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)‡}

(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,2μm激光 PACS: 42.65.Yj, 42.60.Da, 42.55.Xi, 42.65.-k

1引言

高功率、高重频的2μm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 M² 大于 8.

DOI: 10.7498/aps.64.084207

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110W时, 得到了6W的2μm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160W的 LD功率下,使2μm激光功率提高到了9W,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-

© 2015 中国物理学会 Chinese Physical Society

http://wulixb.iphy.ac.cn

^{*} 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 M²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 × 4 mm. 晶体用铟箔包裹后安装于 铜的固定架中,利用热电制冷片把晶体的温度稳 定在25°C±0.1°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 μ m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 M_3 、输出 镜 M_4 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× 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 °C, 温度调节范围为 0—200 °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 °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,可以得到最高功率为 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 M²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简并状态时得到最高功率为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2μm激光脉冲形貌进行了测量. 图 3 为最高功率时2μm的脉冲形状,脉冲宽度仅 为1.4 ns,比1.064μm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 TOPO 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, topo 是 OPO 腔的往返时间. 1.064 µm 激光腔的光子寿命 $\tau_l \approx t_l/(1 - \delta_l)$,其中, δ」是激光腔内往返过程中1.064 μm激光的强度损 耗, t₁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 μm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 μm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 μm 输出功率和光-光转换效率随 LD 功率的变化

Fig. 2. (color online) 2 μ m output power and conversion efficiency versus laser diode power.







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2μm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 M²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2μm激光^[11],光束质量仍 然有较大的改善,主要是因为1.064μm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 μ m 激光光束质量 Fig. 4. (color online) M^2 measurements of 2 μ m output by the knife edge method.



图 5 (网刊彩色) 2 μ m 简并 OPO 输出频谱 Fig. 5. (color online) Output spectrum from the 2 μ m degenerate optical parametric oscillator.

我们利用高分辨率成像光谱仪 (Horiba JY, iHR550) 对2 μm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 μm激光的线宽为30 nm,中心波 长为2.128 μm. 除了参量光的波峰之外没有其他

084207 - 3

的波峰产生. 在实验中,从过阈值一直到最高功 率,2 μm激光始终保持较好的稳定性,图6所示 为2 μm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 μm 最高功率稳定性测量 Fig. 6. (color online) Stability measurement of the maximum output power at 2 μm.

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 µm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 µm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 M²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 µm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

- 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

084207-4

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

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

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)
 (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 μ m optical parametric oscillator based on MgO-doped periodically poled LiNbO₃ intracavity pumped by a 1.064 μ m *Q*-switched Nd:YVO₄ laser is reported. With the intense fluence inside the laser cavity, a maximum 2 μ m 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 μ m region. The pulse duration of 2 μ m is 1.4 ns, which is much shorter than that of 1.064 μ m. A bandwidth of 30 nm is obtained at a degenerate wavelength of 2128 nm. The M^2 values for the 2 μ m beam are 3.47 and 3.54 in the horizontal and vertical directions, respectively. The standard deviation of the power fluctuation is ~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