

文章编号: 0258-7025(2008)10-1459-04

基于周期极化铌酸锂晶体的高功率 可调谐光参量振荡器

杨 剑¹ 李晓芹² 姚建铨³ 邢丕彬¹

¹ 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; ³ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 研究了镁掺杂周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡 (PPMgLN-OPO) 产生高功率、高重复频率中红外激光的特性。采用半导体激光器 (LD) 抽运的声光调 Q Nd:YAG 激光器, 1064 nm 准连续激光功率最大输出为 7.8 W, 重复频率 5~50 kHz。产生 1064 nm 调 Q 光, 抽运周期为 30.7 μm 的掺氧化镁 (摩尔分数为 5%) 周期性极化铌酸锂晶体, 温度变化范围为 40~200 $^{\circ}\text{C}$, 实现了短腔双谐振红外高功率激光输出。实验中近红外激光波长调谐范围为 1570~1676 nm, 最高输出功率 613 mW; 中红外输出波长范围为 2942~3300 nm, 中红外光平均功率也达到了百毫瓦级, 信号光单脉冲能量达 40 μJ ; 光-光 (LD-信号光) 转换效率为 3.4%。

关键词 非线性光学; 准相位匹配; 温度调谐; 镁掺杂周期极化铌酸锂晶体; 光学参量振荡

中图分类号 O 437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20083510.1459

High-Power Temperature-Tunable Periodically-Poled Lithium Niobate Optical Parametric Oscillator

Yang Jian¹ Li Xiaoqin² Yao Jianquan³ Bing Pibin¹

¹ Henan Key Laboratory of Laser and Opto-Electric Information Technology,
Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

³ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A high-rate and high-power optical parametric oscillator is experimentally demonstrated. 1064 nm Q-switched Nd:YAG laser is pumped by laser diode (LD) laser. The maximal output power is 7.8 W with the pulses repetition rate range of 5~50 kHz. Optical parametric oscillator (OPO) based on periodically-poled lithium niobate (PPMgLN) pumped by the 1064 nm Q-switched Nd:YAG laser. Periodically poled grating ($\Lambda = 30.7 \mu\text{m}$) was successfully fabricated in 1.0 mm thick MgO:LiNbO₃ (doped 5% MgO). The output infrared wavelength will change because of the expansion coefficient of PPLN material when the operating temperatures fluctuate from 40 to 200 $^{\circ}\text{C}$. The tuning dimensions of the infrared wavelength are 1570~1676 nm and 2942~3300 nm with the signal maximal power of 613 mW. Several hundred milliwatt of output idler average power was obtained by using short and dual-cavity, the energy of single pulse is 40 μJ , and the conversion efficiency is 3.4%.

Key words nonlinear optics; quasi-phase-matched; temperature-tunable; periodically-poled lithium niobate; optical parametric oscillator

收稿日期: 2008-01-21; 收到修改稿日期: 2008-02-26

基金项目: 河南省重点科技攻关计划 (0223024900) 资助项目。

作者简介: 杨 剑 (1983—), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术及非线性激光变频技术方面的研究。

E-mail: yangjianlizi@163.com

导师简介: 姚建铨 (1939—), 男, 江苏人, 院士, 博士生导师, 主要从事激光与非线性变频技术及太赫兹波方面的研究。

E-mail: jqyao@tju.edu.cn

1 引 言

高重复频率、高平均功率的可调谐中红外 3~5 μm 激光在激光定向红外干扰和激光差分吸收雷达方面有非常广泛的应用^[1]。得到这种波长的方式很多,将现有固体激光波长通过非线性变频技术,把短波长激光转换到中红外区域,光参量振荡成为一种非常有效的方式。

光学参量振荡器(OPO)具有阈值低、转换效率高、结构紧凑、稳定性好、可高重复频率工作等优点。适用于 3~5 μm 输出的 OPO 晶体有 KTP, PPLN, ZnGeP₂, AgGaSe₂, CdGeAs₂, AgGaS₂ 等。由于 ZnGeP₂ (ZGP) 和掺 MgO 的 PPLN 晶体具有宽的透光范围、大的非线性系数、高的抗损伤阈值等晶体参数,在高功率中红外激光应用上有较广阔的前景。近年来,不断涌现出新的手段实现了中红外激光高功率瓦级输出,比如掺 Tm, Ho: YLF 激光器抽运的 ZGP-OPO^[2], Nd: YAG 激光抽运的 KTP-OPO 作为抽运源抽运的 ZGP-OPO, 以及 Nd: YAG 或者 Nd: YVO₄ 激光抽运的 PPLN-OPO^[3~8]。

本文报道一种基于掺镁的周期极化铌酸锂 (PPMgLN) 晶体, 实现高功率高重复频率中红外激光输出的光学参量振荡器。采用声光调 Q Nd: YAG 激光器作为抽运源, 脉宽为 60 ns, 重复频率 5~50 kHz, OPO 镜片采用双谐振输出, 参量振荡阈值为 684 mW。在抽运光功率为 7.8 W 时, 实现了 1570~1676 nm 的近红外和 2942~3300 nm 的中红外激光输出, 信号光单脉冲能量达 40 μJ , 最高平均功率为 613 mW, 实验中光-光(LD-信号光)转换效率为 3.4%。

2 理论分析

像大多数非线性光学过程一样, OPO 必须遵守相位匹配条件。相位匹配条件由两个条件决定

$$\text{能量守恒条件: } \omega_s + \omega_i = \omega_p, \quad (1)$$

$$\text{动量守恒条件: } k_s + k_i = k_p. \quad (2)$$

对于准相位匹配(QPM)的光学参量振荡器来说, 也要满足能量守恒和动量守恒条件, 只是在式子中增加了一个调节项 k_m , 则相位失配量为

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_m, \quad (3)$$

在准相位匹配中, 一般晶体在 z 轴方向极化, 如果三波共线, 波矢均沿晶体 x 轴, 则相位失配量满足

$$\Delta k = 2\pi \times \left[\frac{n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda(T)} \right], \quad (4)$$

$\Lambda(T)$ 是温度为 T 时的极化周期, 满足晶体的热膨胀方程为

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_0) [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2], \quad (5)$$

式中 $\Lambda(T_0)$ 为温度 T_0 时周期极化晶体的周期, α, β 分别为沿 x 轴的一阶、二阶膨胀系数, 三阶以上的膨胀系数很小, 可忽略不计。在室温下, LiNbO₃ 的一阶、二阶热膨胀系数分别为 $\alpha = 1.44 \times 10^{-5}$, $\beta = 7.1 \times 10^{-9}$ 。 λ_p, λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和空闲光的波长; $n(\lambda_p, T), n(\lambda_s, T)$ 和 $n(\lambda_i, T)$ 是温度为 T 时相应光的折射率, 对 PPLN 来说由其色散方程^[9]决定

$$n_o^2 = 4.9130 + \frac{1.173 \times 10^5 + 1.65 \times 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (212 + 2.7 \times 10^{-5} T^2)^2} - 2.78 \times 10^{-8} \lambda^2, \quad (6)$$

$$n_e^2 = A + 2.605 \times 10^{-7} T^2 + \frac{0.970 \times 10^5 + 2.7 \times 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (201 + 5.4 \times 10^{-5} T^2)^2} - 2.24 \times 10^{-8} \lambda^2, \quad (7)$$

式中 $A = 4.5667 - 2.1432 \times 10^{-4} T_{\text{NPM}} - 4.07 \times 10^{-7} T_{\text{NPM}}^2$ 。 T_{NPM} 为 MgO: LiNbO₃ 晶体非临界相位匹配温度。由(1)和(4)式可知, 当波长和温度满足一定条件时, 可产生光学参量振荡。本实验在抽运光波长和晶体周期不变的情况下, 改变周期极化晶体的温度, 可以实现准相位匹配光学参量振荡器波长的调谐输出。

3 高功率光参量振荡器的结构

实验装置如图 1 所示, 抽运源是半导体激光器抽运的调 Q Nd: YAG 激光器, 美国 Coherent 公司生产的 FAP-System 4200 型半导体激光器, 最大电流为 36 A, 最大输出功率为 26 W, 中心波长为 808 nm, LD 自带尾纤输出。调 Q Nd: YAG 激光器谐振腔采用平-平腔结构, 腔长为 68 mm。如图 1 所示, 该腔是由 M_1 和 M_2 组成, 其中 M_1 对 808 nm 高透, 对 1064 nm 高反, M_2 对 808 nm 高反, 对 1064 nm 的透过率为 10%; 声光调 Q 重复频率的范围为 5~50 kHz, 实验所测调 Q Nd: YAG 激光器输出的功率高达 7.8 W, 转换效率为 38%。抽运光经 $f = 50$ mm 的平凸透镜耦合到 OPO 谐振腔中, 该腔采用的是双谐振腔, 由 M_4 和 M_5 组成, M_4 是平镜, M_5 为曲率半径 $R = 100$ mm 的平凹镜, 对 1064 nm 的透过率为 87.9%, 对信号光和闲频光的透过率分别为 8.8% 和 11.6%, 便于实现近红外信号光和中红外闲

频光双谐振输出, 谐振腔长为90 mm。实验中采用的非线性晶体为台湾 HCP 公司生产的周期性极化掺 MgO 铌酸锂 (PPMgLN) 晶体, 相比于普通 PPLN, PPMgLN 具有更好的抗光折射能力、更高的光损伤阈值和更大的二阶非线性光学系数 (d_{33}), 该 PPMgLN 的透光范围为 $0.25 \sim 5 \mu\text{m}$, 为单周期结构 ($30.7 \mu\text{m}$), 几何尺寸相同为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 且输入和输出端分别镀有近红外和中红外增透膜。PPMgLN 晶体放置在特制的温控炉内, 以便于温度调谐, 温控炉温度调节范围为 $50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 控制精度高于 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为便于光路调整, 温控炉固定在特制的调整平台上。PPMgLN 晶体的输出端经滤波片滤除剩余的抽运光和中红外光, 后端接入光谱仪或者功率计中测量。两个谐振腔之间用 $f = 50 \text{ mm}$ 的平凸透镜 M_3 对抽运光聚焦并实现模匹配。

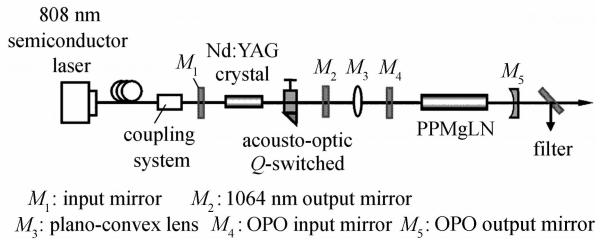


图 1 基于 PPMgLN 的光学参量振荡器结构系统图

Fig. 1 Schematic configuration of the PPMgLN optical parametric oscillator

4 实验结果与分析

实验首先考察了作为 OPO 抽运光的调 Q Nd:YAG 激光器的输出特性。在电流为 35 A 时, 1064 nm 连续光最大输出功率为 11.2 W。为了选择合适的重复频率, 将抽运光电流固定为 25 A, 通过恒温水循环器将声光晶体与激光晶体的温度控制在 $18 \text{ }^\circ\text{C}$, 实验测得 1064 nm 光输出功率随声光调 Q 重复频率变化的关系曲线如图 2 所示。从图 2 可知, 随着重复频率的增加, 1064 nm 输出光功率也随之增加, 但到 15 kHz 之后变化缓慢。通过示波器观察发现, 重复频率选择 15 kHz 时, 脉宽为 45 ns, 波形重复性和稳定性很好; 在 $20 \sim 50 \text{ kHz}$ 频段输出平均功率增加缓慢, 同时波形变差, 因此选择 15 kHz 为最佳的重复频率。

在重复频率为 15 kHz 时, 通过改变 LD 抽运电流, 分别测量了 1064 nm 连续功率、静态功率和准连续输出平均功率, 如图 3 所示。调 Q Nd:YAG 激光器输出的最大功率为 7.8 W, 抽运阈值为 4.0 W, 其

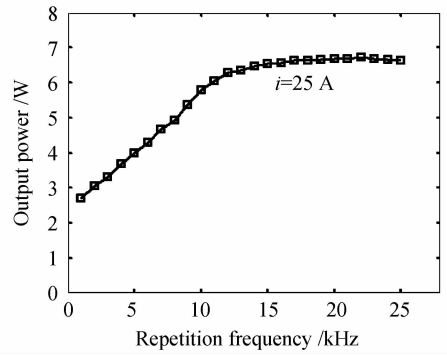


图 2 1064 nm 光输出功率随声光调 Q 重复频率的变化曲线

Fig. 2 1064 nm optical output power as a function of the acousto-optic Q-switched repetition frequency

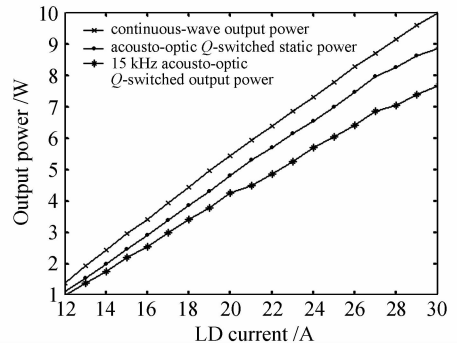


图 3 1064 nm 连续功率、静态功率和调 Q 输出平均功率随 LD 抽运电流变化曲线

Fig. 3 1064 nm continuous power, static power, and Q-switched average output power as functions of LD-pumped current

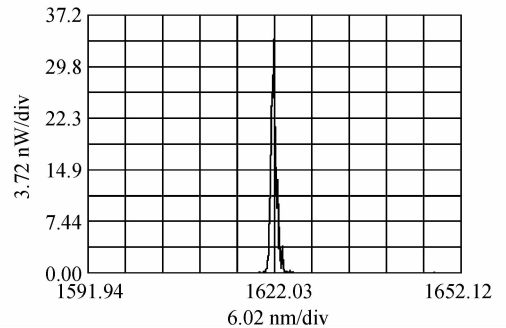


图 4 1622 nm 信号光光谱图

Fig. 4 1622 nm signal photoelectron spectrum
 转换效率达到 38%。

将 LD 输出电流固定为 30 A, Q 开关的重复频率为 15 kHz, 脉宽为 45 ns, 此时对应的调 Q Nd:YAG 激光器输出的功率为 7.8 W, 1064 nm 激光经光学耦合系统耦合进 OPO 谐振腔, 并调整固定晶体的调整平台以保证抽运光被限定在该周期的 1 mm 厚的晶体, 在此基础上, 辅以温度调节, 温度

为130 ℃时,获得了613 mW的近红外信号激光输出。图4为光谱仪(Aglient)测得的近红外激光输出光谱,输出激光的中心波长为1622 nm,这与计算的理论波长基本一致。图5为温度不变时,所测的1622.03 nm近红外信号光功率随1064 nm抽运光功率的变化曲线,由图可知,近红外信号光功率随抽运光功率的增大而增大,成线性关系。

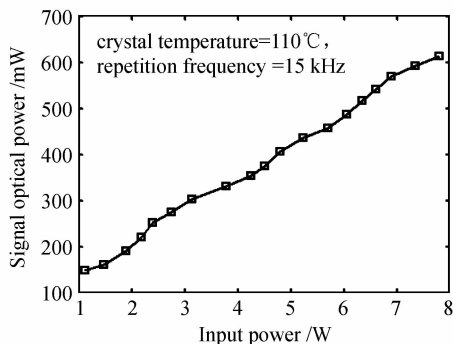


图5 信号光功率随1064nm抽运光功率的变化曲线

Fig. 5 Signal-optical power as a function of 1064 nm pumped-optical power

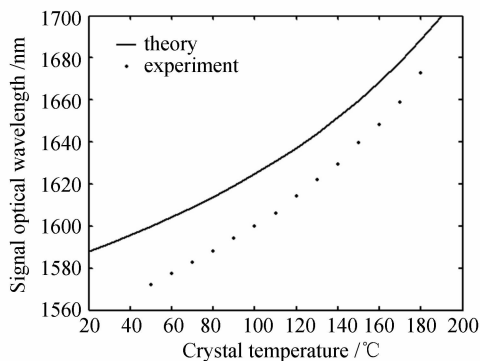


图6 信号光波长随晶体温度变化的理论与实验曲线

Fig. 6 Theoretical and experimental curves of signal-optical wavelength as a function of crystal temperature

实验中通过改变晶体的温度获得双谐振输出,理论和实验所得波长随温度变化的关系如图6所示。实线为根据掺MgO(摩尔分数为5%)LiNbO₃的色散方程的理论计算值,圆点为实验测量值。理论与实验值有些许偏差主要原因在于MgO:LiNbO₃色散方程在不同条件下常数项的修正值有所不同的原因,本次理论曲线对应的色散方程 $A = 4.5667 - 2.1432 \times 10^{-4} T_{\text{NPM}} - 4.07 \times 10^{-7} T_{\text{NPM}}^2$ 中的4.5667修正值采用的是4.7025。在温度从50 ℃升高到180 ℃的过程中,输出可调谐信号光波长为1570~1676 nm,最高平均输出功率613 mW;相应的中红外输出波长范围为2942~3300 nm,调谐宽度达300 nm,根据谐振腔参数,可以计算出双谐振

中红外光最大输出功率应该在300 mW左右。

5 结 论

设计的高功率声光调Q Nd:YAG激光抽运PPMgLN光参量振荡器,实现了可调谐红外激光输出,其中近红外激光最大输出功率为613 mW,中红外激光理论平均功率可达300 mW左右;在重复频率设定为15 kHz时,最大输出的红外光单脉冲能量可达40 μJ。证明这种激光器结构在3~5 μm实现高功率高重复频率可调谐中红外激光是可行的。实验输出的中红外激光波长范围在2942~3300 nm,调谐宽度达358 nm;实验采用的PPMgLN周期为30.7 μm,选择更小的晶体周期或者多周期结构可以实现3~5 μm的中红外光高功率输出。实验发现声光调Q调制后的Nd:YAG输出光光束质量和脉宽并不太理想,因此,下一步的工作是对激光器抽运源和OPO单谐振腔结构进行设计,采用单频特性更好的Yb:YAG激光器抽运,同时改用环形微扰腔,在实现更高红外激光的输出能量和光束质量的同时也增加中红外输出光的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft [J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(1):4~9
任国光,黄裕年. 用激光红外干扰系统保护军用和民航机[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(1):4~9
- 2 Yuye Wang, Degang Xu, Yizhong Yu. High-peak-power, high-repetition-rate intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):93~95
- 3 Xingbao Zhang, Baoquan Yao, Yuezu Wang. Middle-infrared intracavity periodically poled MgO:LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):426~427
- 4 M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(11):2631~2654
- 5 K. J. McEwan, J. A. C. Terry. A tandem periodically-poled lithium niobate (PPLN) optical parametric oscillator (OPO) [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(4):423~432
- 6 A. Agnesi, E. Piccinini, G. C. Reali *et al.*. Efficient all-solid-state tunable source based on a passively Q-switched high-power Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**:303~305
- 7 L. Lefort, K. Puech, S. D. Butterworth. Efficient, low-threshold synchronously-pumped parametric oscillation in periodically-poled lithium niobate over the 1.3 μm to 5.3 μm range [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **152**(1-3):55~58
- 8 Yao Jianghong, Xue Liangping, Yan Boxia *et al.*. Optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO₃ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):209~213
姚江宏,薛亮平,颜博霞等. 周期极化掺镁铌酸锂晶体的光学参量振荡[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):209~213
- 9 Dieter H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_c , in congruent lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20):1553~1555