

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0007-04

1.35 W, 3.85~3.95 μm 连续调谐周期极化 掺镁铌酸锂光参量振荡器

熊波 马建立 林学春 李晋闽

(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083)

摘要 周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器(PPMgLN OPOs)是输出高功率、可连续调谐中红外(MIR)激光的理想光源,在激光光谱仪、大气探测、红外信息对抗等应用方面具有很大优势。理论上分析了 PPMgLN 光参量振荡器的温度调谐特性,计算了脉冲运转单谐振光参量振荡器(SRO)抽运阈值。采用偏振 Nd:YAG 调 Q 激光(1064 nm)抽运 PPMgLN 晶体组成光参量振荡器,抽运阈值功率为 1.7 W,与理论计算值接近。当抽运功率为 12.3 W 时,在波长 3.93 μm 处获得 1.35 W 闲频光输出。晶体温度在 60~140 $^{\circ}\text{C}$ 范围变化,获得波长 3.846~3.952 μm 闲频光连续调谐输出,与理论调谐曲线吻合很好。

关键词 激光器;激光技术;光参量振荡;准相位匹配;周期极化掺镁铌酸锂;中红外

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0007

Continuous Tuning of a 3.85~3.95 μm , 1.35 W Optical Parametric Oscillator Based on PPMgLN

Xiong Bo Ma Jianli Lin Xuechun Li Jinmin

(Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)

Abstract Optical parametric oscillators based on periodically poled MgO-doped lithium niobate (PPMgLN OPOs) are ideal sources for high-power, continuously tunable mid-infrared (MIR) light, which is attractive for applications including laser spectroscopy, atmosphere detection and MIR countermeasure. In this paper, temperature tuning characteristic of PPMgLN OPO and oscillation threshold of pulsed SRO are analyzed theoretically. An OPO with PPMgLN pumped by Nd:YAG (1064 nm) Q-switched polarized laser is reported. The oscillation threshold is 1.7 W, which is close to the theoretical result. Idler output power of 1.35 W at 3.93 μm is achieved with pump power of 12.3 W. Idler wavelength output is tuned continuously from 3.846 to 3.952 μm with temperature varied from 60 to 140 $^{\circ}\text{C}$, which is in accordance with the theoretical tuning curve.

Key words lasers; laser technique; optical parametric oscillator; quasi-phase-matching; periodically poled MgO-doped lithium niobate; mid-infrared

1 引 言

高功率、可连续调谐中红外(MIR)激光(3~5 μm)在激光光谱仪、大气探测等方面具有广泛的应用。光参量振荡器(OPO)利用晶体的非线性效应可将单一波长激光(如 Nd:YAG 激光)转换为中红外激光并可实现连续调谐^[1~3],成为输出中红外

激光的理想光源。准相位匹配(QPM)技术可以充分利用晶体的最大非线性系数,光束无走离效应因而能利用较长晶体,在晶体透光波段内任意波长都可以实现相位匹配,因此极大地提高非线性光学转换效率并拓宽晶体的应用范围^[4]。相比同成分铌酸锂(LN)晶体,镁高掺杂 LN 晶体具有更高的光折变

作者简介: 熊波(1984—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器及非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: xiongbo@semi.ac.cn

导师简介: 李晋闽(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率全固态激光器及其工业应用等方面的研究。

E-mail: jmli@red.semi.ac.cn

损伤阈值,抗光损伤能力显著增强^[5];具有更低的极化矫顽场^[6],有利于制备具有大通光孔径的周期极化晶体。因此,实现高功率输出的准相位匹配光参量振荡器越来越倾向使用周期极化掺镁铌酸锂(PPMgLN)晶体。彭跃峰等^[1]使用 Nd:YAG 调 Q 激光器抽运 PPMgLN 晶体,在输入功率 23 W 时,在波长 3.7 μm 处激光输出功率 3.2 W。

本文对 PPMgLN 光参量振荡器的温度调谐特性和抽运阈值进行了理论分析。使用 1064 nm 偏振激光抽运 PPMgLN 晶体,当抽运功率为 12.3 W 时,在波长 3.93 μm 处获得 1.35 W 闲频光输出;通过温度调谐获得 3.846~3.952 μm 连续可调谐激光输出。

2 周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器理论分析

2.1 温度调谐理论曲线

光参量振荡器利用非线性晶体频率下转换效应,将抽运光转换为信号光和闲频光,为三波相互作用过程。为了获得高转换效率,必须满足相位匹配条件。使用 PPMgLN 晶体实现准相位匹配时,选择 $e \rightarrow e + e$ 匹配方式,可以利用晶体最大有效非线性系数而获得最高转换效率。三波相互作用过程中同时遵循能量守恒原理,在 PPMgLN 光参量振荡器中,能量守恒和共线条件下一阶准相位匹配公式为

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_i} = 0 \\ \frac{n_{ep}}{\lambda_p} - \frac{n_{es}}{\lambda_s} - \frac{n_{ei}}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda_g} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别为抽运光、信号光和闲频光在真空中的波长; n_{ep}, n_{es}, n_{ei} 分别为抽运光、信号光和闲频光 e 分量在晶体中的折射率; Λ_g 为晶体极化周期。PPMgLN 晶体的折射率由塞米尔(Sellmeier)方程决定,对于 MgO 掺杂摩尔分数为 5% 的周期极化同成分 LN 晶体,O. Gyer 等^[7]给出了 Sellmeier 方程中各项系数的最新研究结果,根据这些数据,可以使用 Matlab 软件模拟出 1064 nm 激光抽运条件下 PPMgLN 光参量振荡器温度调谐理论曲线(极化周期 29.05 μm)。

2.2 脉冲运转单谐振光参量振荡器抽运阈值计算

对于脉冲运转的抽运增强单谐振光参量振荡器(PE-SRO),抽运阈值表达式^[8]为

$$I_{th} = \frac{2.25}{kg_s l_{eff}^2 (1 + \gamma)^2} \times \left(\frac{L}{2\tau c} \ln \frac{P_n}{P_0} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2, \quad (2)$$

式中 k 为耦合常量,定义为 $k = \frac{2\omega_s \omega_i d_{eff}^2}{n_s n_i n_p \epsilon_0 c^3}$; ω_s, ω_i 为信号光、闲频光的角频率; n_s, n_i, n_p 为信号光、闲频光、抽运光的折射率; d_{eff} 为晶体有效非线性系数; ϵ_0 为真空介电常量; c 为真空中光速; g_s 为信号空间模耦合系数,定义为

$$g_s = \frac{1}{1 + (\omega_s/\omega_p)^2},$$

ω_s, ω_p 为信号光、抽运光光斑半径; l_{eff} 为晶体有效长度,对于准相位匹配晶体有效长度即为晶体长度 l ; γ 为晶体后向与前向抽运强度之比; L 为谐振腔光学长度; τ 为抽运光脉宽; P_n 为信号光阈值能量, P_0 为信号光噪声能量; α 为晶体对信号光的吸收系数; R 为输出耦合镜对信号光的反射率。(2)式左边与增益有关,右边为损耗:第一项为信号光从噪声增加到阈值时抽运光损耗,第二项对应晶体吸收,第三项为腔镜反射损耗。

3 周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器实验

实验装置如图 1 所示。抽运源为 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器,在激光器后插入薄膜偏振片获得线偏振光以利用晶体最大有效非线性系数。激光器最大输出功率 12.3 W, M^2 约为 3,重复频率 5 kHz,脉宽 88 ns。使用焦距 f 为 667 mm 的凸透镜将抽运光聚焦到 PPMgLN 晶体上,晶体中心束腰半径约为 0.393 mm。晶体为周期极化 MgO 掺杂为 5% 摩尔分数的同成分 LN 晶体(晶体由台湾 HCP 公司提供),尺寸 30 mm \times 12 mm \times 2 mm,极化周期 29.05 μm ,两端面镀增透膜(1.3~1.6 μm 范围 $R < 1\%$; 3.3~4.8 μm 范围 $R < 1.5\%$; 1.0~1.1 μm 范围 $R < 2\%$),晶体温度控制在 80 ± 0.1 $^\circ\text{C}$ 。光参量振荡器腔为对称平平腔, M1 为输入耦合镜,材料为石英,膜层对 1064 nm 高透($T = 97.2\%$),对 1.3~1.6 μm 高反($R > 99.7\%$),对 3.6~4.8 μm 高反($R > 98.2\%$); M2 为输出耦合镜,材料为氟化钙(CaF_2),膜层对 1064 nm 高反($R = 98.7\%$),对 1.3~1.6 μm 高反($R > 98.7\%$),对 3.6~4.8 μm 高透($T > 95.7\%$),腔长 70 mm。光参量振荡器腔为抽运增强的单谐振腔。P 为 CaF_2 棱镜,用于将抽运光、信号光和闲频光

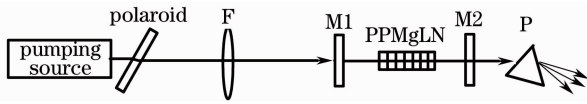


图 1 周期极化镁掺杂铌酸锂光参量振荡器

Fig. 1 Experiment setup of PPMgLN-OPO

分开。

使用(2)式计算光参量振荡器脉冲抽运阈值。取 $R=99.7\%$, $l=30\text{ mm}$, $\tau=88\text{ ns}$, $\ln(P_n/P_0)=33$, $\gamma\approx 1$, $g_s=0.5$, $d_{\text{eff}}=17.2\text{ pm/V}$, $L=104.5\text{ mm}$, $\alpha\approx 0.001\text{ cm}^{-1}$, 将这些数据代入(2)式得抽运阈值功率密度为 0.9 MW/cm^2 , 对应平均功率为 1.9 W 。

实验时逐步增加抽运功率, 当平均功率增加到 1.7 W 时, 开始出现红光, 这表明光参量振荡器已经开始振荡, 阈值与理论计算值 (1.9 W) 比较接近。使用光纤光谱仪测量红光光谱, 结果如图 2 所示。图 2 中有两条明显谱线 (λ_1 和 λ_2), 分别为抽运光与信号光和频以及信号光倍频所得^[9], 波长转变关系为

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_p} + \frac{1}{\lambda_s}, \quad \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_s}, \quad (3)$$

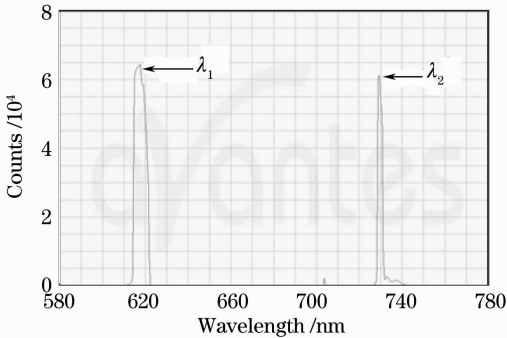


图 2 红光光谱测量结果

Fig. 2 Spectrum of red laser

由图 2 可知, 第一条谱线较宽, 峰值波长 λ_1 难于确定; 第二条谱线较窄, 峰值波长为 $\lambda_2=729.5\text{ nm}$, 根据(3)式可以推算出信号光波长为 $\lambda_s=1.459\text{ }\mu\text{m}$, 再由(1)式可得闲频光的波长为 $\lambda_i=3.930\text{ }\mu\text{m}$ 。实验中光参量振荡器谐振腔为平平腔, PPMgLN 晶体温度控制在 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 达到热平衡后晶体温度均匀分布, 所以光参量振荡器腔应为临界非稳腔。但实验发现光参量振荡器腔工作稳定, 这可能是由于晶体吸收抽运光而引起热效应^[10], 使得谐振腔变为热稳定腔。

当抽运功率增加到 12.3 W 时, 闲频光输出 1.35 W , 总参量光输出 2.05 W 。光参量振荡器的输入输出曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 抽运功率增加到 12.3 W 时, 闲频光输出并未出现饱和现象, 这说明继续增加抽运功率将可以获得更高功率闲频光

输出。另一方面, 增加抽运功率可能使 PPMgLN 晶体中心的功率密度达到晶体损伤阈值而损伤 PPMgLN 晶体。掺杂 MgO 的 LN 晶体极化矫顽场低, 可以制备大通光孔径的周期极化晶体。选择使用 2 mm 厚的 PPMgLN 晶体, 在进一步增加抽运功率时可以使用更大的抽运光斑半径, 使晶体中心抽运功率密度远低于其损伤阈值, 使晶体在高抽运功率条件下安全工作。

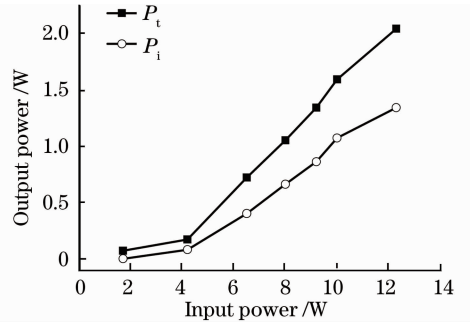


图 3 周期极化镁掺杂铌酸锂光参量振荡器输入输出曲线 (P_t 为总参量光功率, P_i 为闲频光功率)

Fig. 3 Output power versus input power of PPMgLN OPO (P_t is total power, P_i is the power of idler)

考虑抽运光光强的高斯分布^[11]和量子损耗效率两个因素, 理论上当抽运光功率为抽运阈值的 6.5 倍时, 抽运光 (1064 nm) 到闲频光 ($3.930\text{ }\mu\text{m}$) 的转换效率达到最高值, 约为 19% 。实验中最高抽运功率为 12.3 W 时 (约为抽运阈值的 7.2 倍), 抽运光到闲频光转换效率仅为 11% , 比理论值低很多。这可能是由于抽运光光束质量不够好, 晶体内部抽运光发散角太大引起的。下一步可以采用光束质量更好的激光为抽运源以提高转换效率。

改变 PPMgLN 晶体温度, 当晶体温度在 $60\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内改变时, 闲频光波长在 $3.846\sim 3.952\text{ }\mu\text{m}$, 信号光波长在 $1.471\sim 1.456\text{ }\mu\text{m}$ 范围内

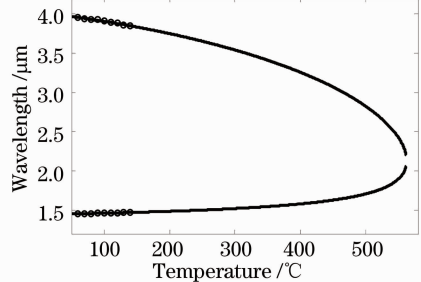


图 4 温度调谐曲线 (极化周期 $29.05\text{ }\mu\text{m}$)

实线为理论调谐曲线, 圆圈为实验数据

Fig. 4 Tuning curve of temperature tuning (poling period $29.05\text{ }\mu\text{m}$): solid line is theoretical tuning curve, circles are experiment data

变化。温度每改变 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，闲频光波长平均改变 1.3 nm ，而本实验使用的温控仪控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保证了闲频光输出波长的稳定性。通过改变晶体工作温度，可以获得在 $3.846\sim 3.952\text{ }\mu\text{m}$ 范围内波长连续改变的闲频光输出。将实验中波长测量值与理论调谐曲线对比，结果如图 4 所示。可以看到，实验测量值与理论调谐曲线吻合很好。

图 5 为周期极化镁掺杂铌酸锂光参量振荡器闲频光输出功率与温度变化的关系曲线。周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体在工作温度低于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，由于光折变损伤效应的影响，光参量振荡器输出功率会明显下降^[12]。本实验所用的 PPMgLN 晶体抗光折变损伤能力明显增强，温度低于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时输出功率无明显变化，表明没有发生光折变损伤。整个温度调谐过程中闲频光功率变化较小，适合于光参量振荡器的温度调谐。

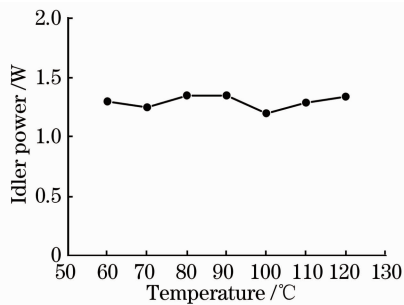


图 5 闲频光输出功率随晶体温度变化关系曲线

Fig. 5 Curve of idler output power versus temperature of PPMgLN crystal

4 结 论

采用偏振 Nd:YAG(1064 nm)调 Q 激光抽运厚度为 2 mm 的大通光孔径 PPMgLN 晶体，功率为 1.7 W 时光参量振荡器开始振荡，与理论计算值接近。当最大抽运功率为 12.3 W 时，在波长 $3.93\text{ }\mu\text{m}$ 处获得 1.35 W 闲频光输出。最大抽运功率下闲频光输出未出现饱和现象，继续增加抽运功率应该可以得到更高功率闲频光输出。闲频光转换效率较低可能是由抽运光光束质量不够好导致，下一步将使用光束质量更好的激光做抽运源以提高转换效率。

通过温度调谐获得波长 $3.846\sim 3.952\text{ }\mu\text{m}$ 闲频光连续调谐输出，与理论调谐曲线吻合很好。温度低于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时输出功率无明显变化，表明没有发生光折变损伤。

参 考 文 献

- 1 Peng Yuefeng, Lu Yanhua Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 670~674
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
- 2 J. A. Giordmaine, Robert C. Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**(24): 973~976
- 3 Xingbao Zhang, Baoquan Yao, Yuezhu Wang *et al.*. Middle-infrared intracavity periodically poled MgO: LiNbO₃ optical parametric oscillator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 426~427
- 4 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 712~713
姚建铨, 徐德钢. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 712~713
- 5 D. A. Bryan, Robert Gerson, H. E. Tomaschke. Increased optical damage resistance in LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(9): 847~849
- 6 Hideki Ishizuki, Ichiro Shoji, Takunori Taira. Periodical poling characteristics of congruent MgO: LiNbO₃ crystals at elevated temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(23): 4062~4064
- 7 O. Gyer, Z. Sacks, E. Galun *et al.*. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**: 343~348
- 8 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6): 415~431
- 9 Yan Caifan, Wang Yanan, Chen Shaofu *et al.*. Spectral properties of parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped lithium niobate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1997~2000
颜彩繁, 王亚楠, 陈少甫等. 周期极化掺镁铌酸锂光参量振荡器的输出光谱特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1997~2000
- 10 C. W. Hoyt, M. Sheik-Bahae, M. Ebrahimzadeh. High-power picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17): 1543~1545
- 11 J. E. Bjorkholm. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **7**(3): 109~118
- 12 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Zhang Hao *et al.*. Temperature tunable infrared optical parametric oscillator with periodically poled LiNbO₃ [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(7): 1077~1080