

文章编号: 0253-2239(2010)09-2624-05

高效率中红外 2.7 μm 可调谐激光器

彭跃峰 魏星斌 王卫民 李德明

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了采用 1064 nm 激光抽运周期极化掺杂氧化镁的铌酸锂 (PPMgO:CLN) 晶体光参变振荡器 (OPO) 实现高效率 2.7 μm 可调谐激光输出的实验结果, 理论计算了 PPMgO:CLN 晶体准相位匹配 (QPM) 温度调谐曲线。在 1064 nm 激光抽运功率为 182 W, 声光 Q 开关工作频率为 10 kHz 和 PPMgO:CLN 晶体工作温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 获得了平均功率为 36.7 W、波长为 2.73 μm 中红外激光输出, 斜率效率为 23.7%。通过改变周期为 31.3 μm PPMgO:CLN 晶体的工作温度 30 $^{\circ}\text{C}$ ~ 200 $^{\circ}\text{C}$, 获得了中红外波长 3.0 ~ 2.6 μm 激光输出, 波长温度调谐实验结果与理论分析结果有大约 10 $^{\circ}\text{C}$ 的差异。

关键词 激光器; 可调谐激光器; 光参变振荡器; 周期极化掺杂氧化镁的铌酸锂晶体; 准相位匹配

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2624

High-Efficiency 2.7 μm Tunable Mid-Infrared Laser

Peng Yuefeng Wei Xingbin Wang Weimin Li Deming

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Experimental results of a high-efficiency 2.7 μm tunable laser are demonstrated on a quasi-phase-matched singly resonant optical parametric oscillator (OPO) in PPMgO:CLN (5% MgO-doping) crystal pumped by a 1064 nm laser. Theoretical analysis of the PPMgO:CLN temperature tuning is presented. When the crystal is operated at 150 $^{\circ}\text{C}$ and the pump power is 182 W with a repetition rate of 10 kHz, an average output power of 36.7 W at 2.73 μm is obtained with a slope efficiency of 23.7%. The wavelength tunability of 3.0 ~ 2.6 μm can be achieved by adjusting the temperature of a 31.3 μm period PPMgO:CLN crystal from 30 $^{\circ}\text{C}$ to 200 $^{\circ}\text{C}$. Compared with the results of theoretical analysis, the discrepancy of about 10 $^{\circ}\text{C}$ is found in experiment.

Key words lasers; tunable laser; optical parametric oscillator (OPO); PPMgO:CLN crystal; quasi-phase-matching (QPM)

1 引 言

中红外波段光在大气环境监测、特殊环境远距离监控、光谱学研究以及光电对抗等诸多领域有重要的应用价值^[1~3]。可调谐中红外固体激光器由于其具有波长可调谐、高转换效率、结构紧凑、重量轻和维护简单等特点, 在红外对抗领域具有重要的应用价值。例如美国诺格公司研制的多波段毒蛇激光器在对抗红外制导导弹方面具有优异的性能, 其可以在 3 个波段产生红外激光: 波段 I (1 ~ 3 μm) 是 3 W, 波段 II (3 ~ 5 μm) 是 2 W, 波段 IV (8 ~ 12 μm) 是 5 W, 包括光束控制系统和电源系统尺寸为 ϕ 33 cm \times 5 cm, 重量 4.15 kg。随着性能优异的大尺寸中红外非线性晶体

技术的发展, 中红外光参变技术越来越成为研究热点^[4~14]。2005 年 Dawun Chen 等^[12] 通过 Yb 掺杂的光纤激光器抽运掺杂氧化镁的周期极化铌酸锂 (MgO:PPLN) 晶体, 采用单谐振光参变振荡器结构, 得到了波长 3 μm , 功率超过 10 W 的连续激光输出, 光束质量因子 $M^2 = 2.8$; 2007 年 Ian Elder 等^[13] 利用调 Q Ho:YAG 激光器抽运 ZGP 晶体, 得到了波长调谐 3 ~ 5 μm , 平均功率 12.6 W 激光输出, 光束质量因子 $M^2 = 2.7$ 。Yuefeng Peng 等^[14] 采用 1 μm 激光抽运 PPMgO:CLN 的 OPO 激光技术, 获得了 3.8 μm 激光输出功率 16.7 W, 波长 3.7 ~ 3.9 μm 可调谐输出, 光束质量因子 $M^2 < 6$ 。

收稿日期: 2009-10-28; 收到修改稿日期: 2010-01-26

作者简介: 彭跃峰 (1978—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: qiaopyf@yahoo.com.cn

本文采用 1064 nm 激光抽运厚度为 2 mm 的 PPMgO:CLN 晶体光参变振荡技术,获得了 2.73 μm 激光,平均输出功率为 36.7 W,斜率效率为 23.7%,波长为 2.6~3.0 μm 可调谐。

2 PPMgO:CLN 晶体准相位匹配特性

准相位匹配(QPM)可以利用晶体的最大非线性系数,且没有波矢方向和偏振方向的限制,理论上能够利用晶体的整个透光范围实现相位匹配。 LiNbO_3 是典型的负单轴晶体,在其所有的二阶非线性极化张量中,以 d_{33} 为最大,约为 27.4 pm/V,是双折射相位匹配常用的 d_{31} 的 7.5 倍。由于掺 MgO 的 PPLN 晶体能显著提高抗激光损伤阈值,且可以有效降低晶体的极化矫顽场,因此掺 MgO 周期极化 LiNbO_3 晶体成为实现 QPM 光参变振荡

器(OPO)最常见的铁电材料。在 QPM 条件下,由于对相互作用的耦合光波的偏振方向没有要求,可以人为的选择,因此,可以选择 $e \rightarrow e+e$ 匹配,此时 PPMgO:CLN 晶体发挥作用的有效非线性系数为 d_{33} ,从而降低了阈值,提高了转换效率。

在 PPMgO:CLN 的 QPM OPO 中,三波相互作用的能量守恒和共线条件下的动量守恒公式满足

$$\begin{cases} 1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/d_i \\ n_{ep}/\lambda_p = n_{es}/\lambda_s + n_{ei}/\lambda_i + 1/\Lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中 λ_p, λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光波长, n_{ep}, n_{es} 和 n_{ei} 分别为抽运光、信号光和闲频光折射率, Λ 为 PPMgO:CLN 晶体极化周期。

PPMgO:CLN 晶体中 e 光折射率塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程^[15]为

$$n_e^2(\lambda, t) = 5.756 + 2.86 \times 10^{-6} f(t) + \frac{0.0983 + 4.7 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.202 + 6.113 \times 10^{-8} f(t)]^2} + \frac{189.32 + 1.516 \times 10^{-4} f(t)}{\lambda^2 - 12.52^2} - 1.32 \times 10^{-2} \lambda^2, \quad (2)$$

式中 $f(t) = (t - 24.5)(t + 570.82)$, t 为摄氏温度, λ 单位为 μm 。

考虑晶体的热膨胀,若在温度为 t_0 时光栅周期为 $\Lambda(t_0)$,则在温度为 t 时光栅周期 $\Lambda(t)$ 应为

$$\Lambda(t) = \Lambda(t_0)[1 + a(t - t_0)], \quad (3)$$

式中 a 为晶体的热膨胀系数, $a = (\partial l / \partial T)(1/l)$; l 为晶体长度。

QPM 采用温度调谐方式可以获得较高波长调谐精度和波长连续调谐,同时采用周期调谐和温度调谐方式,既可以获得较宽的调谐范围,也可以获得较高的调谐精度。利用 PPMgO:CLN 晶体 OPO 能量守恒和

动量守恒公式,计算了在 PPMgO:CLN 晶体周期为 31.3 μm (在常温 25 $^\circ\text{C}$ 时),采用 1064 nm 激光抽运情况下,光参变振荡波长调谐与晶体温度的关系,如图 1 所示。从图中可以了解到,晶体工作在 30 $^\circ\text{C}$ ~200 $^\circ\text{C}$ 温度范围时,可以获得中红外波长 3.06~2.57 μm 和近红外波长 1.63~1.82 μm 激光调谐输出。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验采用 1064 nm 激光抽运 PPMgO:CLN OPO 单谐振腔(SRO)结构,实验装置如图 2 所示。1064 nm 激光谐振腔由全反镜、输出镜、Nd:YAG 增益模块、声光 Q 开关、石英旋转片和偏振片等组成。 M_1 对 1064 nm 激光高反, M_2 对 1064 nm 激光反射率为 50%。Nd:YAG 增益模块为自行研制, Nd:YAG 晶体棒尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 106 \text{ mm}$,采用连续的二极管 bar 条环绕晶体棒排列侧面抽运方式,荧光分布均匀性优于 90%。通过合理设计 1064 nm 激光器参数,获得了高功率、高光束质量 1 μm 激光输出。在声光 Q 开关工作频率为 10 kHz, 1064 nm 激光输出功率为 220 W 时,光束质量因子 $M^2 < 5$ 。1064 nm 激光抽运 PPMgO:CLN(MgO 掺杂摩尔分数为 5%)晶体, OPO 输出近红外和中红外波段激光,抽运光斑直径约为 1.9 mm。OPO 技术采用

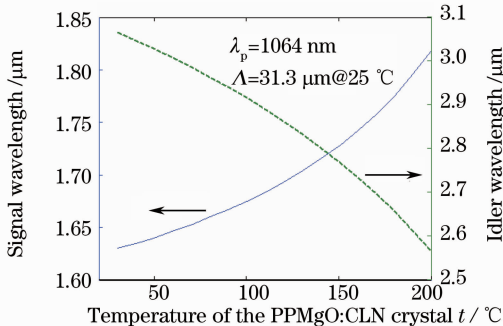


图 1 PPMgO:CLN 晶体温度调谐曲线

Fig. 1 Temperature tuning curve for PPMgO:CLN crystal

$e \rightarrow e + e$ 相位匹配,从而消除了光束之间的走离效应和利用了 PPMgO:CLN 晶体的最大非线性系数 d_{33} (27.4 pm/V)。平面镜 M_3, M_4 构成 PPMgO:CLN OPO 谐振腔, M_3 对 1064 nm 高透,对 2.5~3.1 μm 激光高反, M_4 对 1064 nm 激光高反,对 2.5~3.1 μm 反射

率为 60%,对 1.6~1.9 μm 透射率约为 85%。在常温下 PPMgO:CLN 晶体周期为 31.3 μm ,2 个通光面对 1064 nm,1.6~1.9 μm 和 2.5~3.1 μm 激光高透,晶体尺寸为 2 mm×4 mm×40 mm。晶体安装在控温炉里,控温范围可到 200 $^{\circ}\text{C}$,控温精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

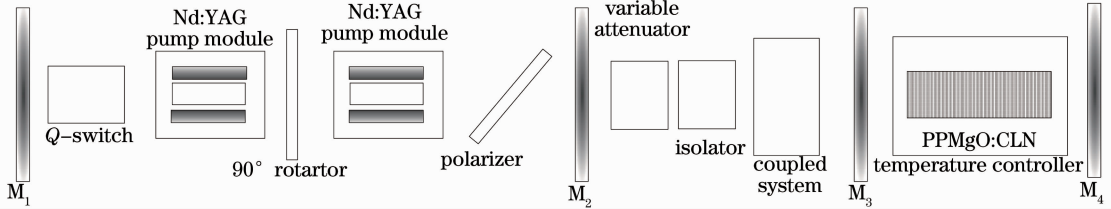


图 2 PPMgO:CLN OPO SRO 实验装置

Fig. 2 Experimental setup of PPMgO:CLN OPO SRO

3.2 实验结果与分析

当 1064 nm 激光抽运功率为 182 W,频率为 10 kHz,PPMgO:CLN 晶体工作温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ 时,2.73 μm 激光输出功率为 36.7 W,斜率效率为 23.7%,对应近红外 1.74 μm 激光输出功率约为 63 W,中红外激光输出功率与抽运功率关系曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,中红外激光输出功率没有出现饱和效应,因此随着抽运功率的提高,有可能获得更高功率中红外激光输出。

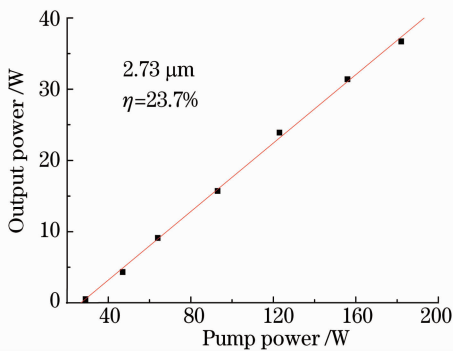


图 3 激光输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 3 Laser output power versus pump power

中红外激光输出功率采用事先标定好的分光镜和功率计来测量,OPO 输出镜 M_4 对 1064 nm 激光反射率大于 99.8%(事先标定过),输出激光中基本不含 1064 nm 激光。采用对 1.6~1.9 μm 激光高反,对 2.5~3.1 μm 激光高透的分光镜对 OPO 输出激光功率进行分光测量,通过测量分光镜反射部分激光功率和透射部分激光功率,然后根据事先标定好的分光镜参数计算得出中红外激光输出功率。OPO 输出激光中还含有可见光成份,这些可见光是抽运光、信号光、闲频光之间和频、差频、倍频的结果,由于这些非线性效应都是 PPMgO:CLN 高阶非

线性效应,功率较小,均为毫瓦量级(经过理论分析和相应测量手段分析判断的结果),在激光高功率输出分析信号光和闲频光功率所占比例时,可见光输出功率可以忽略。

通过改变 PPMgO:CLN 晶体的工作温度 30 $^{\circ}\text{C}$ ~200 $^{\circ}\text{C}$,实验上获得了中红外波长 3.0~2.6 μm 可调谐激光输出,与理论分析有约 10 $^{\circ}\text{C}$ 差异,其中晶体工作温度为 160 $^{\circ}\text{C}$,130 $^{\circ}\text{C}$,90 $^{\circ}\text{C}$,和 50 $^{\circ}\text{C}$ 四种工作温度情况下中红外激光输出光谱如图 4 所示。由于图 4 所示光谱图的测量精度为 5 nm,并不能非常精确的显示出激光的线宽,线宽约 20 nm。光谱测量实验结果与理论分析有稍许差异主要原因可能与折射率方程的准确性、晶体周期的一致性、热梯度、测量的准确性和精度等因素有关。

采用中红外激光脉宽探测器测量了 2.7 μm 激光输出脉宽,脉宽约为 70 ns,如图 5 所示。通过改变晶体工作温度,在抽运功率为 182 W 情况下测量了 OPO 中红外激光平均输出功率,如图 6 所示。从图 6 了解到,在不同工作温度情况下,光参变振荡器中红外激光输出功率有所差异,并且没有规律,分析认为激光器输出波长不同、测量误差、激光器稳定性、光学元器件膜系参数有稍许差异等都有可能造成这种差异。在低功率抽运情况下,通过改变晶体工作温度发现光参变振荡器在 2.82~2.85 μm 波段存在一定的吸收损耗,转换效率相对其他中红外输出波长要低,该波段对应晶体工作温度约为 114 $^{\circ}\text{C}$ ~125 $^{\circ}\text{C}$ 。在抽运功率为 182 W 时,并没有测量晶体工作温度在 105 $^{\circ}\text{C}$ ~135 $^{\circ}\text{C}$ 时的中红外激光输出功率,以避免在高功率抽运时引起晶体损伤。对激光器的输出功率稳定性进行了测量,波长

2.73 μm 激光输出功率 36 W 时,连续工作 1 min,功率稳定性约为 ±4%,连续工作 3 min,功率稳定性约为 ±6%。当波长 2.73 μm 激光平均输出功率

18 W 时(36 W 的 50%),连续工作 20 min,功率稳定性约为 ±5%。

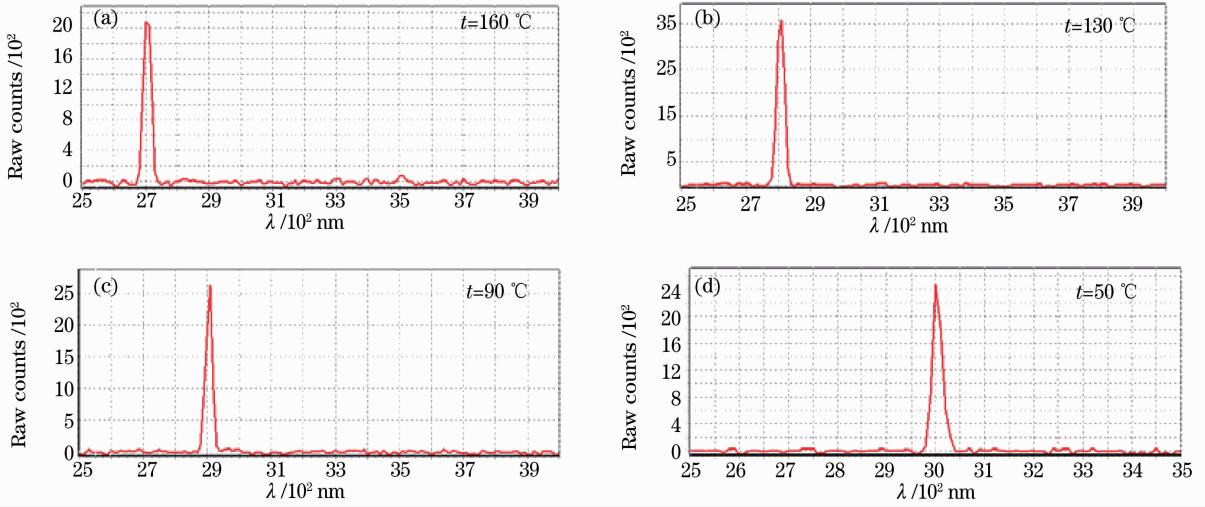


图 4 输出激光光谱

Fig. 4 Spectra of output laser

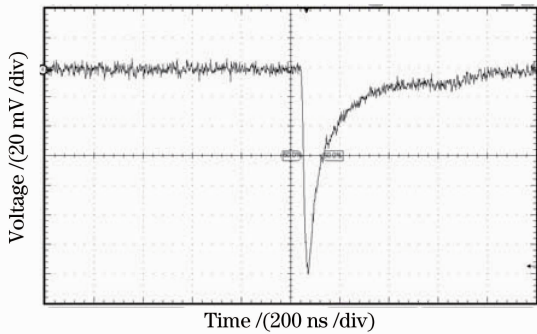


图 5 2.7 μm 激光脉冲波形

Fig. 5 Temporal profile of 2.7 μm laser pulse

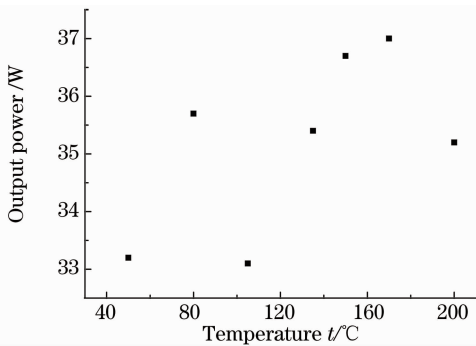


图 6 激光输出功率与晶体工作温度关系

Fig. 6 Laser output power versus the temperature of PPMgO:CLN crystal

4 结 论

本文采用 1064 nm 激光抽运 PPMgO:CLN 晶体

准相位匹配光参变振荡技术,获得了中红外 2.73 μm 激光功率约 37 W 输出,通过温度调谐方式,获得了中红外 2.6~3.0 μm 波长调谐输出。将进一步优化实验方案,避免光学元器件损伤,提高 PPMgO:CLN 光参变振荡激光器长期工作稳定性。

参 考 文 献

- 1 Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2006, **35**(5): 536~550
- 2 Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 1~6
- 3 Maarten van Herpen, Sacco te Lintel Hekkert, Scott E. Bisson *et al.*. The development of a powerful continuous tunable, mid infrared, cw PPLN OPO for gas detection[C]. *SPIE*, 2002, **4762**: 16~21
- 4 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 670~674
- 5 Y. Hirano, S. Yamamoto, H. Taniguchi. Highly efficient and high power 2 μm generation with PPMgLN OPO[C]. Conference on Lasers & Electro-Optics(CLEO), 2001. 579~580
- 6 T. Sumiyoshi, Y. Otani, S. Matsumoto *et al.*. Development of a two-wavelength OPO generating 270-mJ infrared pulses for medical applications[C]. *IEEE*, 2004. 807~808
- 7 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang *et al.*. 3.8 μm mid-infrared laser with 11.2 W output power[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2008, **37**(suppl.): 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**(增刊): 82~85
- 8 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. High efficiency periodically poled lithium niobate with MgO optical parametric oscillator 2.7 μm laser with 11.8 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2262~2265
- 彭跃峰, 谢刚, 王卫民等. 11.8 W 高效率掺氧化镁的周期极化铌酸锂晶体光参量振荡 2.7 μm 激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2262~2265
- 9 H. Ishizuki, T. Taira. High-energy optical-parametric oscillator by using 5 mm \times 5 mm aperture periodically poled MgO:LiNbO₃ [C]. Conference on Lasers & Electro-Optics Europe, 2005. 214
- 10 Kevin T. Zawilski, Peter G. Schunemann, Scott D. Setzler *et al.*. Large aperture single crystal ZnGeP₂ for high-energy applications[J]. *J. Crystal Growth*, 2007, **310**: 1891~1896
- 11 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. High efficiency optical parametric oscillator 2.7 μm laser on PPMgLN pumped by 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1815~1818
- 彭跃峰, 谢刚, 王卫民等. 1064 nm 激光抽运 PPMgLN 光参量振荡高效率 2.7 μm 激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1815~1818
- 12 Dawun Chen, Todd S. Rose. Low noise 10-W OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN [C]. Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO), 2005. 1829~1831
- 13 Ian Elder. High average power thulium fibre laser pumped mid-IR source [C]. *SPIE*, 2007, **6738**: 673804
- 14 Yuefeng Peng, Weimin Wang, Xingbing Wei *et al.*. High efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2897~2899
- 15 O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. B-Lasers and Optics*, 2008, **91**(2). 343~348