

PPMgLN 用于光参量振荡实现低阈值 $2\ \mu\text{m}$ 激光

邓华荣 张 龙 谢宇宙 李 彤 李燕凌 薛亮平

(西南技术物理研究所, 四川省成都 610041)

摘要 报道了使用 MgO 掺杂摩尔分数为 5% 的周期性极化铌酸锂晶体 (PPMgLN) 的高重复频率、低阈值的 $2\ \mu\text{m}$ 激光器。理论计算了 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光抽运 PPMgLN 时, 极化周期与温度的对应关系。实验对比了双极化周期 PPMgLN 晶体(极化周期分别为 $32.2\ \mu\text{m}$ 和 $32\ \mu\text{m}$) 的转换效率。重点对转换效率较高的极化周期 ($32\ \mu\text{m}$) 进行了振荡阈值的实验分析。在满足转换效率不低于 40% 的前提下, 实现了振荡阈值为 $0.046\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 、近简并波长(信号光波长 $2.05\ \mu\text{m}$ 、闲频光波长 $2.236\ \mu\text{m}$) 的激光输出。

关键词 非线性光学; 光参量振荡器; $2\ \mu\text{m}$ 激光器; PPMgLN 晶体; 准相位匹配

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702014

Low Threshold $2\ \mu\text{m}$ Laser Based on Optical Parametric Oscillator Using PPMgLN

Deng Huarong Zhang Long Xie Yuzhou Li Tong Li Yanling Xue Liangping

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

Abstract High repetition frequency and low threshold laser with wavelength of $2\ \mu\text{m}$ is reported using periodically poled MgO-doped lithium niobate (PPMgLN) with doped concentration of 5%. A $2\ \mu\text{m}$ laser is obtained with PPMgLN pumped by a $1.064\ \mu\text{m}$ laser and the corresponding relation between polarization period and the temperature is calculated. In experiments, the comparison of the efficiencies of two different polarization periods ($32.2\ \mu\text{m}$ and $32\ \mu\text{m}$) is carried on. We focus on the polarization period that has higher efficiency ($32\ \mu\text{m}$) and conduct the experimental analysis of the oscillation threshold. Under the condition of the conversion efficiency is not less than 40%, the laser output with oscillation threshold of $0.046\ \text{MW}/\text{cm}^2$ at near degenerate point (signal wavelength of $2.05\ \mu\text{m}$, idler wavelength of $2.236\ \mu\text{m}$) is achieved.

Key words nonlinear optics; optical parametric oscillator; $2\ \mu\text{m}$ laser; PPMgLN crystal; quasi-phase matching

OCIS codes 140.3070; 140.3460; 140.3580; 190.4410

1 引 言

随着固体激光技术的进步, $2\ \mu\text{m}$ 激光在生物医学和军事领域逐渐显示出重要的应用前景。在医学上, 由于 $2\ \mu\text{m}$ 激光有合适的吸收深度并能够在石英晶体中传输而备受关注, 其中德国科医人公司已成功研制出 RevoLix 型 $2\ \mu\text{m}$ 连续波医用激光手术治疗系统^[1-2]; 在军事领域, $2\ \mu\text{m}$ 激光在大气和烟雾中的穿透能力强, 可用于激光雷达和激光测距, 更重要的是能为有迫切需求的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段激光器

提供理想的抽运源。

固体激光技术实现 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出的常用方法有两种: 一种是用激光二极管 (LD) 抽运 Tm、Ho: YLF、YAG 等固体激光器或者由光纤激光器直接产生^[3]; 另一种是采用非线性光学的方法实现 $2\ \mu\text{m}$ 激光的输出^[4-5]。前一种方法获得的 $2\ \mu\text{m}$ 激光光束质量较好, 但稀土元素 Tm 和 Ho 属准三能级, 激光器阈值高, 通常还需制冷, 并且不能实现波长的宽调谐输出。第二种方法可以实现波长的宽调谐输出,

收稿日期: 2013-01-08; **收到修改稿日期**: 2013-03-06

作者简介: 邓华荣 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学及固体光参量振荡激光器等方面的研究。

E-mail: denghuarong0226@126.com

导师简介: 李 彤 (1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事非线性光学及固体光参量振荡激光器等方面的研究。

E-mail: litongln@163.com

且一般有两种方式可实现相位匹配:1) 利用非线性晶体的双折射特性和色散特性实现相位匹配;2) 利用周期性极化晶体的准相位匹配技术实现相位匹配^[6-10]。其中前者一般存在走离效应并且不能利用最大有效非线性系数;而后者利用非临界相位匹配实现相位匹配,不但可避免走离效应,而且通过调整极化方向也可有效利用晶体的最大有效非线性系数。

由于准相位匹配技术有如上所述的诸多优越性,本文首先对利用掺 MgO 的周期性极化铌酸锂 (PPMgLN)晶体实现 2 μm 波段(2~2.1 μm)激光输出进行了理论分析,而后使用双棒串接的 1.064 μm 激光抽运 PPMgLN 外腔光参量振荡(OPO)技术,在频率为 8 kHz 时,获得了振荡阈值为 0.046 MW/cm²,近简并波长(2.05 μm 和 2.236 μm)的激光输出。

2 理论分析

PPMgLN 晶体是一种全新的非线性光学晶体,可以实现从可见光到中红外光的倍频、和频和光学参量振荡等高效频率变换。PPMgLN 晶体的光损伤阈值和光折变阈值大幅增加。PPMgLN 晶体的透光范围为 360~5000 nm,非线性系数大,无走离。通过设计周期,可以实现全波段的输出,特别是利用 PPMgLN 晶体通过光学参量振荡可以实现宽调谐、高效的近红外和中红外激光输出。

PPMgLN 晶体与温度有关的色散方程为

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

式中 $f = (T - 24.5 \text{ } ^\circ\text{C})(T + 570.82 \text{ } ^\circ\text{C})$, T 为摄氏温度, λ 为入射光波长,下标 e 表示非常光。图 1 为 105.5 °C 时晶体的色散曲线。

为了最大限度的利用 PPMgLN 晶体的有效非线性系数,选取准相位匹配级数为 1,即 $m = 1$ 。令抽运光沿 PPMgLN 晶体长度方向入射,能量守恒条件和动量守恒条件分别为

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (2)$$

$$\frac{n_{ep}}{\lambda_p} = \frac{n_{es}}{\lambda_s} + \frac{n_{ei}}{\lambda_i} + \frac{1}{\Lambda}, \quad (3)$$

式中 λ_p 、 λ_s 、 λ_i 分别表示抽运光、信号光和闲频光波长, n_{ep} 、 n_{es} 、 n_{ei} 分别表示晶体对抽运光非常光、对信

号光非常光、对闲频光非常光的折射率, Λ 为 PPMgLN 晶体的极化周期。

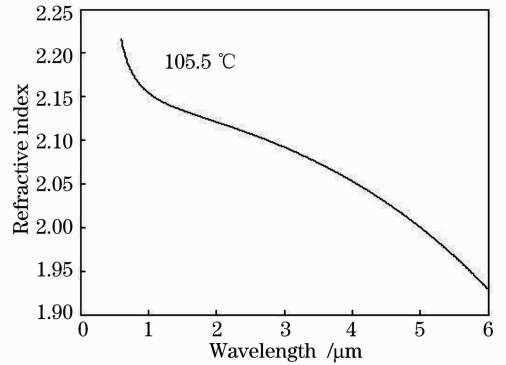


图 1 PPMgLN 晶体对不同波长的折射率
Fig. 1 Refractive indexes of PPMgLN crystal for different wavelengths

为了便于分析各个极化周期输出的 2 μm 波段激光对应的温度范围,分别给出当信号光波长为 2 μm 和 2.1 μm 时,极化周期与温度的对应关系曲线,如图 2 所示。为实现 2 μm 波段激光输出,极化周期为 32.2 μm 和 32 μm 对应的温度范围分别为 60 °C~69 °C、109 °C~115 °C。选取波长 2.1 μm 的信号光,已非常接近简并点 2.128 μm,所以极化周期分别为 32.2 μm 和 32 μm 对应的简并点温度分别为 69 °C 和 115 °C。

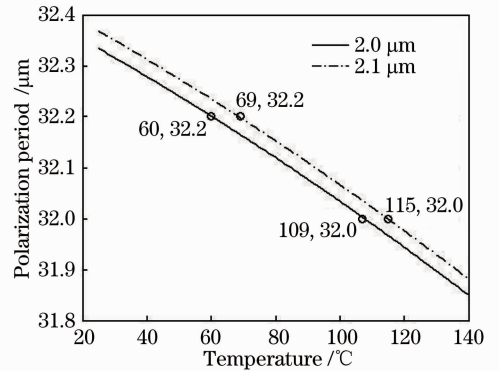


图 2 极化周期与温度的关系
Fig. 2 Relationship between polarization period and temperature

3 实验研究

3.1 实验装置

实验中采用技术上较成熟的侧面抽运双棒串接 Nd:YAG 激光器(波长为 1.064 μm)抽运 PPMgLN 晶体,并利用外腔 OPO 技术获得近简并波长 2.05 μm(信号光)和 2.236 μm(闲频光)的激光输出。实验装置如图 3 所示,包括两个 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 模

块、两个声光 Q 开关(Q1 和 Q2)、90° 偏振旋转器(M2)、偏振片(M3)、耦合透镜(M5)和 PPMgLN 晶体等。M1、M4、M6 和 M7 均为平面镜,其中 M1 对 1.064 μm 激光高反,M4 对 1.064 μm 激光反射率为 50%,M6 对 1.064 μm 激光高透且对 2.05 μm 激光高反,M7 对 1.064 μm 激光高反且对 2.05 μm 激光部分反射。实验中 M7 对 2.05 μm 激光反射率 R 分别取 50%、58%、70%、79%进行了深入的实验研究分析。实验采用的声光调 Q 开关频率为 8 kHz,示波器检测 1.064 μm 激光脉宽大约为 130 ns。实验所用的 PPMgLN 晶体为双周期晶体,极化周期分别为 32 μm 和 32.2 μm,晶体尺寸为 6 mm×1 mm×40 mm,每个周期的宽度分别为 2 mm,周期间空白为 0.2 mm。

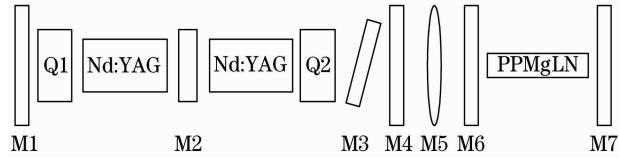


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

3.2 实验结果与分析

3.2.1 极化周期分别为 32.2 μm 和 32 μm 的实验分析研究

利用图 3 所示的实验装置进行了实验研究。为了更好地选择极化周期,对比了极化周期分别为 32.2 μm 和 32 μm 输出的 2 μm 激光的转换效率。选取 M7 对 2.05 μm 激光反射率为 70%,1.064 μm 抽运光的功率为 10 W。实验测得不同极化周期下,输出功率随温度的变化,如图 4 所示。由图 4 可知,极化周期为 32 μm 的晶体转换效率明显高于 32.2 μm 晶体的转换效率。因此选用极化周期为 32 μm 的晶体进行实验研究。

3.2.2 输出波长与温度的实验分析研究

由于 PPMgLN 晶体输出光波长与温度有关,为了得到 2 μm 波段激光对应的具体温度范围,采用光栅单色仪对不同温度对应的波长进行测定。图 5 为测得的输出波长与温度的关系曲线。由图 5 可以看出,实验测得的简并点温度在 110.2 °C,与理论上的简并点(图 2)对应的温度 115 °C 比较符合。虽然简并点转换效率较高,但又考虑到简并点处输出功率波动较大,综合考虑,实验温度定于 105.5 °C,该温度下对应的输出波长分别为 2.05、2.236 μm。因为中红外镀膜技术并不成熟,所以下一步将使用体积布拉格光栅作为输出耦合器实现简并点的波长输

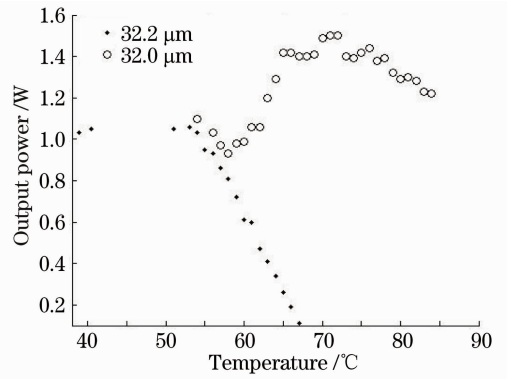


图 4 不同极化周期下输出功率随温度变化

Fig. 4 Output power versus temperature with different polarization periods

出,这样既可以提高从 1.064 μm 抽运源到 2.128 μm 输出光的转换效率,并且信号光和闲频光都可以作为中红外激光器的抽运源。

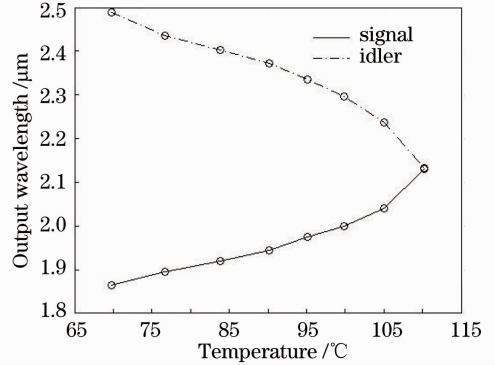


图 5 输出波长与温度的关系

Fig. 5 Relationship between output wavelength and temperature

3.2.3 不同反射率输出镜的实验分析研究

为了减少损耗、降低阈值,使用紧凑的 OPO 腔形结构进行实验。图 6 为在不同抽运功率下,输出镜反

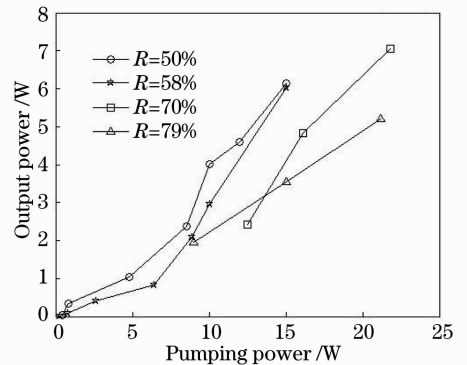


图 6 不同反射率输出镜下输出功率随抽运功率的变化
Fig. 6 Output power versus pumping power with different reflectances of output mirrors

射率取不同值时, $2\ \mu\text{m}$ 激光的输出功率变化情况。从图 6 可以看出, 转换效率基本上在 20% 以上, 甚至能够达到 40%。在保证转换效率不低于 40% 的前提下, 对两片输出镜(反射率分别为 50% 和 58%) 的振荡阈值进行了计算, 分别为 $0.084\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 和 $0.046\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 。振荡阈值较低, 这主要是因为该谐振腔为双谐振光参量振荡腔, 腔内返回的抽运光可对晶体进行二次抽运。

根据光参量振荡腔理论, 输出镜反射率越大, 振荡阈值越小。但由图 6 发现, 随着输出镜反射率的增加转换效率有减小的趋势, 因此对于输出镜反射率选取应综合考虑转换效率和振荡阈值。下一步计划继续降低输出镜的反射率以提高转换效率。实验所用 $1.064\ \mu\text{m}$ 抽运光的光束质量因子 $M^2 \approx 7$, 表明光束质量较差, 这在很大程度上影响了转换效率, 后续研究将对整个激光器系统进行优化设计以提高抽运光光束质量。另外, 由图 6 可以看出, 随着抽运功率的增加均未发现转换效率明显下降的现象, 即并未出现饱和现象, 所以后续研究可继续增加抽运功率以提高 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出。

增加腔长可以提高输出功率的稳定性, 所以对非紧凑型腔形进行了实验研究。实验并未发现 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出功率的稳定性有明显提高, 并且因为腔长的增加导致损耗增大, 进而导致振荡阈值变大、转换效率下降。所以后续研究将继续使用紧凑型腔形。

4 结 论

使用 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光抽运 PPMgLN 晶体外腔 OPO 技术获得 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出。采用侧面抽运的双棒串接 Nd:YAG 激光器做为抽运源, 设计了一台高频率、低阈值的 $2\ \mu\text{m}$ 激光器。PPMgLN 晶体采用准相位匹配技术, 使用非临界相位匹配的方式, 在重复频率为 8 kHz 时, 获得了功率为 7.05 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出, 振荡阈值为 $0.046\ \text{MW}/\text{cm}^2$, 转换效率为 41.3%。下一步工作重点是提高抽运源的光束质量和选取不同反射率大小的输出镜, 以提高转换效率和 $2\ \mu\text{m}$ 激光的输出功率。另外, 下一步计划使用体

积布拉格光栅作为输出耦合器, 实现简并点处的激光输出, 可在提高转换效率的同时, 为中红外激光器提供最佳的抽运源。

参 考 文 献

- 1 Ma Teng. Analysis of the 2 Micron Continuouse Wave Laser in Treatment of Superficial Bladder Cancer[D]. Changchun: Jilin University, 2012. 27-36.
马 腾. $2\ \mu\text{m}$ 激光治疗浅表性膀胱肿瘤疗效分析[D]. 长春: 吉林大学, 2012. 27-36.
- 2 Liao Naikai, Yu Jianjun, Xu Yuemin, *et al.*. Transurethral bipolar plasmakinetic resection combined with $2\ \mu\text{m}$ laser vaporization in the treatment of larger-volumed benign prostate hyperplasia[J]. Chinese J Andrology, 2012, 26(1): 27-31.
廖乃凯, 俞建军, 徐月敏, 等. 经尿道等离子双极电切联合 $2\ \mu\text{m}$ 激光汽化治疗大体良性前列腺增生[J]. 中国男科学杂志, 2012, 26(1): 27-31.
- 3 Wei Lei, Hu Xuehao, Han Long, *et al.*. Laser diode-dual-end-pumped Tm: YAP laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 28-32.
魏 磊, 胡学浩, 韩 隆, 等. 激光二极管双端抽运 Tm: YAP 激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 28-32.
- 4 Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin, *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator high repetition rate $2\ \mu\text{m}$ laser with 46 W output power[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 33-36.
彭跃峰, 谢 刚, 王卫民, 等. 46 W 腔内光参量振荡高重复频率 $2\ \mu\text{m}$ 激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 33-36.
- 5 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2303-2308.
檀慧明, 林洪沂, 张博麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2303-2308.
- 6 M. Henriksson, L. Sjöqvist, G. Strömqvist, *et al.*. Tandem PPKTP and ZGP OPO for mid-infrared generation[C]. SPIE, 2008, 7115: 711500.
- 7 Y H Cen, J W Chang, C H Lin, *et al.*. Spectral narrowing and manipulation in an optical parametric oscillator using periodically poled lithium niobate electro-optic polarization-mode converters[J]. Opt Lett, 2011, 36(12): 2345-2347.
- 8 H Zhao, Jr I T Lima, A Major. Near infrared properties of periodically poled KTiOPO_4 and stoichiometric MgO-Doped LiTaO_3 crystals for high power optical parametric oscillation with femtosecond pulses[J]. Laser Phys, 2010, 20(6): 1404-1409.
- 9 L Wang, Y Men, H Tian, *et al.*. Tolerance and tuning properties of the optical parametric processes using periodically poled RbTiOAsO_4 [J]. Opt Commun, 2009, 282(8): 1664-1667.
- 10 W Y Lin, S W Bi. Theoretical study and experimental scheme for the generation of a 1064 nm continuous variable entangled light source with quasi-phase-matching PPKTP crystal[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 637(1): S153-S157.

栏目编辑: 张 腾