

文章编号: 1001-3806(2014)03-0368-04

中红外 PPMgLN 光参变振荡器技术研究

谢宇宙, 万勇*, 邓华荣, 李燕凌, 薛亮平, 张伟

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了实现 $3.8\mu\text{m}$ 激光输出, 采用了 $1.064\mu\text{m}$ 激光抽运周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体 (MgO 掺杂摩尔分数为 0.05) 的光参变振荡器技术, 由理论分析得到 $1.064\mu\text{m}$ 激光抽运 PPMgLN 实现激光输出时, 输出波长与极化周期以及温度的关系曲线。实验中, 当晶体周期为 $29.2\mu\text{m}$ 、温度为 400K 时, 实现了 $3.8\mu\text{m}$ 激光输出; 当抽运功率为 35W、声光调 Q 频率为 8kHz 条件下, 获得 $3.84\mu\text{m}$ 激光输出的平均功率为 3.9W, 其转换效率为 11.14%, 激光光束质量为 6.46。结果表明, 该技术可以获得较高转换效率的 $3.8\mu\text{m}$ 激光输出, 有望成为中红外激光对抗的激光干扰源。

关键词: 非线性光学; 光参变振荡器; 准相位匹配; 周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体; 中红外

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.018

Study on mid-infrared laser PPMgLN optical parametric oscillators

XIE Yuzhou, WAN Yong, DENG Huarong, LI Yanling, XUE Liangping, ZHANG Wei

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to obtain $3.8\mu\text{m}$ laser output, it was demonstrated in optical parametric oscillator (OPO) with periodically poled lithium niobate crystals doped with magnesium oxide (mole fraction of MgO -doping is 0.05) pumped by $1.064\mu\text{m}$ laser. The relationship curve between output wavelength and polarization period and the temperature was calculated. When polarization period is $29.2\mu\text{m}$ and the temperature is 400K, $3.8\mu\text{m}$ laser output is achieved. When pump power is 35W at repetition rate of 8kHz, an average output power of 3.9W at $3.84\mu\text{m}$ is obtained with slope efficiency of 11.14%, and the M^2 factor is 6.46. The results show that $3.8\mu\text{m}$ laser output can be obtained with high conversion efficiency, and it can be used as laser sources of infrared laser interference.

Key words: nonlinear optics; optical parametric oscillator; quasi phase matching; periodically poled lithium niobate crystal doped with magnesium oxide; mid-infrared

引言

随着科学技术的快速发展, 光学制导技术也日渐成熟, 在现代战场上红外制导导弹开始占据着越来越重要的地位^[1]。根据统计资料显示, 在过去 30 年里, 战场上被击落的飞机中, 90% 左右是因为红外制导导弹, 而红外导弹探测器的响应范围一般在 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 大气窗口波段, 因此, 针对红外制导导弹的光电对抗迫切需要工作在 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 波段的激光光源, 从而进行有效地对抗^[2]。并且中红外光源具有会被多数重要的有毒气体分子吸收的特性, 在

民用探测领域也有着广泛的价值: 如毒品稽查、石油勘探、甲烷气体探测、天然气管道泄漏检测等^[3-5]。

目前, $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外激光器主要有: 二极管激光器、化学激光器、气体激光器、稀土掺杂固体激光器和光参变振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 等, 其中 OPO 相对于其它类型的中红外激光器, 具有调谐范围宽、全固化、结构紧凑、小型化和输出功率高等优点^[6]。

采用准相位匹配 (quasi phase matching, QPM) 方式的周期性极化掺氧化镁铌酸锂 (periodically poled lithium niobate doped with magnesium oxide, PPMgLN) 可以利用最大非线性系数 d_{33} 实现相位匹配, 具有低阈值、高增益和高效等优点^[7-8]。现在 PPMgLN 晶体已经成为 QPM 最重要的非线性光学材料。

作者简介: 谢宇宙 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: wy209@sohu.com

收稿日期: 2013-05-30; 收到修改稿日期: 2013-06-27

2010 年,中国工程物理研究院 PENG 等人在 1.064 μm 激光抽运功率 104W、声光 Q 开关工作频率 7kHz 和 PPMgLN 晶体工作温度 110 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,获得中红外波长 3.84 μm 激光输出功率 16.7W^[9]。

2011 年,中国科学院半导体研究所采用 10kHz 的调 Q 的 Nd:YAG 激光器抽运 PPMgLN,当注入 22W 时,实现了 3781.4nm 的激光输出,功率为 3.4W^[10]。

在本实验中,作者采用 1.064 μm 激光抽运 PPMgLN 晶体,当注入 35W 时,获得输出功率为 3.9W 的 3.84 μm 激光输出,对应波长为 1.47 μm 的信号光输出功率约 10W。

1 波长调谐理论分析

PPMgLN-OPO 有以下几种基本方式可以实现输出波长的调谐:温度调谐、周期调谐、波长调谐、角度调谐等。另外,还可以用两种基本调谐方式相组合来进行调谐,如温度周期调谐^[11]。

PPMgLN 与温度有关的 n_e 色散方程满足以下形式^[12]:

$$n_e^2 = 5.319725 + 4.753469 \times 10^{-7}f + \frac{0.09147285 + 3.310965 \times 10^{-8}f}{\lambda^2 - 0.10017276} + \frac{100.2028 + 2.760513 \times 10^{-5}f}{\lambda^2 - 129.42224943} - 0.01497046\lambda^2 \quad (1)$$

式中, $f = (T - 297.5)(T + 843.82)$, T 为开氏温度, λ 为入射光波长,下标 e 表示非常光。

准相位匹配过程中,相位失配量 Δk 满足:

$$\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 - k_m \quad (2)$$

式中, k_1 为信号光的波矢量,对应标量为 k_1 , k_2 为闲频光的波矢量,对应标量为 k_2 ; k_3 为抽运光的波矢量,对应标量为 k_3 ; k_m 为周期波矢量,对应标量为 $k_m = \frac{2\pi \cdot m}{\Lambda}$, Λ 为极化周期, m (取 1, 3, 5, ...) 为 QPM 阶数。为了最大的利用晶体非线性系数,取 $m = 1$, 则 Δk 的波长表达式变为:

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\Lambda} \right] \quad (3)$$

式中, n_1 为信号光折射率, n_2 为闲频光折射率, n_3 为抽运光折射率, λ_1 表示信号光波长, λ_2 表示闲频光波长, λ_3 表示抽运光波长。

当 $\Delta k = 0$ 时满足相位匹配条件。

1.1 周期调谐的曲线计算

周期调谐实现输出波长调谐的方式是改变晶体周期,通常用多周期晶体或者扇形周期晶体。

Δk 的波长表达式变为:

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{1}{\Lambda(x)} \right] \quad (4)$$

式中, x 为晶体在 OPO 谐振腔内的位置参量。

同时三波还要满足能量守恒关系:

$$\frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1} \quad (5)$$

由(4)式与(5)式联立可得周期调谐的理论曲线,计算曲线如图 1 所示。

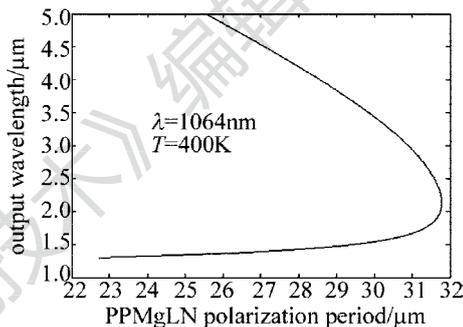


Fig. 1 Period tuning curve for PPMgLN

多周期晶体的晶体周期只能跳跃式变化,不能够连续变化。所以得到的输出光也不能连续调谐,而只有通过和温度调谐相结合的方式才能实现宽带连续调谐。而使用扇形晶体时,由于抽运光是有一定宽度的光束,所以当抽运光通过 PPMgLN 晶体时,通过的将不是同一周期。而当光束的各个部分通过的周期不一样时,产生的光谱也将不同。并且,很难制作出较为理想的扇形周期。

1.2 温度调谐的曲线计算

温度调谐是指把晶体置于一个温控炉里,通过调节晶体的温度来实现输出波长的调谐。

考虑到晶体存在热膨胀因素,若在温度为 T_0 时,极化周期为 $\Lambda(T_0)$,则在温度为 T 时,极化周期 $\Lambda(T)$ 应为:

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_0) [1 + a(T - T_0)] \quad (6)$$

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

由于温度变化, Δk 的波长表达式变为:

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n_3(T)}{\lambda_3} - \frac{n_2(T)}{\lambda_2} - \frac{n_1(T)}{\lambda_1} - \frac{1}{\Lambda(T)} \right] \quad (7)$$

由(7)式与(5)式可以算出温度调谐的理论曲线,如图2所示。

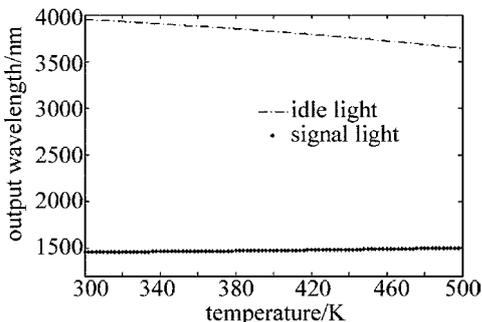


Fig. 2 Output wavelength versus the temperature when polarization period is 29.2 μm

运用温度调谐方式实现波长调谐比较容易,但调谐速度比较慢并且调谐范围比较小。

因以上两种调谐方式各有优缺点,故实验室选择两种组合的方式来进行波长调节,以便得到想要的3.8 μm 中红外激光。

2 实验研究

2.1 实验装置

本实验中采用双棒串接侧面抽运的单谐振腔结构,1.064 μm 抽运源系统由全反镜、Q开关、抽运模块、石英旋转片、偏振片、输出镜等构成,总体实验装置如图3所示。 M_1 对1.064 μm 激光高反, M_2 对1.064 μm 激光反射率为60%。在声光Q开关工作频率为8kHz、输出功率为35W时,通过缓慢调节1.064 μm 激光谐振腔的腔长,获得了光束质量因子 $M^2 < 4$ 的1.064 μm 激光,其脉冲宽度为150ns。使用双棒串接技术,并在双棒之间加90°石英旋转片的目的是补偿温度变化而引起的热致双折射效应,从而提高了1.064 μm 激光的光束质量。而在声光开关 Q_2 之后加一个以布儒斯特角放置的偏振片是为了得到线偏振光,使之可以抽运OPO谐振腔。因实验中选用的PPMgLN晶体的规格为40mm \times 10mm \times 1mm,其通光面为10mm \times 1mm,晶体厚度只有1mm,所以在OPO谐振腔前加了一片聚焦镜,以得到直径在0.7mm左右的抽运光,从而可以有效地利用抽运光以及起到保护晶体的作用。使用1.064 μm 激光抽运特定周期的PPMgLN晶体,OPO将输出3.8 μm 的中红外波段激光和1.47 μm 的近红外激光。OPO谐振腔由 M_3 和 M_4 构成,其中 M_3 对1.064 μm 高透,对3 μm ~5 μm 激光高反;而 M_4 对1.2 μm ~1.9 μm 激光部分反射,对3 μm ~5 μm 激

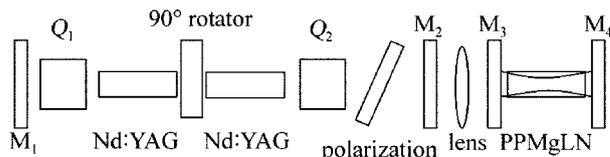


Fig. 3 Experimental setup of PPMgLN

光高透。PPMgLN晶体周期选定为29.2 μm ,其两个通光面对1.064 μm ,1.2 μm ~1.9 μm 和3 μm ~5 μm 激光高透。根据之前波长调谐计算可知,PPMgLN周期为29.2 μm 时,当温度为400K,输出中红外波长在3.8 μm 附近。

2.2 实验结果

通过具体的实验和调节,当1.064 μm 抽运激光功率为35W时,输出功率达到13.9W,其中3.84 μm 中红外激光功率为3.9W左右,光光转换效率为11.14%,对应的1.47 μm 近红外激光功率为10W左右。由图4可以看出,3.8 μm 中红外激光未出现饱和趋势,故如果继续增加抽运功率,其输出功率依然会继续提高。但因晶体的质量问题和晶体膜层的损伤,故实验中并没有继续调高抽运功率。实验中运用光栅单色仪测得中红外激光中心波长在3.84 μm ,对应的信号光中心波长为1.47 μm ,与理论计算值相符。

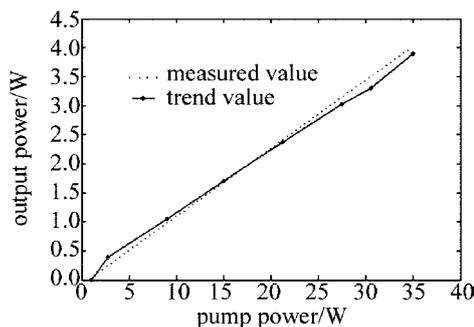


Fig. 4 Laser output power versus pump power

采用刀口法测量光束的光斑大小,再运用曲线拟合法对3.8 μm 激光光束质量进行计算。使中红外激光通过焦距为20cm的聚焦透镜,通过刀口法测量透镜后束腰附近不同位置的对应的光斑大小,采用下式对数据进行曲线拟合:

$$r^2 = A + B \cdot z + C \cdot z^2 \quad (8)$$

式中, z 为光波传输方向上光斑的位置; r 为光斑半径。根据拟合曲线参量,得到 A 、 B 和 C ,并代入光束质量公式 $M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{A \cdot C - \frac{B^2}{4}}$,并计算出光束质量因子 M^2 大小,其中 λ 为激光波长。计算得到光束质量 $M^2 = 6.46$ 。光斑半径拟合曲线如图5所示。

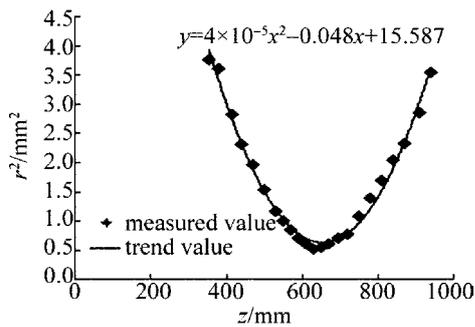


Fig. 5 Fit curve of spot radius

实验中使用套孔法算得了光束的束散角为 2.6° 。

3 结论

采用 $1.064\mu\text{m}$ 激光抽运 PPMgLN 晶体,当抽运功率为 35W 时,获得了平均功率为 3.9W 的 $3.84\mu\text{m}$ 激光输出,可以成为中红外激光对抗的激光干扰源。之后准备进一步优化实验方案和过程,提高光学元器件的抗损伤能力,以便提高抽运光光束质量,并获得更高输出功率的 $3.8\mu\text{m}$ 激光。

参考文献

- [1] REN G G, HUANG Y N. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36 (1): 1-6 (in Chinese).
- [2] LIN H Y, HUANG X H, XU Y Ch, *et al.* Research and progress of middle-infrared intracavity single resonant optical parametric oscillators [J]. *Laser Technology*, 2011, 35 (6): 756-760 (in Chinese).
- [3] YAO B Q, WANG Y Zh, WANG Q. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2002, 26 (3): 217-220 (in Chinese).
- [4] WANG L, WU X Y, LI Zh, *et al.* Progress of the nonlinear crystal and device of the mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2011, 35 (4): 433-439 (in Chinese).
- [5] QIN X F, ZHOU W D. Progress of mid-infrared continuous wave optical parameter oscillator technique based on PPLN crystal [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (2): 198-203 (in Chinese).
- [6] ZHANG W, WAN Y, CHEN H M, *et al.* Experimental study on mid-infrared KTA optical parametric oscillator [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41 (7): 42-46 (in Chinese).
- [7] PETERSON R D, SCHEPLER K L. 1. $9\mu\text{m}$ -fiber-pumped Cr:ZnSe laser [C]//The Optical Society of America, *Advanced Solid-State Photonics*. Vienna, Austria; The Optical Society of America, 2005: 236-240.
- [8] PENG Y F, WANG W M, XIE G, *et al.* $3.8\mu\text{m}$ mid-infrared laser with 11.2W output power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (s1): 82-85 (in Chinese).
- [9] PENG Y F, WANG W M, LIU D, *et al.* High efficiency PPMgLN optical parametric oscillator infrared laser with 62W output power [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37 (3): 613-616 (in Chinese).
- [10] BO X, JIAN L M, RAN Ch. High-power, high-repetition-rate mid-infrared generation with PE-SRO based on a fan-out periodically poled MgO-doped lithium niobate. [J]. *Optics Communications*, 2011, 28 (4): 1391-1394.
- [11] YAO J Q, XU D G. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 732-738 (in Chinese).
- [12] DENG H R, LI T, NIU R H, *et al.* Theory analysis of $2\mu\text{m}$ laser output based on PPLN [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (1): 63-67 (in Chinese).