

基于 MgO:APLN 的 1.57 μm /3.84 μm 连续波内腔多光参量振荡器研究

于永吉 陈薪羽 成丽波 王超 吴春婷 董渊 李述涛 金光勇

Continuous-wave 1.57 μm /3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN

Yu Yong-Ji Chen Xin-Yu Cheng Li-Bo Wang Chao Wu Chun-Ting Dong Yuan Li Shu-Tao Jin Guang-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 224215 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.224215

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224215>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高效率内腔式 2 μm 简并光学参量振荡器

High-efficiency intracavity 2 μm degenerate optical parametric oscillator

物理学报.2015, 64(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084207>

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>

基于MgO:APLN的1.57 μm /3.84 μm 连续波 内腔多光参量振荡器研究*

于永吉¹⁾ 陈薪羽¹⁾ 成丽波²⁾ 王超¹⁾ 吴春婷¹⁾ 董渊¹⁾
李述涛¹⁾ 金光勇^{1)†}

1)(长春理工大学理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)

2)(长春理工大学理学院工科数学基础教学部, 长春 130022)

(2015年5月16日收到; 2015年6月23日收到修改稿)

报道了一种基于MgO:APLN实现1.57 μm 和3.84 μm 跨周期参量光连续输出的内腔抽运多光参量振荡器. 采用1064 nm谐振腔与多光参量振荡腔折叠型复合结构, 综合考虑高功率抽运下谐振腔的热稳定性及多光参量振荡过程的光斑模式匹配, 通过对两个子腔谐振结构的数值模拟分析, 确定了最佳腔型参数. 在此基础上, 进一步研究了谐振参量光透过率对振荡阈值、抽运光下转换效率、输出功率稳定性的影响, 最终实现了3.13 W的1.57 μm 和0.85 W的3.84 μm 参量光输出, 对应斜效率为6.8%和1.9%, 输出功率稳定性分别达到了1.8%和3%.

关键词: MgO:APLN, 多光参量振荡器, 连续波, 内腔谐振

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Lm, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.64.224215

1 引言

波长位于1.57 μm 附近和3.8 μm 以上的红外激光分属于人眼安全波段和中红外探测器强吸收波段, 这两个波段的可调谐相干光源在军事领域有着极为重要的应用, 如对军事目标的测距、干扰、成像等. 基于准相位匹配, 以周期极化掺镁铌酸锂(MgO:PPLN)晶体作为变频介质的光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)是获得这两个波段可调谐激光的主要技术手段^[1-5], 相较于KTP, KTA, ZGP等传统生长型晶体的双折射相位匹配^[6-9], 具有转换效率高、有效频谱范围宽、调谐方式灵活、结构简单紧凑等突出优势. 日本三菱电机公司Taniguchi等^[10]和中国工程物理研究院彭跃峰课题组^[11]通过1064 nm脉冲激光器抽运外腔MgO:PPLN-OPO的方式, 分别实现了43.1 W的

1.57 μm 和22.6 W的3.84 μm 参量光高功率输出. 与脉冲抽运相比, 连续抽运在应用方面的可控性更强, 但由于较低的峰值功率密度, 多采用环形外腔或内腔谐振方式来降低阈值提高效率^[12-16]. 如美国洛克希德马丁公司Henderson和Esquinasi^[17]以及荷兰奈梅亨大学van Herpen等^[18]通过1064 nm连续激光器抽运四镜环形腔MgO:PPLN-OPO, 分别实现了16.8 W的1.5 μm 和1.2 W的3.9 μm 参量光连续输出.

迄今为止, 所报道的1.57 μm 和3.8 μm 波段连续波MgO:PPLN-OPO, 由于动量守恒条件及周期极化结构的限制, 输出的参量光只能满足单一波段, 对应的另一信号光或闲频光波长并不在这两个光谱区间内, 如1064 nm激光抽运时, 1.57 μm 对应输出的是3.30 μm 闲频光, 3.84 μm 对应输出的是1.47 μm 信号光, 因此若想同时获得这两个波段参量光输出, 应用

* 国家自然科学基金(批准号: 61240004)、吉林省中青年科技领军人才及优秀创新团队培育计划(批准号: 20121815)和吉林省青年科研基金(批准号: 20150520103JH)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yyjcust@163.com

MgO:PPLN-OPO是无法实现的. 针对这一问题, 在之前的工作中, 我们设计了能够同时提供 $\Delta k_{\text{OPO1}} = 0.2041 \mu\text{m}^{-1}$ (1.57 μm , 3.3 μm), $\Delta k_{\text{OPO2}} = 0.2135 \mu\text{m}^{-1}$ (1.47 μm , 3.84 μm) 两个相位失配补偿的非周期极化结构掺镁铌酸锂 (MgO:APLN) 晶体, 通过外腔脉冲抽运的方式, 实现了高重频 1.57 μm 和 3.84 μm 跨周期参量光输出 [19]. 本文在此基础上, 采用连续抽运内腔谐振, 通过谐振结构的优化设计, 获得了最高 3.13 W 和 0.85 W 的 1.57 μm 和 3.84 μm 跨周期参量光连续输出, 对应斜效率为 6.8% 和 1.9%, 输出功率稳定性分别达到了 1.8% 和 3%.

2 实验装置

基于 MgO:APLN 的连续波内腔多光参量振荡器 (multiple optical parametric oscillator, MOPO) 实验装置如图 1 所示. 抽运源采用德国 DILAS 半导体激光公司生产的中心波长 808 nm、输出功率 80 W 的光纤耦合模块, 传输光纤芯径为 400 μm , 数值孔径 (NA) 为 0.22, 经 1 : 1.5 耦合镜组 (传输耦

合效率达到 97%) 聚焦后抽运双端键合连续生长型 Nd:YVO₄ 晶体. 沿 *a* 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × (4+16+4) mm, Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 0.25%, 两个端面镀有 808 nm 和 1064 nm 增透膜, 晶体侧面包裹一层铝箔卡在一块紫铜热沉中, 通过外部水冷机循环制冷进行温度控制, 水冷机控温精度达到 ± 0.01 °C.

谐振腔由 1064 nm 抽运激光谐振腔和多光参量振荡腔两个子腔组成, 腔镜 M1 和 M2 构成 1064 nm 激光谐振腔, 激光介质 Nd:YVO₄ 放置于靠近抽运端, M2、偏转镜 BS 和 M3 构成多光参量振荡折叠腔, 这种设计的目的是通过引入折叠支路, 使得多光参量振荡腔内的参量光光斑尺寸能够人为控制, 不受限于激光谐振腔结构. 所有腔镜具体镀膜情况如表 1 所列. 在两个谐振子腔的交叠区域放置 MgO:APLN 晶体, 尺寸为 1 mm × 6 mm × 50 mm, MgO 掺杂浓度为 5%, 两个端面分别镀有 1.064 μm /1.4—1.7 μm /3.3—4.2 μm 多色增透膜, 将 MgO:APLN 固定于台湾 HCP 公司所生产的 OV50 温控器中, 温度控制在 25 °C.

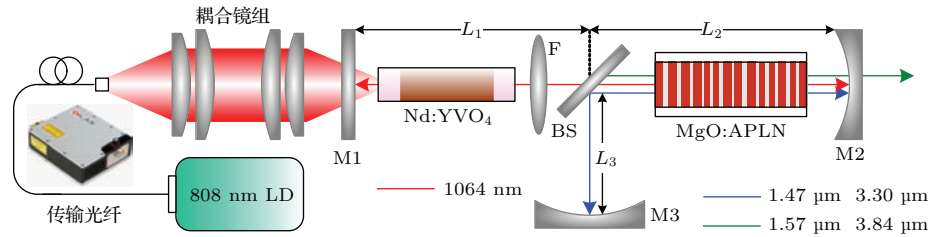


图 1 (网刊彩色) 实验装置示意图

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

表 1 腔镜具体镀膜情况

Table 1. The parameters of cavity mirror coating.

| 编号 | 材质 | 膜系参数 |
|----|------------------|--|
| M1 | K9 | 808 nm@HT ($T \approx 99.19\%$), 1064 nm@HR ($R \approx 99.94\%$) |
| F | K9 | 1064 nm@HT ($T \approx 99.98\%$) |
| BS | CaF ₂ | 45° 角度膜, 1064 nm@HT ($T \approx 96.27\%$) 1.4—1.7 μm @HR ($R \approx 99.95\%$), 3.1—4.2 μm @HR ($R \approx 99.85\%$) 1064 nm@HR ($R \approx 99.99\%$) |
| M2 | CaF ₂ | 1.4—1.5 μm @HR ($R \approx 99.91\%$), 1.5—1.7 μm @HT ($T \approx 96.58\%$) 3.1—3.4 μm @HR ($R \approx 99.79\%$), 3.7—4.2 μm @HT ($T \approx 97.29\%$) |
| M3 | CaF ₂ | 1064 nm@HR ($R \approx 99.98\%$) 1.4—1.7 μm @HR ($R \approx 99.99\%$), 3.1—4.2 μm @HR ($R \approx 99.86\%$) |

注: HR 代表高反射率, HT 代表高透射率.

3 内腔谐振结构优化设计

对于内腔连续抽运 MgO:APLN-MOPO 而言,

激光晶体的热效应补偿和两个子腔内振荡光斑的模式匹配, 决定着多波长参量光最终输出功率、光束质量、稳定性等表征系统性能的重要指标, 因此,

与这一部分密切相关的内腔谐振结构设计及其腔型参数优化十分关键. 采用界稳腔法^[20]测量得到Nd:YVO₄晶体热焦距可以等效成122—787 mm的正薄透镜, 将图1的谐振腔简化分解为1064 nm激光谐振腔和多光参量振荡腔, 如图2所示.

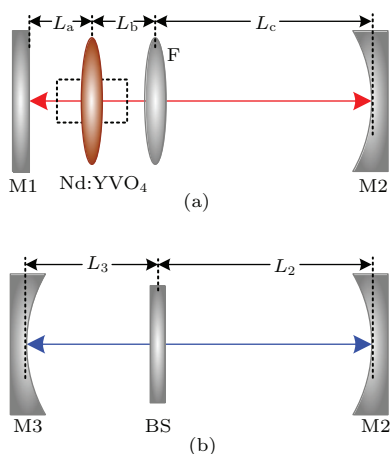


图2 内腔MgO:APLN-MOPO谐振腔分解示意图 (a) 激光谐振腔; (b) 多光参量振荡腔

Fig. 2. Intra-cavity MgO:APLN-MOPO cavity decomposition diagram: (a) Laser resonator; (b) multiple optical parametric oscillation cavity.

在M1与M2组成的激光谐振腔中, 由于高功率抽运下较小的热焦距, 仅靠腔镜曲率的控制很难实现谐振腔整个抽运范围的热稳定, 所以引入一透镜F, 放置于靠近Nd:YVO₄输出端, 通过对透镜F焦距的合理设定, 起到对整个抽运范围的“光学镇定”作用, 同时形成对MgO:APLN的聚焦, 提高其抽运功率密度. 拟定M1与Nd:YVO₄晶体左端面、透镜F与Nd:YVO₄晶体右端面距离均为10 mm, 全反镜M1为平面镜, 输出镜M2为平凹镜($R = 100$ mm), 根据激光谐振腔G参数理论及高斯光束ABCD传输定律^[21], 以Nd:YVO₄晶体中心为参考面, 兼顾考虑器件尺寸及Nd:YVO₄晶体折射率引起的光程变化, 分别模拟得到不同焦距F、不同长度L_c条件下Nd:YVO₄晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化趋势, 模拟结果如图3和图4所示. 当腔内晶体中心参考面处基模光斑半径趋向于无穷大时, 意味着此时传输光束已溢出谐振腔, 激光不再形成振荡, 即谐振腔由稳区进入非稳区. 由图3可知, L_c固定为150 mm时, 热焦距的允许范围对透镜F焦距的变化特别敏感, 当F取到200 mm时, 谐振腔已远远偏离了整个抽运范围的工作稳定区; 而当F固定在150 mm时, 如图4所示, 随着L_c长度的逐渐增大, 热焦距的允许

范围也变得越来越小. 因此, 综合考虑谐振腔在整个抽运区间的工作稳定性和抽运光与1064 nm振荡光的光斑模式匹配(图3和图4中绿色点划线代表808 nm抽运光斑半径), 优化选取 $F = 150$ mm, $L_c = 150$ mm.

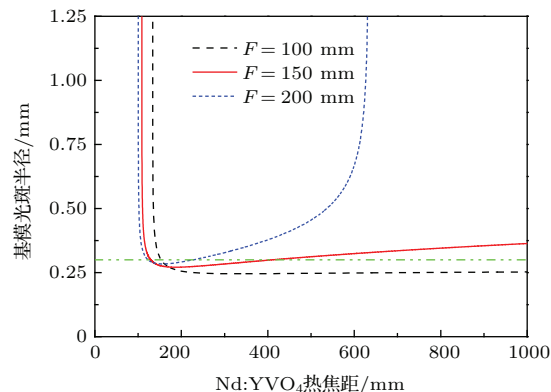


图3 (网刊彩色) 不同焦距 $F(L_c = 150$ mm)下, Nd:YVO₄晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化
Fig. 3. (color online) At different F values ($L_c = 150$ mm), fundamental mode radius in the centers of Nd:YVO₄ crystal versus thermal focal length.

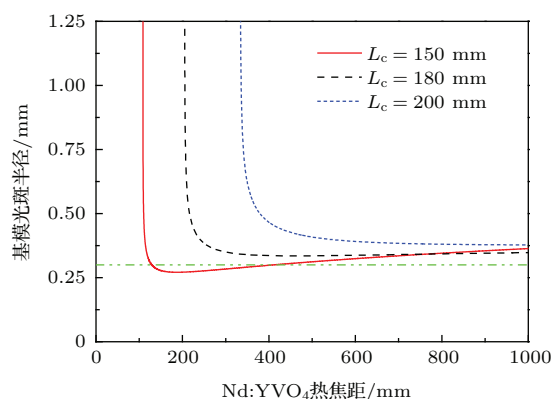


图4 (网刊彩色) 不同长度 $L_c(F = 150$ mm)下, Nd:YVO₄晶体中心处基模光斑半径随热焦距的变化
Fig. 4. (color online) At different L_c values ($F = 150$ mm), fundamental mode radius in the centers of Nd:YVO₄ crystal versus thermal focal length.

对于M2和M3组成的多光参量振荡子腔, 由于MgO:APLN需要放置在其与激光谐振子腔的交叠区域, 为了最大限度地利用1064 nm激光的注入功率密度, 应使1064 nm振荡激光在交叠区域的束腰位置与1.47 μm, 3.3 μm参量光在多光参量振荡腔内的束腰位置基本重合, 同时为了减少衍射损耗, 还需保证振荡激光与参量光聚焦参数 $\xi = L/b$ 的高度匹配, 其中L为MgO:APLN晶体长度, b为共焦参数, 表达式为

$$b_j = \frac{2\pi n_j \omega_j^2}{\lambda_j}, \quad (1)$$

式中, n 为折射率, ω 为束腰半径, j 代表不同的抽运激光与参量光. 综合上述分析, 首先应明确激光谐振腔内的束腰位置及大小. 根据确定的激光谐振腔参数, 选取热透镜焦距 f 为 150—600 mm, 间隔 150 mm 进行研究, 模拟得到如图 5 所示的激光谐振腔内基模光斑分布. 由腔内基模光束传输曲线可以看出, 不同热焦距对束腰位置及大小均会产生影响. 这里以高抽运功率下热焦距 150 mm 为参考, 相应的 1064 nm 激光束腰位置为距输出镜 89 mm 处, 束腰半径为 0.1037 mm, 则聚焦参数

$\xi_{1064 \text{ nm}} = 0.3667$. 以此为多光参量振荡腔的设计依据, 通过对腔长 $L_2 + L_3$ 和折叠尾镜曲率的优化, 当 L_2 取 120 mm, L_3 取 45 mm, 尾镜 M3 曲率半径与 M2 同样设定为 $R = 100$ mm 时, 多光参量振荡腔的腔内束腰位置距离输出镜 88.5 mm, 模拟得到的腔内基模光斑分布如图 6 所示, 相应 $1.47 \mu\text{m}$, $3.3 \mu\text{m}$ 振荡参量光的聚焦参数 $\xi_{1.47 \mu\text{m}} = 0.3675$, $\xi_{3.3 \mu\text{m}} = 0.3769$, 达到了预期设计目的. 联立两个子腔最终确定的腔型结构参数, 整个 MgO:APLN-MOPO 的腔内基模光斑分布如图 7 所示.

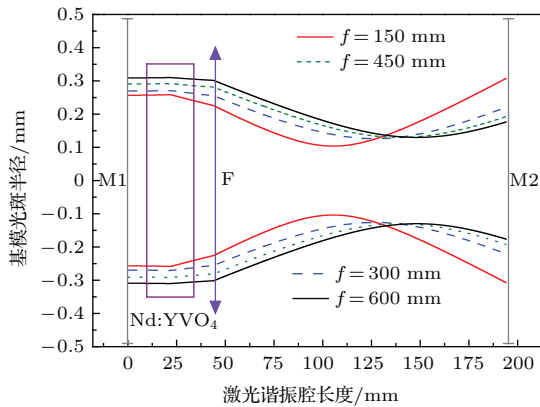


图 5 (网刊彩色) 激光谐振腔内基模光斑分布模拟
Fig. 5. (color online) Simulated fundamental mode beam in the laser resonator.

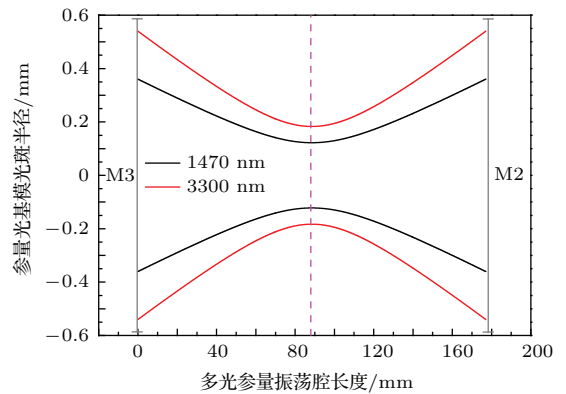


图 6 (网刊彩色) 多光参量振荡腔内基模光斑分布模拟
Fig. 6. (color online) Simulated fundamental mode beam in the multiple optical parametric oscillation cavity.

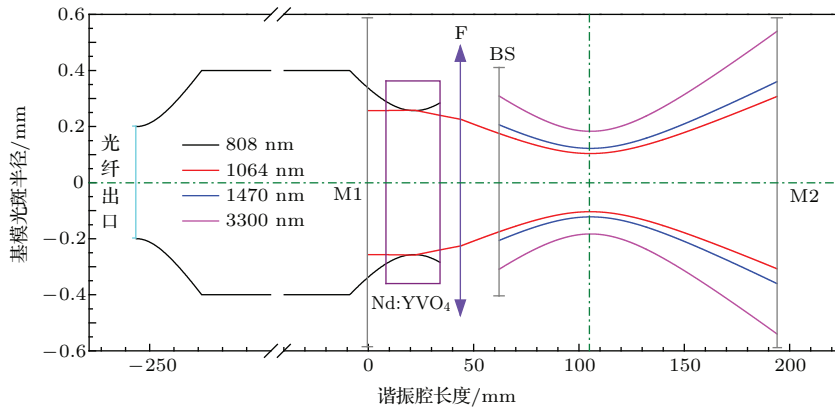


图 7 (网刊彩色) 整个 MgO:APLN-MOPO 的腔内基模光斑分布模拟
Fig. 7. (color online) Simulated fundamental mode beam in the MgO:APLN-MOPO cavity.

4 实验结果

实验装置按照上述参数进行设置, 提高抽运功率至形成参量光输出, 使用以色列 OPHIR 公司生产的 F150A-BB-26-PPS 型功率探头, 对未分光的参量光输出功率进行测量, 测得参量光总输出功率

及相应转换效率随抽运吸收功率的变化如图 8 所示. 抽运吸收功率 (吸收比为 89%) 50 W 左右, 总输出功率达到最大值 3.47 W, 对应光-光转换效率为 7.1%. 继续增大抽运功率, 由于高功率作用下严重的热效应, 使得 1064 nm 振荡激光无法工作在谐振腔稳定区内, 输出功率出现明显下降. 在输出端对参量光分光后, 分别使用日本横河 AQ6375 型光

谱分析仪(波长精度 ± 0.05 nm, 光谱范围1200—2400 nm)和瑞士ARCOptix公司FTIR-C-20-120型傅里叶光谱仪(波长精度 < 0.1 cm^{-1} , 光谱范围2.5—12 μm)对参量光输出光谱进行测量, 测得输出的信号光波长为1570 nm, 闲频光波长为3839.4 nm. 继续测得1.57 μm 和3.84 μm 参量光各自输出功率随抽运吸收功率的变化, 如图9所示. 起振阈值在2.4 W左右, 1.57 μm 信号光最高输出功率为2.97 W, 而3.84 μm 闲频光最高输出功率仅为0.5 W. 将输出镜M2换为对“1.4—1.5 μm @HR($R \approx 90\%$)”和“3.1—3.4 μm @HR($R \approx 90\%$)”, 此时1.57 μm 和3.84 μm 输出参量光起振阈值分别增高至3.6 W和4.3 W, 当抽运吸收功率分别达到57 W和63 W时, 获得了最高3.13 W和0.85 W的1.57 μm 和3.84 μm 参量光输出, 对应斜效率为6.8%和1.9%. 相比原高反射率的输出镜膜系, 输出功率及提取效率均有一定幅度提升, 尤其对于3.84 μm 闲频光波段, 提升幅度更为明显.

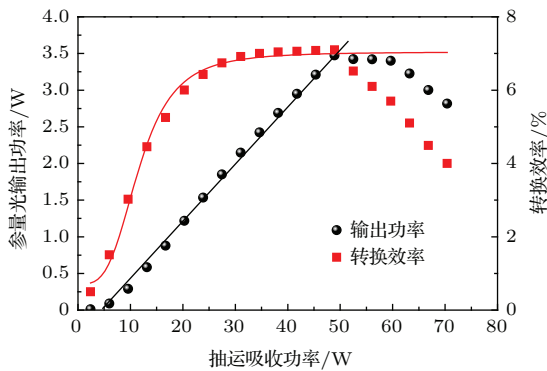


图8 参量光总输出功率及转换效率随抽运吸收功率的变化
Fig. 8. Total output power and conversion efficiency versus absorbed pumped power.

根据测得的1.57 μm 与3.84 μm 参量光输出功率, 可由下式反推得到参与该频率下转换过程的1064 nm抽运光功率 P_{DC} , 即

$$P_{\text{DC}} = (2P_j / \eta_j) / (\lambda_p / \lambda_j), \quad (2)$$

式中, P_j 为对应参量光输出功率, η_j 为输出镜对该参量光的透过率, 因子2表示参量光沿正反两个反向传输. 将输出镜M2的膜系更换为对1064 nm激光 $T = 20\%$, 测得1064 nm激光振荡阈值 $P_{\text{th}}^{\text{laser}}$ 为0.71 W, 由1064 nm激光输出功率, 结合图9不同透过率条件下参量光输出功率数据, 计算得到对应的1064 nm振荡激光下转换效率随抽运吸收功率的变化, 如图10所示. 在M2使用谐振参量光高反

膜系时, 其腔内1064 nm振荡激光下转换效率在超过阈值后迅速上升, 并在吸收功率31 W附近处达到最高值96.7%, 之后又迅速下降, 这一由低到高又到低的过程可看作1064 nm振荡激光的能量“回流”, 即逆转换. 而当M2使用谐振参量光透过率 $T = 10\%$ 膜系时, 并未出现能量逆转换现象, 但直至谐振腔失稳, 下转换效率也仅达到75.4%.

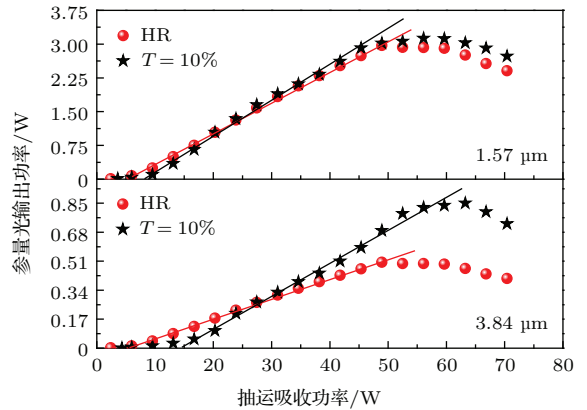


图9 不同输出镜透过率条件下1.57 μm 和3.84 μm 参量光输出功率随抽运吸收功率的变化
Fig. 9. 1.57 μm , 3.84 μm output power and conversion efficiency with different output coupler transmittances versus absorbed pumped power.

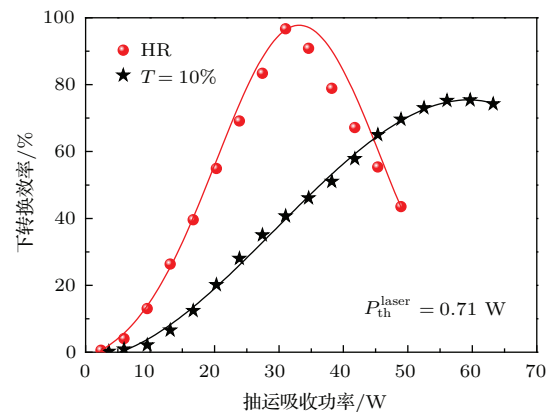


图10 不同输出镜透过率条件下1064 nm激光下转换效率随抽运吸收功率的变化
Fig. 10. 1064 nm laser down-conversion efficiencies with different output coupler transmittances versus absorbed pumped power.

图11为两种膜系最高输出功率稳定性对比监测情况, 在连续输出30 min时间内, 根据监测结果计算得到使用高反射率输出镜时1.57 μm 信号光波动为2.63% (均方根值RMS), 3.84 μm 闲频光波动为6.85%, 更换透过率后, 1.57 μm 信号光波动幅度降为1.8%, 3.84 μm 闲频光波动幅度降为3%. 这是由于多光参量振荡及能量转换过程中OPO1 (1.57 μm , 3.3 μm)的参量光增益要高于

OPO2 (1.47 μm , 3.84 μm), 高反射率下腔内剧烈的增益竞争及逆转换引起的能量再分配促使参量光的输出功率波动加剧, 提高 OPO1 参量光透过率来降低其在振荡腔内的增益, 有效平衡了两个参量振荡过程的增益竞争, 进而获得了更加稳定的参量光输出. 上述实验结果表明, 优化谐振参量光的反射率来提高输出参量光起振阈值方法可以有效抑制逆转换, 改善输出功率稳定性. 但实验中谐振参量光透过率 $T = 10\%$ 的选取, 并未能高效利用腔内振荡的 1064 nm 激光, 这也是导致该膜系条件下提取效率不高的主要原因. 同时, 由于输出镜膜系未考虑控制 1064 nm 激光能量过多流向高增益的 1.57 μm 参量光, 致使 1.57 μm 和 3.84 μm 输出相对功率比严重失衡, 后续还需要进一步优化.

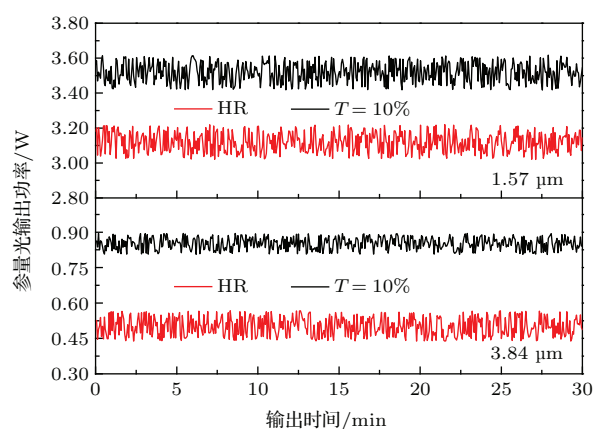


图 11 (网刊彩色) 不同输出镜透过率条件下 1.57 μm , 3.84 μm 参量光输出稳定性随抽运吸收功率的变化

Fig. 11. (color online) 1.57 μm , 3.84 μm output power stability with different output coupler transmittances versus absorbed pumped power.

5 结 论

本文基于能够同时提供两个相位失配补偿的单晶体 MgO:APLN, 采用连续抽运内腔谐振的方式, 实现了 1.57 μm 和 3.84 μm 跨周期参量光连续波输出. 在内腔谐振结构优化设计的基础上, 实验研究了谐振参量光不同透过率对 1.57 μm 和 3.84 μm 输出参量光起振阈值、输出功率、功率稳定性的影响, 获得了最高输出功率 3.13 W 的 1.57 μm 和 0.85 W 的 3.84 μm 参量光输出, 功率稳定性分别达到了 1.8% 和 3%. 实验结果表明, 优化谐振参量光透过率对于多光参量振荡过程逆转换抑制、转换效率提升及功率稳定性的改善作用不可忽视. 未来工作中, 我们将进一步优化输出镜膜系参数, 平衡

这对跨周期参量光的输出功率比, 以满足更多应用需求.

参考文献

- [1] Liu T, Wang X B, Liu L, Li X, Hou J 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 1202003 (in Chinese) [刘通, 汪晓波, 刘磊, 李霄, 侯静 2011 中国激光 **38** 1202003]
- [2] Lin D J, Alam S, Shen Y H, Chen T, Wu B, Richardson D J 2012 *Opt. Express* **20** 15008
- [3] Wu B, Kong J, Shen Y H 2010 *Opt. Lett.* **35** 1118
- [4] Peng Y F, Wang W M, Wei X B, Li D M 2009 *Opt. Lett.* **34** 2897
- [5] Ding X, Zhang S M, Ma H M, Pang M, Yao J Q, Li Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 211
- [6] Ding X, Yao J Q, Yu Y Z, Yu X Y, Xu J J, Zhang G Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 725
- [7] Miao J G, Pan Y Z, Qu S L 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 124206
- [8] Hemming A, Richards J, Davidson A, Carmody N, Bennetts S, Simakov N, Haub J 2013 *Opt. Express* **21** 10062
- [9] Yao B Q, Li G, Zhu G L, Meng P B, Ju Y L, Wang Y Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034213
- [10] Taniguchi H, Yamamoto S, Hirano Y 2001 *Mitsubishi Cable Industries Review* **98** 88
- [11] Peng Y F, Wei X B, Wang W M, Li D M 2010 *Opt. Commun.* **283** 4032
- [12] Sowade R, Breunig I, Kiessling J, Buse K 2009 *Appl. Phys. B* **96** 25
- [13] Kumar S C, Das R, Samanta G K, Zadeh M E 2011 *Appl. Phys. B* **102** 31
- [14] Sheng Q, Ding X, Shi C P, Yin S J, Li B, Shang C, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2012 *Opt. Express* **20** 8041
- [15] Li B, Ding X, Sheng Q, Yin S J, Shi C P, Li X, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 014207
- [16] Ding X, Sheng Q, Chen N, Yu X Y, Wang R, Zhang H, Wen W Q, Wang P, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4314
- [17] Henderson A, Esquinasi P 2010 *Proc. SPIE* **7580** 75800D
- [18] van Herpen M M J W, Bisson S E, Harren F J M 2003 *Opt. Lett.* **28** 2497
- [19] Yu Y J, Chen X Y, Wang C, Wu C T, Dong Y, Li S T, Jin G Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 044203 (in Chinese) [于永吉, 陈薪羽, 王超, 吴春婷, 董渊, 李述涛, 金光勇 2015 物理学报 **64** 044203]
- [20] Geng A C, Zhao C, Bo Y, Lu Y F, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6987 (in Chinese) [耿爱丛, 赵慈, 薄勇, 鲁远甫, 许祖彦 2008 物理学报 **57** 6987]
- [21] Lü B D 2003 *Laser Optics* (Beijing: Higher Education Press) p343 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学 (北京: 高等教育出版社) 第 343 页]

Continuous-wave 1.57 μm /3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN*

Yu Yong-Ji¹⁾ Chen Xin-Yu¹⁾ Cheng Li-Bo²⁾ Wang Chao¹⁾ Wu Chun-Ting¹⁾
Dong Yuan¹⁾ Li Shu-Tao¹⁾ Jin Guang-Yong¹⁾†

1) (*Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

2) (*Department of Engineering Mathematics Basic Teaching, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(Received 16 May 2015; revised manuscript received 23 June 2015)

Abstract

Continuous-wave (CW) coherent sources emitting two wavelengths of 1.57 μm and 3.84 μm have aroused much interest of scientists due to their many applications such as military multiband composite guidance, remote monitoring of the special environment, etc. Quasi-phase matching (QPM) optical parametric oscillator (OPO) device with periodically inverted structure of nonlinear coefficient can implement an efficient and wavelength conversion at arbitrary wavelength in the transparent range of the QPM material. Nowadays, using MgO:PPLN for QPM, various MgO:PPLN-OPOs pumped by conventional 1.06 μm laser source can produce 1.57 μm and 3.84 μm laser and also achieve good results. But as a result of the limitation of momentum conservation condition and periodically poled structure, 1.57 μm and 3.84 μm laser can only meet a single band. To obtain the two-wavelength laser output at the same time, the MgO:PPLN-OPO could not be applied. In this paper, a CW 1.57 μm and 3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN is reported. The cross period parameter light is obtained by using a folded type doubly cavity which consists of 1064 nm resonator and multiple optical parametric oscillator. Considering both its thermal stability under high power pump and the light spot mode matching of multiple optical parametric oscillation process, through numerical simulation and theoretical analysis of two sub cavities, the optimum parameters of the cavity structure are determined. On this basis, the influences of output coupler transmittance on oscillation threshold, the down-conversion efficiency, output power stability are investigated in experiment. With $T = 10\%$ at 1.47 μm and 3.3 μm output coupler used, the maximum output powers of 3.13 W at 1.57 μm and 0.85 W at 3.84 μm are obtained, corresponding to slope efficiencies of 6.8% and 1.9%, respectively. The power stabilities are better than 1.8% and 3% at the maximum output power in half an hour. The experimental results show that the intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on a single poled crystal MgO:APLN is an effective method of obtaining a 1.57 μm and 3.84 μm CW laser.

Keywords: MgO:APLN, multiple optical parametric oscillator, continuous-wave, intra-cavity oscillator

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Lm, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.64.224215

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61240004), the Science and Technology Department Project of Jilin Province, China (Grant No. 20121815), and the Natural Science Foundation for Young Scientists of Jilin Province, China (Grant No. 20150520103JH).

† Corresponding author. E-mail: yyjcust@163.com