

高效率内腔式 2 μm 简并光学参量振荡器

郭靖 何广源 焦中兴 王彪

High-efficiency intracavity 2 μm degenerate optical parametric oscillator

Guo Jing He Guang-Yuan Jiao Zhong-Xing Wang Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 MgO:APLN 的多光参量振荡器实验研究及其逆转换过程演化分析

Experimental study of multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN and its evolution analysis of back conversion

物理学报.2015, 64(4): 044203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044203>

高功率, 红光至中红外可调谐腔内和频光学参量振荡器

High power red to mid-infrared laser source from intracavity sum frequency optical parametric oscillator pumped by femtosecond fiber laser

物理学报.2014, 63(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054205>

光纤参量放大增益谱边带快慢光特性研究

Characteristics of the slow and fast light in the band-edge of gain spectrum of the fiber-optic parametric amplification

物理学报.2014, 63(4): 044203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044203>

级联参量振荡产生太赫兹辐射的理论研究

Theoretical research on terahertz wave generation based on cascaded parametric oscillation

物理学报.2013, 62(8): 084212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084212>

保偏光纤中在不同频率区域拉曼效应和参量放大增益谱

Raman effect on parametric amplification gain spectra of different frequency propagation regimes in polarization maintaining fibers

物理学报.2013, 62(4): 044215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044215>

高效率内腔式2 μm 简并光学参量振荡器*郭靖¹⁾ 何广源²⁾ 焦中兴^{1)†} 王彪^{1)‡}

1) (中山大学, 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

2) (中山大学中法核工程与技术学院, 广州 510275)

(2014年10月8日收到; 2014年10月29日收到修改稿)

报道了一种高效率的2 μm 光学参量振荡器. 利用1.064 μm 声光调Q Nd:YVO₄ 激光器抽运基于氧化镁掺杂周期性极化铌酸锂的内腔式光学参量振荡器, 在简并状态实现了稳定高效的2 μm 激光输出. 当808 nm 激光二极管抽运功率为20 W, Q开关工作频率为15 kHz时, 产生了平均功率为3.5 W、脉冲宽度为1.4 ns的2 μm 激光, 光-光转换效率为17.5%, 斜效率为25%. 据我们所知, 该转换效率在2 μm 波段内腔式光学参量振荡器中是最高的.

关键词: 光学参量振荡器, 简并, 高效率, 2 μm 激光

PACS: 42.65.Yj, 42.60.Da, 42.55.Xi, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.64.084207

1 引言

高功率、高重频的2 μm 波段脉冲激光在医疗、遥感和光通信等方面有广阔的应用前景^[1,2]. 目前产生2 μm 激光的固体激光技术主要有两种: 一种是利用激光二极管(LD)抽运掺Tm和Ho激光晶体直接产生; 另一种是利用工艺成熟的1 μm 钕掺杂固体激光器抽运简并光学参量振荡器(OPO)产生. 采用后一种技术时, 为了得到高效率和高功率的2 μm 激光输出常采用腔内抽运的方式. 内腔式结构可以有效地利用激光腔内较高的能量密度, 并且因腔内抽运光多次通过OPO, 使得晶体的有效长度增加, OPO的转换效率增高^[3,4]. 文献^[5—7]报道了基于II类相位匹配KTiOPO₄ (KTP)晶体的2 μm 内腔式OPO, 他们利用走离补偿的内腔式KTP OPO, 得到了超过20 W的2 μm 激光输出, 从LD到2 μm 激光的转换效率为3.9%, 光斑为椭圆形, 光束质量因子 M^2 大于8.

准相位匹配参量晶体, 例如周期极化铌酸锂(PPLN)和周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)等, 可以利用晶体的最大非线性系数并且避免走离效应, 从而使其构建的OPO能得到更高的转换效率和更好的光束质量^[8,9]. 2005年, Cho等^[10]利用基于PPLN晶体的内腔式OPO, 当LD功率为110 W时, 得到了6 W的2 μm 激光输出, 对应的转换效率为5.4%, 光束质量因子 M^2 为3.3. 在后续的工作中, 他们使用PPLT晶体替换PPLN晶体, 在160 W的LD功率下, 使2 μm 激光功率提高到了9 W, 对应的转换效率为5.6%^[11]. 但是随着LD功率的增加, Nd:YAG棒的热效应增强, 光束质量因子 M^2 增加到了7.

在先前的工作中, 我们利用非偏振的Nd:YAG激光抽运内腔式氧化镁掺杂周期性极化铌酸锂(PPMgLN) OPO, 当LD功率为380 W时, 得到了20 W的2 μm 激光输出^[12], 对应的转换效率为5.3%, 但是光束质量较差, M^2 因子为10. 之后, 我们使用线偏振的Nd:YAG激光抽运内腔式PP-

* 国家自然科学基金(批准号: 61308056, 61008025)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 11232015)和广东省自然科学基金(批准号: S2012010010172)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiaozhx@mail.sysu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: wangbiao@mail.sysu.edu.cn

MgLN OPO, 在LD功率为408 W时, 得到了最高输出功率为7.1 W的2 μm 激光, 改善了光束质量, 水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 分别为3.2和3.3. 但是转换效率有所下降, 对应的转换效率仅为1.96%^[13]. 引起转换效率下降的主要原因是Nd:YAG晶体热效应导致的退偏损耗.

本文以LD端面抽运Nd:YVO₄激光器替代侧面抽运Nd:YAG激光器作为OPO的抽运源. 相比于Nd:YAG晶体, Nd:YVO₄晶体在1.064 μm 处有更大的受激发射截面, 在808 nm附近有更大的吸收带宽和吸收系数, 更有利于LD抽运产生低阈值、高效率的1.064 μm 激光. 另外, Nd:YVO₄晶体的基质材料为双折射晶体, 以它作为增益介质可直接产生线偏振的1.064 μm 激光, 能有效地避免退偏损耗, 进而提高2 μm OPO的转换效率. 我们使用这种方法在简并状态实现了最高转换效率为17.5%(LD-2 μm)的2 μm 激光输出, 此时2 μm 激光的功率为3.5 W, 脉冲宽度为1.4 ns, 线宽为30 nm, 水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 分别为3.47和3.54.

2 实验装置

激光器结构如图1所示, 抽运源是波长为808 nm的LD, 最大功率为20 W. 耦合光纤的芯直径为400 μm , 数值孔径为0.22. 抽运光通过由两个非球面透镜组成的耦合系统1:1聚焦到Nd:YVO₄晶体中, 耦合过程能量损耗小于2%. Nd:YVO₄晶体掺杂浓度为0.3 at.%, 长为10 mm, 通光截面为4 mm $\times$ 4 mm. 晶体用铝箔包裹后安装于铜的固定架中, 利用热电制冷片把晶体的温度稳定在25 $^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ $^{\circ}\text{C}$. 晶体的两个端面均是平面, 并镀有1.064 μm 和808 nm的增透膜, 对1.064 μm 的反射率小于0.1%. 激光谐振腔由三个平面镜M₁, M₂和M₄组成, 腔长为350 mm. 平面镜M₁对1.064 μm 激光高反($R > 99.5\%$), 对808 nm激光高透($T > 99\%$). 平面镜M₂对1.064 μm 激光高反($R > 99.8\%$). 平面镜M₄对1.064 μm 激光高反($R > 99.8\%$), 对2 μm 激光部分反射($R = 60\%$). 声光Q开关放置于平面镜M₂与Nd:YVO₄晶体之间.

内腔式PPMgLN OPO由入射腔镜M₃、输出镜M₄和PPMgLN晶体构成. 受机械结构的限制,

OPO的腔长为55 mm. 平面镜M₃对2 μm 激光高反($R > 99.5\%$), 对1.064 μm 激光高透($T > 98\%$). PPMgLN晶体长度为20 mm, 通光截面为3 mm $\times$ 3 mm. 为了得到高转换效率, 晶体紧贴位于光腰的镜片M₄放置, M₄上的光腰半径约为300 μm . PPMgLN晶体两端均镀有增透膜, 对1.064和2 μm 激光具有高透射率($T > 99\%$). 为了稳定晶体的工作温度, 晶体被置于一个温控炉中. 该温控炉的控温精确度为0.1 $^{\circ}\text{C}$, 温度调节范围为0—200 $^{\circ}\text{C}$. PPMgLN晶体的极化周期为32 μm , 当抽运波长为1.064 μm 时, 其简并状态的工作温度为115 $^{\circ}\text{C}$.

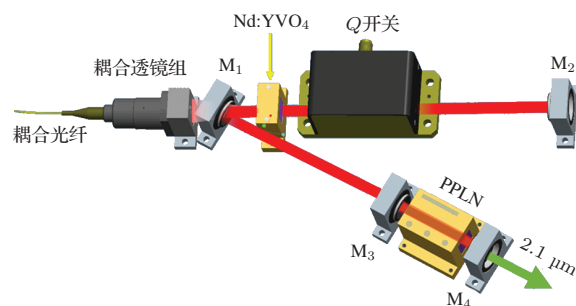


图1 (网刊彩色) 实验装置示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of experiment setup.

3 实验结果与分析

在不加入OPO时, 使用对1.064 μm 透射率为20%的输出镜替代M₂, 可以得到最大功率为6.2 W的1.064 μm 激光. 激光水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 都始终小于1.4. 重复频率为15 kHz时, 利用高速光电硅探测器(Thorlabs, PDA10A)测得1.064 μm 激光脉冲宽度为20 ns. 将OPO置于激光腔内, 并恢复输出镜为M₂后, 在15 kHz简并状态时得到最大功率为3.5 W的2 μm 激光输出, 相对于20 W LD的转换效率为17.5%, 如图2所示. 据我们所知, 该转换效率目前在2 μm 波段内腔式OPO中是最高的. 相比于Nd:YAG抽运的内腔式PPMgLN OPO^[11], 该转换效率提升了3倍以上.

我们使用高速InGaAs探测器(Thorlabs, DET08 CFC)对2 μm 激光脉冲形貌进行了测量. 图3为最高功率时2 μm 的脉冲形状, 脉冲宽度仅为1.4 ns, 比1.064 μm 激光的脉冲宽度要小很多. 对内腔式OPO而言, 参量激光脉冲的建立时间取决于参量增益和OPO腔的光子寿命^[14,15]. OPO

腔的光子寿命 τ_{OPO} 与 OPO 光子损耗和腔内往返时间有关: $\tau_{\text{OPO}} \approx t_{\text{OPO}}/(1-R)$, 其中, R 是 OPO 输出耦合镜的反射率, t_{OPO} 是 OPO 腔的往返时间. $1.064 \mu\text{m}$ 激光腔的光子寿命 $\tau_1 \approx t_1/(1-\delta_1)$, 其中, δ_1 是激光腔内往返过程中 $1.064 \mu\text{m}$ 激光的强度损耗, t_1 是激光腔内往返时间. 由此得知 OPO 腔的光子寿命远小于激光腔内的光子寿命, 因此可以得到较短的参量激光脉冲, 这一特点区别于外腔式的 OPO. 在外腔式 OPO 中, 参量激光的脉冲宽度仅比抽运光的脉冲宽度略小^[16]. 由图 3 可以看出, 在主脉冲的后面还有一个很微小的脉冲, 其在多次测量过程中持续存在, 这主要是由腔内 $1.064 \mu\text{m}$ 激光的高强度和内腔式 OPO 的低阈值造成的. 当腔内能量积累超过 OPO 阈值时, 参量过程开始建立, 但是由于参量激光脉冲强度远小于 $1.064 \mu\text{m}$ 激光脉冲强度, 在主脉冲消失后, 剩余的能量仍足以支持参量过程的建立, 这就导致了第二个参量脉冲的产生^[14]. 在本实验中, 第二个参量脉冲很微弱, 只比背景噪声略高, 相对于主脉冲而言可以忽略.

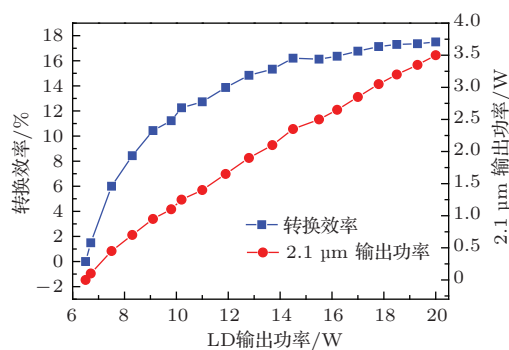


图 2 (网刊彩色) $2 \mu\text{m}$ 输出功率和光-光转换效率随 LD 功率的变化

Fig. 2. (color online) $2 \mu\text{m}$ output power and conversion efficiency versus laser diode power.

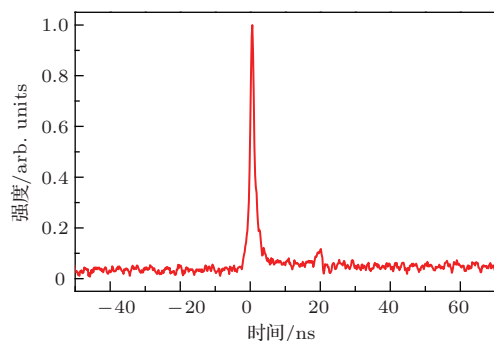


图 3 (网刊彩色) $2 \mu\text{m}$ 激光的脉冲形状

Fig. 3. (color online) Pulse shape of $2 \mu\text{m}$ laser.

在最高功率, 即 OPO 工作在 3.1 倍阈值(阈值

为 6.5 W) 时, 用刀口法测量了 $2 \mu\text{m}$ 激光的光束质量. 测量结果如图 4 所示, 水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 分别为 3.47 和 3.54. 光斑基本呈圆形, 水平和竖直方向的光束质量略微有所差异, 其主要原因是由于晶体放置在温控炉上, 晶体下表面直接接触温控炉的功能面, 而上表面与空气接触, 比下表面温度略低, 这样就形成了竖直方向的温度梯度, 导致竖直方向上的相位匹配发生变化, 因此竖直方向的光束质量比水平方向略差. 但是相比于先前利用 Nd:YAG 激光器抽运内腔式 PPMgLN OPO 产生的 $2 \mu\text{m}$ 激光^[11], 光束质量仍然有较大的改善, 主要是因为 $1.064 \mu\text{m}$ 激光具有较好的光束质量, 模式近于基模, 并且与参量激光具有良好的模式匹配.

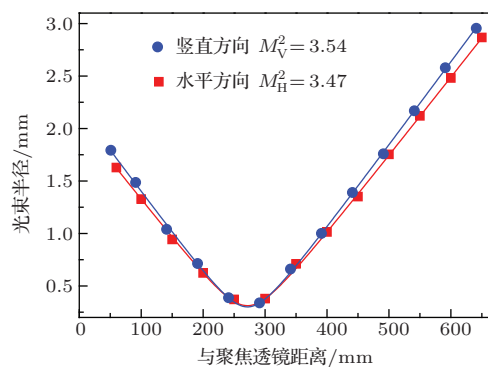


图 4 (网刊彩色) 刀口法测量 $2 \mu\text{m}$ 激光光束质量
Fig. 4. (color online) M^2 measurements of $2 \mu\text{m}$ output by the knife edge method.

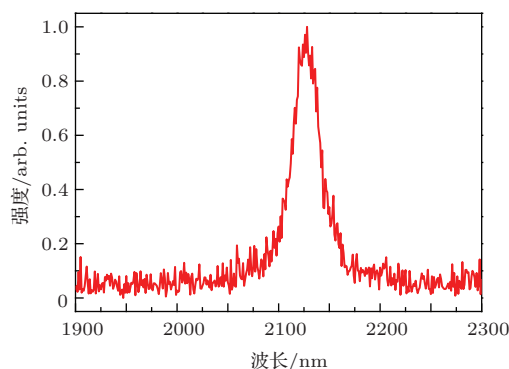


图 5 (网刊彩色) $2 \mu\text{m}$ 简并 OPO 输出频谱
Fig. 5. (color online) Output spectrum from the $2 \mu\text{m}$ degenerate optical parametric oscillator.

我们利用高分辨率成像光谱仪(Horiba JY, iHR550)对 $2 \mu\text{m}$ 激光的输出频谱进行了测量, 得到简并状态时 OPO 的输出频谱如图 5 所示. 从图 5 可看出, $2 \mu\text{m}$ 激光的线宽为 30 nm , 中心波长为 $2.128 \mu\text{m}$. 除了参量光的波峰之外没有其他

的波峰产生. 在实验中, 从过阈值一直到最高功率, $2\ \mu\text{m}$ 激光始终保持较好的稳定性, 图6所示为 $2\ \mu\text{m}$ 激光在最高功率时的稳定性测量结果, 在30 min内功率波动的标准偏差为2%.

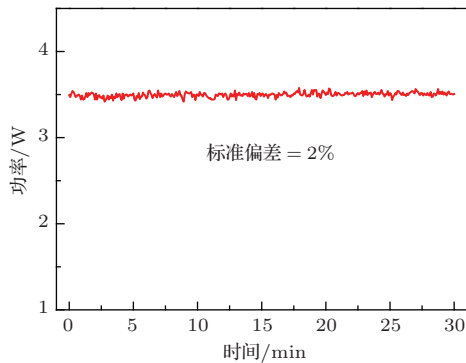


图6 (网刊彩色) $2\ \mu\text{m}$ 最高功率稳定性测量
Fig. 6. (color online) Stability measurement of the maximum output power at $2\ \mu\text{m}$.

4 结 论

本文利用端面抽运、偏振输出的Nd:YVO₄激光器作为内腔式简并PPMgLN OPO的抽运源, 在重复频率为15 kHz时, 得到了稳定高效的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出, 最高转换效率为17.5%. 基于内腔式OPO结构的优势, 最高功率时 $2\ \mu\text{m}$ 激光的脉冲宽度仅为1.4 ns. 相比之前的工作^[11], 在提高了转换效率的同时, 光束质量也有较大的改善, 水平方向和竖直方向的光束质量因子 M^2 分别为3.47和3.54, 光斑呈圆形. 在未来的工作中, 我们将增加抽运源功率, 优化谐振腔结构, 进一步提高 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出功率和光束质量, 以满足更多的应用需求.

参考文献

- [1] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, Hannon S M, Magee J R, Bruns D L, Yuen E H 1993 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **31** 4
- [2] Sumiyoshi T, Sekita H, Arai T, Sato S, Ishihara M, Kikuchi M 1999 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **5** 936
- [3] Geng Y F, Tan X L, Li X J, Yao J Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114209
- [4] Phua P B, Lai K S, Wu R F 2000 *Appl. Opt.* **39** 1435
- [5] Wu R F, Phua P B, Lai K S, Lim Y L, Lau E, Chang A, Bonnin C, Lupinski D 2000 *Opt. Lett.* **25** 1460
- [6] Wu R F, Lai K S, Lau E, Wong H F, Xie W J, Lim Y L, Lim K W, Chia L 2002 *Advanced Solid State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics Series* **68** paper TuA4
- [7] Phua P B, Tan B S, Wu R F, Lai K S, Chia L, Lau E 2006 *Opt. Lett.* **31** 489
- [8] Guo J, Lu G G, He G Y, Jiao Z X, Wang B 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 115403
- [9] Ji F, Yao J Q, Zhang B G, Zhang T L, Xu D G, Wang P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1286
- [10] Cho K H, Rhee B K, Sasaki Y, Ito H 2005 *J. Nonlinear Opt. Phys.* **14** 383
- [11] Cho K H, Rhee B K 2008 *Proc. SPIE* **6875** 68751A
- [12] Jiao Z X, He G Y, Guo J, Wang B 2012 *Opt. Lett.* **37** 64
- [13] Jiao Z X, Guo J, He G Y, Lu G G, Wang B 2014 *Opt. Laser Technol.* **56** 230
- [14] Falk J, Yarborough J M, Ammann E O 1971 *IEEE J. Quant. Electron.* **7** 359
- [15] Debuisschert T, Raffy J, Pocholle J -P, Papuchon M 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1569
- [16] He G Y, Guo J, Jiao Z X, Wang B 2012 *Opt. Lett.* **37** 1364

High-efficiency intracavity 2 μm degenerate optical parametric oscillator^{*}

Guo Jing¹⁾ He Guang-Yuan²⁾ Jiao Zhong-Xing^{1)†} Wang Biao^{1)‡}

1) (State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

2) (Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

(Received 8 October 2014; revised manuscript received 29 October 2014)

Abstract

A high-efficiency 2 μm optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled LiNbO₃ intracavity pumped by a 1.064 μm *Q*-switched Nd:YVO₄ laser is reported. With the intense fluence inside the laser cavity, a maximum 2 μm average power of 3.5 W is obtained at 15 kHz repetition rate in a degenerate state. A maximum optical-to-optical conversion efficiency of 17.5% with a slope efficiency of 25% is achieved when the laser diode power is 20 W. To the best of our knowledge, the efficiency is the highest ever achieved from an intracavity degenerate optical parametric oscillator in 2 μm region. The pulse duration of 2 μm is 1.4 ns, which is much shorter than that of 1.064 μm . A bandwidth of 30 nm is obtained at a degenerate wavelength of 2128 nm. The M^2 values for the 2 μm beam are 3.47 and 3.54 in the horizontal and vertical directions, respectively. The standard deviation of the power fluctuation is $\sim 2\%$ at the maximum power in half an hour.

Keywords: optical parametric oscillator, degenerate, high efficiency, 2 μm laser

PACS: 42.65.Yj, 42.60.Da, 42.55.Xi, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.64.084207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61308056, 61008025), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11232015), and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. S2012010010172).

† Corresponding author. E-mail: jiaozhx@mail.sysu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wangbiao@mail.sysu.edu.cn