

文章编号: 0258-7025(2009)09-2262-04

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

彭跃峰 谢 刚 王卫民 武德勇

(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 激光椭圆光斑抽运掺氧化镁的周期极化铌酸锂 (PPMgLN) 晶体准相位匹配 (QPM) 技术实现 2.7 μm 激光输出的实验结果, 理论计算了 PPMgLN 晶体准相位匹配周期调谐曲线, 得出 PPMgLN 晶体周期为 31.3 μm 时可获得中红外波长 2.7 μm 激光输出。PPMgLN 晶体 (MgO 掺杂摩尔分数为 5%) 单谐振光参量振荡 (OPO) 技术采用 $e \rightarrow e+e$ 相位匹配, 消除了光束之间的走离效应和利用了 PPMgLN 晶体的最大非线性系数 d_{33} (27.4 pm/V)。在 1064 nm 激光抽运功率 78 W, 声光 Q 开关工作频率 8 kHz 的条件下, 获得了平均功率 11.8 W, 波长 2.72 μm 的激光输出, 斜率效率 19.5%, 对应闲频波长 1.75 μm 激光输出功率约 24 W。2.7 μm 激光水平方向和垂直方向光束质量 M^2 因子分别为 2.04 和 5.56。

关键词 激光器; 准相位匹配; PPMgLN 晶体; 椭圆光斑

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2262

High Efficiency Periodically Poled Lithium Niobate with MgO Optical Parametric Oscillator 2.7 μm Laser with 11.8 W Output Power

Peng Yuefeng Xie Gang Wang Weimin Wu Deyong

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

Abstract The experimental results of high-efficiency 2.7 μm laser are demonstrated on quasi-phase-matched single-resonated optical parametric oscillator (OPO) in periodically poled lithium niobate with MgO (PPMgLN) pumped by 1064 nm laser of elliptical beam. Theoretical analyses of PPMgLN grating period tuning is presented. When grating period is 31.3 μm , a PPMgLN OPO could get output at wavelength of 2.7 μm . The pump beam polarization matches the $e \rightarrow e+e$ interaction in PPMgLN (5 mol% MgO-doping), thus maximal nonlinear coefficient d_{33} (27.4 pm/V) is effective and walk-off of beams can be avoided. When pump power was 78 W with 8 kHz Q-switch, an average output power of 11.8 W at 2.72 μm was obtained with slope efficiency of 19.5%, with 24 W at the corresponding idle wavelength of 1.75 μm . The M^2 factor of 2.7 μm laser was 2.04, 5.56 in parallel and perpendicular direction respectively.

Key words lasers; quasi-phase-matching; PPMgLN crystal; elliptical beam

1 引 言

中红外波段光在军事对抗、大气环境监测、医学、特殊环境远距离监控以及光谱学研究等诸多领域有重要的应用价值^[1,2]。目前获得中红外激光输出的主要方法有 3 种: 激光二极管直接输出中红外激光^[3]; 采用激光二极管直接激射掺杂中红外稀土粒子晶体获得^[4~7]; 采用中红外非线性晶体光学参

量振荡 (OPO) 技术获得^[8~12]。在近 40 年发展中, 随着一些新型而高效的非线性晶体的出现及发展, OPO 相继实现了从紫外到远红外的全波段调谐、从连续 (CW) 到超快飞秒的整个时间谱范围运转。

双折射相位匹配 (BPM) 是利用非线性晶体的双折射和色散特性, 通过选择光波波矢方向和偏振方向来使相位矢配量为零; 而准相位匹配 (QPM) 是

收稿日期: 2008-10-03; 收到修改稿日期: 2008-11-30

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

E-mail: qiaopyf@yahoo.com.cn

通过调节晶体的极化周期来补偿由于折射率色散而产生的波矢失配。相比 BPM 技术, QPM 没有波矢方向和偏振方向的限制, 这样就可以通过适当的选择光束偏振, 利用晶体最大非线性系数, 采用非临界相位匹配方式, 消除光束之间的走离效应; 同时 QPM 有 3 种波长调谐方式: 角度调谐、周期调谐和温度调谐。QPM 技术的特性决定了理论上能够利用晶体的整个透光范围实现相位匹配。目前, 实现准相位匹配光学参量振荡器最常见的铁电材料是掺 MgO 周期极化 LiNbO₃ 晶体 (PPMgLN)。加拿大航空公司采用 PPMgLN OPO 技术获得了转换效率 20%, 波长 2.94 μm, 功率 10 W 的激光输出^[9]; 国内中国工程物理研究院应用电子学研究所采用 PPMgLN OPO 技术获得了输出功率 3.2 W, 波长 3.7 μm 的激光输出^[8]。

本文分析了 PPMgLN 晶体准相位匹配光学参量振荡器的周期调谐特性, 采用 1064 nm 激光椭圆光斑抽运 PPMgLN 晶体, 实验上获得输出功率 11.8 W, 波长 2.72 μm 的激光输出, 对应闲频波长 1.75 μm 激光输出功率约 24 W。

$$n_e^2(\lambda, t) = 5.35583 + 4.629 \times 10^{-7} f(t) + \frac{0.100473 + 3.862 \times 10^{-8} f(t)}{\lambda^2 - [0.20692 - 0.89 \times 10^{-8} f(t)]^2} + \frac{100 + 2.657 \times 10^{-5} f(t)}{\lambda^2 - 11.34929^2} - 1.5334 \times 10^{-2} \lambda^2, \quad (2)$$

式中 $f(t) = (t - 24.5)(t + 570.82)$; t 取摄氏温度; λ 为激光波长, 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 $a = (1/l)(\partial l / \partial t)$ 为晶体的热膨胀系数, l 为晶体长度。

PPMgLN 晶体波长调谐方式有 3 种, 周期调谐、温度调谐和角度调谐。温度调谐可以获得更高的调谐精度, 周期调谐是最有效的波长调谐方式。同时采用周期调谐和温度调谐方式, 这样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 PPMgLN 晶体 OPO 能量守恒和动量守恒公式, 计算了在 1064 nm 激光抽运方式下, 中红外波长调谐与周期的关系, 如图 1 所示。从图中可以了解到, 当 PPMgLN 晶体周期为 31.3 μm 时, 可以获得中红外波长 2.7 μm 激光输出。

2 PPMgLN 准相位匹配波长调谐特性

LiNbO₃ 是典型的负单轴晶体, 其透光波段为 330~5500 nm, 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。在准相位匹配条件下, 由于对相互作用的耦合光波的偏振方向没有要求, 可以人为地选择, 因此, 可以选择 $e \rightarrow e + e$ 匹配, 此时发挥作用的有效非线性系数最大 (d_{33}), 从而降低了阈值, 提高了转换效率。

在 PPMgLN 准相位匹配光参量振荡器中, 3 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

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

式中 λ_p, λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的波长; n_{ep}, n_{es} 和 n_{ei} 分别为抽运光、信号光和闲频光波长的折射率; Λ 为光栅周期。

PPMgLN 晶体中 e 光折射率赛耳迈耶尔 (Sellmeier) 方程^[8]为

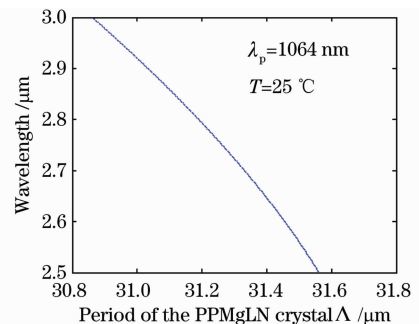


图 1 PPMgLN 晶体的调谐曲线

Fig. 1 Calculated tuning curve for PPMgLN OPO pumped by 1064 nm laser at 25 °C

3 实验研究

3.1 实验装置

实验采用单谐振 (SRO), 外腔 OPO 结构, 实验装置如图 2 所示。1064 nm 激光输出采用平-平腔、双棒退偏补偿结构。M₁, M₂ 构成 1064 nm 激光谱

振腔, M_1 对 1064 nm 激光高反, M_2 对 1064 nm 激光反射率 70%。在声光 Q 开关工作频率 8 kHz, 输出功率 78 W 时, 1064 nm 激光光束质量 M^2 因子小于 2.1。采用高光束质量 1 μm 激光作为抽运源, 有利于获得高效率、高光束质量中红外激光输出。为了获得高功率中红外激光输出, 根据 PPMgLN 晶体的特点, 设计了椭圆光斑抽运 PPMgLN 晶体光参量振荡单谐振腔结构。1064 nm 激光经耦合系统后被整形为椭圆光斑, 抽运 PPMgLN (MgO 掺杂摩尔分数为 5%) 晶体, OPO 输出中红外波段激光。OPO 技术采用 $e \rightarrow e+e$ 相位匹配, 从而消除了光束之间的走离效应和利用了 PPMgLN 晶体的最大非

线性系数 d_{33} (27.4 pm/V)。 M_3, M_4 构成 PPMgLN OPO 谐振腔, M_3 对 1064 nm 高透, 对 2.5~3.0 μm 激光高反, M_4 对 1.6~1.9 μm 激光高透, 对 2.5~3.0 μm 激光部分反射。PPMgLN 晶体周期为 31.3 μm , 两个通光面对 1064 nm, 1.6~1.9 μm 和 2.5~3 μm 激光高透。因为晶体加工技术的限制, PPMgLN 晶体加工厚度一般为 0.5~1 mm, 并且目前中红外波段膜层损伤阈值较低, 所以限制了采用 1064 nm 激光圆形光斑抽运获得高功率中红外激光输出。采用 1064 nm 激光椭圆光斑抽运, 可以获得高效率、高功率激光输出。

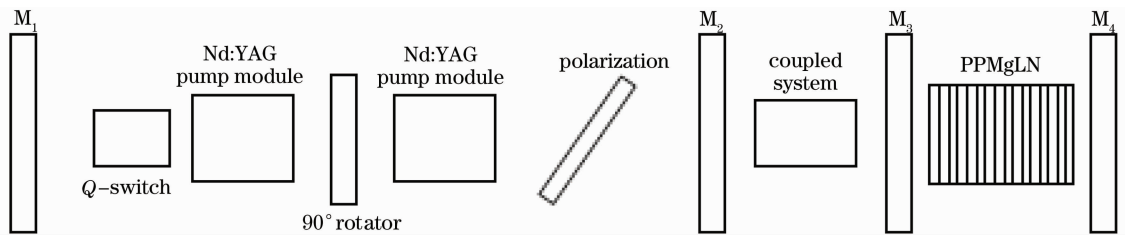


图 2 PPMgLN SRO 实验装置

Fig. 2 Experimental setup of PPMgLN SRO

3.2 结果与分析

开展了实验研究, 当 1064 nm 激光抽运功率为 78 W, 频率为 8 kHz 时, 波长 2.72 μm 激光输出功率 11.8 W, 斜率效率为 19.5%, 对应闲频波长 1.75 μm 激光输出功率约 24 W, 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 2.72 μm 激光输出。光谱仪测得的输出激光光谱如图 4 所示, 中红外激光中心波长为 2.72 μm , 近红外激光中心波长为 1.75 μm 。由于所用光谱仪和采用测量方法测量精度的原因, 并不能准确测出激光谱线宽度, 实际线宽比图 4 所示的要窄。

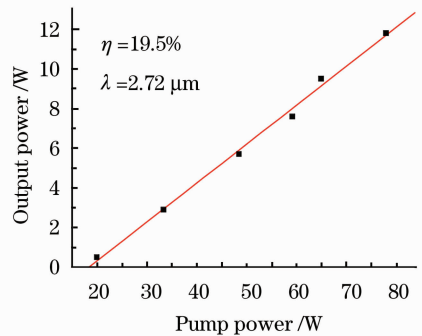


图 3 激光输出功率与抽运功率的关系曲线

Fig. 3 Laser output power versus pump power

使 2.7 μm 激光光束通过焦距为 200 mm 的聚焦透镜, 通过测量不同位置的光斑大小, 采用光束传输方程拟合得两个方向的光束质量分别为 $M_x^2 =$

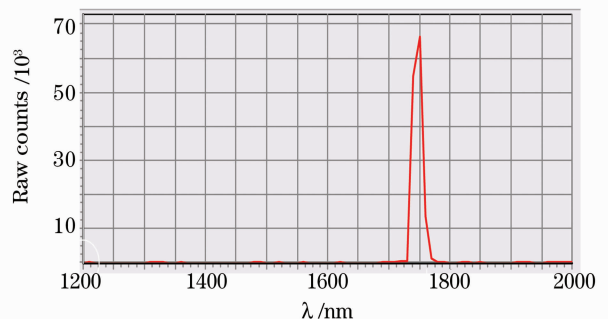
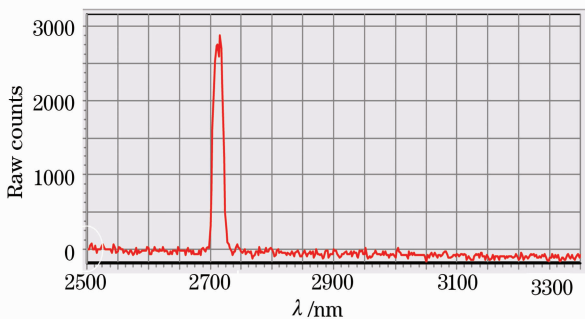


图 4 输出激光光谱

Fig. 4 Spectrum of laser

2.04 和 $M_y^2 = 5.56$, 如图 5 所示。图 6 为 2.7 μm 激光近场光斑分布。水平方向和垂直方向光束质量有一定的差异, 主要原因是采用了 1 μm 激光椭圆光斑抽运方式, 同时又在两个方向采用了相同腔结构, 相比较来说, 1 μm 激光长光斑抽运方向中红外 2.7 μm 激光高阶模式较小光斑方向容易达到阈值, 较容易起振, 光束质量就较差。为了改变长光斑抽运方向光束质量, 下一步工作将采用非对称混合光参量腔结构, 增加长光斑抽运方向中红外光束腔模体积。

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi \omega_0}\right)^2 (z - z_0)^2, \quad (4)$$

式中 z_0 为光波传输方向上束腰的位置, ω_0 为束腰大小, $\omega(z)$ 为位置 z 处光斑大小。

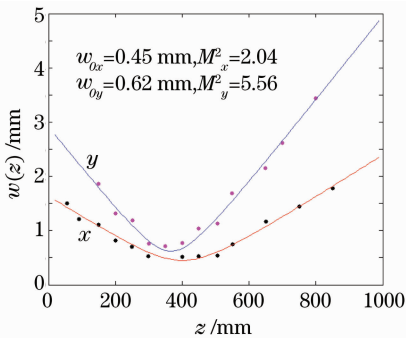


图 5 光斑半径非线性拟合曲线

Fig. 5 Nonlinear curve fit of spot radius

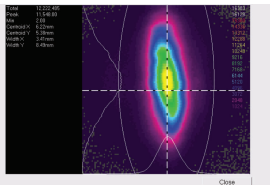


图 6 2.7 μm 激光光斑近场分布

Fig. 6 2.7 μm laser intensity distribution of near-field beam

4 结 论

采用 1064 nm 激光椭圆光斑抽运 PPMgLN 晶

体准相位匹配技术, 实验上获得了输出功率 11.8 W, 波长 2.72 μm 中红外激光输出, 对应闲频波长 1.75 μm 激光输出功率约 24 W。

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 and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 536~550
- 2 范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 536~550
- 3 Ren Guoguang, Huang Yunian. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(1): 1~6
- 4 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): 1~6
- 5 R. U. Martinelli, G. Belenky, J. G. Kim *et al.*. Room-temperature high-power type-I QW in (Al) GaAsSb/GaSb diode lasers with $\lambda = 2.7$ and $2.8 \mu\text{m}$ [C]. *Martinelli - SSDLTR*, 2003, 48~51
- 6 Rita D. Peterson, Kenneth L. Schepler. 1.9 μm-fiber-pumped Cr: ZnSe laser [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2004, 236~240
- 7 Alex Dergachev, Peter F. Moulton. High-power operation of Tm: YLF, Ho: YLF and Er: YLF lasers [C]. *Moulton-SSDLTR*, 2003, 43~46
- 8 Stuart D. Jackson. Single-transverse-mode 2.5-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 334~336
- 9 XS. Zhu, R. Jain. Mid-IR fiber laser achieves ~10 W [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(1): 26~28
- 10 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
- 11 彭跃峰, 鲁燕华, 谢刚等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 670~674
- 12 Da-Wun 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 Hideki Ishizuki, Ichiro Shoji, Takunori Taira *et al.*. High-energy quasi-phase-matched optical parametric oscillation in a 3-mm-thick periodically poled MgO: LiNbO₃ device [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2527~2529
- 14 Jan-Peter Meyn, Richard Wallenstein, Pavel Urenski *et al.*. Single-frequency continuous-wave optical parametric oscillator system with an ultrawide tuning range of 550 to 2830 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2002, **19**(6): 1419~1423
- 15 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. Efficient mid-infrared laser using 1.9-μm-pumped Ho: YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 723~729