

基于 PPMgO:CLN 的光参量放大器

彭 珏^{1,2,3} 王卫民^{1,2} 彭跃峰^{1,2} 魏星斌^{1,2} 罗兴旺^{1,2} 高剑蓉^{1,2} 李德明^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900
²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900
³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 对基于周期极化掺氧化镁的铈酸锂(PPMgO:CLN)晶体的光参量放大器(OPA)进行了理论分析和实验研究。模拟了 PPMgO:CLN 晶体准相位匹配(QPM)波长-温度调谐曲线和 OPA 中各光波平均功率随晶体长度的变化曲线,并进一步分析了最佳晶体长度的影响因素。当常温极化周期为 31.3 μm 的 PPMgO:CLN 晶体工作在 150 $^{\circ}\text{C}$ 时,用平均功率为 44 W 的调 Q Nd:YAG 激光器抽运 OPA,注入 OPA 内的 2.765 μm 激光的功率由 4 W 定标放大至 13.3 W,转换效率为 21.14%。

关键词 非线性光学; 中红外激光; 光参量放大器; 光参量振荡器; 周期极化掺氧化镁的铈酸锂晶体
中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602004

Optical Parametric Amplifier Based on PPMgO:CLN

Peng Jue^{1,2,3} Wang Weimin^{1,2} Peng Yuefeng^{1,2} Wei Xingbin^{1,2}
Luo Xinwang^{1,2} Gao Jianrong^{1,2} Li Deming^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract The theoretical analysis and experimental research of the optical parametric amplifier (OPA) based on periodically poled MgO:LiNbO₃ (PPMgO:CLN) are presented. The quasi-phase-matched (QPM) wavelength-temperature tuning curves and the curves of average power of each light versus crystal length are simulated, and the influencing factors of optimum length are investigated. When the crystal with grating period of 31.3 μm is operated at 150 $^{\circ}\text{C}$ and the OPA stage is pumped by a Q-switched Nd:YAG laser with average power of 44 W, the input idle power of 4 W at 2.765 μm is amplified by 13.3 W, and the conversion efficiency is 21.14%.

Key words nonlinear optics; mid-infrared laser; optical parametric amplifier; optical parametric oscillator; periodically poled MgO:LiNbO₃

OCIS codes 140.3070; 140.3480; 190.4970

1 引 言

宽调谐范围、高输出功率、高转换效率且结构紧凑的光参量振荡技术是产生 3~5 μm 波段中红外激光的有效途径之一^[1,2]。在光电对抗、大气监测、太赫兹场产生、自由空间光通信等诸多领域的应用需求驱使下,进一步提高中红外激光功率成为国内外研究的热点。光参量放大器(OPA)在超短脉冲

光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)上的应用广受国内外科研工作者关注^[3,4],而采用高增益单程 OPA 系统对光学参量振荡器(OPO)输出参量光进行功率定标放大作为实现高功率中红外激光输出的一种有效途径也备受关注。

2004 年,Arisholm 等^[5]通过 OPO/OPA 两级系统获得了高光束质量($M^2 \approx 2.3$)、高转换效率的

收稿日期: 2013-02-28; 收到修改稿日期: 2013-04-15

作者简介: 彭 珏(1991-),女,硕士研究生,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: jpeng2016@gmail.com

导师简介: 王卫民(1965-),男,研究员,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: weimin_653@163.com

2.1 μm 中红外激光输出:单脉冲能量为 8 mJ 的 Nd:YAG 激光抽运磷酸氧钛钾光学参量振荡器(KTP-OPO),产生 1.9 mJ 参量光,抽运能量为 500 mJ 的 KTP-OPA 将此参量光放大至 138 mJ。2006 年, Saikawa 等^[6]使用了厚度为 5 mm 的大尺寸周期极化掺氧化镁的铌酸锂 (PPMgO:CLN) 晶体,在 0.7 mJ 的 OPO 窄线宽种子光注入和 86 mJ 的 1.064 μm 激光抽运下,获得了 52 mJ 的 2.128 μm 简并点输出,线宽为 2 nm,系统总的光-光转换效率达 60%。2008 年, Dergachev 等^[7]实现了主振荡功率放大 Ho:YLF 激光器抽运的 ZGP-OPO/OPA 系统,OPO 获得的大于 10 mJ 的 3.4 μm 信号光经 OPA 放大至 30 mJ,转换效率约为 20%。

本文采用声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器抽运单谐振 PPMgO:CLN-OPO 和单程 PPMgO:CLN-OPA,OPA 将 OPO 产生的 4 W 的 2.765 μm 闲频光功率放大至 13.3 W,转换效率为 21.14%。

2 理论分析

2.1 PPMgO:CLN 晶体准相位匹配特性

准相位匹配(QPM)技术可以选择光束偏振方向以利用晶体的最大非线性极化系数,理论上可在整个晶体通光范围内实现相位匹配。目前,QPM 中应用最为广泛的铁电材料是 PPMgO:CLN 晶体,其有效非线性极化系数大、透射光谱范围宽的特点,有助于获得高效率、低阈值的中红外激光输出^[8,9]。

OPO 和 OPA 中的三波混频过程均需满足能量守恒和动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_s} \\ \frac{n_p(\lambda_p, t)}{\lambda_p} - \frac{n_i(\lambda_i, t)}{\lambda_i} - \frac{n_s(\lambda_s, t)}{\lambda_s} - \frac{1}{\Lambda(t)} = 0, \quad (1) \\ \Lambda(t) = \Lambda(t_0)[1 + a(t - t_0)] \end{cases}$$

式中 $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_s$ 分别为抽运光、信号光和闲频光波长; n_p, n_i, n_s 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,考虑 PPMgO:CLN 晶体的热膨胀效应对晶体极化周期的影响,极化周期为一个与温度相关的函数, $a = 2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 为晶体的热膨胀系数^[10]。

由于 QPM-OPO 对三束耦合光波的偏振方向没有限制,为使非线性极化系数取最大值 $d_{33} = 27.4 \text{ pm/V}$ 以降低振荡阈值和提高转换效率,选择 $e+e \rightarrow e$ 匹配。PPMgO:CLN 晶体中 e 光折射率 Sellmeier 方程为^[11]

$$\begin{cases} n_e^2 = 5.756 + 2.860 \times 10^{-6} f(t) + \\ \frac{0.0983 + 4.700 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.202 + 6.113 \times 10^{-8} f(t)]^2} + \\ \frac{189.320 + 1.516 \times 10^{-4} f(t)}{\lambda^2 - 12.520^2} - \\ 1.320 \times 10^{-2} \lambda^2 \\ f(t) = (t - 24.5)(t + 570.82) \end{cases}, \quad (2)$$

式中晶体温度 t 单位为 $^\circ\text{C}$, 波长 λ 单位为 μm 。

PPMgO:CLN 晶体的极化周期为 31.3 μm (常温 25 $^\circ\text{C}$), 抽运源为 1.064 μm 的 Nd:YAG 激光器,此时 OPO 和 OPA 波长温度调谐曲线如图 1 所示。通过改变 PPMgO:CLN 晶体的温度,可以对参量光波长进行连续高精度的调谐。在晶体温度为 150 $^\circ\text{C}$ 时,获得 2.765 μm 的闲频光和 1.73 μm 的信号光输出。

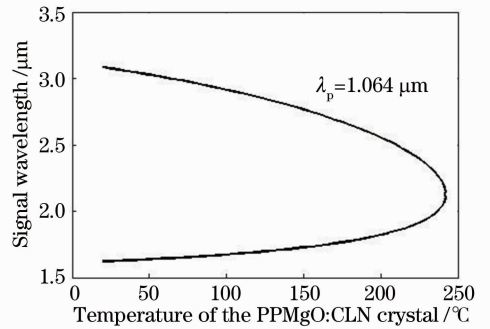


图 1 PPMgO:CLN 晶体温度调谐曲线

Fig. 1 Wavelength-temperature tuning curve for PPMgO:CLN crystal

2.2 最佳晶体长度分析

当满足相位匹配条件 $\Delta k = 0$ 时,描述光参量放大过程的归一化平面耦合波方程为^[12]

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial \xi} = -u_s u_p \\ \frac{\partial u_s}{\partial \xi} = -u_i u_p \\ \frac{\partial u_p}{\partial \xi} = u_i u_s \\ \xi = \frac{2\pi\chi_e(\pi W)^{1/2} z}{(\epsilon_0 \lambda_i \lambda_s \lambda_p n_i n_s n_p)^{1/2}} \\ W = \frac{P_p(0)}{\pi r_p^2} + \frac{P_s(0)}{\pi r_s^2} + \frac{P_i(0)}{\pi r_i^2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $u_p^2 = \frac{P_p \lambda_p}{2\pi^2 r_p^2 c W}$, $u_i^2 = \frac{P_i \lambda_i}{2\pi^2 r_i^2 c W}$, $u_s^2 = \frac{P_s \lambda_s}{2\pi^2 r_s^2 c W}$, 分别为抽运光、闲频光、信号光归一化光子流密度; ξ 为归一化长度; W 为光传播方向上的功率流; P_p, P_i, P_s 分别为抽运光、闲频光、信号光平均功率; $P_p(0), P_i(0), P_s(0)$ 则分别为抽运光、闲频光、信号

光初始平均功率； r_p, r_i, r_s 分别为抽运光、信号光、闲频光光斑半径； ϵ_0 为真空中介电常数； χ_e 为有效非线性极化系数； z 为晶体长度。

对于 PPMgO:CLN-OPA, 选取 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运光平均功率为 40 W , 重复频率为 8 kHz , 脉宽为 70 ns , 光斑半径为 1 mm , $2.765 \mu\text{m}$ 闲频光和 $1.73 \mu\text{m}$ 信号光的初始平均功率分别为 4 W 和 0 , 重复频率、脉宽、光斑半径与抽运光均相同, 此时将各光波初始平均功率、光斑半径和(1)式求得各光波波长及相位折射率代入(3)式可得 OPA 中各光波的平均功率随晶体长度的变化, 如图 2 所示。可以看出, 在光学参量放大器中, 参量过程和和频过程交替发生, 抽运光、参量光功率和转换效率呈周期性变化。定义闲频光输出功率和转换效率首次达极大值的晶体长度为最佳长度, 在不同闲频光初始功率下, 改变(3)式中的抽运功率, 则最佳晶体长度将发生相应变化。图 3 为最佳晶体长度随抽运光功率的变化情况, 由图 3 可得, 当抽运光和闲频光波长一定时, 抽运光功率越大、头频光初始功率越大, 最佳晶体长度越短。

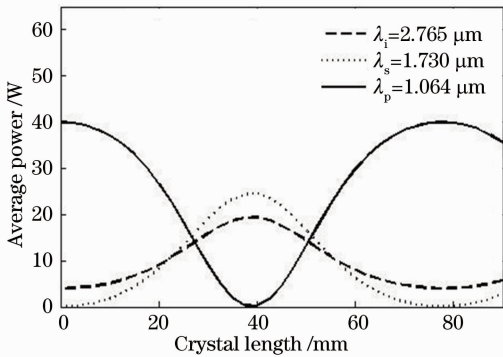


图 2 OPA 中各光波平均功率随晶体长度的变化
Fig. 2 Average power of each light in OPA versus crystal length

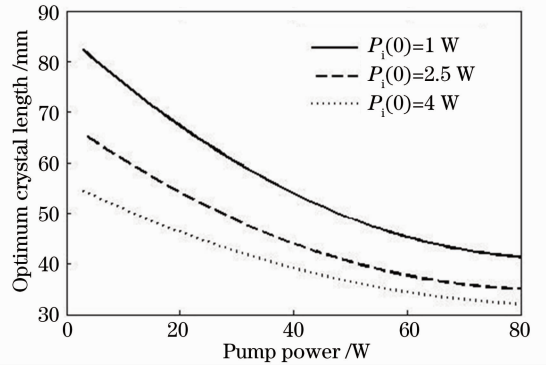


图 3 最佳晶体长度随抽运光功率的变化
Fig. 3 Optimum crystal length versus pump power

3 实验研究

3.1 实验装置

实验采用 $1.064 \mu\text{m}$ 激光抽运单谐振 PPMgO:CLN-OPO 和单程 PPMgO:CLN-OPA 结构, 实验装置如图 4 所示。OPO 产生的闲频光注入由另一束 $1.064 \mu\text{m}$ 激光抽运的 OPA 中, 此闲频光和抽运光均经耦合系统调整光斑大小, 以使 OPA 中获得良好的空间重叠, 提高转换效率。OPO 和 OPA 中所用 PPMgO:CLN 晶体相同, 其尺寸为 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。在常温下晶体极化周期为 $31.3 \mu\text{m}$, 两端面均镀有对 $1.064, 2.5 \sim 3.1, 1.6 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 的增透膜, 晶体安装于温控炉中, 控温范围为室温到 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 控温精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 实验结果与分析

根据图 4 所示实验装置图开展了实验研究。控制 PPMgO:CLN 晶体温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 利用重复频率为 8 kHz 的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光抽运 OPO, 获得了 $2.765 \mu\text{m}$ 闲频光输出。采用中红外激光脉宽探测器 (VIGO PVM-10.6) 测得功率为 5 W 的 $2.765 \mu\text{m}$ 闲频光脉

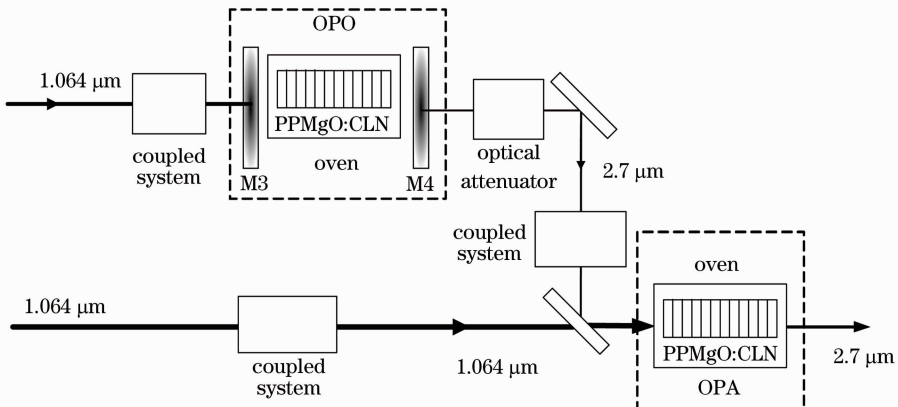


图 4 PPMgO:CLN-OPO/OPA 实验装置图
Fig. 4 Experimental setup of PPMgO:CLN-OPO & OPA

宽为63.5 ns,功率为 44 W 的 1.064 μm 抽运光脉宽为 64.11 ns,脉冲波形如图 5 所示。

实验着重对闲频光输入功率一定的情况下,OPA 中输出闲频光功率与抽运功率的关系进行了研究。通过光衰减系统先后分别锁定 OPO 输出参量光功率为 4 W 和 1 W,调节 OPA 抽运光功率,获得 OPA 中输出参量光功率与抽运功率的关系曲线,如图 6 所示。

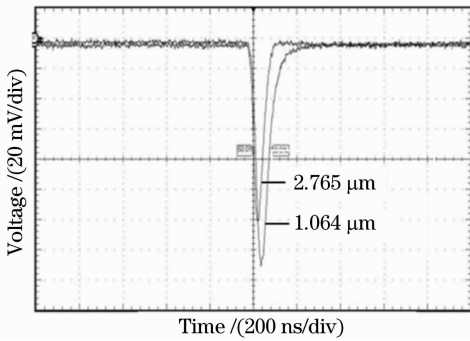


图 5 2.765 μm 和 1.064 μm 激光脉冲波形图

Fig. 5 Temporal profile of 2.765 μm and 1.064 μm laser pulses

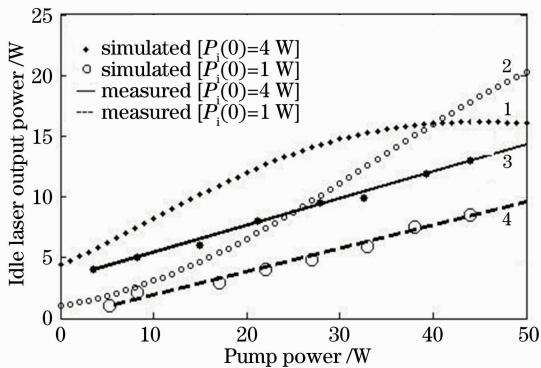


图 6 闲频光输出功率随抽运功率的变化

Fig. 6 Idle laser output power versus pump power

从理论计算曲线 1、2 可看出,在抽运功率大于 30 W 后,初始闲频光功率为 4 W 的参量光输出功率的增长趋于平缓,而初始闲频光功率为 1 W 的参量光输出功率则保持较高转换效率。由图 3 可得,当晶体长度为 50 mm 时,初始闲频光功率 4 W、1 W 分别对应的最佳抽运功率为 48 W 和 11.8 W,因此图 6 中曲线 1 在抽运功率为 11.8 W 处转换效率达最大值,此后抽运功率继续增大,将产生和频过程,转换效率降低;而曲线 2 则在抽运功率小于 48 W 时只发生参量过程,因此转换效率不断增加,闲频光输出近似线性增长。考虑到抽运光线宽、抽运光角度、高增益和晶体温度等引起的相位失配以及各种损耗造成的转换效率降低,最佳抽运功率应较相位

匹配时大。所以如图 6 中实际测量曲线 3、4 所示,闲频光相对于抽运光的转换效率仍有较大的提升空间。

实验中用 44 W 的 1.064 μm 激光抽运 OPA 时,4 W 的 2.765 μm 激光被定标放大至 13.3 W,转换效率为 21.14%;1 W 的 2.765 μm 激光被定标放大至 8.8 W,转换效率为 18.7%。由于理论计算采用相位匹配条件下的平顶波模型,对晶体长度和初始功率进行优化组合且令 $\Delta k=0$ 时,参量转换效率可达 100%,其中 2.765 μm 闲频光理论占比为 38.7%。而实际光波近似于高斯波,最高参量转换效率低于平面波情况^[13],相位失配和各种损耗也将造成转换效率的降低,因此实验值与理论值有一定差距。

通过改变 OPA 中 PPMgO:CLN 晶体温度,当晶体温度由 150 $^{\circ}\text{C}$ 降为 145 $^{\circ}\text{C}$ 时,转换效率并未有明显改变,而当进一步降低晶体温度时带来的温度失配使得转换效率大幅下降。这也证实了相位失配对 OPA 参量过程分析的重要性,在下一步工作中将优化理论模型,引入相位失配量。

4 结 论

理论分析了 OPA 中各光波功率随晶体长度的变化,并进一步分析了抽运光功率和闲频光初始功率对最佳晶体长度的影响。当声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器输出的 1.064 μm 激光抽运 OPA 的功率为 44 W 时,将 4 W 的 2.765 μm 激光定标放大至 13.3 W,转换效率为 21.14%。下一步的工作将围绕贴合实际引入相位失配计算高斯波理论模型以及提高 OPA 输出功率和转换效率展开。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Liu Lei, Li Xiao, Liu Tong *et al.*. Progress of mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillation technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060002
刘磊,李霄,刘通等. 中红外连续波光参量振荡技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(6): 060002
- 3 C. Heese, C. Phillips, L. Gallmann *et al.*. Ultrabroadband, highly flexible amplifier for ultrashort mid-infrared laser pulses based on aperiodically poled Mg:LiNbO₃[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2340~2342
- 4 Chen Liezun, Wen Shuangchun. Recent advances and methods of optical parametric generation and amplification for tunable ultrashort mid-infrared pulse[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081902
陈列尊,文双春. 可调谐超短中红外激光脉冲的参变产生与放大

- 及其最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(8): 081902
- 5 G. Arisholm, O. Nordseth, G. Rustad. Optical parametric master oscillator and power amplifier for efficient conversion of high-energy pulses with high beam quality[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(18): 4189~4197
- 6 Saikawa M, Fujii *et al.*. 52 mJ narrow-bandwidth degenerated optical parametric system with a large-aperture periodically poled MgO:LiNbO₃ device[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **31**(21): 3149~3151
- 7 A. Dergachev, D. Armstrong, A. Smith *et al.*. High-power, high-energy ZGP OPA pumped by a 2.05- μ m Ho:YLF MOPA system[C]. *SPIE*, 2008, **6875**: 687507
- 8 R. Bhushan, H. Yoshida, K. Tsubakimoto *et al.*. Generation of high efficiency 2 μ m laser pulse from a periodically poled 5 mol% MgO-doped LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. Express*, 2008, **1**(2): 022007
- 9 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Wei Xingbin *et al.*. High-efficiency mid-infrared optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2897~2899
- 10 Zhang Kecong, Wang Ximin. Science of the Nonlinear Optical Crystal Materials (2nd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2005. 272
张克从, 王希敏. 非线性光学晶体材料科学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 272
- 11 O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equation for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(3): 343~348
- 12 Li Gang. The Transformation and Extendibility of Laser Frequency[M]. Beijing: Science Press, 2005. 162
李 港. 激光频率的变换与扩展[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 162
- 13 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering (5th edition)[M]. New York: World Book Press, 2005. 162

栏目编辑: 张 腾