

文章编号: 1672-8785(2013)04-0038-05

中红外宽调谐连续 Nd:YVO₄/PPMgLN 光学参量振荡器研究

林洪沂^{1,2} 孟宪国^{1,2} 黄晓桦^{1,2} 蔡丽娥^{1,2} 许英朝^{1,2} 檀慧明³

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 福建省高校光电技术重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 采用连续 Nd:YVO₄ 激光器作为泵浦源, 在室温下实现了 PPMgLN 晶体准相位匹配, 获得了连续内腔光学参量振荡。获得的光参量阈值仅为 3 W (808 nm); 在泵浦光功率为 5 W、PPMgLN 极化周期为 31.5 μm 时, 获得了 365 mW、2.95 μm 的中红外连续激光输出和 312 mW、1.66 μm 信号光输出, 总光光转换效率达到 13.3%。通过改变晶体周期, 实现了 2.95~4.16 μm 闲频光和 1.43~1.66 μm 信号光的宽带可调谐输出。此连续中红外光参量振荡器结构简单紧凑, 效率高, 将是未来产生 3~5 μm 中红外激光光源的重要方法之一。

关键词: 中红外激光; 单谐振光学参量振荡器; PPMgLN 晶体; 可调谐激光

中图分类号: TN 248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.04.08

Study of Widely-tunable Mid-infrared Nd:YVO₄/PPMgLN Optical Parametric Oscillator

LIN Hong-yi^{1,2}, MENG Xian-guo^{1,2}, HUANG Xiao-hua^{1,2}, CAI Li-e^{1,2}, XU Ying-chao^{1,2}, TAN Hui-ming³

(1. School of Opto-electronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Fujian University, Xiamen 361024, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: By using a continuous wave (CW) Nd:YVO₄ laser as the pump source, the quasi-phase match is implemented for a PPMgLN crystal at room temperature and a continuous intracavity optical parametric oscillator (OPO) is obtained. The optical parametric threshold obtained is only 3 W (808 nm). For the pump power of 5 W and the period of PPMgLN crystal of 31.5 μm , both continuous mid-infrared laser output with the power of 365 mW at the wavelength of 2.95 μm and the signal laser output with the power of 312 mW at the wavelength of 1.66 μm are obtained. The total light conversion efficiency is up to 13.3%. By changing the periods of the crystal, the wide band tunable output of idle light in the spectral range from 2.95 μm to 4.16 μm and that of the signal light in the spectral range from 1.43 μm to 1.66 μm are obtained. This mid-infrared optical parametric oscillator is simple in structure and high in efficiency. It will be one of the important methods for producing 3-5 μm mid-infrared laser sources in the future.

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 福建省教育厅 A 类科技项目 (JA12248)

作者简介: 林洪沂 (1982-), 男, 山东冠县人, 博士, 讲师, 主要从事全固态激光与非线性频率变换技术研究。

E-mail: linyi0714@163.com

Key words: mid-infrared laser; SRO; PPMgLN crystal; tunable laser

0 引言

全固态连续光学参量振荡器 (Continuous Wave Optical Parametric Oscillator, CW-OPO) 是获得近红外和中红外激光光源的重要手段。其结构紧凑, 调谐简单, 可以广泛地应用于激光雷达、光谱分析和大气探测等领域^[1-3]。相对于脉冲 OPO^[4], CW-OPO 有很高的阈值, 所以最初主要采用连续双谐振结构 (CW-DRO)。CW-DRO 虽然阈值很低, 但它对谐振腔和泵浦源的要求很高, 所以发展受到了严重的限制。

最近, 准相位匹配非线性晶体的出现极大地推动了 CW-SRO 技术的进步^[5,6]。准相位匹配利用晶体最大非线性系数消除光束间走离效应等, 极大地降低了 CW-SRO 的阈值, 提高了 CW-SRO 的输出功率和转化效率。相对于外腔 CW-SRO, 内腔 CW-SRO 可以充分地利用腔内激光功率降低阈值和提高转化效率, 同时对泵浦源的要求也不高了^[7]。

实现 CW-SRO 最常用的晶体为 PPLN、PPMgLN 等。与 PPLN 晶体相比, PPMgLN 晶体有更强的抗光损伤能力, 室温下即可实现高效率参量输出。本文以连续 Nd:YVO₄ 激光器为泵浦源, 在室温下实现了 PPMgLN 晶体的准相位匹配, 获得了连续内腔光学参量振荡。

1 理论分析

1.1 PPMgLN 调谐特性

根据能量守恒定律、动量守恒定律以及 PPMgLN 晶体的 Sellmeier 方程^[8], 可计算出泵浦光波长为 1064 nm 时 PPMgLN 晶体的调谐特性。由图 1 可知, 在一定温度下, 可通过改变晶体极化周期来实现信号光与闲频光调谐。随着 PPMgLN 晶体周期的增加, 信号光波长会增大, 而闲频光波长会减小。闲频光变化幅度比信号光变化幅度要大一些。

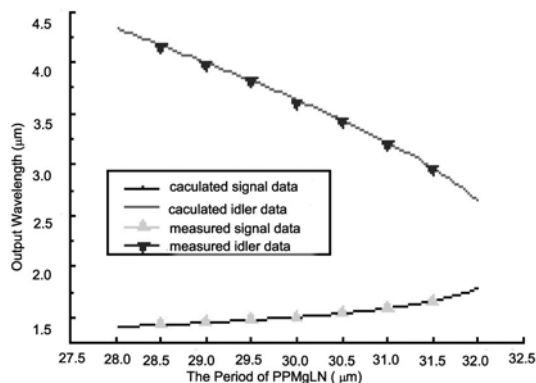


图 1 PPMgLN 晶体调谐特性 (T=20°C)

1.2 CW-SRO 阈值特性

CW-SRO 阈值可表示为^[9]

$$P_{th} = \frac{cn_p n_s n_i \lambda_s \lambda_i}{4\pi(2\pi)^4 d_e^2} \frac{1 - R_s}{l^2} \quad (1)$$

式中 c 为真空光速; n_p 、 n_s 、 n_i 分别为 PPMgLN 晶体内泵浦光、信号光和闲频光的折射率; λ_s 、 λ_i 分别为信号光与闲频光的波长; d_e 为有效二阶非线性光学磁化系数; l 为非线性晶体长度; R_s 为输出镜信号光的反射率。由上式可知, CW-SRO 阈值与 $d_e l$ 乘积的平方成反比, 与输出镜的透过率成正比。因此, 我们可通过选择较长的、非线性系数较高的晶体作为参量增益介质, 采用高反射率输出镜来降低 CW-SRO 阈值。PPMgLN 晶体的有效非线性系数特别高 (25.2 pm/V), 特别适合用于 CW-SRO。

2 实验装置

CW-SRO 系统实验装置如图 2 所示。CW-SRO 抽运源是 LDA 端面泵浦 Nd:YVO₄ 连续激光器; LDA 是 Limo 公司生产的半导体激光器阵列, 在室温下其中心发射波长为 809.1 nm。为了提高参量增益, 降低 SRO 阈值, 谐振腔采用平-凹直腔结构, 以便于把基频光束腰放置在 PPMgLN 晶体内。激活介质为 a-cut、0.5 at.% 掺杂、双面镀 1064 nm 增透膜的 Nd:YVO₄ 晶体, 尺寸为 $3 \times 3 \times 8 \text{ cm}^3$; PPMgLN 晶体的 MgO 掺

杂量为 5 at%，长为 50 mm，厚为 10 mm，在 28.5~31.5 μm 范围共平行排列了 7 个极化周期，其相邻间距为 0.5 μm ；晶体两端均镀有多层增透膜，该膜可增透 1.064 μm 的泵浦光、1.4~1.7 μm 的信号光和 2.9~4.2 μm 的闲频光。

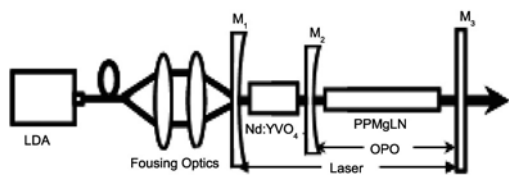


图 2 内腔连续 CW-SRO 实验装置图

图 2 中 M_1 的曲率半径为 100 mm，双面镀 808 nm 波长的增透膜，凹面镀 1064 nm 波长的高反膜； M_2 的曲率半径为 200 mm，双面镀 1064 nm 波长的增透膜，凹面镀 1.3~1.6 μm 波长的高反膜； M_3 （衬底白宝石）是整个 CW-SRO 系统的输出镜，其左端面对 1064 nm 波长的光是高反射的（ $R > 99.8\%$ ），而对信号光是部分反射的（反射率约为 95%），而右端面对信号光是高透的。这样， M_1 和 M_3 为基频光谐振腔， M_2 和 M_3 则是 SRO 谐振腔。另外，实验中制冷方式为热电制冷。

3 实验结果与讨论

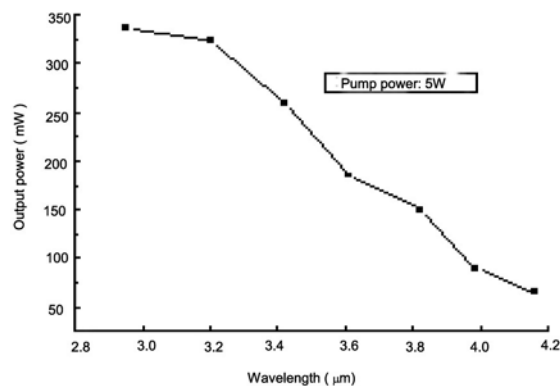


图 3 泵浦光为 5W 时不同闲频光的输出功率

我们利用相干公司生产的 LabMaster LM-3 型能量计测量了 CW-SRO 的输出功率。图 3 给出了 5 W 泵浦功率条件下不同波长闲频光的输

出功率。可以看出，闲频光波长越短，获得的功率越高。经分析主要有以下两个原因：(1) 光参量增益系数随着闲频光波长增大而减小；(2) PPMgLN 晶体对长闲频光（大于 3.6 μm ）的吸收更强。

另外，我们用组合式多功能光栅光谱仪测量了不同周期下 SRO 系统的调谐特性，获得了 1.43~1.66 μm 信号光、2.95~4.16 μm 闲频光的可调谐激光输出。如图 1 所示，测量值与实验值相吻合。图 4 给出了周期分别为 28.5 μm 、31.5 μm 的闲频光光谱图。闲频光的波长分别为 2.95 μm 和 4.16 μm 。

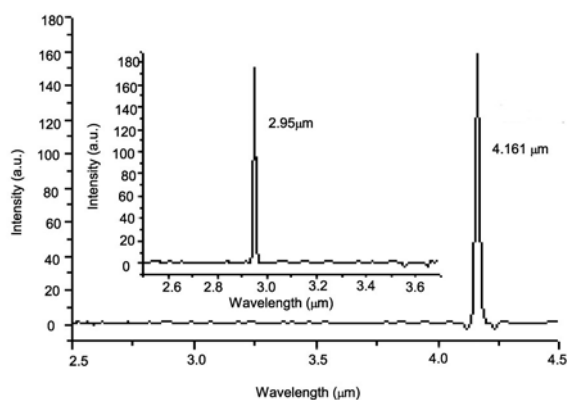


图 4 周期分别为 28.5 μm 、31.5 μm 的闲频光光谱图

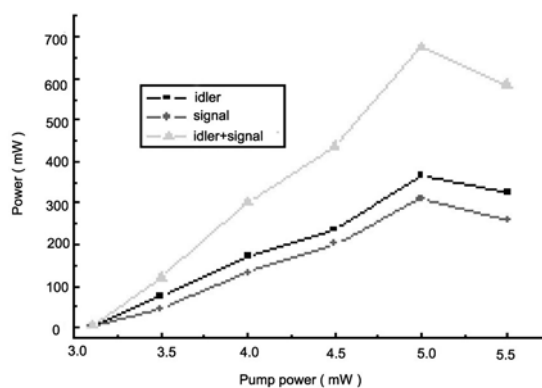


图 5 周期为 28.5 μm 时不同泵浦光对应的输出功率

在 PPMgLN 周期为 31.5 μm 时，分别测量了不同泵浦功率下信号光、闲频光以及参量光（信号光 + 闲频光）的输出功率（如图 5 所示）。泵浦功率为 5 W 时分别获得了 365 mW 的 2.95 μm 闲

频光和 312 mW 的 $1.66\ \mu\text{m}$ 信号光输出。总光光转换效率达到 13.3%。其阈值仅为 3 W 左右, 与式 (1) 的计算值 2.8 W 基本一致。另外, 泵浦功率为 5.5 W 时输出功率下降的主要原因是 PPMgLN 和 Nd:YVO₄ 晶体存在严重的热透镜效应^[10]。

我们发现相对于腔外 CW-SRO 系统, 此内腔 SRO 系统的信号光与闲频光功率之比更小。在连续外腔 SRO 系统中, 信号光与闲频光的功率之比接近其光子能量之比 (约 1.8)^[11]; 而此系统中, 两者的比值小于 1。这主要是由信号光自身倍频、三倍频以及其与泵浦光和频造成的。此系统中, 腔内泵浦光和信号光的功率更强, 混频效应更明显。图 6 给出了 PPMgLN 晶体周期为 $28.5\ \mu\text{m}$ 时, 信号光倍频及泵浦光与信号光和频产生的可见光光谱图。

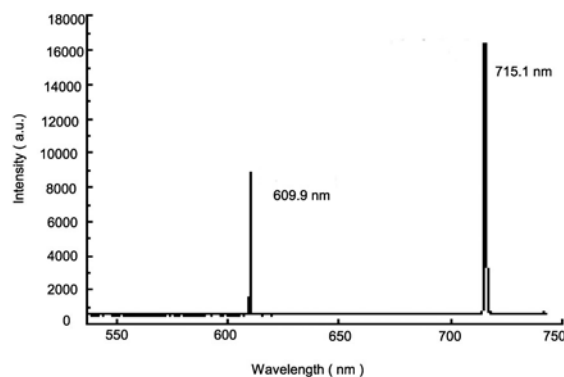


图 6 周期为 $28.5\ \mu\text{m}$ 时的红光光谱图

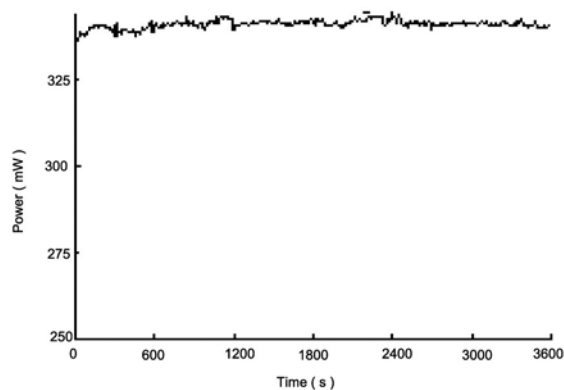


图 7 闲频光功率 1 小时的稳定性

另外, 在 PPMgLN 晶体极化周期为 $31.5\ \mu\text{m}$ 、泵浦光功率为 5 W 时, 利用计算机软件每隔 10 s 记录一次 SRO 闲频光的输出功率。经过连续一个小时的检测, 发现功率稳定性在 2% 以内 (如图 7 所示), 这说明参量光的输出功率是非常稳定的。

4 结束语

采用连续 Nd:YVO₄ 激光器作为泵浦源, 在室温下实现了 PPMgLN 晶体准相位匹配和连续内腔光学参量振荡。光参量阈值仅为 3 W (808 nm); 在泵浦光功率为 5 W、PPMgLN 极化周期为 $31.5\ \mu\text{m}$ 时, 获得了 365 mW、 $2.95\ \mu\text{m}$ 的中红外连续激光输出和 312 mW、 $1.66\ \mu\text{m}$ 的信号光输出, 总光光转化效率达到 13.3%。通过改变晶体周期, 实现了 $2.95\sim 4.16\ \mu\text{m}$ 闲频光、 $1.43\sim 1.66\ \mu\text{m}$ 信号光的宽带可调谐输出。在实验过程中发现, 当泵浦功率为 5.5 W 时, 由于 PPMgLN、Nd:YVO₄ 晶体的热效应, 输出功率有所下降。因此下一步工作是进一步优化谐振腔结构, 以提高参量输出功率。

参考文献

- [1] Breunig I, Haertle D, Buse K. Continuous-wave Optical Parametric Oscillators: Recent Developments and Prospects[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **105**(1): 99–111.
- [2] Bae I H, Moon H S, Kim S K, et al.. Self-guided Operation of Singly Resonant Continuous-wave Optical Parametric Oscillator Based on Bulk MgO-doped PPLN[J]. *Appl. Phys. B*, 2012, **106**(4): 797–801.
- [3] Markku V, Cecile O, Ville U, et al. Tuning and Stability of a Singly Resonant Continuous-wave Optical Parametric Oscillator Close to Degeneracy[J]. *Opt. Exp.*, 2011, **19**(23): 22515–22527.
- [4] Jieguang Miao, Jiying Peng, Baoshan Wang, et al. Compact KTA-based Intracavity Optical Parametric Oscillator Driven by a Passively Q-switched Nd:GdVO₄ Laser [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(23): 4287–4291.
- [5] 林洪沂, 黄晓桦, 许英朝, 等. 外腔式连续宽调谐中红外单谐振 PPMgLN 光学参量振荡器 [J]. *光电工程*, 2011, **38**(7): 31–35.
- [6] 林洪沂, 黄晓桦, 许英朝, 等. 中红外内腔式单谐振光学参量振荡器的研究进展 [J]. *激光技术*, 2011, **35**(6): 756–760.

- [7] Ebrahimzadeh M, Turnbull G A, Edwards T J, et al. Intracavity Continuous-wave Singly Resonant Optical Parametric Oscillators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(9): 1499–1511.
- [8] Paul O, Quosig A, Bauer T, et al. Temperature-dependent Sellmeier Equation in the MIR for the Extraordinary Refractive Index of 5% MgO Doped Congruent LiNbO₃[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(1): 111–115.
- [9] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M, et al. Quasi-phase-matched Optical Parametric Oscillators in Bulk Periodically Poled LiNbO₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2102–2116.
- [10] Stothard J M, Fortin P Y, Carleton A, et al. Comparison of Continuous-wave Optical Parametric Oscillators Based on Periodically Poled LiNbO₃ and Periodically Poled RbTiOAsO₄ Pumped Internal to a High-power Nd:YVO₄ Laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(10): 2102–2108.
- [11] Hongyi Lin, Huiming Tan, Jieguang Miao, et al. Extra-cavity, Widely Tunable, Continuous Wave MgO-doped PPLN Optical Parametric Oscillator Pumped with a Nd:YVO₄ Laser[J]. *Opt. Mater.*, 2009, **32**(1): 257–260.

(上接第 13 页)

参考文献

- [1] Herbert Kaplan. 地球红外成像从航天项目中获得益处 [J]. *红外*, 1999, **20**(5): 12–16.
- [2] 何丽, 胡以华. 红外地球敏感器的技术发展趋势 [J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(7): 4–6.
- [3] 邓雷, 刘学明, 崔维鑫. 基于焦平面技术的红外地球姿态敏感方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2006, **6**(17): 26–48.
- [4] 何敬. 基于 FPGA 的非制冷红外热成像系统 [D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2008.
- [5] 贝治年. 静态红外地平仪技术分析 [J]. *红外*, 2002, **23**(5): 16.
- [6] 刘志才, 李志广. 红外热像仪图像处理技术综述 [J]. *红外技术*, 2000, **22**(6): 27–32.
- [7] 邱翰. 红外热像仪软件系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [8] 姜华. 非制冷红外凝视成像系统研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

(上接第 37 页)

后的出气总量, 以指导选用合适的吸气剂用量, 满足杜瓦真空对长寿命的技术要求。

本文构建的杜瓦夹层材料出气特性模型可为杜瓦真空寿命的评估提供参考。结合红外焦平面探测器在恒温贮存下的盲元退化规律, 也可用于权衡对真空寿命和盲元数的技术要求。

参考文献

- [1] Brenière X, Tribolet P. IR Detectors Design and Approach for Tactical Applications with High Reliability without Maintenance[J]. *SPIE*, 2008, 6940:15.
- [2] Sintered Porous Getters manual, SAES 公司.
- [3] 姚日剑, 王鸽, 王先荣, 等. 星用非金属材料出气模型的应用 [J]. *宇航材料工艺*, 2007, **37**(2): 48–54.
- [4] 赵建权. 延长排气周期能提高杜瓦真空寿命 – 对 HgCdTe 红外探测器的放气量测试 [J]. *半导体技术*, 1994, **4**(2): 58–60.
- [5] Yuan S W, Kuo D T, Loc A S. Cryocooler Contamination Study[J]. *Proc of Advance in Cryogenic Engineering*, 2000, **45A**: 275–282.
- [6] Yuan S W, Kuo D T. Cryogenic [M]. New York, Kluwer Academic plenum Press Publishers, 2002: 659–664.