

doi: 10.3788/gzxb20174601.0114001

# 基于复合腔的波长可调谐连续橙红色激光器

陈玉华, 白杨, 张泽南, 白冰, 孙延笑, 白晋涛

(西北大学 光子学与光子技术研究所, 光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地,  
陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

**摘 要:**设计并研制了一种基于复合腔结构的波长可调谐、瓦级连续输出的橙红色激光器. 该激光器是由半导体激光侧泵 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体产生 p-偏振 1 062.9 nm 基频光的谐振腔和使用周期性极化晶体 MgO:PPLN(三个极化周期为 29.0 μm、29.8 μm 和 30.8 μm)的单共振光学参量振荡器组成. 在两个谐振腔的重叠区域,利用 II 类临界相位匹配 KTP 晶体对 s-偏振信号光与 p-偏振 1 062.9 nm 基频光进行腔内和频. 通过对 MgO:PPLN 晶体进行三个不同极化周期的调谐和 30℃~200℃范围内的温度调谐,在三个波段(613.4~619.2 nm@29.0 μm、620.2~628.9 nm@29.8 μm 和 634.4~649.1 nm@30.8 μm)获得了波长可调谐的橙红色激光连续输出,并在相应波段(3 980.0~3 758.5 nm @29.0 μm、3 714.2~3 438.3 nm @29.8 μm 和 3 278.0~2 940.2 nm @30.8 μm)获得了波长可调谐的中红外闲频光的连续输出. 在 30℃最低调谐温度,通过改变晶体的极化周期,在 613.4 nm、620.2 nm 和 634.4 nm 处测得最大连续输出功率分别为 1.52 W、2.21 W 和 3.03 W,对应的三束闲频光最大连续输出功率分别为 2.36 W @3 980.0 nm、3.17 W @3 714.2 nm 和 4.13 W @3 278.0 nm.

**关键词:**橙红色激光;波长可调谐;周期调谐;温度调谐;单共振光学参量振荡器;和频

中图分类号:O437.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)01-0114001-7

## Continuous Output Orange-red Laser with Tunable Wavelength Based on Composite Cavity

CHEN Yu-hua, BAI Yang, ZHANG Ze-nan, BAI Bing, SUN Yan-xiao, BAI Jin-tao

(Institute of Photonics and Photo-Technology, National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials (Cultivation Base), Shaanxi Engineering Technology Research Center for All Solid State Laser and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** An orange-red laser was designed and developed based on a composite cavity structure with tunable wavelength, W-level continuous output. It consisted of a resonant cavity which generated p-polarized 1 062.9 nm fundamental frequency light based on laser diode side pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal and a single resonant optical parametric oscillator using a periodically poled crystal MgO:PPLN with three-poling periods (29.0 μm, 29.8 μm, and 30.8 μm). In the overlap region of the two resonant cavities, the type-II critical phase-matched crystal KTP was used to bring about inner-cavity sum-frequency generation with the s-polarized signal light and the p-polarized 1 062.9 nm fundamental frequency light. By the tuning of three different polarizations of MgO:PPLN crystal and the temperature tuning in the range of 30℃~200℃, the wavelength tunable orange-red laser with W-level continuous outputs in three bands (613.4~619.2 nm at 29.0 μm, 620.2~628.9 nm at 29.8 μm and 634.4~

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61205114)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(No. 2011KTCL01-06)资助

**第一作者:**陈玉华(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为全固态激光器技术. Email:1274663099@qq.com

**导 师:**白晋涛(1959-),男,教授,博士,主要研究方向为全固态(包括光纤)激光器及超短脉冲激光器的理论与实验. Email:bajjt@nwu.edu.cn

**通讯作者:**白杨(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为大功率全固态激光器及非线性频率变化. Email:by@nwu.edu.cn

**收稿日期:**2016-07-19; **录用日期:**2016-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

649.1 nm at 30.8  $\mu\text{m}$ ) were obtained. In addition, the wavelength tunable mid-infrared idlers were gained in the corresponding bands(3 980.0~3 758.5 nm at 29.0  $\mu\text{m}$ , 3 714.2~3 438.3 nm at 29.8  $\mu\text{m}$  and 3 278.0~2 940.2 nm at 30.8  $\mu\text{m}$ ). By changing the poling periods at 30°C minimum temperature, the maximum continuous output powers were measured as 1.52 W (at 613.4 nm), 2.21 W (at 620.2 nm) and 3.03 W (at 634.4 nm). At the same time, the maximum continuous output powers of the three corresponding idlers were measured as 2.36 W(at 3 980.0 nm), 3.17 W(at 3 714.2 nm) and 4.13 W(at 3 278.0 nm), respectively.

**Key words:** Orange-red laser; Tunable wavelength; Periodic tuning; Temperature tuning; Single Resonant Optical parametric oscillator(SRO); Sum Frequency Generation(SFG)

**OCIS Codes:** 140.7300; 140.3600; 190.2620; 190.4970

## 0 引言

连续输出的橙红色激光在生物医学、激光测量、激光显示、激光打印、污染监测、光谱分析等领域有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 早期的橙红色激光器多为铜蒸汽和染料激光器, 体积大又含有剧毒物质限制了其实际应用. 随着半导体激光技术的发展, 基于半导体薄片激光器倍频效应<sup>[4-5]</sup>, 或半导体激光泵浦掺 Nd<sup>3+</sup> 或 Pr<sup>3+</sup> 晶体的腔内和频、倍频及喇曼效应<sup>[6-12]</sup>产生橙红色激光成为了研究热点. 但是此类激光器输出波长固定, 不能实现波长可调谐输出. 最近, 利用光学参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)的泵浦光与其腔内信号光和频过程产生波长可调谐的橙红色激光的研究受到关注. 2011年, 盛泉等利用 OPO 的泵浦光和信号光的和频技术获得了 120 mW 的 605~623 nm 激光输出<sup>[13]</sup>. 2014年, S. Mieth 等同样采用该技术获得了输出功率达到 1 W 的 605~616 nm 橙红光激光输出<sup>[14]</sup>. 然而, OPO 的泵浦光功率被分散到光参量振荡和和频两个非线性频率变化过程降低了 OPO 腔内信号光的功率密度, 导致波长可调谐的橙红色激光连续输出功率较低.

本文采用由一个半导体激光(Laser Diode, LD)侧泵 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 p-偏振 1 062.9 nm 谐振腔和一个 MgO:PPLN 三周期性极化晶体单共振光学参量振荡器(Singly Resonant Optical parametric oscillator, SRO)组成的复合腔成功实现了波长调谐、瓦级连续的橙红色激光输出. 在 II 类角度匹配 KTP 晶体腔内和频过程(Sum-Frequency Generation, SFG)中, s-偏振信号光和 p-偏振 1 062.9 nm 基频光在谐振腔内各自独立振荡, 相互不受影响<sup>[10]</sup>. 通过 MgO:PPLN 晶体的三个极化周期调谐和 30°C~200°C 范围内温度调谐, 分别获得了三个波段的橙红光和中红外闲频光的瓦级连续输出; 在 30°C 最低调谐温度和 29.0  $\mu\text{m}$ 、29.8  $\mu\text{m}$ 、30.8  $\mu\text{m}$  三个不同极化周期下, 实验测得 613.4 nm、620.2 nm 和 634.4 nm 三束红橙光最大连续输出功率分别为 1.52 W、2.21 W 和 3.03 W, 对应测得 3 980.0 nm、3 714.2 nm 和 3 278.0 nm 三束闲频光最大连续输出功率分别为 2.36 W、3.17 W 和 4.13 W.

## 1 实验装置

实验装置示意图如图 1(a). 信号光光参量振荡基于三波差频的准相位匹配  $1/\lambda_{s\text{-polarized pump}} \rightarrow 1/\lambda_{s\text{-polarized signal}} + 1/\lambda_{s\text{-polarized idler}}$  原理<sup>[15]</sup>. 信号光 SRO 的泵浦源为 s-偏振 1 062.9 nm 泵浦光谐振腔, 其结构由平面镜 M<sub>1</sub> (s-偏振 1 062.9 nm 的反射率  $R > 99.9\%$ )、LD 侧泵 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体泵浦模块 1 (波长为 808 nm 的泵浦光功率为 76.3 W, s-偏振 1 062.9 nm 的输出功率为 30.5 W) 以及平面耦合输出镜 M<sub>2</sub> (对 s-偏振 1 062.9 nm 的透射率为 15%) 组成. 实验采用的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体棒 (直径为 2 mm, 长度为 65 mm, Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.7 at%). 与常规的激光增益介质 (例如 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体) 相比, 具有较大的吸收和发射截面、合适的荧光寿命、高的热导率和偏振输出等特性<sup>[16]</sup>. 另外, 由于近年来大尺寸棒状产品的推出, 使其在高功率的激光系统中逐渐获得广泛的应用. 信号光 SRO 由腔镜 M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub>、M<sub>6</sub>、M<sub>7</sub>、M<sub>8</sub> 以及周期极化晶体 MgO:PPLN 晶体组成. MgO:PPLN 晶体具有三个极化周期 ( $\Lambda = 29.0 \mu\text{m}$ , 29.8  $\mu\text{m}$  和 30.8  $\mu\text{m}$ ), MgO 的掺杂浓度为 5 mol. %, 尺寸为 50 L × 9 W × 1 T mm<sup>3</sup>, 双面镀制 1 062.9 nm ( $R < 1\%$ ) & 1 400~1 700 nm ( $R < 1\%$ ) & 2.5~4.5  $\mu\text{m}$  ( $R < 5\%$ ) 三色增透膜. 实验中通过转动 1/2 波片来确保经过焦距为 80 mm 透镜聚焦至 MgO:PPLN 晶体中心附近的 1 062.9 nm 泵浦光的偏振态为 s-偏振. 腔镜 M<sub>4</sub> 的平面镀制 0° 入射泵浦光增透膜 ( $R < 0.2\% @ 1 062.9 \text{ nm}$ ), 其曲率半径为 -1 000 mm 的凹面镀制 0° 入射泵浦光增透膜 ( $R < 0.5\% @ 1 062.9 \text{ nm}$ )、信号光和闲频光高反膜 ( $R >$

99.6% @ 1 400~1 700 nm,  $R > 95\%$  @ 2.5~4.5  $\mu\text{m}$ ). 腔镜  $M_5$  为谐波镜, 对泵浦光高反射 ( $R > 99.8\%$  @ 1 062.9 nm)、对信号光和闲频光增透 ( $R < 0.4\%$  @ 1 400~1 700 nm,  $R < 3\%$  @ 2.5~4.5  $\mu\text{m}$ ).  $M_5$  能够反射 1 062.9 nm 泵浦光, 从而提高 SRO 对泵浦光的利用率和光光转换效率, 但需要引入一个高功率偏振相关光隔离器 (中心波长为 1 064 nm, 最大输入光束直径为 7 mm, 最大输入功率为 75 W), 以避免反射光对 LD 侧泵模块 1 的损伤.

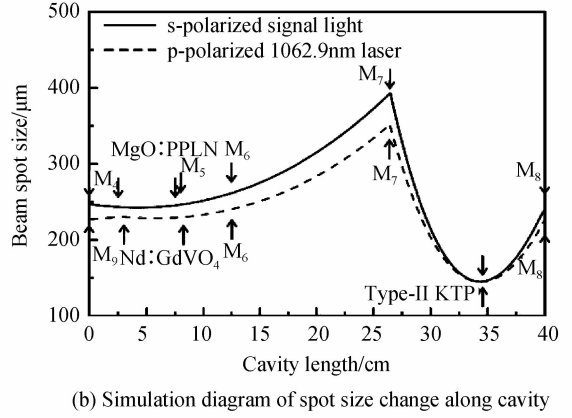
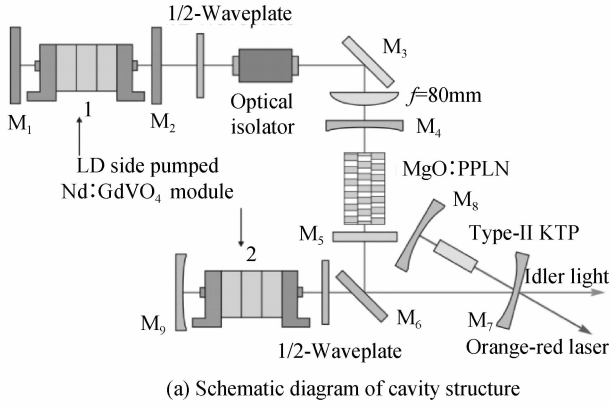


图 1 波长可调谐的橙红色激光器结构示意图及其腔内光斑半径沿谐振腔变化的仿真图

Fig. 1 Experimental setup of wavelength tunable orange-red laser and simulation diagram of the s-polarized signal and p-polarized 1062.9 nm light spot sizes along cavity

腔镜  $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$ 、 $M_9$ 、1/2 波片以及 LD 侧泵 Nd : GdVO<sub>4</sub> 模块 2 共同组成参与和频的 p-偏振 1 062.9 nm 基频光的谐振腔, 它与信号光 SRO 共同组成了一个双波共振复合腔结构. LD 侧泵 Nd : GdVO<sub>4</sub> 模块 2 与 LD 侧泵 Nd : GdVO<sub>4</sub> 模块 1 完全相同. 平面镜  $M_6$  的左侧面镀制 45° 入射基频光增透膜 ( $R < 0.3\%$  @ 1 062.9 nm), 另一面镀 45° 入射基频光增透膜 ( $R < 0.5\%$  @ 1 062.9 nm)、45° 入射信号光和闲频光高反膜 ( $R > 99.5\%$  @ 1 400~1 700 nm,  $R > 99.5\%$  @ 2.5~4.5  $\mu\text{m}$ ). 腔镜  $M_7$  为一个凹面曲率半径为 -200 mm 的输出耦合镜, 对 15° 入射基频光和信号光高反射 ( $R > 99.8\%$  @ 1 062.9 nm,  $R > 99.8\%$  @ 1 400~1 700 nm), 并对 15° 入射和频橙红光和闲频光增透 ( $R < 2\%$  @ 600~660 nm,  $R < 10\%$  @ 2.5~4.5  $\mu\text{m}$ ). 腔镜  $M_8$  的凹面曲率半径为 -100 mm, 其凹面镀制有 0° 入射基频光、信号光和和频橙红光的三色高反膜 ( $R > 99.8\%$  @ 1 062.9 nm,  $R > 99.8\%$  @ 1 400~1 700 nm,  $R > 99.8\%$  @ 600~650 nm). 镜  $M_9$  的凹面曲率半径为 -1 000 nm, 镀制有 0° 入射基频光的高反膜 ( $R > 99.8\%$  @ 1 062.9 nm). II 类角度相位匹配 KTP 晶体 ( $\theta = 78.5^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 尺寸为  $4 \times 4 \times 7 \text{ mm}^3$ ), 两个通光面镀制 (1 062.9 nm & 1 400~1 700 nm & 600~660 nm) 三色增透膜, 放置于腔镜  $M_7$  和  $M_8$  之间, 以实现  $1/\lambda_{\text{s-polarized orange red}} \rightarrow 1/\lambda_{\text{s-polarized signal}} + 1/\lambda_{\text{p-polarized p}_{\mu\text{mp}}}$  的和频过程.

在复合腔的折叠光线中, 凹面反射镜离轴放置会造成 p-偏振 1 062.9 nm 基频光腔内传输光束半径与 s-偏振信号光的腔内传输光束半径不相等, 从而导致在 KTP 和频晶体中 p-偏振 1 062.9 nm 基频光与 s-偏振信号光的模式体积不匹配, 这将严重影响和频转换效率<sup>[17]</sup>. 因此, 基于 ABCD 矩阵理论, 本文采用激光谐振腔分析设计软件 (LASCAD) 对复合谐振腔的结构进行优化设计. 腔镜  $M_4$ 、MgO : PPLN 晶体、 $M_5$ 、 $M_6$ 、 $M_7$  和  $M_8$  之间的距离分别为 25、5、45、140 和 135 mm, 对应的信号光 SRO 腔长为 400 mm.  $M_9$ 、LD 侧泵模块 2 和  $M_6$  之间的距离均为 30 mm. 当泵浦功率在 10 W 至 100 W 之间变化时, p-偏振 1 062.9 nm 基频光谐振腔和 s-偏振信号光 SRO 的腔稳定参量  $(A+D)/2$  分别在 0.41~0.54、0.49~0.61 之间变化. 如图 1(b), KTP 和频晶体中的 p-偏振 1 062.9 nm 基频光和 s-偏振信号光的半径分别约为 160  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ . 这一结果表明, 参与和频的 p-偏振 1 062.9 nm 光和 s-偏振信号光具有较好的模体积匹配, 从而可以降低衍射损耗与和频阈值, 提高和频转换效率.

## 2 实验结果及讨论

实验将 MgO : PPLN 晶体置于准确度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  的温控炉内, 通过温度调谐来实现波长调谐. 由于极化

晶体热效应的制约,调谐温度过低,不能确保在必要的调谐准确度和极化晶体抗损伤阈值下获得中心波长稳定的光参量振荡.因此温控范围设定在  $30^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ .图 2(a)、(b)和(c)分别为在  $29.0\ \mu\text{m}$ 、 $29.8\ \mu\text{m}$ 和  $30.8\ \mu\text{m}$ 三个不同的极化周期条件下,当 LD 侧泵模块 1 处于最大泵浦功率  $76.3\ \text{W}$  时,闲频光的连续输出功率、光谱随  $\text{MgO}:\text{PPLN}$  周期极化晶体的调谐温度变化情况.当温度在  $30^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$  范围内调节时,实验获得了  $3\ 980.0\sim 3\ 758.5\ \text{nm}\ @29.0\ \mu\text{m}(\Delta\lambda=221.5\ \text{nm})$ 、 $3\ 714.2\sim 3\ 438.3\ \text{nm}\ @29.8\ \mu\text{m}(\Delta\lambda=275.9\ \text{nm})$ 和  $3\ 278.0\sim 2\ 940.2\ \text{nm}\ @30.8\ \mu\text{m}(\Delta\lambda=337.8\ \text{nm})$ 三组波长可调谐的中红外波段闲频光输出,相对应的三组信号光的理论计算波长调谐范围分别为  $1\ 450.2\sim 1\ 482.0\ \text{nm}(\Delta\lambda=31.8\ \text{nm})$ 、 $1\ 489.0\sim 1\ 538.5\ \text{nm}(\Delta\lambda=49.5\ \text{nm})$ 和  $1\ 572.9\sim 1\ 664.7\ \text{nm}(\Delta\lambda=91.8\ \text{nm})$ .实验结果表明,随着  $\text{MgO}:\text{PPLN}$  晶体极化周期的减小或调谐温度的增加,相位失配量增加,光参量振荡转换效率下降,从而导致闲频光的最大连续输出功率出现明显下降.如图 2(d),当  $\text{MgO}:\text{PPLN}$  晶体温度为  $30^{\circ}\text{C}$ 、LD 泵浦模块 1 处于其最大泵浦功率  $76.3\ \text{W}$  时,在  $29.0\ \mu\text{m}$ 、 $29.8\ \mu\text{m}$ 和  $30.8\ \mu\text{m}$ 三个不同的极化周期条件下,由信号光 SRO 产生的  $3\ 980.0\ \text{nm}$ 、 $3\ 714.2\ \text{nm}$ 和  $3\ 278.0\ \text{nm}$ 三个波长闲频光最大连续输出功率分别为  $2.36\ \text{W}$ 、 $3.17\ \text{W}$ 和  $4.13\ \text{W}$ ;LD 泵浦光至闲频光的光光转换效率分别可达  $3.09\%$ 、 $4.15\%$ 和  $5.41\%$ ;测得闲频光的线宽均为  $15\ \text{nm}$ 左右;在  $10\ \text{min}$ 内,不稳定性均低于  $5\%$ .

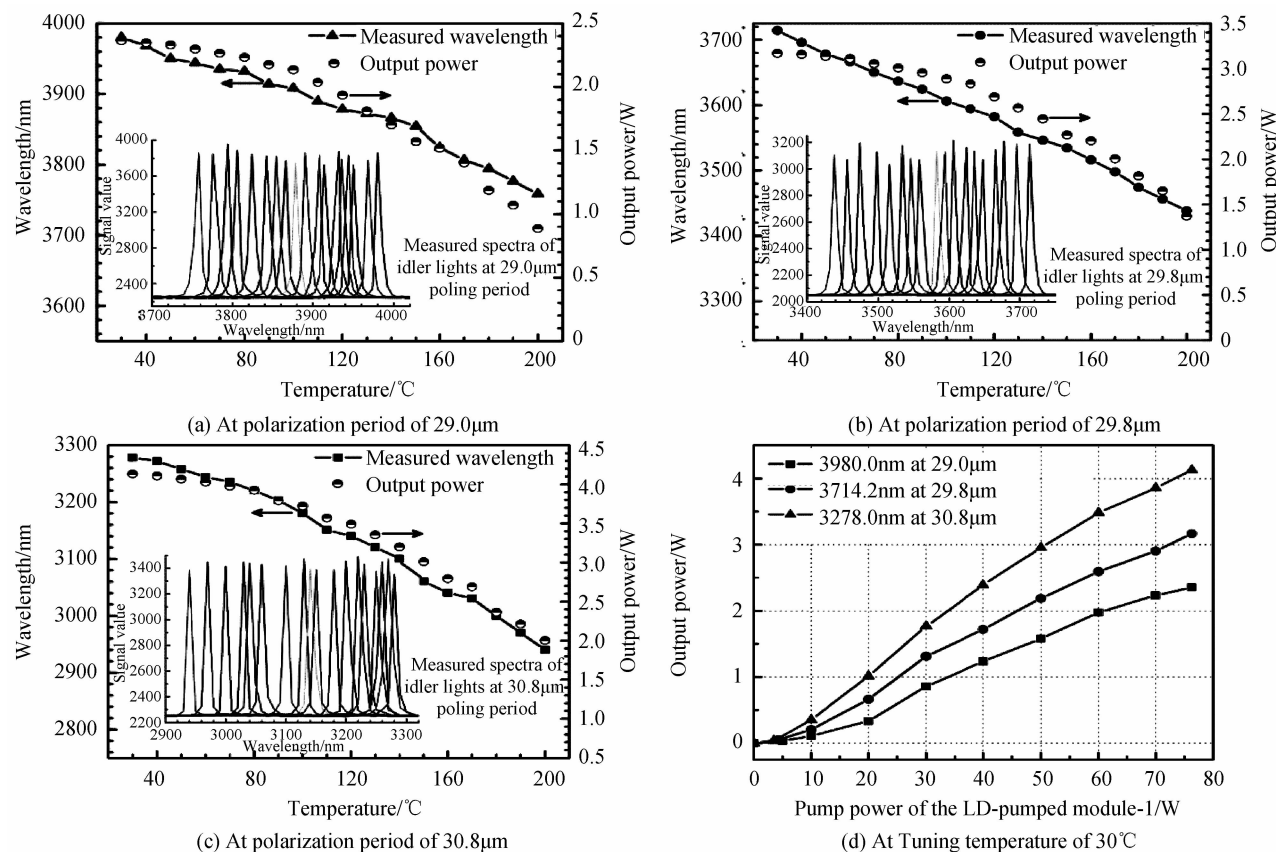


图 2 不同极化周期下闲频光各个中心波长及其最大输出功率随调谐温度的变化和  $30^{\circ}\text{C}$  调谐温度时不同中心波长的闲频光连续输出功率随 LD 泵浦模块 1 泵浦功率的变化

Fig. 2 Variation of center wavelengths and maximum CW output power of idler lights with temperature tuning at different polarization periods, and the variation of CW output power of idler light with pump power of LD laser pumped module-1

当 LD 泵浦模块 1 处于最大泵浦功率时,通过调整 LD 泵浦模块 2 的泵浦电流,确保 p-偏振  $1\ 062.9\ \text{nm}$  光和 s-偏振信号光的光子数之比为  $1:1$ ,从而达到增益匹配的目的.为进一步提高和频转换效率,需要微调两个  $1/2$  波片,确保 s-偏振信号光与 p-偏振  $1\ 062.9\ \text{nm}$  基频光的偏振态满足 II 类角度相位匹配.另外, KTP 和频晶体的放置角度需要根据信号光波长做稍微调整,从而获得最佳的相位匹配角.在 OPO-SFG 过程中,如图 3(a)、(b)和(c),基于三极化周期调谐和  $30\sim 200^{\circ}\text{C}$  的温度调谐,获得了三个波段的连续橙红色激光输出,调谐范围分别为:  $613.4\sim 619.2\ \text{nm}\ @29.0\ \mu\text{m}(\Delta\lambda=5.8\ \text{nm})$ 、 $620.2\sim 628.9\ \text{nm}\ @29.8\ \mu\text{m}(\Delta\lambda=$

8.7 nm) 和 634.4~649.1 nm@30.8 μm (Δλ=14.7 nm), 并测得线宽均为 0.8 nm 左右. 可以看出, 在腔内高

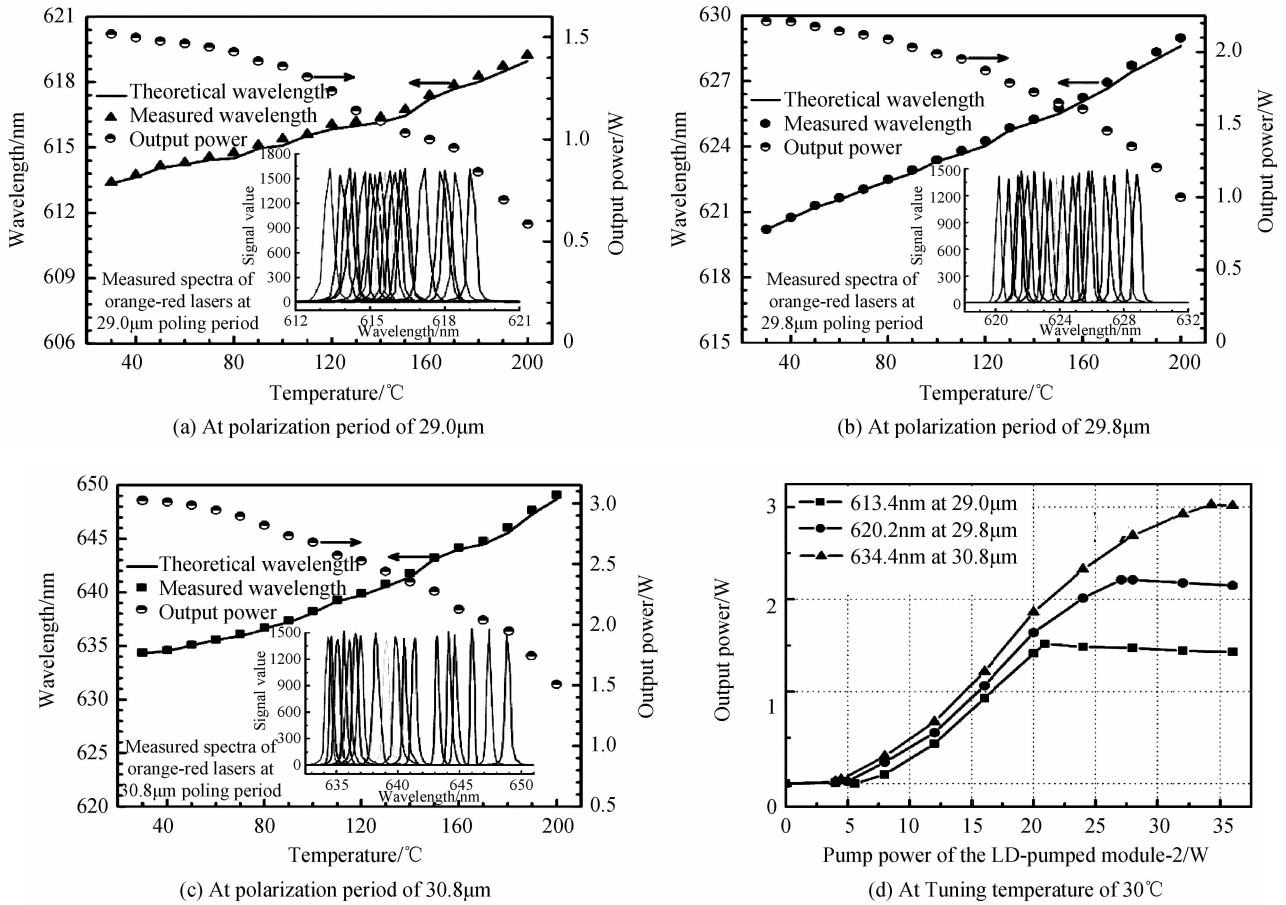


图 3 不同极化周期下橙红色激光各个中心波长及其最大输出功率随调谐温度的变化和 30°C 调谐温度时不同中心波长的橙红色激光连续输出功率随 LD 泵浦模块 2 泵浦功率的变化

Fig. 3 Variation of center wavelengths and maximum CW output power of orange-red laser beams with temperature tuning at different polarization periods, and the variation of CW output power of orange-red laser beams pumped with pump power of LD laser pumped module-2

功率密度的情况下, s-偏振信号光波长在 MgO:PPLN 晶体中受到喇曼散射红移的轻微影响<sup>[18]</sup>, 造成测得的橙红色激光实际波长与理论值相比略有增加. 同样由于极化周期减少与调谐温度增加所导致的 MgO:PPLN 晶体相位失配量的增加会导致腔内 s-偏振信号光的最大光子数减小, 造成通过和频过程产生的橙红色激光最大连续输出功率呈下降趋势. 如图 3(d), 由于 LD 泵浦模块 1 已经处于最大泵浦功率状态, 其产生的 s-偏振信号光的光子数达到饱和值, 当继续增加 LD 泵浦模块 2 的泵浦功率, 也难以进一步提高橙红光的输出功率. 因此, 下一步计划通过增加 LD 泵浦模块 1 的最大泵浦功率来进一步提高腔内 s-偏振信号光的光子数, 以获得更高连续输出功率的橙红色激光.

当调谐温度为最小值 30°C 时, 在三个不同极化周期 (29.0 μm, 29.8 μm 和 30.8 μm), 实验测得了 613.4 nm、620.2 nm 和 634.4 nm 橙红色激光最大连续输出功率分别为 1.52 W、2.21 W 和 3.03 W, 对应的两个 LD 泵浦模块的最大总泵浦功率为 96.39 W (76.3 W + 20.09 W)、103.39 W (76.3 W + 27.09 W) 和 110.59 W (76.30 W + 34.29 W), 光光转换效率分别为 1.58%、2.14% 和 2.74%. 在 10 min 内, 它们的不稳定性同样低于 5%. 此外, 本实验使用激光光束质量分析仪 (ModeScan1740, Photon Usa Inc.), 对 613.4 nm、620.2 nm 和 634.4 nm 三束橙红光的光束质量因子  $M^2$  进行了无衰减测量, 分别为 ( $M_{x-613.4}^2 = 5.972$ ,  $M_{y-613.4}^2 = 5.354$ )、( $M_{x-620.2}^2 = 5.829$ ,  $M_{y-620.2}^2 = 5.336$ ) 和 ( $M_{x-634.4}^2 = 5.405$ ,  $M_{y-634.4}^2 = 5.295$ ); 测得光束实际光斑和近场光束轮廓的 2D 和 3D 图像如图 4.

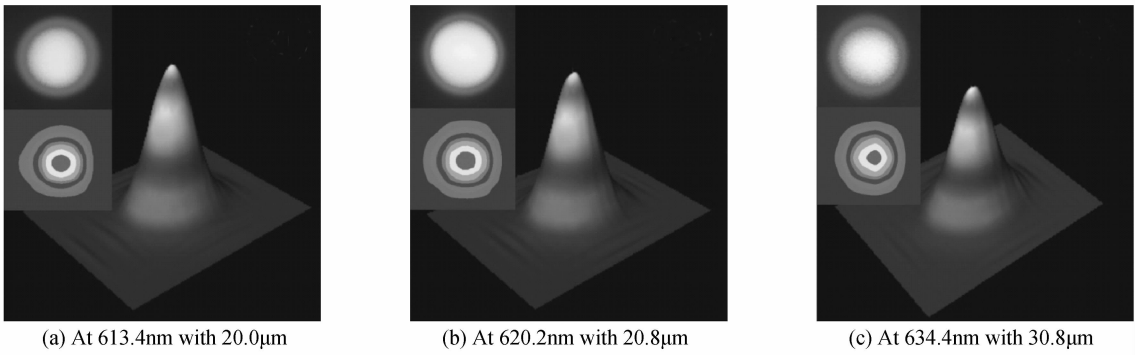


图4 30℃调谐温度时对应不同极化周期并处于最大连续输出功率状态的三束橙红色激光的实际光斑照片、2D和3D近场光束强度分布图

Fig. 4 Actual light spots, 2D and 3D near field beam profiles of three orange-red laser beams with maximum CW output power when tuning temperature is 30℃

### 3 结论

本文采用由一个 s-偏振信号光 SRO 和一个 LD 侧泵 Nd : GdVO<sub>4</sub> p-偏振 1 062.9 nm 谐振腔组成的复合腔,通过 MgO : PPLN 晶体的 29.0 μm, 29.8 μm 和 30.8 μm 三极化周期调谐, 30~200℃ 温度调谐以及 II 类角度匹配 KTP 晶体腔内和频过程, 获得了 613.4~619.2 nm、620.2~628.9 nm 和 634.4~649.1 nm 三组波长可调谐的橙红色激光连续输出, 以及 3 980.0~3 758.5 nm、3 714.2~3 438.3 nm 和 3 278.0~2 940.2 nm 三组波长可调谐的中红外波段闲频光输出. 在 30℃ 最低调谐温度和固定极化周期条件下, 613.4 nm、620.2 nm 和 634.4 nm 三束橙红光的最大连续输出功率分别达到 1.52 W、2.21 W 和 3.03 W, 光光转换效率分别为 1.58%、2.14% 和 2.74%; 同时测得 3 980.0 nm、3 714.2 nm 和 3 278.0 nm 三束闲频光的最大连续输出功率分别为 2.36 W、3.17 W 和 4.13 W, 光光转换效率分别为 3.09%、4.15% 和 5.41%. 与目前常用方法比较, 本文基于像散补偿的 SRO 复合腔结构的橙红色激光器具有较高的连续输出功率和光光转换效率, 30 nm 左右的宽波长调谐范围和良好的光束质量, 同时还可以获得数瓦连续输出、波长可调谐中红外闲频光, 从而能够在更为广阔的领域得到应用.

### 参考文献

- [1] BERNSTEIN E F, BHAWALKAR J, CLIFFORD J, *et al.* Laser treatment of dyschromia with a novel 607 nm pulsed-dye laser[J]. *Journal of Drugs in Dermatology*, 2011, **10**(4): 388-394.
- [2] WANG Qiao-zhen, LU Ming-qian, LI Bing, *et al.* Raman spectra of single cell in the ethanol stress yeast apoptosis process[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0630005.  
王巧贞, 卢明倩, 李冰, 等. 乙醇胁迫酵母凋亡过程的单细胞喇曼光谱[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0630005.
- [3] WEICHMANN U, BELLANCOURT A R, MACKENS U, *et al.* Solid-state lasers for projection[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, **18**(10): 813-820.
- [4] RAUTIAINEN J, KRESTNIKOV I, NIKKINEN J, *et al.* Multi-watt orange light generation by intracavity frequency doubling in a dual-gain quantum dot semiconductor disk laser [C]. SPIE, 2011, **7917**: 791702.
- [5] RAUTININEN J, HARKONEN A, KORPIJARVI V M, *et al.* 2.7 W tunable orange-red GaInNAs semiconductor disk laser[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26): 18345-18350.
- [6] YU X, LI C L, SUN G C, *et al.* All-solid-state CW doubly resonant sum-frequency mixing red-orange laser at 611 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(6): 1057-1060.
- [7] LI B Z, SU X X, GUO L J, *et al.* Diode-pumped Nd : YAP sum-frequency mixing orange-red laser at 616 nm[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(6): 1061-1063.
- [8] LUO S Y, YAN X G, CUI Q, *et al.* Power scaling of blue-diode-pumped Pr : YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm[J]. *Optical Communications*, 2016, **380**: 357-360.
- [9] METZ P W, MARZAH L D T, GUGUSCHEV C, *et al.* Growth and diode-pumped laser operation of Pr<sup>3+</sup> : β-(Y<sub>0.5</sub>, Gd<sub>0.5</sub>)F<sub>3</sub> at various transitions[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(12): 2699-2702.
- [10] XU B, STARECKI F, PABOEUF D, *et al.* Red and orange laser operation of Pr : KYF<sub>4</sub> pumped by a Nd : YAG/LBO laser at 469.1nm and a InGaN laser diode at 444 nm[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5567-5574.
- [11] LEE A J, LIN J P, PASK H M. Near-infrared and orange-red emission from a continuous-wave, second-Stokes self-Raman Nd : GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(18): 3000-3002.

- [12] LI Yu-yao, WANG Fei, JIAO Zheng-chao, *et al.* High efficient LD end-pumped QCW 355 nm laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(3): 332-336.  
李玉瑶, 王菲, 焦正超, 等. 高效率 LD 端面抽运连续 355 nm 激光器[J]. *发光学报*, 2014, **35**(3): 332-336.
- [13] SHENG Quan, DING Xin, CHEN Na, *et al.* Continuous-wave tunable intracavity optical oscillator and orange-red source[J]. *Chinese Journal of 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.
- [14] MIETH S, HENDERSON A, HALFMANN T. Tunable, continuous-wave optical parametric oscillator with more than 1W output power in the orange visible spectrum [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 11182-11191.
- [15] SENG Q, DING X, YIN S J, *et al.* A continuous-wave tunable orange-red source based on sum-frequency generation in an intra-cavity periodically poled LiNbO<sub>3</sub> singly resonant optical parametric oscillator cavity[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(9): 725-733.
- [16] WANG Ying, WANG Zheng-ping, ZHANG Huai-jin, *et al.* Ti : sapphire laser pumped Nd : GdVO<sub>4</sub> microchip lasers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(5): 546-548.  
王莹, 王正平, 张怀金, 等. 钛宝石激光泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 微片激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(5): 546-548.
- [17] SHI R P, BAI Y, QI M, *et al.* A passively mode-locked intracavity frequency doubled Nd : YVO<sub>4</sub> femtosecond green laser based on grapheme[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, **11**(2): 025001.
- [18] MY T H, ROBIN O, MHIBIK O, *et al.* Stimulated Raman scattering in an optical parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(7): 5912-5918.