

880 nm 共振抽运连续波内腔单谐振 光学参量振荡器及其逆转换

丁 欣^{1,2} 尚 策^{1,2} 盛 泉^{1,2*} 李 斌^{1,2} 范 琛^{1,2} 张海永^{1,2} 禹宣伊³ 温午麒^{1,2} 姚建铨^{1,2}

¹天津大学激光与光电子研究所,天津大学精仪学院,天津 300072

²天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072;³南开大学物理科学学院,天津 300071

摘要 报道了 880 nm 激光二极管(LD)共振抽运的连续波(CW)Nd:YVO₄-PPLN 内腔单谐振光学参量振荡器(ICSRO)。在 21.9 W 抽运功率下,获得了 1.54 W 的 3.66 μm CW 中红外闲频光输出,光-光转换效率为 7.0%;与 808 nm 传统抽运相比,共振抽运 ICSRO 在振荡阈值、输出功率、转换效率和功率稳定性等方面都显示出明显优势。针对高抽运功率下逆转换过程影响单谐振光学参量振荡器(SRO)转换效率的问题,研究了振荡信号光的耦合输出透射率对 SRO 阈值和下转换效率的影响。通过提高振荡光输出镜透射率优化 SRO 阈值,可在高抽运功率下保持下转换效率的同时获得高效的信号光输出;21.4 W 抽运功率下同时获得 1.54 W 闲频光和 5.03 W 信号光输出,总提取效率为 30.2%。

关键词 非线性光学;内腔光学参量振荡器;共振抽运;连续波;中红外;逆转换

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602008

Continuous-Wave Tunable Intra-Cavity Single Resonance Optical Parametric Oscillator under 880 nm in-Band Pumping and the Inverse Conversion

Ding Xin^{1,2} Shang Ce^{1,2} Sheng Quan^{1,2} Li Bin^{1,2} Fan Chen^{1,2}
Zhang Haiyong^{1,2} Yu Xuanyi³ Wen Wuqi^{1,2} Yao Jianquan^{1,2}

¹Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract A continuous-wave (CW) tunable Nd:YVO₄-PPLN intra-cavity resonance single oscillator (ICSRO) under 880 nm laser diode (LD) resonance pumping is reported. 1.54 W maximum idler output power at 3.66 μm is obtained under the pump power of 21.9 W, corresponding to an optical-optical conversion efficiency of 7.0%. The ICSRO under 880 nm in-band pumping shows significant improvements in threshold, output power, conversion efficiency and power stability compared with that under 808 nm traditional pumping. Since the back-conversion process harms the single resonance oscillator (SRO) down-conversion efficiency under high pump power, the influence of output coupler transmittance on SRO threshold and down-conversion efficiency is investigated. By increasing the output coupling of resonant signal to raise the SRO threshold, the down-conversion efficiency can be maintained under high pump power and efficient signal output can be obtained. 1.54 W idler output and 5.03 W signal output are obtained under the pump power of 21.4 W, corresponding to a total extraction efficiency of 30.2%.

Key words nonlinear optics; intra-cavity optical parametric oscillator; in-band pumping; continuous-wave; mid-infrared; back-conversion

OCIS codes 190.4970; 140.5560; 140.3070; 140.3600; 190.4360

收稿日期: 2013-02-15; 收到修改稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60978021, 61178028)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0610)资助课题。

作者简介: 丁 欣(1972-),男,教授,主要从事全固态激光器和非线性光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: dingxin@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shengquan@tju.edu.cn

1 引 言

利用周期极化钕酸锂(PPLN)晶体为非线性介质的光学参量振荡器(OPO)是获得 1.5 μm 附近人眼安全波段和 3~5 μm 中红外波段相干辐射的有效手段,在光谱分析和遥感等方面具有广泛的应用^[1~7]。单谐振光学参量振荡器(SRO)的功率和光谱稳定性以及波长调谐能力均优于双谐振光学参量振荡器(DRO),但其较高的阈值不利于其高效连续波(CW)运转。尽管近年来具有高非线性系数和长作用长度的周期极化晶体以及高光束质量的抽运源日趋成熟,外腔 SRO 连续波运转的阈值仍然高达数瓦^[8,9]。考虑到 SRO 仅在抽运功率充分高出振荡阈值后才具有高转换效率,当仅需要较低输出功率时外腔 SRO 是非常低效的^[10]。内腔 SRO(ICSRO)将非线性介质置于抽运激光器的谐振腔内,通过利用谐振腔内循环的高功率密度,能够在较低外界抽运功率下实现 SRO 高效的连续波运转,具有低阈值、高输出功率和高下转换效率等特点^[10~12]。

共振抽运技术是近年激光技术领域的研究热点,在掺 Nd³⁺ 激光工作介质中,将 Nd³⁺ 离子由基态⁴I_{9/2}直接抽运到激光上能级⁴F_{3/2},消除了传统抽运方式下由激发态⁴F_{5/2}到⁴F_{3/2}的弛豫过程,能够有效降低量子缺陷率,提高量子效率,减少热量产生。与 808 nm 传统抽运方式相比,共振抽运的 Nd:YVO₄激光器在输出功率、转换效率、阈值以及功率稳定性等方面均表现出了明显的优势^[13~16]。本文将共振抽运技术应用于 ICSRO 中,利用 880 nm 半导体激光器(LD)共振抽运 Nd:YVO₄-PPLN ICSRO,在 21.9 W 的抽运功率下获得了 1.54 W 的连续波 3.66 μm 中红外闲频光输出,光光转换效率为 7.0%。与 808 nm 传统抽运相比,共振抽运的

ICSRO 在阈值、输出功率、转换效率和功率稳定性等方面都得到明显提升。

抽运功率超过 OPO 阈值后,能量开始由抽运光向信号光和闲频光转换,而抽运功率继续增加,信号光与闲频光光场达到一定强度后,能量开始流回至抽运光场,即发生了逆转换^[17]。逆转换过程是影响 OPO 效率的重要因素,在脉冲运转的 OPO 中,为抑制逆转换,须考虑晶体的最佳长度和振荡光的最佳透射率,使得 OPO 阈值 P_{th} 和抽运功率 P_{in} 满足最优关系 $P_{in} = (\pi/2)^2 \cdot P_{th}$ ^[17~19]。而早期的 CW-SRO 中,为克服其较高的阈值经常采用非振荡光输出而振荡光无输出的方式,对于逆转换和信号光最佳透射率的问题考虑较少。近年来随着抽运源和非线性介质的发展,CW-SRO 中逆转换过程对转换效率的影响也越发明显,Stoohard 等^[20]曾报道为提高 CW-ICSRO 的闲频光输出功率,甚至需要调偏谐振腔以提高阈值。显然,调偏谐振腔单纯引入损耗以提高阈值与通过调整振荡光耦合输出来提高阈值相比,是非常低效的。调整振荡光耦合输出,在适当提高阈值、抑制高抽运功率下逆转换并保持下转换效率的同时,能够高效地获得有用的信号光输出,提高总提取效率。本文实验研究了振荡信号光的耦合输出透射率对 ICSRO 阈值和下转换效率的影响,结果表明 CW-ICSRO 能够在较高信号光输出透射率时仍保持较低的阈值,同时在很大抽运功率范围内实现较高的下转化效率。

2 实验装置

图 1 为实验装置示意图。光纤耦合输出的中心波长为 880 nm,尾纤芯径为 400 μm,数值孔径(NA)为 0.22,经 1:1 耦合器聚焦后抽运 Nd:YVO₄ 晶体。

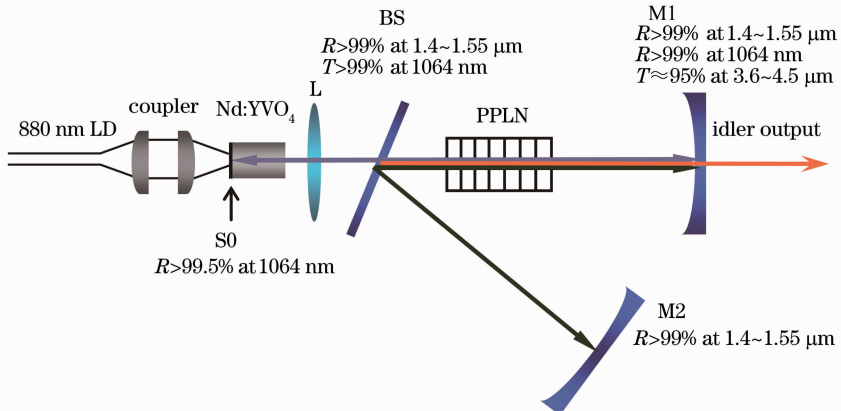


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental setup

沿 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体掺杂浓度的原子数百分比为 0.5%，尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm，入射端镀 800~900 nm 增透、1064 nm 高反膜系，出射端镀 1064 nm 增透膜，晶体对入射的非偏振 880 nm 抽运光吸收百分比约为 85%。透镜 L 焦距为 100 mm，双面镀 1064 nm 增透膜。M1 镜为 CaF₂ 基片，曲率半径为 100 mm，镀 1064 nm 和 1.4~1.55 μm 信号光波段高反(HR)、3.6~4.5 μm 闲频光波段增透膜系，与 Nd:YVO₄ 晶体入射面 S0 组成 1064 nm 激光谐振腔。PPLN 晶体尺寸 24 mm×8 mm×1 mm，双端镀 1064 nm、1.4~1.55 μm 和 3.6~4.5 μm 增透膜系，包含 26~29 μm、间隔为 0.5 μm 的 7 个不同极化周期。平-平分束镜 BS 双面镀 1064 nm 增透膜，单面镀信号光高反膜；M2 镜曲率半径 90 mm，镀信号光高反膜；信号光谐振腔由 M1-BS-M2 组成。为避免光折变损伤，PPLN 晶体用精度为 0.1 °C 的控温系统加热工作；Nd:YVO₄ 晶体置于铝质夹具中，水冷至 10 °C。为进行共振抽运和传统抽运下 ICSRO 的对照实验，还分别使用了 808 nm LD 和掺杂浓度(原子数分数)为 0.3%，尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体作为抽运源和激光增益介质，此晶体对 808 nm 非偏振抽运光吸收百分比为 97%。

Nd:YVO₄ 晶体吸收 880 nm 抽运功率为实验中所用最大值 21.9 W 时，测得其热透镜焦距为 150 mm。据此确定激光谐振腔长度(S0-M1)为 170 mm，此时 Nd:YVO₄ 晶体中 1064 nm 激光光斑半径为 225 μm，PPLN 晶体中的 1064 nm 激光束腰半径为 90 μm。信号光谐振腔长度(M1-BS-M2)为 190 mm，PPLN 晶体中的 1.5 μm 信号光束腰半径为 110 μm。1064 nm 激光(SRO 抽运光)和 1.5 μm 信号光的聚焦参数分别为 $\xi_p = L/b_p = 0.22$ 和 $\xi_s = L/b_s = 0.21$ ，其中 L 为晶体长度，共焦参数 $b_i = 2\pi n\omega_i^2/\lambda_i$ ， $i = p, s$ 。当使用 808 nm 抽运光时，在 17.1 W 抽运功率下 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜焦距约为 80 mm，热效应远比 880 nm 共振抽运下严重。为进行合理的对比，激光谐振腔长度缩短至 165 mm，使得聚焦参数与 880 nm 共振抽运时相同。

3 实验结果与讨论

3.1 共振抽运 ICSRO 的输出特性

由于中红外闲频光波长不在实验所用的光谱仪(Agilent 86142B 型)响应范围之内，闲频光波长根据测得的信号光波长计算得到。晶体温度 t 为 140 °C，极化周期 Λ 由 27.5 μm 变化至 29 μm 时，闲频光波长

调谐范围为 3.66~4.22 μm。图 2 给出 21.9 W 抽运功率 P_{abs} 下，不同极化周期对应的中红外闲频光波长和输出功率(功率计为 Molectron EPM1000 型)。由于 PPLN 晶体对闲频光吸收的增强和光子能量的降低，闲频光输出功率随波长增大而明显下降。

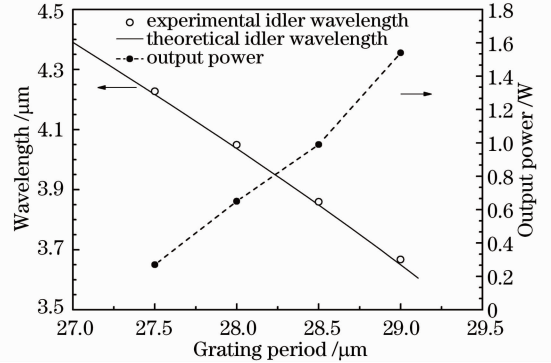


图 2 闲频光波长和输出功率随 PPLN 晶体极化周期的变化($t=140$ °C, $P_{abs}=21.9$ W)

Fig. 2 Idler wavelength and output power versus PPLN crystal grating period ($t=140$ °C, $P_{abs}=21.9$ W)

图 3 为 880 nm 共振抽运和 808 nm 传统抽运下 3.66 μm 闲频光输出功率以及转换效率随吸收抽运功率关系的对比(极化周期 Λ 为 29 μm，温度 t 为 140 °C)。880 nm 抽运下 SRO 阈值为 1.22 W LD 功率，在 21.9 W 最大抽运功率下得到 1.54 W 的闲频光输出，光-光转换效率为 7.0%，斜率效率为 7.6%。继续增大抽运功率，由于严重的热透镜效应使得 1064 nm 激光谐振腔不能工作在稳区之内，输出功率发生下降。如缩短激光谐振腔，可增大稳区，使用更高抽运功率；为避免损坏晶体，实验中并未进行此尝试。808 nm 传统抽运下，SRO 阈值

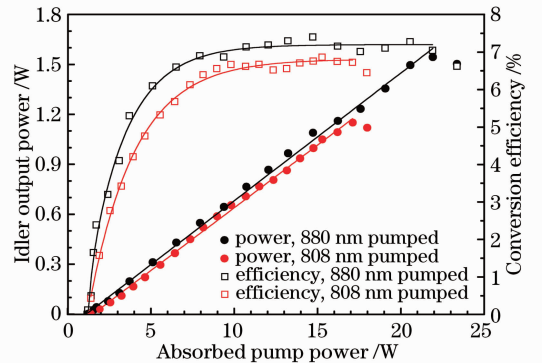


图 3 880 nm 及 808 nm 抽运下 3.66 μm 闲频光输出功率以及转换效率随吸收抽运功率的变化关系($\Lambda=29$ μm, $t=140$ °C)

Fig. 3 3.66 μm idler output power and conversion efficiency versus absorbed LD pump power under 880 nm and 808 nm pumping ($\Lambda=29$ μm, $t=140$ °C)

增至 1.39 W LD 功率,抽运功率为 17.1 W 时获得最高闲频光输出功率为 1.15 W,光-光转换效率为 6.7%,斜率效率为 7.0%,限于严重的热效应,不能利用更高抽运功率。

由于热负载的降低改善了 1064 nm 激光的功率稳定性,ICSRO 闲频光输出的功率稳定性也得到了明显提升。880 nm 共振抽运下,闲频光输出功率为 1.54 W 时,其在 1 h 内波动仅为 1.1% [均方根值(RMS)],远低于 808 nm 传统抽运下输出功率 1.15 W 时 2.9% 的波动(如图 4 所示)。

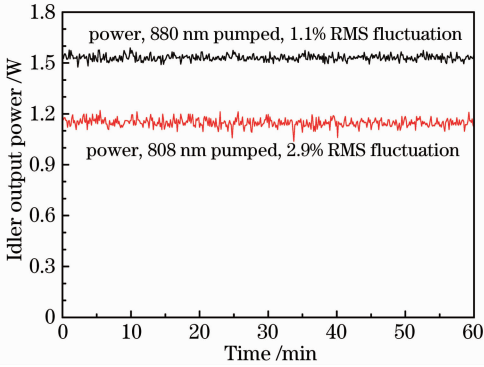


图 4 880 nm 共振抽运和 808 nm 传统抽运内腔 SRO 闲频光输出功率稳定度对比

Fig. 4 Comparison of idler power stability under 880 nm in-band pumping and 808 nm traditional pumping

3.2 CW-ICSRO 中的逆转换

实验中观察到了逆转换过程对下转换效率的影响:1064 nm 激光和 1.5 μm 信号光的聚焦参数 ξ 均为 0.28 时,激光阈值为 0.34 W,最低 SRO 阈值为 0.95 W,在此情况下增加抽运功率,21.4 W 抽运功率下得到 1.13 W 的 3.66 μm 闲频光输出,在最高抽运功率下调整 SRO 谐振腔,闲频光输出功率升至 1.54 W,此时 SRO 阈值升至 3.4 W,如图 5 所示。这说明 ICSRO 信号光无输出时此抽运功率下逆转换的作用已经很明显,可考虑通过增大信号光输出透射率来适当提高 SRO 阈值 P_{th}^{SRO} ,使之满足 $P_{th}^{SRO} = \sqrt{P_{th}^L \cdot P_m}$ 的关系,其中 P_{th}^L 为激光阈值,以优化下转换效率^[21],同时获得高效的信号光输出。

为此,换用对 1.5 μm 信号光透射率 T 分别为 5.3% 和 9.6% 的 M2 镜,均按照最低 SRO 阈值准直谐振腔,SRO 阈值分别升至 1.55 W 和 2.46 W。利用测得的闲频光输出功率 P_i ,可以计算得到相应发生下转换的 1064 nm 激光功率 P_{DC} ,即

$$P_{DC} = (2P_i / \eta_i) / (\lambda_p / \lambda_i), \quad (1)$$

式中因子 2 表示闲频光沿正反 2 个方向传输, $\eta_i =$

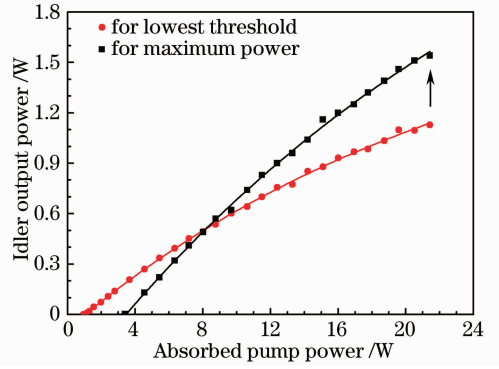


图 5 SRO 谐振腔分别按照最低阈值(圆点)和最高闲频光输出功率(方块)准直情况时闲频光输出功率相对 LD 抽运功率的变化

Fig. 5 Idler output power versus LD pump power when the SRO resonant cavity is optimized for the lowest threshold (solid circle) and the maximum idler output power (solid square), respectively

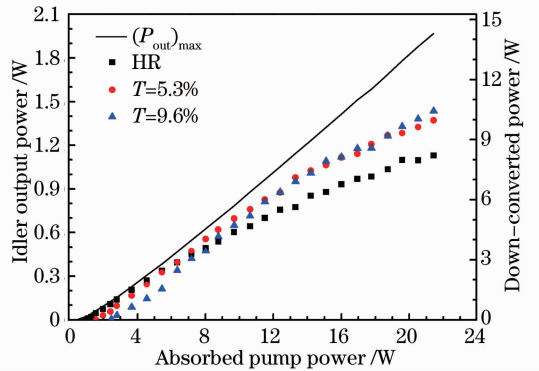


图 6 使用不同信号光透射率的 M2 镜时,SRO 闲频光输出和下转换功率随抽运功率的变化(SRO 谐振腔均按最低阈值准直)

Fig. 6 SRO idler output power and down-converted power with different signal output coupler transmittances versus absorbed LD power (cavities optimized for the lowest threshold)

0.95 为闲频光输出镜的透射率。 λ_p 和 λ_i 分别为 SRO 抽运光(1064 nm 激光)和闲频光波长。图 6 给出了 P_{DC} 随 LD 抽运功率的变化关系。可以看出随着 SRO 阈值的升高,抽运功率超过 SRO 阈值后闲频光输出功率的增长更快。使用信号光透射率分别为 $T=5.3\%$ 和 $T=9.6\%$ 的 M2 镜,谐振腔按最低 SRO 阈值准直时,在最高抽运功率 21.4 W 下 3.66 μm 闲频光输出功率分别为 1.37 W 和 1.43 W。图中实线表示相应抽运功率下使用最佳透射率的 1064 nm 激光输出镜时所能获得的激光输出功率。

根据上面得到的下转换功率和最高激光输出功率,可以计算出使用不同 M2 镜时 ICSRO 的下转换

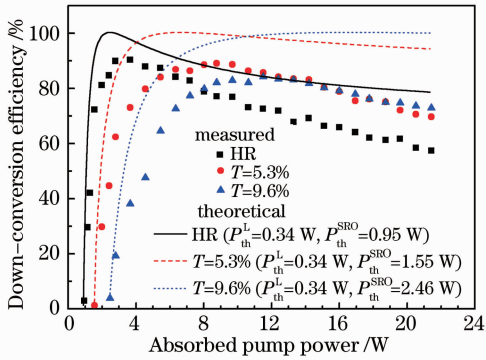


图7 使用不同 M2 镜时 SRO 的理论和实验下转换效率随抽运功率的变化(谐振腔均按最低 SRO 阈值准直)

Fig.7 Theoretical and measured SRO down-conversion efficiencies with different signal output coupler transmittances versus absorbed pump power (cavities optimized for the lowest threshold)

效率随抽运功率的变化关系,如图7所示。图中同时给出对应激光阈值为 0.34 W, SRO 阈值分别为 0.95 W、1.55 W 和 2.46 W 时 ICSRO 的理论下转换效率^[21]。理论上, ICSRO 的 100% 下转换效率分别出现在 2.5 W、6.7 W 和 16.8 W 处;在 21.4 W 最大抽运功率下,分别下降至 78.3%、94.0% 和 99.7%。实验中使用信号光高反的 M2 镜时,其下转换效率在超过阈值后迅速上升,在 2.8~3.7 W 抽运功率下达到(90±0.5)% 的最高值。随后逆转换过程和热效应等因素共同作用,使得下转换效率开始下降,最终抽运功率 21.4 W 时下转换效率为 57.4%。使用信号光透射率分别为 5.3% 和 9.6% 的信号光输出镜时,得益于对逆转换过程的抑制,最高抽运功率下的下转换效率分别为 69.7% 和 72.9%,得到了明显提高。需要指出的是,上述结果均为 SRO 谐振腔按照最低阈值准直得到的,在最高抽运功率下重新调整谐振腔,闲频光输出功率分别从 1.37 W 和 1.43 W 提高至 1.48 W 和 1.49 W。如此小的提升说明,通过振荡光耦合输出优化 SRO 阈值,使之接近其理论最优值,基本消除了逆转换过程对下转换效率的影响。实验中使用不同 M2 镜时最终下转换效率之间的差距也与它们的理论值之间的差距大致相符。分别使用 3 种不同透射率的 M2 镜时,实验下转换效率均比理论值低 20%~30%,这是由于高功率下严重的热效应使得光束质量下降所致;使用透射率为 9.6% 的输出镜,闲频光输出功率为 0.1 W 时水平和垂直方向上光束质量 M^2 因子分别为 1.24 和 1.29,而输出功率为 1.43 W 时分别恶化至 1.62 和 1.71。另一个反映热效应影响的现象

是使用透射率为 9.6% 输出镜时,最高下转换效率为 11.5 W 抽运功率下的 84.2%,低于使用高反镜和透射率为 5.3% 的输出镜时达到的 90% 左右的最高下转换效率。这是由于在 2.46 W 的较高 SRO 阈值下,逆转换过程发生较晚,而热效应先于逆转换开始影响转换效率。

使用透射率分别为 5.3% 和 9.6% 的信号光输出镜时,在 21.4 W LD 抽运功率下分别获得了 3.79 W 和 5.03 W 的 1.5 μm 信号光输出功率,总提取效率分别达到了 24.1% 和 30.2%。相对于外腔 SRO, ICSRO 的低阈值特性决定了其更适于耦合输出连续波信号光。文献[4]中连续波外腔 SRO 振荡信号光输出透射率为 3.8% 时阈值就已高达 10.5 W,在输出透射率为 6% 时阈值更是超过 15 W。考虑 2%~3% 的典型腔内损耗,相对外腔 SRO 低于 5% 的信号光输出透射率, ICSRO 10% 的输出透射率对于提高信号光提取效率的作用是不可忽视的。

4 结 论

进行了 880 nm 共振抽运的连续波 Nd:YVO₄-PPLN 内腔单谐振光学参量振荡器的实验研究,在 21.9 W LD 抽运功率下,获得了 1.54 W 的 3.66 μm 中红外闲频光输出,光-光转换效率为 7.0%。与 808 nm 传统抽运相比,880 nm 共振抽运的 ICSRO 在阈值、输出功率、转换效率以及功率稳定性等方面具有明显优势。同时实验研究了振荡信号光的输出透射率对 ICSRO 阈值和下转换效率的影响,通过适当提高信号光输出透射率,优化 SRO 阈值,在将 SRO 阈值保持在较低水平(2.46 W)的同时,基本消除了逆转换过程对 SRO 下转换效率的影响, SRO 下转换效率在 7~21.4 W 的较大范围内均超过 70%。在 21.4 W 最高抽运功率下,同时获得了 1.54 W 的 3.66 μm 闲频光输出和 5.03 W 的 1.5 μm 信号光输出,总提取效率为 30.2%。

参 考 文 献

- 1 W. R. Bosenberg, A. Drobshoff, J. I. Alexander *et al.*. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1336~1338
- 2 Liu Lei, Li Xiao, Liu Tong *et al.*. Progress of mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillation technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060002
刘磊,李霄,刘通等. 中红外连续波光参变振荡技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(6): 060002
- 3 Wu Yu, Jiao Zhongxing, He Guangyuan. Near infrared optical parametric oscillator based on periodically poled MgO:LiNbO₃ [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 061403

- 吴羽,焦中兴,何广源. 近红外掺镁周期极化铌酸锂光参变振荡器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(6): 061403
- 4 S. C. Kumar, R. Das, G. K. Samanta *et al.*. Optimally-output-coupled, 17.5 W, fiber-laser-pumped continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **102**(1): 31~35
- 5 Yan Caifan, Wang Hongjie, Jin Shuai *et al.*. Study on infrared spectrum of optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1015003
颜彩繁,王宏杰,金帅等. 光参变振荡器的红外光谱研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1015003
- 6 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Liu Dong *et al.*. High efficiency PPMgLN optical parametric oscillator infrared laser with 62 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 613~616
彭跃峰,王卫民,刘东等. 62 W 高效率 PPMgLN 光参量振荡红外激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 613~616
- 7 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High power MgO:PPLN optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1447~1450
魏星斌,彭跃峰,王卫民等. 高功率 MgO:PPLN 光参变振荡器[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1447~1450
- 8 Walter R. Bosenberg, Alexander Drobshoff, Jason I. Alexander *et al.*. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(10): 713~715
- 9 G. K. Samanta, G. R. Fayaz, M. Ebrahim-Zadeh. 1.59 W, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO:sPPLT[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2623~2625
- 10 David J. M. Stothard, Malcolm H. Dunn. Relaxation oscillation suppression in continuous-wave intracavity optical parametric oscillators[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1336~1348
- 11 D. J. M. Stothard, M. Ebrahimzadeh, M. H. Dunn. Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1895~1897
- 12 Sheng Quan, Ding Xin, Chen Na *et al.*. Continuous wave tunable intra-cavity optical parametric oscillator and orange-red source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2821~2824
- 盛泉,丁欣,陈娜等. 连续波可调谐内腔光学参量振荡器及橙红光源[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2821~2824
- 13 R. Lavi, S. Jackel, Y. Tzuk *et al.*. Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(36): 7382~7385
- 14 Y. Sato, T. Taira, N. Pavel *et al.*. Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO₄ under direct pumping into the emitting level[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(6): 844~846
- 15 X. Ding, H. Zhang, R. Wang *et al.*. High-efficiency direct-pumped Nd:YVO₄ laser operating at 1.34 μm [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11247~11252
- 16 P. Zhu, D. Li, P. Hu *et al.*. High efficiency 165 W near-diffraction-limited Nd:YVO₄ slab oscillator pumped at 880 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1930~1932
- 17 Stephen E. Harris. Tunable optical parametric oscillators[J]. *Proc. IEEE*, 1969, **57**(12): 2096~2113
- 18 John E. Bjorkholm. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **7**(3): 109~118
- 19 Liu Jianhui, Liu Qiang, Gong Mali. Back conversion in optical parametric process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 024215
刘建辉,柳强,巩马理. 光参量过程中的逆转换问题[J]. 物理学报, 2011, **60**(2): 024215
- 20 D. J. M. Stothard, J.-M. Hopkins, D. Burns *et al.*. Stable, continuous-wave, intracavity, optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser (VECSEL) [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10648~10658
- 21 G. A. Turnbull, M. H. Dunn, M. Ebrahimzadeh. Continuous-wave intracavity optical parametric oscillators; an analysis of power characteristics[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**(6): 701~710

栏目编辑: 张腾