小,但是它的透光范围较宽,损伤阈值较高,并且易于极化较厚的晶体,因此在中红外领域具有很大的应用潜力。本实验中选用室温电场极化方法自制的PPLT晶体,长度为 $40\ \text{mm}$,厚度为 $1\ \text{mm}$,具有 $30\ \mu\text{m}$ 和 $30.5\ \mu\text{m}$ 两个周期。

OPO谐振腔采用平-平腔结构,腔长为 $50\ \text{mm}$ 。输入镜 M_1 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 高透,对 $1.4\sim 1.6$ 和 $3.0\sim 3.9\ \mu\text{m}$ 高反;输出镜 M_2 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反,对 $3.0\sim 3.9\ \mu\text{m}$ 增透,同时在 $1.4\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段透射率为 5% 。实验过程中,

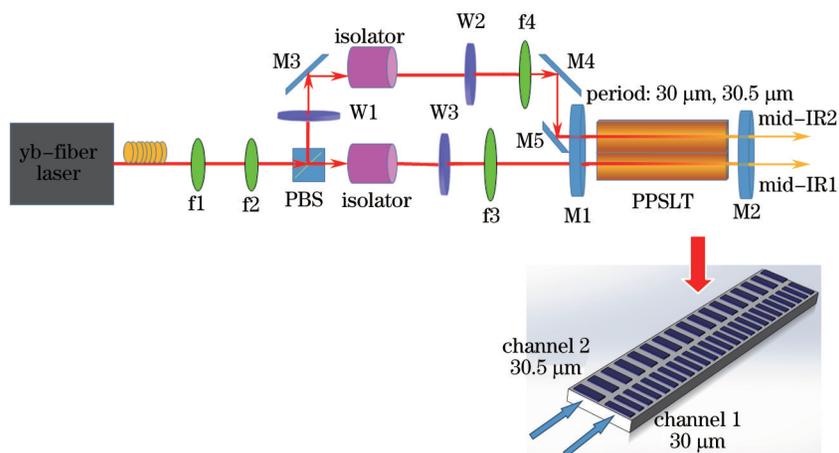


图1 四波近一中红外光参量振荡器实验装置图

Fig.1 Experimental configuration of the four-wavelength near and MIR OPO laser

PPSLT晶体放置在控温炉中,控温精度为0.1℃,晶体温度调谐范围为160℃~190℃。采用型号为YOKOGA-WA AQ6370C的光纤光谱仪对输出波长进行测量,该光谱仪波长测量范围为0.9~1.7μm,可以根据测量到的近红外信号光波长,通过能量守恒定律,计算出中红外闲频光波长。

3 实验结果和分析

首先研究了单通道OPO输出特性。将周期为30.5μm通道的抽运光挡住,选定周期为30μm通道,并将晶体温度升至190℃,此时OPO输出的信号波长为1586.4nm,相应的闲频光波长为3231.1nm。图2(a)给出了30μm通道的OPO输出功率随抽运功率的变化曲线。采用一片对1.4~1.6μm高反同时对3.0~3.9μm增透的镜片将信号光和闲频光分开。当注入抽运功率为18.1W时,得到的总的OPO的输出功率为7.25W,其中1586.4nm信号光功率为3.82W,3231.1nm闲频光功率为3.43W。对应的OPO的光-光转换效率为40.1%,其中信号光和闲频光的光-光转换效率分别为21.1%和20.0%。对激光最高功率输出时的不稳定性进行了测试,1个小时的不稳定性小于3%。用刀口法对光束质量进行了测试,光斑半径与发散角乘积为15.2mm·mrad。然后将周期30μm通道的抽运光挡住,选定周期为30.5μm通道。当晶体温度升至190℃时,OPO输出的信号波长为1625.9nm,相应的闲频光波长为3078.8nm。图2(b)给出了周期为30.5μm通道的OPO输出功率随抽运功率的变化曲线。当注入抽运功率为19W时,得到的总的OPO的输出功率为8.17W,其中1625.9nm信号光功率为4.45W,3078.8nm闲频光功率为3.72W。对应的OPO的光-光转换效率为43.0%,其中信号光和闲频光的光-光转换效率分别为23.4%和19.6%。在最高输出功率下,1h的不稳定度小于2.8%,光斑半径与发散角乘积为13.5mm·mrad。

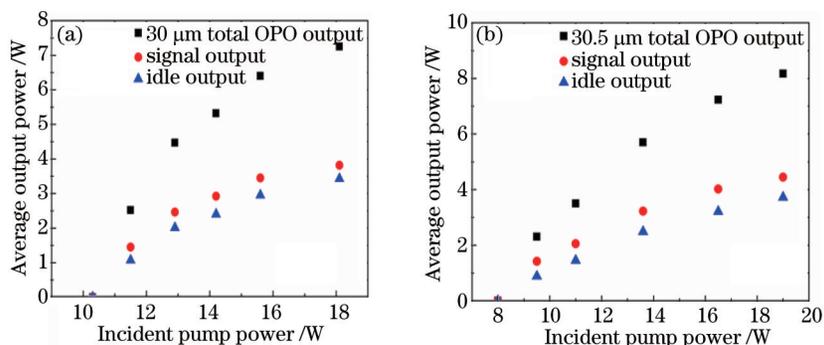


图2 单通道OPO中输出功率及信号光和闲频光功率随注入抽运功率的变化曲线。

(a) 周期为30μm和(b) 30.5μm通道

Fig.2 Variation of the total output signal and idle output power for single period OPO versus incident pump power.

(a) Channel of 30 μm and (b) 30.5 μm period

同时将两路抽运光注入到PPSLT晶体的两个通道,在总的抽运功率为37 W时,得到的OPO输出的最大功率为14.9 W,如图3所示。经镜片分光后,得到的1586.4、1625.9、3078.8、3231.1 nm 4个波长激光输出功率分别为3.71、4.36、3.21、3.62 W。相应的OPO的光-光转换效率为40.3%,其中信号光和闲频光的光-光转换效率分别为21.8%和18.5%。可以看到,双通道同时输出时总的信号光输出功率和总的闲频光的输出功率均低于单通道输出时两者的和,这是由于在调节过程中满足双通道同时最优化输出时不能同时满足单个通道的最优化输出。但是在本实验中,两者差别不大。如果选择合适的腔镜(信号光透射率),优化谐振腔设计,可以实现4个波长同等功率的输出。多波长中红外激光适合作为太赫兹波产生的抽运光源,同时也在多波长光电对抗领域具有重要意义。图4给出了晶体温度为190 °C时两个通道OPO输出信号光的光谱。采用的New Focus 1611型光电探测器探测波长范围为900~1700 nm,因此只测试了抽运光和信号光脉冲宽度,如图5所示。190 °C时,在最高注入抽运功率下,得到最窄的1586.4 nm和1625.9 nm信号光的脉冲宽度分别为159 ns和161.3 ns。

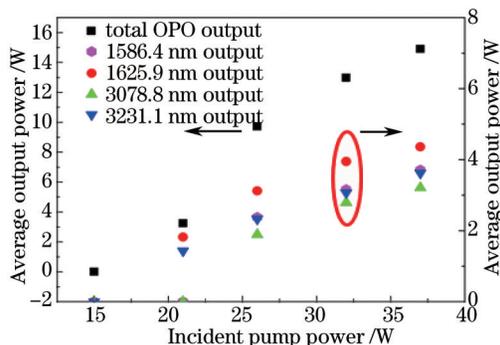


图3 双通道OPO输出平均功率随注入抽运功率的变化曲线

Fig.3 Variation of the average output power for double-period OPO versus incident pump power

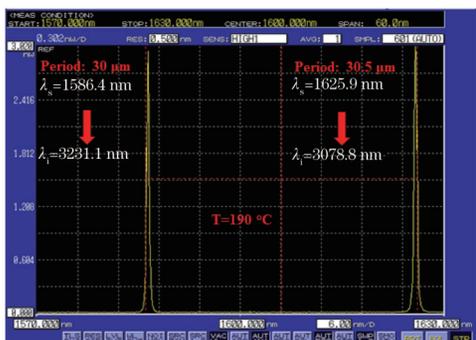


图4 190 °C时两信号光输出光谱

Fig.4 Spectroscopy of the two signal waves at 190 °C

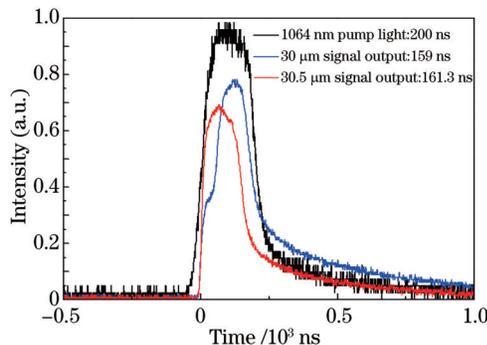


图5 抽运光和两个通道信号光脉冲宽度

Fig.5 Pulse width of the pump and two signal waves

要实现光参量过程的高效输出,需同时满足动量守恒和能量守恒,如(1)式

$$\begin{cases} \frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda(T)} = 0 \\ \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 λ 为波长,下标 p, s, i 分别表示抽运光、信号光和闲频光, n 为折射率, T 为晶体温度, Λ 为周期。当晶体温度变化时,抽运光、信号光和闲频光对应的折射率随之变化,在满足相位匹配的条件下,同时需要满足能量守恒,因此,在抽运波长固定的情况下可以获得信号光和闲频光的调谐输出。图6给出了在最高抽运功率下两个通道OPO输出波长随温度变化情况。调节控温炉的温度,使晶体温度从160 °C升高到190 °C,30 μm通道对应的OPO信号光波长从1571.8 nm调谐到1586.4 nm,闲频光波长从3293.4 nm调谐到3231.1 nm,调谐范围分别为14.6 nm和62.3 nm。30.5 μm通道对应的OPO信号光波长从1607.6 nm调谐到1625.9 nm,闲频光波长从3146.6 nm调谐到3078.8 nm,调谐范围分别为18.3 nm和67.8 nm。在温度调谐过程中,OPO输出功率变化不大。

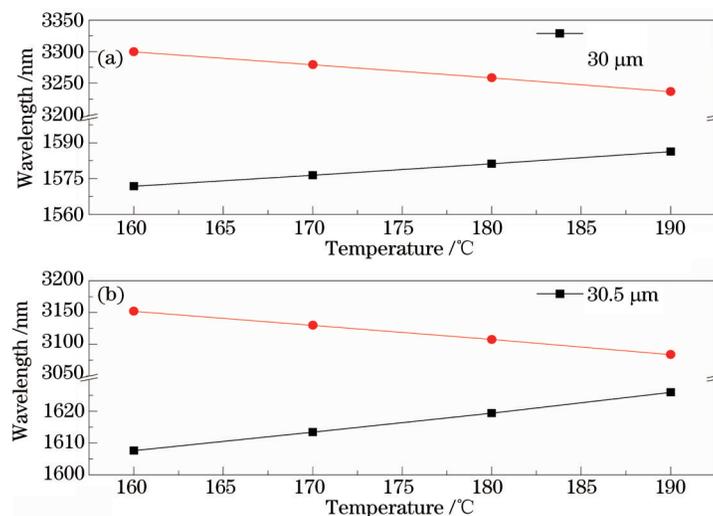


图6 双周期OPO的波长调谐范围

Fig.6 Wavelength tunable range of two periods OPO

4 结 论

采用 1064 nm 非偏振的纳秒光纤激光器作为抽运源,采用 PPSLT 光学超晶格晶体作为频率变换介质,进行了多波长、宽调谐 OPO 研究。为了能够充分利用随机偏振激光的所有能量,在偏振分束之后进行偏振旋转,然后将两束抽运光注入到具有双通道 PPSLT 的 OPO 中,实现了四波长中红外激光同时输出。通过调节 PPSLT 晶体的温度,可以实现约 100 nm 可调谐输出。在晶体温度 190 °C 时,获得的总的 OPO 最高输出功率为 14.9 W,其中 1586.4、1625.9、3078.8、3231.1 nm 4 个波长输出功率分别为 3.71、4.36、3.21、3.62 W。本实验获得的中红外可调谐输出光源,可用于太赫兹波的产生以及激光制导、定向红外干扰等光电对抗等领域。

参 考 文 献

- 1 Wang Jianxun, Zhang Dongyang. Analysis of the IR active jamming technology[J]. Guidance and Fuze, 2003, 24(2): 46-50.
王建勋, 张东洋. 红外有源干扰技术分析[J]. 制导与引信, 2003, 24(2): 46-50.
- 2 D H Titterton. A review of the development of optical counter measure[C]. SPIE, 2004, 5615: 1-15.
- 3 Chen Zicong, Gao Zhihui, Cao Zhi, *et al.*. Research on CO₂ gas concentration test system based on mid-infrared LED[J]. Laser and Infrared, 2012, 42(11): 1255-1258.
陈子聪, 高致慧, 曹志, 等. 基于中红外 LED 的 CO₂ 气体浓度检测系统研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1255-1258.
- 4 Sun Guoming, Ma Hongliang, Wang Guishi, *et al.*. Frequency stabilization of mid-infrared difference frequency laser by iodine molecule absorption[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(7): 0702006.
孙明国, 马宏亮, 王贵师, 等. 碘分子吸收稳定中红外差频激光频率[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0702006.
- 5 Li Li, Wang Yiding, Li Shuwei. Application of infrared gas detection technology to safe production and transportation in natural gas industry[J]. Natural Gas Ind, 2011, 31(1): 96-103.
李黎, 王一丁, 李树维. 红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 96-103.
- 6 Zhang Lan, Zhang Qingyue, Nan Qun, *et al.*. Application of mid-infrared spectrum in non-invasive blood glucose measurement[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(2): 81-84.
张兰, 张清悦, 南群, 等. 中红外光谱法在无创血糖检测技术中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(2): 81-84.
- 7 W T Carnall, P R Fields, K Rajnak. Electronic energy levels in the trivalent lanthanide aqua ions. I. Pr³⁺, Nd³⁺, Pm³⁺, Sm³⁺, Dy³⁺, Ho³⁺, Er³⁺, and Tm³⁺[J]. J Chem Phys, 1968, 49(10): 4424-4442.
- 8 F L Madarasz, J O Dimmock, N Deitz, *et al.*. Sellmeier Parameters for ZnGeP₂ and GaP[J]. J Appl Physics. 2000, 87(3): 1564-1565.
- 9 Wu Haixin, Ni Youbao, Geng Lei, *et al.*. Investigation of infrared nonlinear crystal material ZnGeP₂[J]. J Synthetic Crystals, 2007, 36(3): 507-511.
吴海信, 倪友保, 耿磊, 等. 红外非线性晶体 ZnGeP₂ 的生长与品质研究[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(3): 507-511.

- 10 Wang Li, Yang Jingwei, Cai Xubin, *et al.*. 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(1): 0102008.
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, 41(1): 0102008.
- 11 M L Bortz, M A Arbore, M M Fejer. Quasi-phase-matched optical parametric amplification and oscillation in periodically-poled LiNbO₃ waveguides[J]. Opt Lett, 1995, 20(1): 49-51.
- 12 D Butterworth, V Pruneri, D C Hanna. Optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate based on continuous-wave synchronous pumping at 1047 nm[J]. Opt Lett, 1996, 21(17): 1345-1347.
- 13 W R Bosneberg, A Drobshoff, J I Alexander. Continuous-wave single resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO₃[J]. Opt Lett, 1996, 21(10): 713-715.
- 14 Liu Tong, Wang Xiaobo, Liu Lei, *et al.*. Mid-infrared synchronously pumped picosecond optical parametric oscillator based on PPMgLN crystal[J]. Chinese J Laser, 2011, 38(12): 1202003.
刘 通, 汪晓波, 刘 磊, 等. 基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的中红外同步抽运皮秒光参量振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202003.
- 15 W R Bosneberg, A Drobshoff, J I Alexander, *et al.*. 93% pump depletion, 3.5 W continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. Opt Lett, 1996, 21(10): 1336-1338.
- 16 L E Myers, R C Eckardt, M M Fejer, *et al.*. Quasi-phase matched optical parametric oscillations in bulk periodically poled LiNbO₃ [J]. J Opt Soc Am B, 1995, 12(11): 2102-2116.
- 17 L E Myers, M R Bosenberg, Periodically poled lithium niobate quasi-phase-matched optical parametric oscillators[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(10): 1663-1672.
- 18 X C Lin, Y Zhang, Y P Kong, *et al.*. Low-threshold mid-Infrared optical parametric oscillator using periodically poled LiNbO₃ [J]. Chin Phys Lett, 2004, 21(1): 98-100.
- 19 Cai Shuangshuang, Wu Bo, Shen Yonghang. Tunable mid-infrared parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 160-162.
蔡双双, 吴 波, 沈永行. 基于高品质 PPMgLN 器件的中红外光参量振荡器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 160-162.
- 20 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang, *et al.*. 3.8 μm mid-infrared laser with 11.2 W output power[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37: 82-85.
彭跃峰, 王卫民, 谢 刚, 等. 11.2 W 中红外 3.8 μm 激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 82-85.
- 21 Deng Huarong, Zhang Long, Xie Yuzhou, *et al.*. Low threshold 2 μm laser based on optical parametric oscillator using PPMgLN[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(7): 0702014.
邓花荣, 张 龙, 谢宇宙, 等. PPGgLN 用于光参量振荡实现低阈值 2 μm 激光[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702014.
- 22 Shen Zhaoguo, Dong Tao, Yang Yi, *et al.*. Study on fiber laser pumped optical parametric oscillator[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5): 502-505.
沈兆国, 董 涛, 羊 毅, 等. 光纤激光器泵浦光参量振荡器[J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 502-505.
- 23 M Nakamura, K Terabe, S Takekawa, *et al.*. Effect of subgrain boundaries on domain-inverted structure in periodically poled near-stoichiometric LiTaO₃ crystal[J]. Optical Materials, 2008, 31(2): 276-279.
- 24 M Nakamura, S Takekawa, Y Furukawa, *et al.*. Influence of powder supply on radio-frequency power stability and compositional uniformity in near-stoichiometric LiTaO₃ crystal grown by double-crucible Czochralski method[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, (245): 267-272.
- 25 Zuo Yue, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, *et al.*. Picosecond mid-infrared parametric generator based on periodically poled stoichiometric LiTaO₃[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 712-715.
邹 跃, 秘国江, 庞庆生, 等. PPSLT 皮秒中波红外光参量发生器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 712-715.
- 26 Lü Xinjie, Zhao Gang, Li Guijun, *et al.*. Mid-infrared laser with 1.2 W output power based on PPLT[J]. Sci China Ser G, 2009, 39(11): 1594-1598.
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 G 辑, 2009, 39(11): 1594-1598.
- 27 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, *et al.*. Research on optical parametric oscillator based on periodically poled LiTaO₃ crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0164001.
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 基于周期极化钽酸锂晶体的光参量振荡器技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0164001.