

**基于含时分步积分算法反演单体MgO:APLN多光参量振荡能量场**

刘航 于永吉 王宇恒 刘贺言 李淦洁 金光勇

**Energy conversion of multi-optical parametric oscillation based on time-dependent split-step integration methods in MgO:APLN**

Liu Hang Yu Yong-Ji Wang Yu-Heng Liu He-Yan Li Lu-Jie Jin Guang-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 244202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190843

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190843>

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

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

基于中红外光参量振荡器光束质量优化的90° 像旋转四镜非平面环形谐振腔型设计与分析

Design and analysis of 90° image rotating four-mirror non-planar ring resonator based on mid-infrared optical parametric oscillator beam quality optimization

物理学报. 2019, 68(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182001>

基于分裂格式有限点集法对孤立波二维非线性问题的模拟

Simulation of two-dimensional nonlinear problem with solitary wave based on split-step finite pointset method

物理学报. 2019, 68(14): 140203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190340>

基于光束偏转的扫描式宽带光参量啁啾脉冲放大

Scanning broadband optical parametric chirped pulse amplification based on optical beam deflection

物理学报. 2019, 68(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181538>

基于光参量放大相位共轭特性的图像修复与增强

Image restoration and enhancement based on phase conjugation of optical parametric amplification

物理学报. 2017, 66(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104205>

非线性薛定谔方程的高阶分裂改进光滑粒子动力学算法

Numerical study of nonlinear Schrödinger equation with high-order split-step corrected smoothed particle hydrodynamics method

物理学报. 2019, 68(9): 090203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190169>

# 基于含时分步积分算法反演单体 MgO:APLN 多光参量振荡能量场\*

刘航<sup>1)†</sup> 于永吉<sup>1)‡</sup> 王宇恒<sup>1)</sup> 刘贺言<sup>1)</sup> 李涿洁<sup>2)</sup> 金光勇<sup>1)‡</sup>

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) (长春中国光学科学技术馆, 长春 130117)

(2019年5月30日收到; 2019年9月3日收到修改稿)

针对脉冲抽运机制下多光参量振荡器内 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  跨周期参量光的能量耦合过程, 利用含时波动方程建立起关于时间的能量转换模型, 并运用分步积分法对模型进行求解, 获得参量光转换效率. 模拟多光参量放大器输出参量光波形, 证实逆转换和模式竞争是影响多光参量振荡的重要因素. 进一步, 模拟外腔多光参量振荡器 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  跨周期参量光的输出情况. 分别对比不同输出透过率、晶体长度和谐振腔长度下转换效率的模拟值, 证实了输出镜透过率影响 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  跨周期参量光的转换效率, 同时表明外腔多光参量振荡器存在最佳晶体长度和谐振腔长度. 基于仿真结果, 开展外腔多光参量振荡器实验. 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  参量光转换效率实验值与理论值相吻合, 证实此方法能精准地反演多光参量振荡器的能量转换过程, 为优化多光参量振荡器、提高参量光转换效率提供了理论依据.

**关键词:** 多光参量振荡, 分步积分, 能量转换, MgO:APLN

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

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190843

## 1 引言

多光参量振荡器 (multi optical parametric oscillator, MOPO) 将传统光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 单对参量光子振荡拓展到多对参量光子同时在腔中形成振荡, 是获得同谱区以及跨周期多波长可调谐激光的有效途径<sup>[1-7]</sup>, 在军用多波段激光干扰对抗、光学差频、双光梳光谱学、环境多组分气体高精度同步检测等前沿科技领域的应用前景广阔<sup>[8-10]</sup>.

光参量振荡中, 利用能量转换模型反演非线性晶体内的能量耦合过程, 分析参量光随抽运光能量

和作用距离的演化规律, 为优化参量振荡器结构、研究逆转换现象成因提供了理论依据<sup>[11]</sup>. 目前, 针对传统单光参量振荡建立了关于抽运光、信号光和闲频光的三波耦合方程, 利用龙格库塔法或分步积分法求解三波耦合方程, 获得了输出参量光的波形及转换效率<sup>[12-16]</sup>. 由于 MOPO 能量转换过程更加复杂, 涉及的波长数量较多, 三波耦合方程不再适合此类参量振荡过程.

针对脉冲抽运机制下的多光参量振荡过程, 本文建立了关于抽运光与两组参量光的能量转换模型. 运用分步积分法模拟多光参量振荡能量耦合过程. 依据电场强度的数值解获得了参量光的转换效率. 多光参量放大器的模拟结果表明了逆转换与模

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61505013)、中国博士后科学基金 (批准号: 2016M591466)、吉林省科技厅重点科技攻关项目 (批准号: 20170204046GX) 和吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目 (批准号: 20190101004JH) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [yyjcust@163.com](mailto:yyjcust@163.com)

‡ 通信作者. E-mail: [jgyciom@163.com](mailto:jgyciom@163.com)

式竞争影响能量的转换过程. 分析外腔 MOPO 转换效率模拟值, 表明在最佳晶体长度和谐振腔长度下, 参量光转换效率与输出镜透过率成正比, 抽运平均功率为 21 W 时, 外腔 MOPO 在 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  的最大转换效率分别为 22.2% 和 7.8%, 与模拟值相吻合, 验证了此方法能够模拟 MOPO 的能量转换过程.

## 2 外腔 MOPO

多光参量振荡所需的 MgO:APLN 晶体极化结构和相位失配量如图 1 所示. 其中, 内插图为显微镜 (Leica DMI5000M) 下晶体的极化结构. MgO:APLN 晶体内部设置两个倒格矢, 能同时补偿相位失配量 0.2135 和 0.2041  $\mu\text{m}^{-1}$ , 1064 nm 抽运下能实现 1.47, 3.84  $\mu\text{m}$  和 1.57, 3.3  $\mu\text{m}$  两组参量光同时振荡输出 [17].

外腔 MOPO 结构如图 2 所示. 880 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 高重复频率声光调 Q 激光器作为抽运源. 1064 nm 脉冲抽运光经过偏振片 P 调整为线

偏振光, 偏振片后放置聚焦透镜 F1 用于压缩抽运光发散角, 近似为平行传输的抽运光通过自由空间隔离器进行回光隔离. 隔离器与腔镜 M3, M4 组成的谐振腔之间放置半波片 (HWP) 和透镜 F2, 半波片主要起到调整偏振方向的作用, 使之满足 MgO:APLN 的偏振匹配要求, 透镜 F2 用于将抽运光聚焦耦合到谐振腔内.

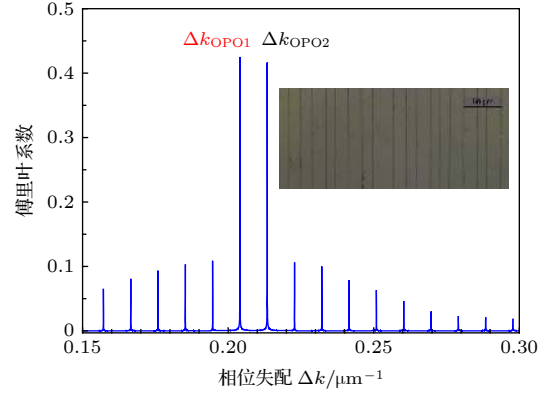


图 1 MgO:APLN 的极化结构和相位失配量

Fig. 1. Polarization structure and phase mismatch of MgO:APLN.

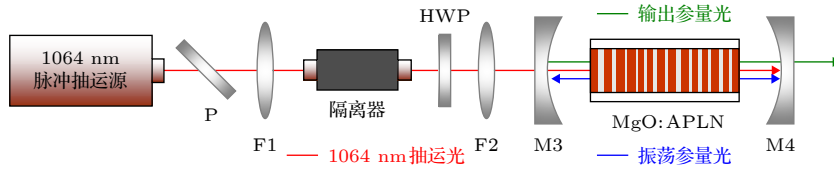


图 2 外腔 MOPO 示意图

Fig. 2. Schematic diagram of external cavity MOPO.

## 3 理论分析

MgO:APLN 晶体非周期极化结构经优化设计, 能够同时提供两个“倒格矢”, 获得两组参量光的同步输出 [18–20]. 依据非线性光学理论, 抽运光、两组参量光的电极化强度与电场强度之间的关系如下:

$$P_p(z) = \varepsilon_0 d_1 E_{s1}(z) E_{i1}(z) + \varepsilon_0 d_2 E_{s2}(z) E_{i2}(z), \quad (1)$$

$$P_{sn}(z) = \varepsilon_0 d_n E_p(z) E_{in}(z), \quad (2)$$

$$P_{in}(z) = \varepsilon_0 d_n E_p(z) E_{sn}(z), \quad (3)$$

式中, p, s, i 分别代表抽运光、信号光和闲频光; n 取 1 和 2, 代表参量光 1 过程和参量光 2 过程; d 为有效非线性系数. 将 (1)—(3) 式代入含时波动方程, 获得含时多光参量振荡五波耦合方程:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_p(t, z) \\ &= \frac{i\omega_p d_1}{n_p c} E_{s1}(t, z) E_{i1}(t, z) \exp(-i\Delta k_1 z) \\ &+ \frac{i\omega_p d_2}{n_p c} E_{s2}(t, z) E_{i2}(t, z) \exp(-i\Delta k_2 z), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{sn}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_{sn}(t, z) \\ &= \frac{i\omega_{sn} d_n}{n_{sn} c} E_p(t, z) E_{in}^*(t, z) \exp(i\Delta k_n z), \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{in}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_{in}(t, z) \\ &= \frac{i\omega_{in} d_n}{n_{in} c} E_p(t, z) E_{sn}^*(t, z) \exp(i\Delta k_n z). \quad (6) \end{aligned}$$

从 (4)—(6) 式可知, 多光参量振荡过程等效于两个单光参量振荡过程的叠加, 其中抽运光与两组

参量光之间实现能量交换, 而参量光只在抽运光与同组参量光之间发生转换.

利用分步积分法对五波耦合方程进行求解, 反演光波在晶体内的传播过程. 第一步模拟线性传播过程, 忽略电极化强度, 则 (4)—(6) 式化简为

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_j} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_j(t, z) = 0. \quad (7)$$

第二步模拟非线性转换过程, 不考虑群速度, 则 (4)—(6) 式变为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial z}\right) E_p(t, z) \\ &= \frac{i\omega_p d_1}{n_p c} E_{s1}(t, z) E_{i1}(t, z) \exp(-i\Delta k_1 z) \\ & \quad + \frac{i\omega_p d_2}{n_p c} E_{s2}(t, z) E_{i2}(t, z) \exp(-i\Delta k_2 z), \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial z}\right) E_{sn}(t, z) \\ &= \frac{i\omega_{sn} d_n}{n_{sn} c} E_p(t, z) E_{in}^*(t, z) \exp(i\Delta k_n z), \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial z}\right) E_{in}(t, z) \\ &= \frac{i\omega_{in} d_n}{n_{in} c} E_p(t, z) E_{sn}^*(t, z) \exp(i\Delta k_n z). \quad (10) \end{aligned}$$

MgO:APLN 晶体被分为  $N$  段, 每段内交替模拟上述线性传播与非线性转换过程, 直至光场完全通过晶体.

在脉冲抽运机制下, MOPO 参量光转换效率等于输出参量光能量与输入抽运光能量的比值, 进一步化简为

$$\eta = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_{out} |E_{out}(t)|^2}{c_{in} |E_{in}(t)|^2} dt, \quad (11)$$

式中,  $E_{out}$  与  $c_{out}$  分别为输出参量光的电场强度与折射率,  $E_{in}$  与  $c_{in}$  分别为抽运光的电场强度与折射率.

## 4 数值仿真与分析

### 4.1 多光参量放大器模拟仿真

依据第 3 节理论分析, 对多光参量放大器参量光输出波形进行仿真模拟. 模拟所用的 1064 nm 激光器产生高斯型激光脉冲, 脉宽为 20 ns, 光斑半径为 1 mm. 图 3 给出了多光参量放大器输出波形, 包含了 1064 nm 抽运光与 3.3  $\mu\text{m}$ , 3.84  $\mu\text{m}$  闲频光波形. 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 抽运光能量为 2.25 mJ 时, 剩余抽运光与闲频光分别呈 W 和 M 型, 是因为达到抽运光阈值开始参量放

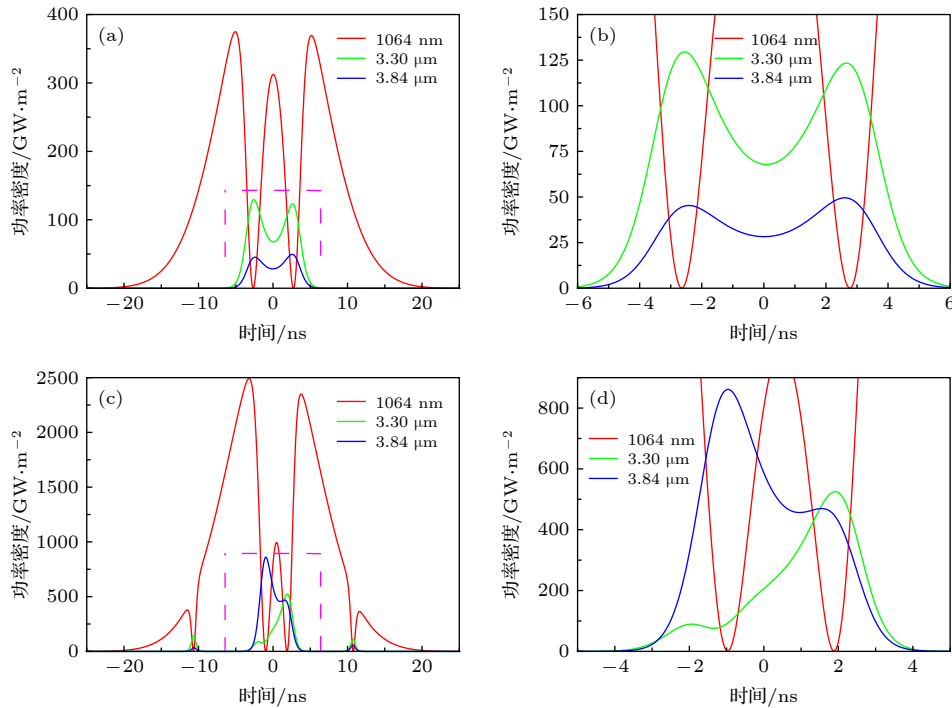


图 3 多光参量放大器输出波形 (a), (b) 抽运光能量为 2.25 mJ; (c), (d) 抽运光能量为 10 mJ

Fig. 3. Output waveform simulation of multi-optical parametric amplifier when the pump energy is 2.25 mJ (a), (b) or 10 mJ (c), (d).

大后, 抽运光被快速消耗至 0; 之后, 能量则由参量光向抽运光转换, 即发生逆转换现象. 随后, 多光参量放大器又经历正转换和逆转换过程. 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 抽运光能量为 10 mJ 时, 剩余抽运光呈 W 型, 说明正转换与逆转换交替发生. 同时, 3.3 μm, 3.84 μm 闲频光波形不成比例, 表明高抽运能量下, 两组参量光之间存在模式竞争现象.

### 4.2 MOPO 模拟仿真

MgO:APLN 晶体置于腔镜 M3 和 M4 之间. 腔镜 M3 对抽运光和参量光的耦合作用为

$$E_j^r(z=0) = \sqrt{R_j} E_j^{\text{in}}(z=0) + \sqrt{1-R_j} E_j^{\text{circ}}(z=0), \quad (12)$$

其中,  $E_j^{\text{circ}}$  为腔内电场强度,  $E_j^{\text{in}}$  为输入电场强度,  $R_j$  为对应的反射率. 腔镜 M4 的选模输出的作用为

$$E_j^{\text{out}}(z=L) = \sqrt{1-R_j} E_j^{\text{circ}}(z=L). \quad (13)$$

模拟采用的腔镜 M3 镀有 1064 nm 高透 (HT) 膜、1.47 μm/1.57 μm/3.3 μm/3.84 μm 高反 (HR) 膜. 腔镜 M4 的 4 种膜系对 1064 nm/1.57 μm/3.3 μm/3.84 μm 具有相同透过率, 仅 1.47 μm 透过率不一致, 分别为 80%, 60%, 40% 和 20%, 如

表 1 所列.

当 MgO:APLN 晶体长度为 50 mm, 腔镜 M3 与 M4 组成的谐振腔长度为 200 mm, 抽运光重频为 70 kHz 时, 对不同输出透过率下参量光进行模拟. 图 4 为 1.57 μm 和 3.84 μm 参量光输出波形的仿真结果. 依据 (11) 式, 输出参量光与输入抽运光能量的比值为参量光转换效率 (图 5). 输出镜采用 M4-1 膜系时, 1.57 μm 和 3.84 μm 转换效率高于其他膜系. 对比图 4 和图 5 可知, 1.57 μm 和 3.84 μm 参量光转换效率随输出镜 1.47 μm 透过率增加而逐渐增大, 说明增大输出镜 1.47 μm 透过率降低了腔内参量光的功率密度, 抑制了逆转换, 进而提高

表 1 腔镜膜系参数  
Table 1. Cavity mirror parameters.

腔镜	膜系
腔镜M3	1064 nm@HT, 1.47 μm/ 1.57 μm/3.3 μm/ 3.84 μm@HR
腔镜M4 (1064 nm/3.3 μm @HR, 1.57 μm@T=40%, 3.84 μm@HT)	1) 1.47 μm@T = 80%; 2) 1.47 μm@T = 60%; 3) 1.47 μm@T = 40%; 4) 1.47 μm@T = 20%

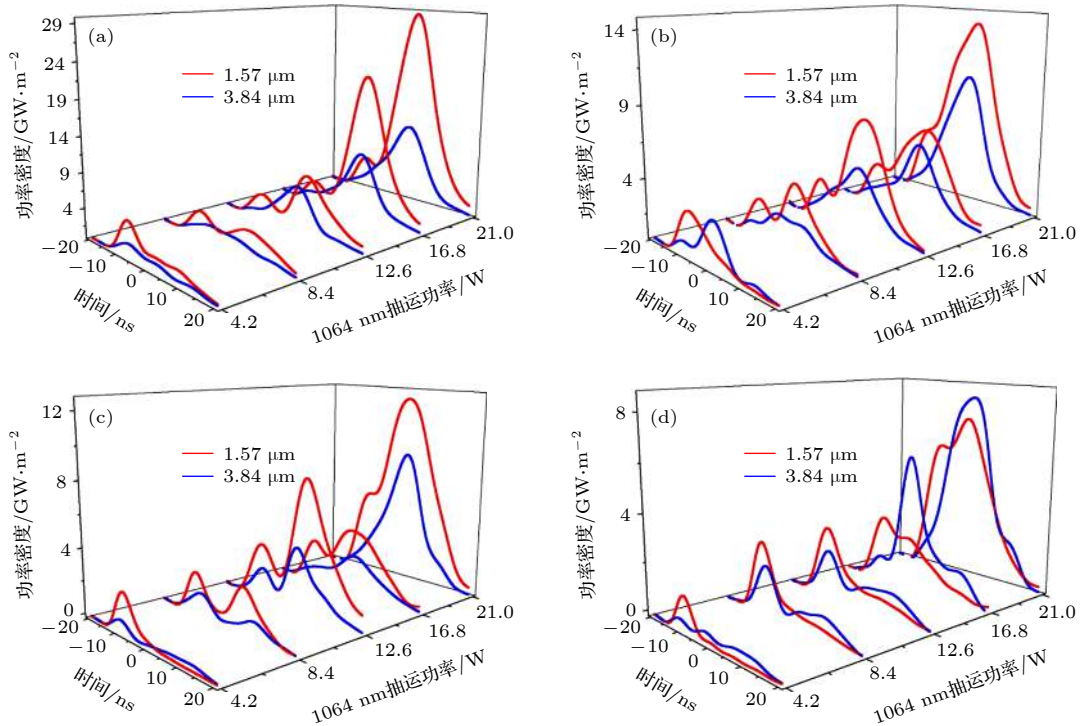


图 4 不同输出透过率下外腔 MOPO 输出波形 (a) M4-1 (1.47 μm@T = 80%); (b) M4-2 (1.47 μm@T = 60%); (c) M4-3 (1.47 μm@T = 40%); (d) M4-4 (1.47 μm@T = 20%)

Fig. 4. Output waveform simulation of external cavity MOPO with different output transmittance: (a) M4-1 (1.47 μm@T = 80%); (b) M4-2 (1.47 μm@T = 60%); (c) M4-3 (1.47 μm@T = 40%); (d) M4-4 (1.47 μm@T = 20%).

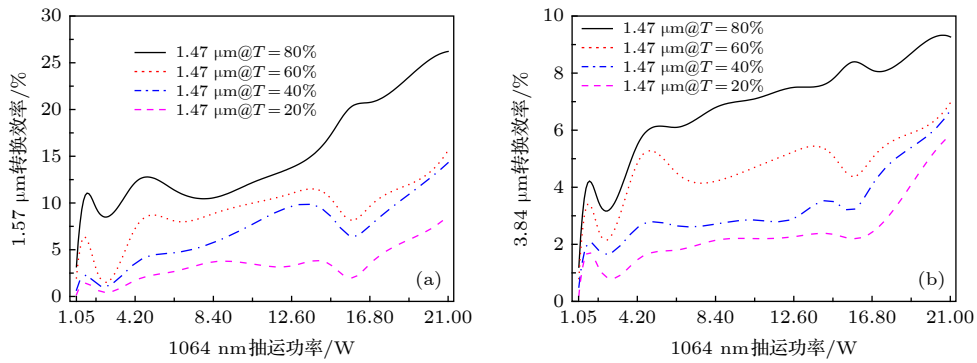


图 5 不同输出透过率下外腔 MOPO 转换效率模拟值 (a) 输出 1.57 μm 参量光; (b) 输出 3.84 μm 参量光

Fig. 5. Conversion efficiency simulation values of external cavity MOPO with different output transmittance: (a) Output 1.57 μm parametric light; (b) output 3.84 μm parametric light.

了参量光的转换效率, 这表明可通过改变输出镜的单一参量光透过率, 实现对跨周期参量光转换效率的调节.

谐振腔长度保持在 200 mm, 不同 MgO:APLN 晶体长度下输出参量光转换效率模拟值如图 6 所示. 由图 6 可知, MgO:APLN 晶体最佳工作长度为 50 mm. 当 MgO:APLN 晶体长度小于 50 mm 时, 1.57 μm 和 3.84 μm 参量光转换效率随抽运功

率增加而降低, 是因为多光参量振荡过程作用距离过短; 晶体长度为 60 mm 时, 多光参量振荡过程作用距离过长, 发生了逆转换现象, 进而降低了参量光的转换效率.

进一步保持 MgO:APLN 晶体长度为 50 mm, 模拟不同谐振腔长度下输出参量光的转换效率(图 7). 谐振腔长度为 200 mm 时, 1.57 μm 和 3.84 μm 参量光转换效率随抽运功率的增加而增长. 当谐振

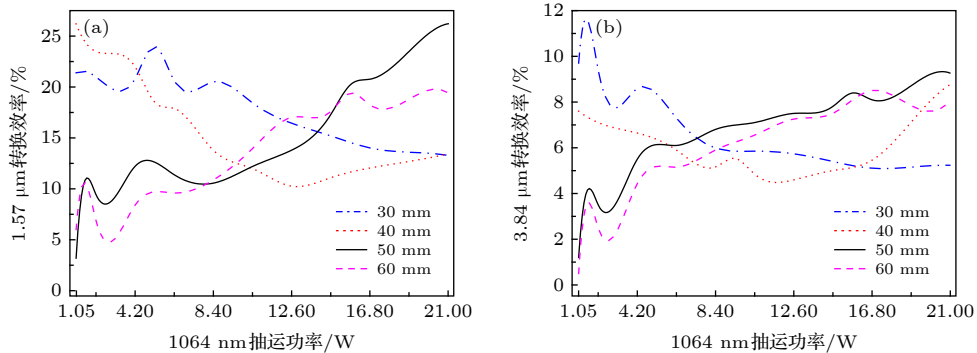


图 6 不同晶体长度下外腔 MOPO 转换效率模拟值 (a) 输出 1.57 μm 参量光; (b) 输出 3.84 μm 参量光

Fig. 6. Conversion efficiency simulation values of external cavity MOPO with different crystal length: (a) Output 1.57 μm parametric light; (b) output 3.84 μm parametric light.

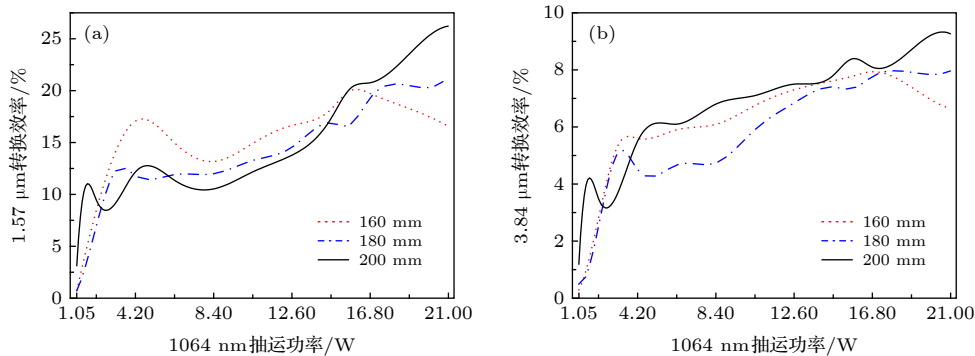


图 7 不同谐振腔长度下外腔 MOPO 转换效率模拟值 (a) 输出 1.57 μm 参量光; (b) 输出 3.84 μm 参量光

Fig. 7. Conversion efficiency simulation values of external cavity MOPO with different cavity length: (a) Output 1.57 μm parametric light; (b) output 3.84 μm parametric light.

腔长度小于 200 mm 时, 谐振腔内参量光的耦合叠加次数增多, 导致腔内参量光功率密度过高发生逆转换现象, 降低了参量光转换效率.

通过图 5—7 可知, 抽运功率在 2.6 W 附近时, 1.57 和 3.84  $\mu\text{m}$  参量光转换效率出现明显凹陷, 这是因为抽运光功率增加致使参量振荡增益变大, 由于谐振腔的耦合作用导致抽运光在正反两次通过晶体过程中被完全消耗, 发生逆转换现象, 降低了转换效率, 且晶体长度或谐振腔长度变短时, 又引发模式竞争现象, 导致两个参量光转换效率出现不同步的起伏. 高抽运功率下, 不同透过率间转换效率随功率出现不规律的起伏, 是因为透过率为 20%—60% 时, 谐振腔内积累大量参量光, 导致逆转换现象, 降低转换效率, 而透过率为 80% 时, 大部分参量光由腔镜射出, 减少了腔内参量光积累,

抑制了逆转换现象的发生.

### 5 实验结果

基于仿真模拟结果, 搭建了基于 MgO:APLN 的外腔 MOPO 实验装置. 880 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 高重复频率声光调 Q 激光器作为 1064 nm 脉冲抽运源, 70 kHz 重复频率下最高输出平均功率为 30.2 W. MgO:APLN 晶体尺寸为 50 mm  $\times$  6 mm  $\times$  3 mm, 多光参量振荡谐振腔长度为 200 mm. 输入镜选择腔镜 M3 的膜系, 输出镜选择腔镜 M4-1 和 M4-2 膜系. 不同输出透过率下外腔 MOPO 的输出功率及转换效率如图 8 所示. 其中, 模拟值为第 4 节仿真结果. 对比两组实验数据, 腔镜 M4-1 下 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  参量光转换效率比腔镜 M4-2

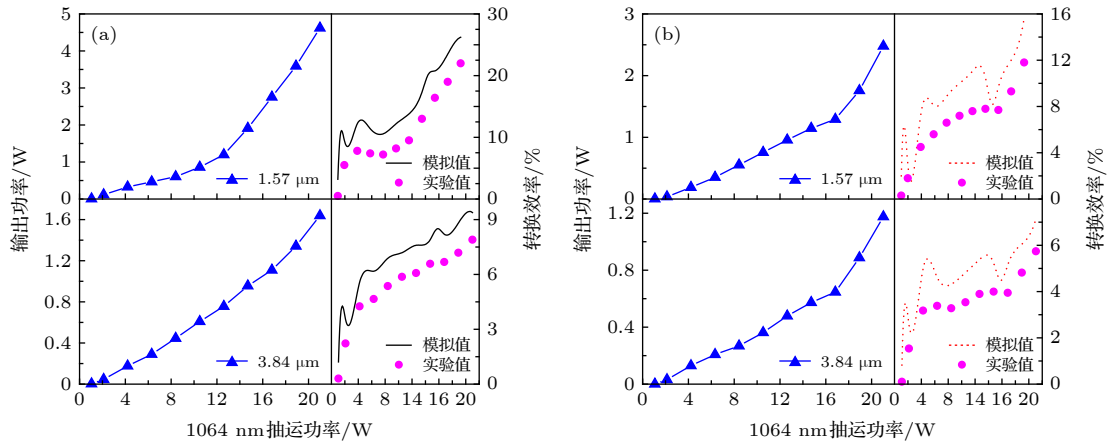


图 8 不同输出透过率下外腔 MOPO 输出功率及转换效率 (a) M4-1 (1.47  $\mu\text{m}$ @ $T = 80\%$ ); (b) M4-2 (1.47  $\mu\text{m}$ @ $T = 60\%$ )

Fig. 8. Output power and conversion efficiency of external cavity MOPO with different output transmittance: (a) M4-1 (1.47  $\mu\text{m}$ @ $T = 80\%$ ); (b) M4-2 (1.47  $\mu\text{m}$ @ $T = 60\%$ ).

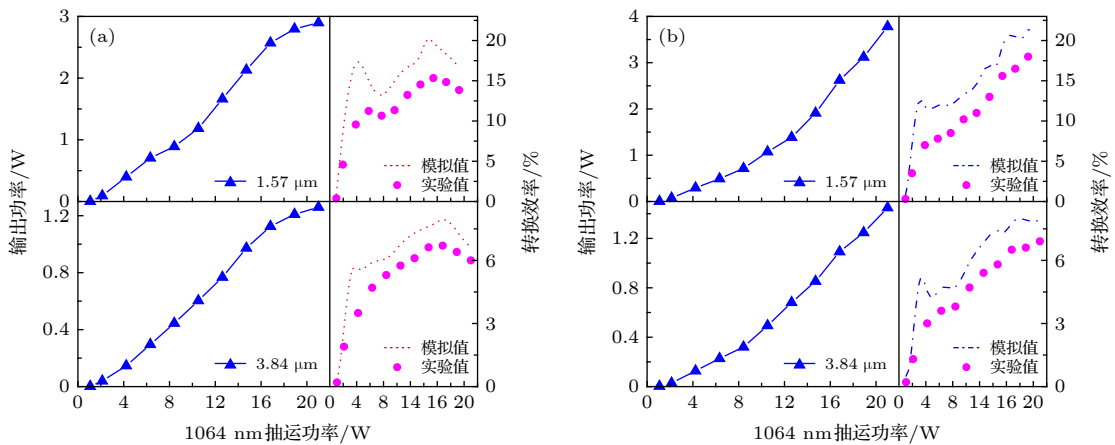


图 9 不同谐振腔长度下外腔 MOPO 输出功率及转换效率 (a) 腔长 160 mm; (b) 腔长 180 mm

Fig. 9. Output power and conversion efficiency of external cavity MOPO with different cavity length: (a) Cavity length of 160 mm; (b) cavity length of 180 mm.

高,且腔镜 M4-2 的参量光转换效率存在由逆转换现象引起的拐点. 1064 nm 抽运光平均功率为 21 W 时,包含腔镜 M3 和 M4-1 的外腔 MOPO 在 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  的最大输出功率分别为 4.6 W 和 1.6 W,对应转换效率为 22.2% 和 7.8%. 进一步,腔镜选择 M3 和 M4-1,测量不同谐振腔长度下多光参量振荡的输出功率和转换效率(图 9). 由图 9(a)可知,腔长为 160 mm,抽运光功率大于 16 W 时,参量光转换效率持续下降. 由图 9(b)可知,腔长为 180 mm,参量光转换效率随抽运光功率增加而增长. 综合图 8 和图 9,参量光 1.57  $\mu\text{m}$  和 3.84  $\mu\text{m}$  转换效率的实验值与模拟值具有相同的变化规律,表明参量光转换效率的实验值与理论值相匹配,证明此模型能精准地反演 MOPO 的能量转换过程.

## 6 结 论

针对多光参量振荡,在含时波动方程的基础上,建立起脉冲抽运机制下包含抽运光与两组参量光的能量转换模型,即五波耦合方程. 利用分步积分法计算输出参量光电场强度的数值解,获得参量光转换效率. 模拟多光参量放大器结构的输出参量光波形,证实逆转换和模式竞争是影响多光参量振荡的重要因素. 在外腔 MOPO 结构下,模拟结果表明 1.57 和 3.84  $\mu\text{m}$  参量光转换效率随输出镜 1.47  $\mu\text{m}$  透过率增加而逐渐增大,即通过改变输出镜的单一参量光透过率能实现对跨周期参量光转换效率的调节. 通过模拟不同晶体长度和谐振腔长度下的参量光转换效率,证实外腔多光参量振荡器存在最佳晶体长度和谐振腔长度. 开展外腔 MOPO 实验,验证了仿真模型的有效性,证明此方法能精

准地反演 MOPO 能量转换过程,对优化各种结构的 MOPO、提高参量光转换效率提供了理论依据.

## 参考文献

- [1] Huang H T, He J L, Liu S D, Liu F Q, Yang X Q, Yang H W, Yang Y, Yang H 2011 *Laser Phys. Lett.* **8** 358
- [2] 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
- [3] Breunig I, Sowade R, Buse K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1450
- [4] Wang P, Shang Y P, Li X, Shen M L, Xu X J 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1500107
- [5] Chang J H, Yang Z B, Lu Z, Dong S C 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 1002009 (in Chinese) [常建华, 杨镇博, 陆洲, 董时超 2013 *中国激光* **40** 1002009]
- [6] Wei X, Peng Y, Wang W, Chen X, Li D 2011 *Appl. Phys. B* **104** 597
- [7] Chou M H, Parameswaran K R, Fejer M M, Brener I 1999 *Opt. Lett.* **24** 1157
- [8] Kawase K, Hatanaka T, Takahashi H, Nakamura K, Taniuchi T, Ito H 2000 *Opt. Lett.* **25** 1714
- [9] Jin Y W, Cristescu S M, Harren F J M, Mandon J 2014 *Opt. Lett.* **39** 3270
- [10] Klingbeil A E, Jeffries J B, Davidson D F, Hanson R K 2008 *Appl. Phys. B* **93** 627
- [11] Smith A V, Gehr R J, Bowers M S 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 609
- [12] Kong Y, Xu Z, Zhou Y, Deng D, Zhu X, Wu L 1998 *IEEE J. Quantum Elect.* **34** 439
- [13] Boller K J, Schroder T 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1778
- [14] Schroder T, Boller K J, Fix A, Wallenstein R 1994 *Appl. Phys. B* **58** 425
- [15] Fix A, Wallenstein R 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 2484
- [16] Arisholm G 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 117
- [17] Yu Y J, Chen X Y, Cheng L B, Li S T, Wu C T, Dong Y, Fu Y G, Jin G Y 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1500908
- [18] Yu Y J, Chen X Y, Cheng L B, Wang C, Wu C T, Dong Y, Li S T, Jin G Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224215 (in Chinese) [于永吉, 陈薪羽, 成丽波, 王超, 吴春婷, 董渊, 李述涛, 金光勇 2015 *物理学报* **64** 224215]
- [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] Yu Y J, Chen X Y, Cheng L B, Dong Y, Wu C T, Li S T, Fu Y G, Jin G Y 2017 *Opt. Laser Technol.* **97** 187

# Energy conversion of multi-optical parametric oscillation based on time-dependent split-step integration methods in MgO:APLN\*

Liu Hang<sup>1)2)</sup> Yu Yong-Ji<sup>1)†</sup> Wang Yu-Heng<sup>1)</sup> Liu He-Yan<sup>1)</sup>  
Li Lu-Jie<sup>2)</sup> Jin Guang-Yong<sup>1)‡</sup>

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

2) (*Changchun China Optical Science and Technology Museum, Changchun 130117, China*)

( Received 30 May 2019; revised manuscript received 3 September 2019 )

## Abstract

In a multi-optical parametric oscillator by pulse pumping, energy conversion process for 1.57  $\mu\text{m}$  and 3.84  $\mu\text{m}$  parametric light can be expressed by time-dependent wave equations. The split-step integration method is used to solve the equations. By analyzing the simulation results of the output waveform for the multi-optical parametric amplifier, it is confirmed that back conversion and mode competition are the important factors affecting the multi-optical parametric oscillation. The 1.57  $\mu\text{m}$  and 3.84  $\mu\text{m}$  parametric light in an external cavity multi-optical parametric oscillator are simulated under different output mirror transmittances, crystal working lengths and cavity lengths. The conversion efficiency of 1.57  $\mu\text{m}$  and 3.84  $\mu\text{m}$  increase with the output mirror transmittance increasing, which means that the conversion efficiency can be adjusted by changing the parametric light transmittance of the output mirror. There exist an optimal crystal working length and a cavity length in the external cavity multi-optical parametric oscillator. The experiment on external cavity multi-optical parametric oscillator is carried out. The conversion efficiency of 1.57  $\mu\text{m}$  and 3.84  $\mu\text{m}$  parametric light are consistent with the theoretical values. The energy conversion process in the multi-optical parametric oscillator can be simulated by this method, which could be used for optimizing the multi-optical parametric oscillator and increasing the parametric conversion efficiency.

**Keywords:** multi-optical parametric oscillator, split-step integration methods, energy conversion, MgO:APLN

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

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190843

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505013), the Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 2016M591466), the Key Science and Technology Program of Jilin Science and Technology Department, China (Grant No. 20170204046GX), and the Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Leader and Team of Jilin Science and Technology Department, China (Grant No. 20190101004JH).

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

‡ Corresponding author. E-mail: [jgyciom@163.com](mailto:jgyciom@163.com)