

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

于永吉 陈薪羽 王超 吴春婷 董渊 李述涛 金光勇

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

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

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 044203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.044203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

拉曼效应和参量放大共同作用下增益谱特性

The gain spectrum character under Raman scattering and parametric amplification

物理学报.2012, 61(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194209>

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*

于永吉 陈薪羽 王超 吴春婷 董渊 李述涛 金光勇†

(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)

(2014年7月21日收到; 2014年9月9日收到修改稿)

对基于MgO:APLN的多光参量振荡器进行了实验研究. 通过优化MgO:APLN极化结构及参量光耦合输出透过率, 在200 kHz高重复频率1064 nm激光抽运下, 通过单极化晶体实现了1.57 μm , 3.84 μm 跨周期参量光输出, 平均功率分别达到2.4 W和1.31 W, 对应光-光转换效率为11.54%和6.25%. 同时针对多光参量振荡过程的逆转换现象, 通过耦合波方程对其进行了数值演化, 并引入“逆转换能量传导区”概念, 指出逆转换能量传导区的存在促使弱增益光学参量振荡器的参量光得到二次增强, 所得结论与实验结果相符合.

关键词: 多光参量振荡器, MgO:APLN, 逆转换, 能量传导

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

DOI: 10.7498/aps.64.044203

1 引言

基于准相位匹配(quasi-phase matching, QPM)技术, 以周期极化型晶体作为变频介质的光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)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, 是近年来获得近、中红外光谱区可调谐激光的主要技术手段^[1-7], 在军事、医疗、通信等领域均有着广泛应用. 传统意义上QPM-OPO的工作原理是利用周期极化晶体特定周期结构形成的“倒格矢”补偿参量光相位失配, 因此所获得的参量光波长与晶体极化周期一一对应. 如在室温条件下, 1064 nm激光抽运极化周期为29.5 μm 的MgO:PPLN, 将得到波长1.47 μm 信号光和与之惟一对应的3.84 μm 闲频光, 当把极化周期调整到30.5 μm , 与之联动的信号光与闲频光输出波长分别变为1.57 μm 和3.30 μm , 此时若需要同谱区1.47 μm , 1.57 μm 双波长信号光或3.30 μm , 3.84 μm 双波长闲频光输出, 又或者

1.57 μm , 3.84 μm 这种跨周期参量光同时输出, 在常规QPM-OPO以及单周期极化晶体中是无法实现的. 解决类似问题的前提需要改变QPM-OPO固有的参量光运转体制, 使得所需参量光尽管为不同的极化周期所对应, 依然均能在腔内获得足够的增益. 按照这种思路, 如果把传统QPM-OPO单对参量光子振荡的形式拓展到多对参量光子在腔中同时形成振荡, 即多光参量振荡器(multi optical parametric oscillator, MOPO), 可以依据需求在腔内背景噪声中同时建立起两对及以上的参量光, 这种运转体制不失为获得同谱区以及跨周期多波长可调谐激光的有效途径.

近年来, 随着光学差频THz、军用多波段激光制导、多信道光纤通信等前沿科技领域的发展, 多波长可调谐相干光源的需求越发迫切, 这使得MOPO这一新兴方向逐步得到行业关注, 并被广泛研究. 2007年, 天津大学姚建铨课题组^[8]采用1064 nm激光抽运串接的多周期PPLN与单周期MgO:PPLN双晶体, 实现了1.5 μm 附近平均功率169.6 mW的双信号光可调谐输出. 2013年, Vin-

* 国家自然科学基金(批准号: 61240004)和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)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yyjcust@163.com

cent 等^[9] 为避免多对参量光在同一 OPO 腔内的增益干扰, 将 1064 nm 脉冲激光分束注入到两个并行 MgO:PPLN-OPO 中, 获得了 1.41—4.3 μm 任意双波长参量光合束输出, 单脉冲能量均大于 2 mJ. 上述 MOPO 的技术方法均是通过晶体累加实现的, 这种方法不利于参量光多波长的持续拓展和器件集成化. 2011 年 Wei 等^[10] 利用单晶体 MgO:PPLN 产生的信号光作为二次抽运光, 在获得闲频光级联放大的同时也实现了多波长参量光输出, 但这种方法在参量光输出波长任意性及功率配比方面受到信号光简并点限制. 综合来看这些研究, QPM 与极化晶体材料特有的结构设计灵活性、便于集成化并未能同时兼顾. 鉴于此, 本文创新性提出基于能够提供多“倒格矢”的非周期极化结构的掺氧化镁铌酸锂晶体 (MgO:APLN), 开展全新运转体制下 MOPO 实验研究, 通过调整振荡参量光耦合透过率, 在 200 kHz 高重复频率 1064 nm 激光抽运下, 得到了平均功率分别为 2.4 W 和 1.31 W 的 1.57 μm 和 3.84 μm 参量光输出. 同时, 针对多光参量振荡过程的逆转换现象进行了数值演化, 剖析了 MOPO 逆转换过程能量传导的特殊性.

2 MgO:APLN 极化结构设计

非周期极化结构即根据频谱需求, 合理设定一最小极化单元畴宽度, 并以此宽度对极化晶体进行分割, 每个单元畴的极化方向排列规则不受限于周期性或准周期性正负交替, 符号连续相同的单元畴组成一个正畴或负畴, 有效非线性系数由于畴长度的不均匀而在空间上受到非周期的调制, 这种结构突破了周期性限制, 在保持高转换效率的条件下可以灵活地提供与方案相匹配的多个倒格矢.

对于非周期极化结构优化, 转换效率是衡量优化效果的主要标准, 在低增益情况下, 抽运光的能量损耗可以忽略, 从基波抽运光到变频参量光的转换效率可表示为^[11]

$$\eta = \frac{8\pi^2 |d_{33}|^2 I_p L^2}{\epsilon_0 \lambda_s \lambda_i n_i n_s n_p} \left| \frac{1}{L} \int_0^L dz e^{i\Delta k z} \Phi(z) \right|^2, \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; I_p 为抽运光强; λ_j , n_j ($j = p, s, i$) 分别为抽运光、信号光和闲频光波长及其对应的折射率; $\Phi(z)$ 为每个单元晶畴极化方向, 当 $\Phi(z) = 1$ 时, 极化方向沿 y 轴正向; 当 $\Phi(z) = -1$ 时, 极化方向沿 y 轴反向.

针对 (1) 式, 引入相对有效非线性系数:

$$d_{\text{reff}}(\lambda) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L dz e^{i\Delta k(\lambda)z} \Phi(z) \right|, \quad (2)$$

$d_{\text{reff}}(\lambda)$ 可以作为衡量参量光转换效率的参考依据. 在非周期极化晶体中, 整个晶体极化畴被分为 N 个区域, 每个单元畴区域的大小为 Δz , 则 $N = L/\Delta z$. 任意单元畴位于 z_q 和 z_{q+1} 之间, 其中 $q = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$. 用 $d(z_q)$ 表征第 q 个单元畴的极化方向, 代替 (2) 式中的 $d(z)$, 并对 (2) 式进行展开, 可得

$$\begin{aligned} d_{\text{reff}}(\lambda) &= \frac{1}{L} \left| \sum_{q=0}^{N-1} d(z_q) \int_{z_q}^{z_{q+1}} e^{i\Delta k(\lambda)z} dz \right| \\ &= \frac{1}{N} \left| \text{sinc} \left(\frac{\pi}{2l_c(\lambda)} \Delta z \right) \right. \\ &\quad \times \left. \sum_{q=0}^{N-1} \Phi(z_q) e^{i2\pi \frac{\pi}{2l_c(\lambda)} (q+0.5)\Delta z} \right|, \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $l_c(\lambda)$ 为输出参量光对应的相干长度, $l_c(\lambda) = \pi/\Delta k(\lambda)$. 分析 (3) 式, 每个正、负畴区域的长度, 也就是含有多少个单元畴和极化方向是影响 $d_{\text{reff}}(\lambda)$ 的主要因素, 根据所需的多重 QPM 过程, 通过这两个方面的优化, 逆向求解 (3) 式就可以得到理想的非周期极化结构.

本文以掺杂 5 mol%MgO 的 LiNbO₃ 为基质, 以形成能够提供 1.57 μm 信号光、3.3 μm 闲频光和 1.47 μm 信号光、3.84 μm 闲频光的两个倒格矢为设计目标, 极化结构中最小单元晶畴 Δz 设定为 5 μm, 总长设定为 50 mm, 根据 (1)—(3) 式, 采用文献^[12] 中的模拟退火算法对晶畴组合进行优化, 每经过一个最小晶畴宽度 Δz 就代入效率函数中进行一次迭代运算, 将获得结果输入至目标函数中进行评估, 利用设定目标值与实时效率值作差, 这个值越小说明晶畴排列越接近最佳化, 最终得到的优化结构及对应的相位失配补偿如图 1 所示.

由图 1 中 MgO:APLN 最佳极化结构的傅里叶变换可知, 两对参量光的相位失配量 Δk 所对应的傅里叶系数分别达到了 0.42 和 0.41, 表明两个光参量振荡过程的相位失配得到了有效补偿. 图 2 给出了傅里叶系数随 MgO:APLN 作用长度的变化, 两对参量光的傅里叶系数随着抽运光每经过一个晶畴持续增长, 这说明每个晶畴都能够同时提供给这两对参量光有效的能量转换, 达到了最优化要求和预期的设计目标.

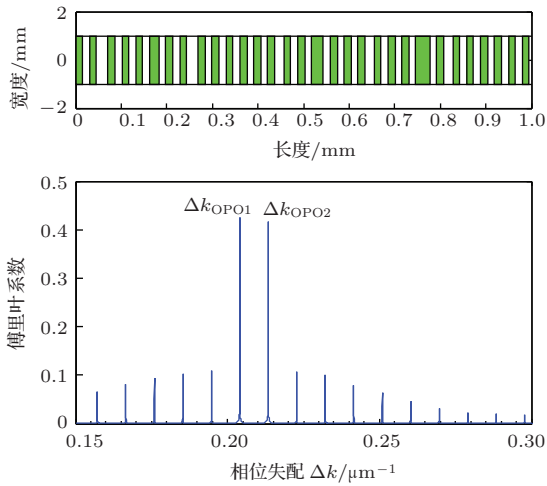


图1 (网刊彩色) 优化后 MgO:APLN 的极化结构及相位失配补偿

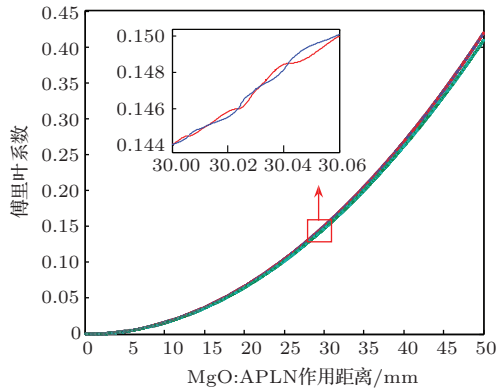


图2 (网刊彩色) MgO:APLN 傅里叶系数与作用长度之间的关系

3 实验装置

MgO:APLN-MOPO 实验装置如图 3 所示. 采用 880 nm 抽运 Nd:YVO₄ 高重复频率声光调 Q 激光器作为 1064 nm 脉冲抽运源, 200 kHz 重复频率下最高输出平均功率为 22.8 W, 对应脉冲宽度为 9.756 ns. 1064 nm 抽运光经过偏振片 P 调整为线偏振光, 偏振片后放置一焦距为 200 mm 的聚焦透镜 F1 用于 1064 nm 抽运光的发散角压束, 近似为平行传输的抽运光通过 Thorlabs 公司生产的 IO-8-1064-HP 型自由空间隔离器进行回光隔离, 1064 nm 最大隔离功率为 75 W, 隔离器与 MOPO 之间放有 1/4 波片 (QWP) 和焦距为 150 mm 的透镜 F2, QWP 主要起到调整偏振方向作用, 使之满足 MgO:APLN 的偏振匹配要求, 透镜 F2 用于将 1064 nm 抽运光聚焦耦合到 M3 与 M4 组成的 MOPO 腔内. M3 与 M4 镜基质为氟化钙, 曲率半径分别为 150 mm 和 100 mm, 其中 M3 镜镀有 1064 nm 增透、1.4—1.7 μm 和 3.2—4.0 μm 高反膜系, M4 镜采用三种不同膜系, 具体镀膜情况如表 1 所列. 腔内的 MgO:APLN 尺寸为 1 mm × 6 mm × 50 mm, 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 放置于台湾 HCP 公司所生产的 OV50 温控器中, 温度控制在 25 °C.

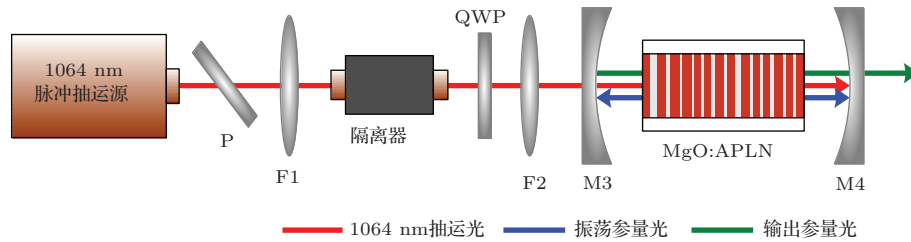


图3 (网刊彩色) MgO:APLN-MOPO 实验装置示意图

表1 耦合输出镜 M4 镀膜情况

编号	膜系参数	备注
M4-1	1064 nm@HR($R \approx 99.99\%$)	HR 代表高反射率
	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($T \approx 97.29\%$)	
M4-2	1064 nm@HR($R \approx 99.99\%$)	HT 代表高透射率
	1.4—1.5 μm@HR($R \approx 89.96\%$), 1.5—1.7 μm@HT($T \approx 96.58\%$)	
	3.1—3.4 μm@HR($R \approx 90.12\%$), 3.7—4.2 μm@HT($T \approx 97.29\%$)	
M4-3	1064 nm@HR($R \approx 99.81\%$)	AR 代表部分透射率
	1.4—1.5 μm@HR($R \approx 99.96\%$), 1.5—1.7 μm@AR($R \approx 61.18\%$)	
	3.1—3.4 μm@HR($R \approx 99.87\%$), 3.7—4.2 μm@HT($T \approx 97.13\%$)	

4 实验结果

上述实验装置调整到最佳工作状态, 由于输出镜M4镀膜均采用对3.3 μm和1.47 μm参量光谐振, 因此理论上最终获得的应为1.57 μm和3.84 μm这对跨周期参量光. 分别使用日本横河公司生产的AQ6375型光谱分析仪(波长精度为±0.05 nm, 光谱范围为1200—2400 nm)和瑞士ARCOptix公司生产的FTIR-C-20-120型傅里叶光谱仪(波长精度< 0.1 cm⁻¹, 光谱范围为2.5—12 μm)对MOPO的输出光谱进行测量, 测量得到的参量输出光谱如图4所示. 由图4可知, 输出的信号光波长为1570 nm, 闲频光波长为3839.2 nm, 与理论设计目标相符.

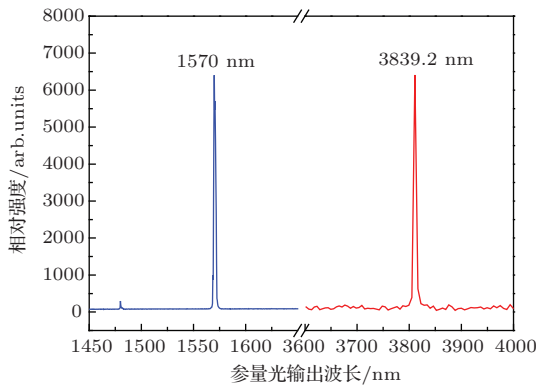


图4 (网刊彩色) MgO:APLN-MOPO 参量光输出光谱

确定MgO:APLN极化结构设计正确后, 声光Q开关(AO)重复频率设置为200 kHz, 使用以色列OPHIR公司生产的F150A-BB-26-PPS型功率探头, 测量得到不同膜系M4对应的1.57 μm和3.84 μm参量光平均输出功率及转换效率随1064 nm抽运激光注入功率增加的变化情况, 结果如图5所示. 从图5可以看出, 当未对输出参量光透过率限制时, 使用M4-2膜系在20.8 W(经传输后注入到晶体内的功率)最大抽运功率作用下, 分别获得了3.5 W和0.9 W的1.57 μm和3.84 μm参量光输出, 对应光-光转换效率为16.8%和4.3%, 对输出参量光的效率提取要明显优于M4-1, 但二者相对功率比均相差较大. 而当使用限制1.57 μm参量光透过率的M4-3输出镜时, 尽管1.57 μm参量光平均输出功率降低到2.4 W, 但处于弱增益的3.84 μm参量光效率得到了大幅提升, 平均输出功率达到1.31 W, 对应光-光转换效率为6.25%, 二者

相对功率比更为接近. 由于参量光获得的增益均由抽运光经过三波混频作用转化而来, 所以这种现象表明, 脉冲强抽运下, 限制多光参量振荡中的高增益分支参量光的输出功率, 会促使更多的抽运能量反向朝低增益分支转化, 间接平衡了两个分支参量光功率配比.

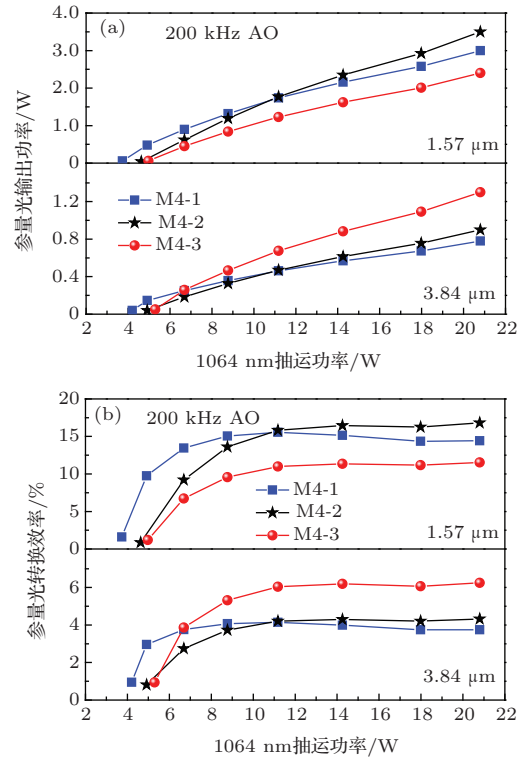


图5 (网刊彩色) M4不同膜系对应的参量光输出功率及其转换效率 (a) 1.57 μm, 3.84 μm 参量光输出功率; (b) 1.57 μm, 3.84 μm 参量光转换效率

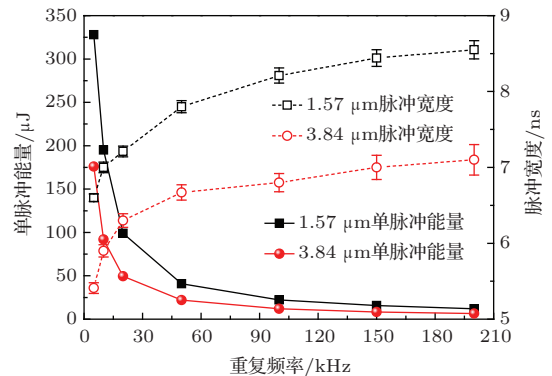


图6 (网刊彩色) 1.57 μm, 3.84 μm 参量光输出能量及脉宽随重复频率的变化

继续使用输出镜M4-3, 固定最大抽运功率不变, 改变声光调Q重复频率, 分别使用美国Thorlabs公司生产的DET01CFC/M型脉宽探测器和波兰VIGO公司生产的PVMI-2TE-10.6型红外探测器对两路参量光输出脉宽同时监测, 测量得到

不同重复频率下 1.57 μm , 3.84 μm 参量光单脉冲输出能量及对应脉冲宽度的变化情况如图 6 所示. 由图 6 可知, 两个参量光输出单脉冲能量随重复频率的增加单调递减, 脉宽随之展宽, 因为 1.57 μm , 3.84 μm 参量光建立时间要晚于抽运光时间, 所以整个过程参量光脉宽始终小于抽运光脉宽.

在 200 kHz 最高重复频率下, 进一步应用以色列 OPHIR 公司生产的 PyrocamIII 型焦热电阵列相机对参量光光束质量 M^2 因子进行测量. 图 7 为 3.84 μm 参量光光束质量测量曲线, M^2 因子约为 4.2, 相较 1064 nm 抽运光及低重复频率下输出参量光的光束质量, 均表现出不同程度的恶化, 这说明随着重复频率的增大, 多光参量间能量耦合及传递过程的稳定性、同步性均受到影响.

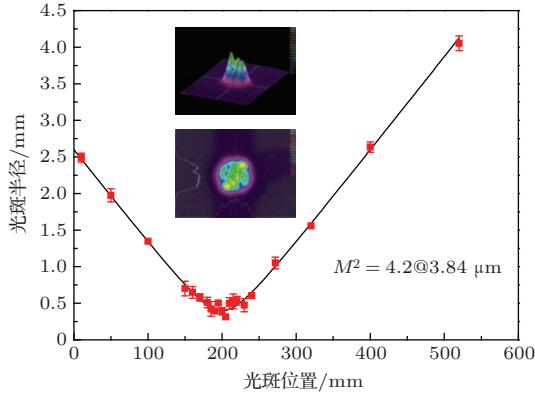


图 7 (网刊彩色) 200 kHz 重复频率下 3.84 μm 参量光光束质量

5 MOPO 逆转换过程演化分析

逆转换问题始终伴随光参量振荡过程, 是造成效率降低、参量光光束质量变差以及光谱展宽的主要成因 [13]. 对于 MOPO 的多光参量耦合及能量传递过程而言, 所涉及的逆转换问题显然更为复杂. 在纳秒量级脉冲激光作用下的光参量振荡过程, 可以通过稳态三波耦合方程进行描述 [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} &= i\sigma_1 A_2^* A_3 e^{i\Delta kz}, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} &= i\sigma_2 A_1^* A_3 e^{i\Delta kz}, \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} &= i\sigma_3 A_1 A_2 e^{-i\Delta kz}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, A_j ($j = 1, 2, 3$) 分别为信号光、闲频光和抽运光的复振幅; $\sigma_j = \omega_j / (cn_j \cos^2 \alpha_j d_{\text{eff}})$ 为对应光波耦合系数; α_j 为对应光波走离角, 对于极化晶体而言该值取 0. 将复振幅 A_j 的实部与虚部分开, 令

$$A_j = \rho_j e^{-i\varphi_j(z)}, \quad (5)$$

式中, ρ_j 表示实振幅, $\varphi_j(z)$ 表示相位, 则相位差

$$\theta = \Delta kz + \varphi_1(z) + \varphi_2(z) - \varphi_3(z). \quad (6)$$

将 (5), (6) 式分别代入 (4) 式中, 并将实部与虚部分开, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial z} &= -\sigma_1 \rho_2 \rho_3 \sin \theta, \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial z} &= -\sigma_2 \rho_1 \rho_3 \sin \theta, \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial z} &= \sigma_3 \rho_1 \rho_2 \sin \theta, \\ \frac{d\theta}{dz} &= \left(\sigma_3 \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_3} - \sigma_2 \frac{\rho_1 \rho_3}{\rho_2} - \sigma_1 \frac{\rho_2 \rho_3}{\rho_1} \right) \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

对方程组 (7) 进行归一化处理, 令归一化能流密度 $u_j^2 = \frac{n_j c}{\omega_j} \rho_j^2$, 归一化作用长度 $\xi = z / \sqrt{\frac{n_1 n_2 n_3 c^3}{\omega_1 \omega_2 \omega_3}}$. 代入方程组 (7) 中, 则归一化耦合波方程为

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{d\xi} &= -u_2 u_3 \sin \theta, \\ \frac{du_2}{d\xi} &= -u_1 u_3 \sin \theta, \\ \frac{du_3}{d\xi} &= u_1 u_2 \sin \theta, \\ \frac{d\theta}{d\xi} &= \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \left(\frac{d}{d\xi} \ln u_1 u_2 u_3 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

根据上述归一化耦合波方程, 以 MgO:APLN 多光参量振荡过程中 1.47 μm , 3.84 μm 单 OPO 过程为例, 模拟得到晶体不同作用位置上三波能量分布, 结果如图 8 所示. 由图 8 可以看出, 三波的能量走势在晶体内呈周期性变化, 随着三波相互作用距离的越来越大, 抽运光能量逐步向参量光转化, 当抽运光强度降到最低值后, 逆转换发生, 依次周而复始, 图中最佳耦合区, 即是最佳晶体长度. 当改变初始抽运能量密度后, 这个区间会随之发生变化, 由此可见最佳耦合区与抽运光及参量光的能量密度有着密切关系.

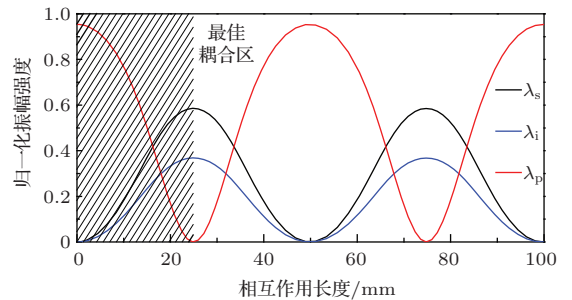


图 8 (网刊彩色) MgO:APLN 晶体内单 OPO 逆转换过程演化

在单OPO基础上,将该耦合过程演化推广至MOPO,假定初始抽运光能量按照两个OPO增益进行分配,模拟得到晶体内两个OPO过程各自的三波能量分布,结果如图9所示.从图9可以看出,多光参量同步振荡过程中,在逆转换发生前,两个OPO子过程的能量转化与图9所示的单OPO趋势相同,由于OPO1过程所对应的 $1.57\ \mu\text{m}$, $3.3\ \mu\text{m}$ 参量光增益较高,因此首先发生能量逆转换,OPO1中能量开始向抽运光回流,而此时OPO2中抽运光强度还未降到最低值,依然处于向参量光转化过程,因此OPO1流回的抽运能量必然有一部分向OPO2转化,直至OPO2中抽运能量达到增益饱和,整个区间即是图9中“逆转换能量传导区”.

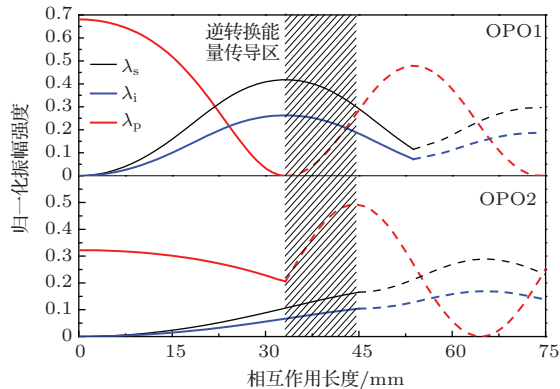


图9 (网刊彩色) MgO:APLN 晶体内多光参量逆转换过程演化

由于MOPO过程逆转换传导区的存在,弱增益OPO2中的参量光会得到二次增强,而OPO1中回流抽运光的传导消耗会使得剩余抽运光迅速形成二次能量转化,如图9中虚线所示,因此最佳晶体长度不能简单按照单OPO的选取原则来选取,应根据拟获取参量光的相对光强比权衡考虑.如本文拟获得OPO1中 $1.57\ \mu\text{m}$ 和OPO2中 $3.84\ \mu\text{m}$ 参量光,按照图9的能量转换过程,两者最佳能量比值约在晶体长度 $63\ \text{mm}$ 处.通过图9也可以进一步解释为何实验中耦合输出镜选取 $1.57\ \mu\text{m}$ ($R \approx 61.18\%$)低透过率时,获得的参量光输出为最佳.当增大OPO1中参量光反射率,势必造成腔内OPO1过程参量光能量密度的增大,提前进入逆转换传导区,促使OPO2中 $3.84\ \mu\text{m}$ 闲频光二次增强,使得二者输出功率比更加接近.综上所述,多光参量振荡过程中,合理利用逆转换能量传导区,是获得近功率比多波长参量光的关键.

6 结 论

本文研究了基于单晶体MgO:APLN的新型MOPO,在 $200\ \text{kHz}$ 高重复频率 $1064\ \text{nm}$ 激光抽运下,实现了 $1.57\ \mu\text{m}$, $3.84\ \mu\text{m}$ 跨周期参量光输出,通过优化参量光耦合输出透过率,平均功率分别达到 $2.4\ \text{W}$ 和 $1.31\ \text{W}$,对应光-光转换效率为 11.54% 和 6.25% .结合实验对比结果,进一步数值演化了多光参量振荡能量逆转换过程,并引入“逆转换能量传导区”概念,模拟结果表明该传导区的存在使得处于弱增益OPO的参量光得到了二次增强,这在一定程度上缩小了两个OPO过程弱增益与强增益参量光间的功率失衡比例,所得模拟结果与实验事实符合得较好.

参考文献

- [1] Kumar S C, Das R, Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M 2011 *Appl. Phys. B* **102** 31
- [2] 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
- [3] Wu B, Kong J, Shen Y H 2010 *Opt. Lett.* **35** 1118
- [4] Hideki I, Takunori T 2012 *Opt. Express* **20** 20002
- [5] 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
- [6] Liu J L, Liu Q, Li H, Li P, Zhang K S 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114215
- [7] 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
- [8] Zhang T L, Yao J Q, Zhu X Y, Zhang B G, Li E B, Zhao P, Li H F, Ji F, Wang P 2007 *Opt. Commun.* **272** 111
- [9] Vincent K, David J, Jerome D, Elodie B, Patricia S, Benoit B, Hideki I, Yakunori T, Gabriel M, Jean-Michel M, Antoine G 2013 *Opt. Express* **21** 28886
- [10] Wei X, Peng Y, Wang W, Chen X, Li D 2011 *Appl. Phys. B* **104** 597
- [11] Wu F, Chen X F, Zeng X L, Chen Y P, Xia Y X 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** 708
- [12] Wu X, Zhu Q F, Zhang Y 2011 *J. Infrared Millim. Waves* **30** 221 (in Chinese) [毋雪, 朱巧芬, 张岩 2011 红外与毫米波学报 **30** 221]
- [13] Liu J H, Liu Q, Gong M L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024215 (in Chinese) [刘建辉, 柳强, 巩马理 2011 物理学报 **60** 024215]
- [14] Li G 2005 *The Conversion and Scaling for Lasers Frequency: the Practical Nonlinear Optics Technology* (Beijing: Science Press) p64 (in Chinese) [李港 2005 激光频率的变换与扩展——实用非线性光学技术(北京: 科学技术出版社)第64页]

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

Yu Yong-Ji Chen Xin-Yu Wang Chao Wu Chun-Ting Dong Yuan
Li Shu-Tao Jin Guang-Yong[†]

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

(Received 21 July 2014; revised manuscript received 9 September 2014)

Abstract

In this paper, a multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN is reported. The polarization structure of MgO:APLN and output coupler transmittance are optimized, with a high repetition rate of 200 kHz and 1064 nm laser pumping. The 1.57 μm and 3.84 μm cross period parameters light output can be achieved by a single poled crystal for the first time. The maximum average output powers of 2.4 W at 1.57 μm and 1.31 W at 3.84 μm are obtained, corresponding to optical-optical conversion efficiency of 11.54% and 6.25%, respectively. For the phenomenon of energy back conversion appearing in the multiple optical parametric oscillation process, the numerical evolution of multi-wave coupling process through the coupled wave equations is investigated, and the concept of “back conversion in energy transmission area” is induced, and indicates that the existence of back conversion in energy transmission area causes the weak gain parameters of optical parametric oscillator to be enhanced twice. The theoretical analyses are basically in agreement with the experimental results.

Keywords: multiple optical parametric oscillator, MgO:APLN, back conversion, energy transmission

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

DOI: [10.7498/aps.64.044203](https://doi.org/10.7498/aps.64.044203)

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

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