

# 基于台阶声光调 $Q$ 外腔泵浦 MgO:PPLN 光参量振荡器的 $3.4\ \mu\text{m}$ 中红外脉冲串激光器\*

姚晓岱<sup>1)</sup> 吴爽<sup>1)</sup> 赵锐<sup>1)</sup> 吴森鑫<sup>1)</sup> 刘航<sup>1)</sup> 金光勇<sup>1)</sup> 于永吉<sup>1)2)†</sup><sup>1)</sup> (长春理工大学物理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)<sup>2)</sup> (长春理工大学重庆研究院, 重庆 401135)

(2023 年 8 月 18 日收到; 2023 年 10 月 19 日收到修改稿)

本文报道了一种台阶声光调  $Q$  外腔泵浦 MgO:PPLN 光参量振荡器的  $3.4\ \mu\text{m}$  中红外脉冲串激光器. 建立了基频台阶声光调  $Q$  理论模型, 模拟了不同台阶调  $Q$  间隔时光子数密度随时间变化趋势, 获得了台阶信号最优触发时间, 确定了台阶声光调  $Q$  获得脉冲串激光输出的可能性. 根据理论模拟设计台阶信号触发时间, 并应用于台阶声光调  $Q$  外腔泵浦 MgO:PPLN 光参量振荡器的中红外脉冲串激光器实验中, 在每个重复周期内声光  $Q$  开关分三次开启, 获得了单脉冲包络含三个子脉冲的  $3.4\ \mu\text{m}$  中红外脉冲串激光输出. 脉冲包络内子脉冲间隔为  $5\ \mu\text{s}$ , 最窄脉宽为  $12.8\ \text{ns}$ , 脉冲包络重频为  $20\ \text{kHz}$ , 理论和是实验中均发现脉冲包络内子脉冲宽度逐渐增大. 在最大平均输出功率为  $1.08\ \text{W}$  时,  $1064\ \text{nm}$  基频光与  $3.4\ \mu\text{m}$  参量光的光-光转换效率为  $10.05\%$ , 光束质量因子  $M^2$  为  $2.01$ .

**关键词:** 中红外激光, 脉冲串, 台阶声光调  $Q$ , 光参量振荡器**PACS:** 42.60.Gd, 42.65.Yj, 42.55.Xi**DOI:** 10.7498/aps.73.20231348

## 1 引言

中红外 ( $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ ) 波段激光涵盖了大气中许多原子和分子的基频吸收峰, 并且其在大气中的穿透能力较强, 因此该波段激光被称为“分子指纹区”和“大气窗口区”<sup>[1,2]</sup>. 其中  $3.4\ \mu\text{m}$  的中红外激光是  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  等分子的吸收峰特征谱线<sup>[3-5]</sup>, 可用于差分吸收雷达 (differential absorption lidar, DIAL) 测量大气中该痕量气体的浓度<sup>[6-9]</sup>, 因此中红外激光器是 DIAL 的核心器件. 近年来人们发现脉冲串模式的激光器能够增强 DIAL 性能, 提高探测精度. 2015 年美国国家航空航天局 (NASA) 采用三脉冲  $2\ \mu\text{m}$  DIAL 系统成功以  $0.5\%$  和  $0.2\%$  的精

度测量了水蒸气和  $\text{CO}_2$  的差分光学深度, 并验证采用三脉冲模式比单脉冲具有更高的回波信噪比, 能够提高探测精度<sup>[10,11]</sup>. 2018 年, Shayeganrad<sup>[12]</sup> 通过从高重频脉冲激光器中提取脉冲串, 并应用 DIAL 技术进行大气  $\text{O}_2$  浓度测量, 成功将测量精度提升至  $1\times 10^{-6}$  以下. 因此脉冲串激光能够增加 DIAL 测量的回波信噪比, 提高探测精度<sup>[13,14]</sup>. 所以在当前“双碳”(“碳达峰”、“碳中和”) 战略背景下开展中红外脉冲串激光器研究, 为 DIAL 提供核心光源, 将推动中红外激光技术在雷达探测、环境监测、光谱分析等领域的进一步应用<sup>[15-17]</sup>, 并具有很高的研究价值.

目前, 产生脉冲串激光的方法主要有腔外调制法<sup>[18,19]</sup>和腔内调制法<sup>[20,21]</sup>. 腔外调制法得到的脉

\* 国家自然科学基金 (批准号: U20A20214, 62275031, 11974060)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTB2022NSCQ-MSX1027) 和吉林省自然科学基金 (批准号: 20210101154JC) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuyongji@cust.edu.cn

冲串是从脉冲振荡级输出的脉冲序列中选取一部分得到的, 所以振荡级的能量利用率较低<sup>[22]</sup>. 而腔内调制法通过控制腔内损耗直接获得脉冲串输出, 具有能量利用率高的优点. 2017年, 武文涛等<sup>[20]</sup>通过脉冲泵浦 Nd:YAG 并进行腔内电光调  $Q$ , 经过两级放大, 在脉冲泵浦频率为 10 Hz, 调  $Q$  重频为 100 Hz 时, 获得脉冲串能量 1.89 J 的 1064 nm 多子脉冲串激光输出. 但采用脉冲泵浦结合腔内调  $Q$  的传统腔内调制法时, 由于脉冲上升沿和下降沿的限制, 导致脉冲串整体强度失衡, 甚至出现脉冲丢失现象, 无法达到精确控制. 而台阶调  $Q$  通过连续泵浦仅靠控制腔内损耗台阶式变化即可实现脉冲串激光输出. 2021 年本课题组的毛洁等<sup>[23]</sup>在 808 nm 连续泵浦时, 通过台阶电光调  $Q$  Nd:YAG, 获得脉冲串能量 32.5 mJ、子脉冲个数为 3 个的 1064 nm 脉冲串激光输出, 实现子脉冲个数精确控制. 因此相较于传统腔内调制法, 台阶调, 具有结构简单、能量利用率高、控制精确的优点. 但是迄今为止, 国内外对脉冲串的报道主要集中在近红外, 对于中红外脉冲串鲜有报道.

由此, 本文开展了台阶声光调  $Q$  (acousto-optic  $Q$ -switch, AOQS) 外腔泵浦周期极化铌酸锂晶体 (MgO:PPLN) 光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 3.4  $\mu\text{m}$  中红外脉冲串激光器的理论与实验研究. 建立了 AOQS 理论模型, 模拟了台阶 AOQS 反转粒子数与光子数随时间的变化关系, 获得了台阶信号最优触发时间. 根据模拟结果进行实验成功获得了单脉冲包络内包含 3 个子脉冲的 3.4  $\mu\text{m}$  中红外脉冲串激光输出.

## 2 理论模型及实验装置

### 2.1 基频台阶 AOQS 理论模型

根据光子数与反转粒子数之间的关系, 建立了基频台阶 AOQS 脉冲串激光输出的速率方程<sup>[24]</sup>, 如 (1) 式—(5) 式所示:

$$\frac{dN}{dt} = R_p - \gamma\sigma c\phi N - \frac{N}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = N\sigma\phi c \frac{l}{L_{\text{laser}}} - \frac{\phi}{\tau_c}, \quad (2)$$

$$R_p = \frac{P_{\text{in}} [1 - e^{-\alpha_a l}]}{\hbar\nu_a \pi \omega_a^2 l}, \quad (3)$$

$$\tau_r = 2L_{\text{laser}}/c, \quad (4)$$

$$\tau_c = \frac{\tau_r}{L_i + L_p + \ln(1/R_a)}. \quad (5)$$

这里,  $N$  表示反转粒子数密度;  $R_p$  表示泵浦速率;  $\gamma$  是能级反转因子;  $\sigma$  是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体受激发射截面;  $c$  是光速;  $\phi$  是光子数密度;  $\tau$  是粒子的上能级寿命;  $l$  和  $L_{\text{laser}}$  分别是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体长度和谐振腔长度;  $\tau_c$  是腔内光子衰变时间.  $P_{\text{in}}$  是泵浦功率;  $\nu_a$  是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对泵浦光的吸收系数;  $\hbar\nu_a$  是泵浦源发出单个光子的能量;  $\omega_a$  是泵浦源的光斑半径;  $\tau_r$  光子在腔内的往返时间;  $L_i$  代表往返过程中的损耗;  $L_p$  是 AOQS 引起的阶跃损耗函数;  $R_a$  是输出镜对 1064 nm 的反射率.

在一个调  $Q$  周期内, 设定 AOQS 分 3 步打开, 谐振腔内由 AOQS 引起的损耗的变化可以用如下函数表示:

$$L_p = \begin{cases} T_1 = -\ln(1 - \eta_1), & 0 < t < t_1, \\ T_2 = -\ln(1 - \eta_2), & t_1 < t < t_2, \\ T_3 = -\ln(1 - \eta_3), & t_2 < t < t_3, \\ T_4 = 0, & t_3 < t < t_4. \end{cases} \quad (6)$$

$\eta_i$ ,  $T_i$ ,  $t_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别表示声光晶体的不同衍射效率、AOQS 阶跃损耗、台阶信号触发时间. 在  $0-t_1$  时刻衍射损耗处于最高值  $T_1$ , AOQS 完全“关门”; 在  $t_1-t_2$  时刻衍射损耗处于次高值  $T_2$ , AOQS 部分打开;  $t_2-t_3$  时刻衍射损耗降低到  $T_3$ , AOQS 再次打开一部分;  $t_3-t_4$  时刻衍射损耗为 0, AOQS 完全“开门”, 激光完全透过 AOQS. 在一个调  $Q$  周期内由 AOQS 引起腔内损耗台阶式下降, 反转粒子数在一个调  $Q$  周期内释放三次, 通过调整三个阶跃损耗的幅值比例、台阶信号触发时间、泵浦功率, 可以输出等间隔等幅值的一个脉冲包络包含 3 个子脉冲的脉冲串激光.

(6) 式中声光晶体的衍射效率  $\eta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 可以表示为<sup>[25]</sup>

$$\eta_i = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{Q_{\text{ac}} K P_i}{2}} \right), \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  是激光波长;  $Q_{\text{ac}}$  是声光晶体的品质因数;  $K$  是换能器的长宽之比;  $P_i$  是声光功率, 因此对于给定的 AOQS, 衍射效率只与声光功率有关. 所以通过改变声光调  $Q$  信号台阶幅值来改变加到声光晶体上的声光功率, 以实现腔内损耗台阶式调控.

为了获得最优台阶触发时间, 将表 1 中的数据代入 (1) 式—(6) 式中, 同时保持其他参数一致的情况下, 模拟了台阶间隔分别为 4, 5, 6, 7  $\mu\text{s}$  时一个周期内光子数密度随时间变化情况, 模拟结果如图 1 所示. 当台阶间隔为 4, 6, 7  $\mu\text{s}$  时, 由于腔内损耗的变化, 导致在当前泵浦速率下, 反转粒子数并不能迅速积累到饱和值, 导致脉冲并不能在规定的台阶处输出, 因此出现输出脉冲间隔、幅值不相等, 且有明显的弛豫振荡现象. 而在台阶间隔为 5  $\mu\text{s}$  时, 输出脉冲间隔、幅值基本相等, 能够满足脉冲串输出要求, 此时对应的三个台阶触发时间分别为 16, 21 和 26  $\mu\text{s}$ .

表 1 台阶 AOQS 速率方程模拟主要参数  
Table 1. Simulating key parameters of step AOQS equation.

参数	取值
声光晶体品质因数 $Q_{ac}/(\text{s}^3\cdot\text{g}^{-1})$	$1.51\times 10^{15}$ [25]
换能器长宽之比 $K$	12.5
Nd:YVO <sub>4</sub> 上能级寿命 $\tau/\mu\text{s}$	90
四能级系统反转因子 $\gamma$	1
光速 $c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$3\times 10^8$
晶体受激发射截面 $\sigma/\text{cm}^2$	$12\times 10^{-19}$ [26]
Nd:YVO <sub>4</sub> 晶体长度 $l/\text{mm}$	10
激光谐振腔长度 $L_{\text{laser}}/\text{mm}$	70
泵浦速率 $R_p/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$2.1\times 10^{26}$
重复频率 $f/\text{kHz}$	20
输出镜对 1064 nm 反射率 $R_a$	50%

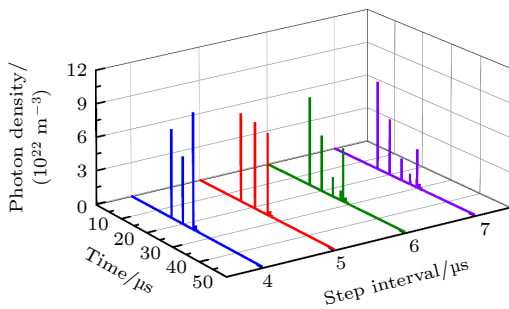


图 1 光子数密度在不同台阶间隔下的变化趋势  
Fig. 1. Change trend of photon number density under different step spacings.

图 2 是在台阶触发时间为 16, 21, 26  $\mu\text{s}$  时, 模拟的反转粒子数密度与光子数密度随时间的变化情况. 其中图 2(a) 和图 2(b) 是三个周期内反转粒子数密度与光子数密度随时间变化情况, 图 2(c) 和图 2(d) 是对图 2(a) 和图 2(b) 中第一个周期的

放大显示. 其中图 2(c) 中蓝色虚线表示 AOQS 阶跃损耗幅值, 拐点处对应台阶触发时间. 图 2(e) 和图 2(f) 是第一个周期内 AOQS 完全“开门”时, 反转粒子数与光子数随时间变化的详细情况.

由图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, 每个周期内子脉冲高度基本一致, 第一个子脉冲结束后反转粒子数并没有维持在当前值, 而是继续积累, 到下一次损耗变化点处输出第二个子脉冲, 然后反转粒子数继续积累输出第三个子脉冲. 产生这一现象的原因是台阶调  $Q$  影响了腔内损耗的变化, 由高损耗向低损耗变化的瞬态过程中, 反转粒子数被大量消耗, 使剩余反转粒子数远低于此时低损耗所对应的反转粒子数饱和值, 因此第一个脉冲结束后反转粒子数还会继续积累, 直到下一次损耗改变. 因此一个周期内反转粒子数积累三次, 释放三次, 输出三个子脉冲. 同时在图 2(d) 中发现一个周期内的子脉冲宽度逐渐增宽, 这是因为反转粒子数和脉冲宽度呈负相关, 由于在一个周期内台阶调  $Q$  使腔内损耗台阶式减小, 上能级积累的反转粒子数也逐渐减少, 因此导致脉冲宽度逐渐增加. 由图 2(e) 和图 2(f) 可以看出在  $t_3$ — $t_4$  时间段, 出现了微弱的弛豫振荡. 由于此时腔内损耗较低, 反转粒子数并不会一直在上能级积累, 当反转粒子数超过阈值反转粒子数后, 便会输出微弱的脉冲激光, 之后反转粒子数再次积累, 再次释放, 并逐渐降低最终维持在阈值反转粒子数附近.

## 2.2 实验装置

台阶声光调  $Q$  外腔泵浦 MgO:PPLN-OPO 3.4  $\mu\text{m}$  中红外脉冲串激光器实验装置如图 3 所示. 基频光谐振腔由 M1 和 M2 组成, 抽运源为光纤耦合 808 nm LD 连续泵浦源, 最大输出功率为 30 W. 使用纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径  $NA$  为 0.22 的光纤进行传输, 光纤的另一端链接 1:1.5 的耦合镜组, 使 808 nm 泵浦光聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中心. 采用英国 G&H 公司生产的 AOQS 组件对基频光腔内损耗进行阶跃调控. OPO 腔由 M3 和 M4 组成, 采用 MgO:PPLN 晶体作为非线性频率变换介质 [27], 晶体尺寸为 40 mm×5 mm×2 mm, 极化周期为 30.44  $\mu\text{m}$ , MgO 掺杂浓度为 5%, MgO:PPLN 晶体两端分别镀有 1064 nm, 1.4—1.7  $\mu\text{m}$ , 3.0—4.0  $\mu\text{m}$  增透膜, 并将晶体放在 HCP 公司生产的精

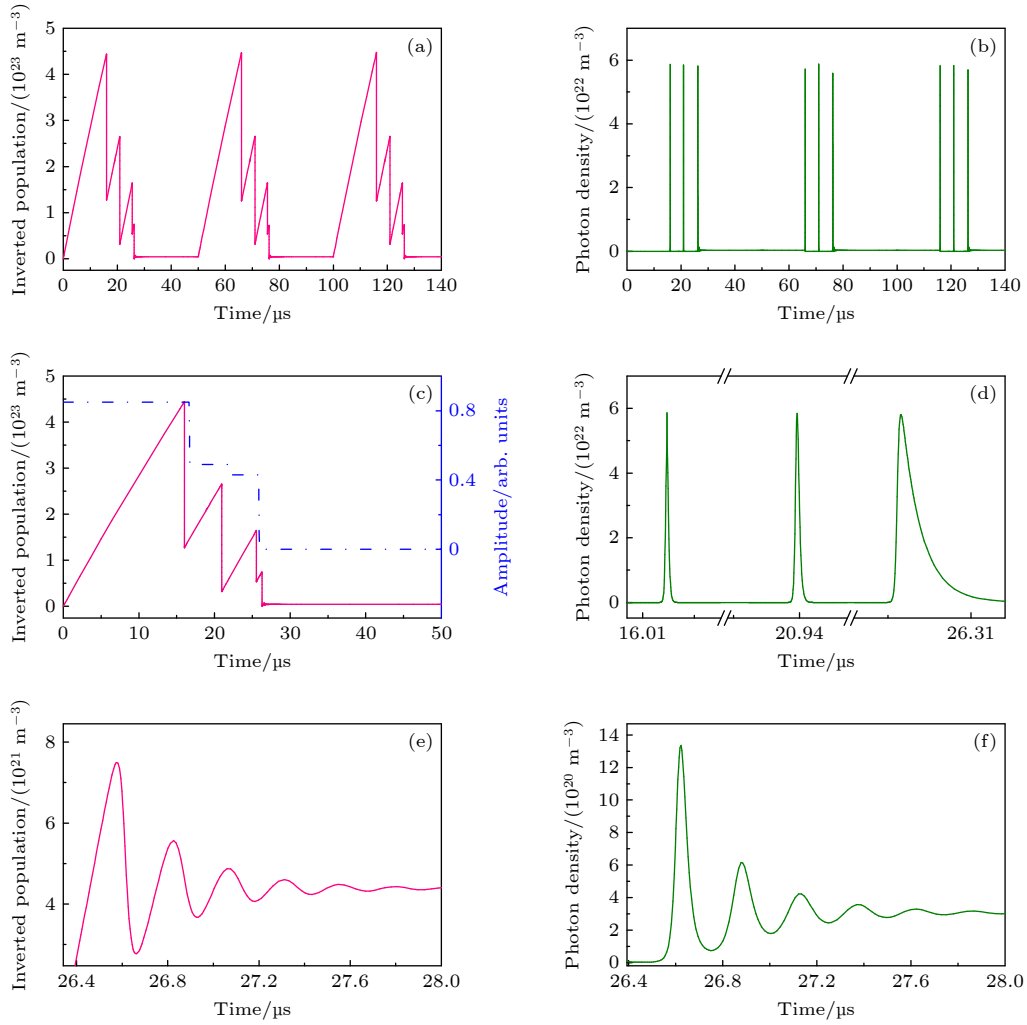


图 2 反转粒子数密度、光子数密度随时间变化情况 (a) 反转粒子数密度随时间变化; (b) 光子数密度随时间变化; (c) 第一个周期内反转粒子数密度随时间变化; (d) 第一个周期内光子数密度随时间变化; (e)  $t_3-t_4$  时反转粒子数密度随时间变化; (f)  $t_3-t_4$  时光子数密度随时间变化

Fig. 2. Inversion population density and photon density change with time: (a) Inversion population density changing over time; (b) photon number density changing over time; (c) number density of inversion particles changes with time in the first period; (d) photon number density changes with time during the first cycle; (e) number density of inversion particles changes with time at  $t_3-t_4$ ; (f) number density of photons changes with time at  $t_3-t_4$ .

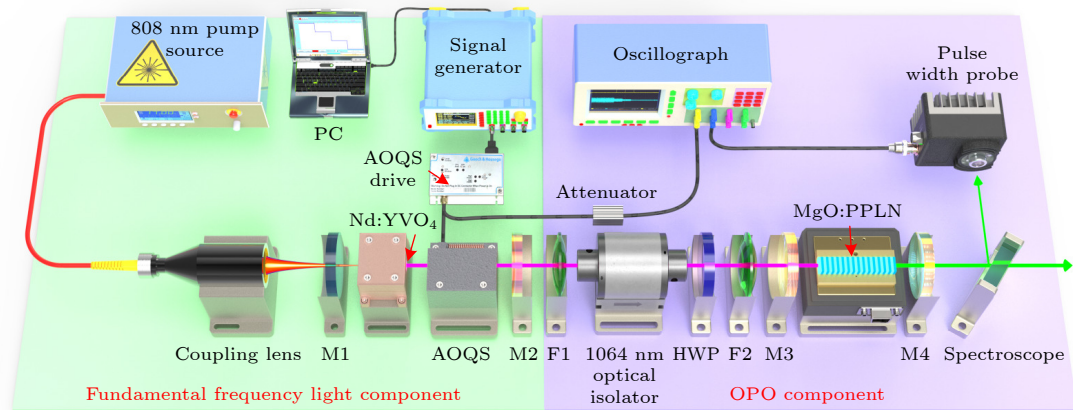


图 3  $3.4 \mu\text{m}$  中红外脉冲串激光器实验装置示意图

Fig. 3. Schematic of  $3.4 \mu\text{m}$  mid-infrared pulse-train laser experimental setup.



度为 $\pm 0.1$  K 的温控炉中. 在 M2 输出镜片后依次放置焦距为 200 mm 的 1064 nm 聚焦镜 F1、自由空间隔离器 (Thorlabs IO-8-1064-HP)、1/2 波片 (HWP)、焦距为 100 mm 的 1064 nm 聚焦镜 F2, F1 的作用是对 1064 nm 输出光的发散角压束, 隔离器用于回光隔离, 起到保护 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的作用, HWP 用于调整 1064 nm 激光偏振方向, 使之满足 MgO:PPLN 偏振匹配需求, F2 的作用是将 1064 nm 激光聚焦耦合到 MgO:PPLN 晶体内. 表 2 列出了镜片 M1, M2, M3, M4 镀膜情况.

表 2 镜片 M1, M2, M3, M4 镀膜情况  
Table 2. Coating status of lenses M1, M2, M3, and M4.

光学元件	材质	膜系参数
M1	K9	HT@808 nm, HR@1064 nm
M2	K9	HR@808 nm, $T = 50\%$ @1064 nm
M3	CaF <sub>2</sub>	HR@1.4—1.85 $\mu\text{m}$ , HR@2.6—4.3 $\mu\text{m}$ , HT@1060—1095 nm
M4	CaF <sub>2</sub>	HR@1064 nm, HR@1.4—1.7 $\mu\text{m}$ , HT@3.1—4.2 $\mu\text{m}$

### 3 实验结果与讨论

首先进行基频 1064 nm 台阶声光调  $Q$  实验. 根据前文模拟的数值设定信号发生器台阶的触发时间  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  和  $t_4$  分别为 16, 21, 26 和 50  $\mu\text{s}$ , 重复频率为 20 kHz. 采用脉宽探测器 (Thorlabs DET10D/M) 将捕获到的基频光输出波形信号连接至数字示波器 (Tektronix MDO3054) 上, 测量结果如图 4 所示. 可以看出加入台阶信号后, 输出了一个重频为 20 kHz, 每个脉冲包络内包含 3 个子脉冲的脉冲串. 其中第一个脉冲包络内的子脉冲脉宽分别为 24.3, 39.46, 45.00 ns, 这与模拟所得子脉冲宽度逐渐增大的趋势一致. 根据示波器测量结果计算了单个脉冲包络内的子脉冲信噪比 (SNR) 为 30.45 dB. 同时测量了 AOQS 驱动器衰减后的射频 (radio frequency, RF) 信号, 并将一个周期内基频脉冲串输出波形信号的实验值和理论值进行了对比, 如图 5 所示. AOQS 驱动器输出台阶式 RF 信号, 并在 RF 信号的下降沿输出子脉冲, 脉冲包络内子脉冲间隔、子脉冲输出位置与理论模拟基本一致.

接着进行外腔 OPO 中红外脉冲串输出实验.

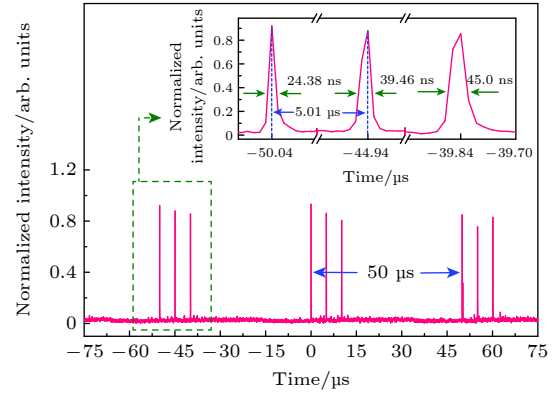


图 4 基频脉冲串输出波形图及子脉冲脉宽

Fig. 4. Output waveform of fundamental frequency pulse train and pulse width of sub-pulse.

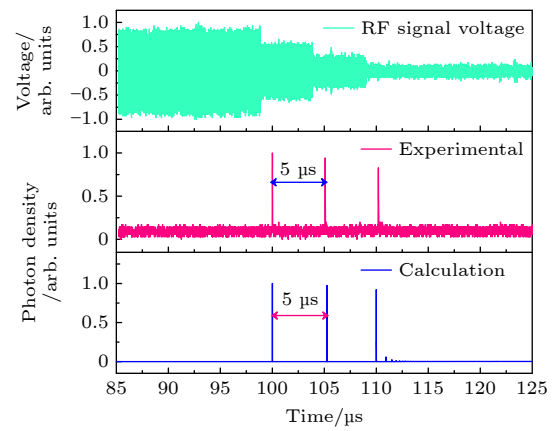


图 5 射频信号及三子脉冲输出波形实验与理论对比

Fig. 5. Experimental and theoretical comparison of RF signal and triple-pulse output waveforms.

用傅里叶光谱仪测量经过 OPO 过程后输出的闲频光波长, 测量结果如图 6 所示, 其中心波长为 3.44  $\mu\text{m}$ . 图 7 是用中红外脉宽探头 (Vigo PCI-3TE-12) 测量的 3.4  $\mu\text{m}$  中红外脉冲串输出波形及脉宽, 测量结果显示中红外脉冲串输出重频为 20 kHz, 一个脉冲包络内包含 3 个子脉冲子, 在最大输出功率时, 子脉冲宽度分别为 12.8, 15.3 和 25.8 ns, 子脉冲间隔为 5  $\mu\text{s}$ . 同基频 1064 nm 脉冲串子脉冲脉宽对比发现中红外的脉冲串子脉冲宽度比基频的小, 这是由于在每个基频子脉冲上升沿和下降沿功率密度较低不能达到 OPO 阈值, 脉冲中间部分达到 OPO 阈值进行了非线性频率变换, 所以输出中红外脉冲串脉宽变窄. 同时通过测量单个脉冲包络内子脉冲幅值平均值与背景噪声幅值平均值, 通过计算得中红外脉冲串子脉冲信噪比为 46.39 dB. 对比基频子脉冲和中红外子脉冲信噪比, 发现中红外子脉冲信噪比更高, 这是由于连

续或低功率的本底非线性转换效率较低甚至并未达到 OPO 阈值, 噪声被得到抑制, 因此中红外子脉冲信噪比明显优于基频子脉冲信噪比.

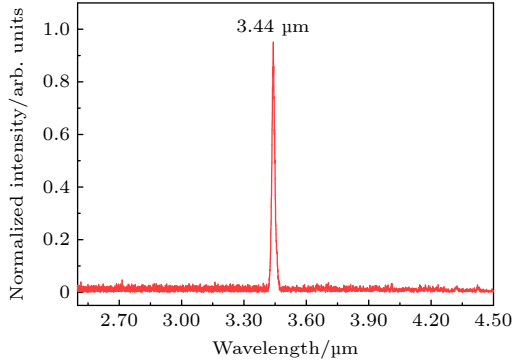


图 6 中红外脉冲串输出光谱图

Fig. 6. Mid-infrared pulse train output spectrum.

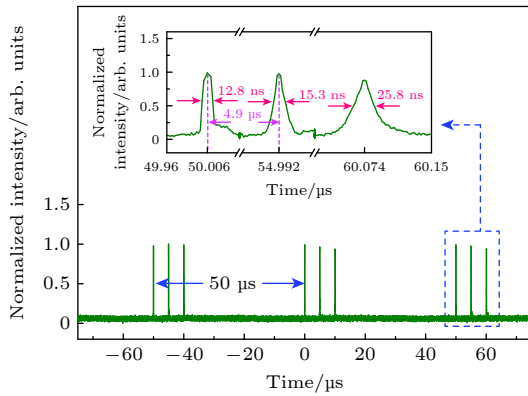


图 7 3.4 μm 脉冲串输出波形及子脉冲宽度

Fig. 7. 3.4 μm pulse train output waveform and sub-pulse width.

图 8 显示了中红外 3.4 μm 脉冲串输出平均功率、转换效率与泵浦功率的关系. 随着基频 1064 nm 脉冲串泵浦功率的增加, 中红外 3.4 μm 脉冲串平均输出功率先增加后降低, 在 1064 nm 抽运功率为 10.74 W 时, 得到了 3.4 μm 脉冲串最大平均输出功率为 1.08 W, 此时 OPO 的光-光转换效率为 10.05%. 1064 nm 与 3.4 μm 的光-光转换效率先迅速升高后逐渐趋于平稳, 并在达到最大值后逐渐降低. 产生这种现象的原因是当基频光功率达到 OPO 阈值后参量光功率迅速增加, 导致转换效率迅速增加. 随着基频光功率的增加参量光功率也逐渐增加, 然而, 因谐振腔耦合作用, 基频光在多次通过 MgO:PPLN 晶体时几乎被彻底消耗, 导致参量光倒流至基频光, 产生逆转换效应<sup>[28]</sup>, 因此转换效率又逐渐降低. 图 8 中的插图是在 3.4 μm 脉冲串最大输出功率时用焦热阵列相机 (Ophir

PyrocamIII) 通过刀口法测量的不同位置的光斑大小, 通过数据拟合计算出光束质量因子  $M^2$  为 2.01.

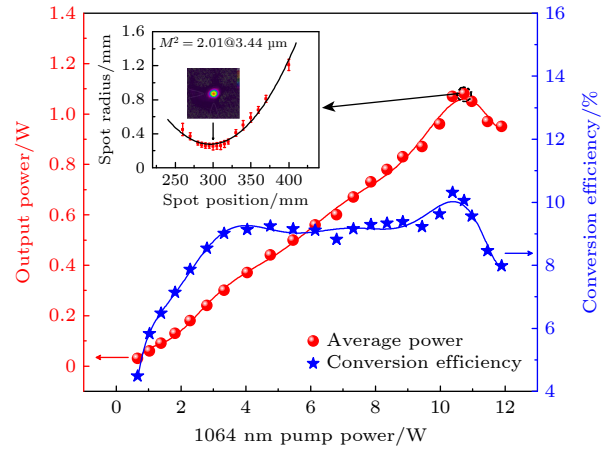


图 8 3.4 μm 脉冲串平均输出功率、转换效率随泵浦功率的变化

Fig. 8. Changes in average output power and conversion efficiency of 3.4 μm pulse train with pump power.

## 4 结 论

本文报道了一种台阶 AOQS 外腔泵浦 MgO:PPLN-OPO 3.4 μm 中红外脉冲串激光器. 建立了基频台阶 AOQS 理论模型, 在重频为 20 kHz 时模拟了不同台阶信号间隔下光子数密度变化趋势, 获得最佳台阶信号间隔为 5 μs. 依据理论模型设计台阶信号触发时间为 16, 21 和 26 μs, 进行台阶 AOQS 外腔 MgO:PPLN-OPO 实验, 获得了单个脉冲包络内包含 3 个子脉冲的 3.4 μm 中红外脉冲串激光输出. 子脉冲间隔为 5 μs, 最窄脉宽为 12.8 ns, 脉冲包络重频为 20 kHz, 在最大平均输出功率为 1.08 W 时, 1064 nm 基频光与 3.4 μm 参量光的最高光-光转换效率为 10.05%, 光束质量因子  $M^2$  为 2.01. 实验中每个重复周期内子脉冲的输出位置与理论模拟基本一致, 并且理论和实验中均发现, 每个脉冲包络内子脉冲宽度逐渐增大. 实验结果表明, 采用台阶 AOQS 并结合 OPO 的方式能够获得 3.4 μm 中红外脉冲串激光输出, 从而为获得中红外脉冲串激光开辟了新的技术途径, 为中红外脉冲串激光大气污染物浓度的检测提供理论与技术支撑. 后续我们将进一步优化台阶幅值比例、台阶间隔、腔型结构, 以获得等间隔、等幅值、稳定的脉冲串激光输出.

## 参考文献

- [1] Muraviev A, Smolski V, Loparo Z, Vodopyanov K 2018 *Nat. Photonics* **12** 209
- [2] Vodopyanov K L 2020 *Laser-based Mid-infrared Sources and Applications* (Hoboken: John Wiley & Sons) pp1–5
- [3] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, Pan Z H, Liu Z J, Zhang P Q, Shen X, Nie Q H, Dai S X, Wang R P 2017 *Laser Photonics Rev.* **11** 1700005
- [4] Koroglu B, Neupane S, Pryor O, Peale R E, Vasu S S 2018 *J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transfer* **206** 36
- [5] Walsh B M, Lee H R, Barnes N P 2016 *J. Lumin.* **169** 400
- [6] Ma H L, Sun M G, Zhan S B, Zhang Q L, Zha S L, Wang G S, Liu K, Yi M F, Cao Z S 2020 *Spectrochim. Acta, Part A* **226** 117605
- [7] Petrov K, Waltman S, Dlugokencky E, Arbore M, Fejer M, Tittel F, Hollberg L W 1997 *Appl. Phys. B* **64** 567
- [8] Nikodem M, Krzempek K, Dudzik G, Abramski K 2018 *Opt. Express* **26** 21843
- [9] Veerabuthiran S, Razdan A K, Jindal M K, Sharma R K, Sagar V 2015 *Opt. Laser Technol.* **73** 1
- [10] Refaat T F, Singh U N, Petros M, Remus R, Yu J 2015 *Appl. Opt.* **54** 7240
- [11] Refaat T F, Singh U N, Yu J, Petros M, Ismail S, Kavaya M J, Davis K J 2015 *Appl. Opt.* **54** 1387
- [12] Shayeganrad G 2018 *Opt. Laser Eng.* **111** 80
- [13] Koch G J, Barnes B W, Petros M, Beyon J Y, Amzajerjian F, Yu J, Davis R E, Ismail S, Vay S, Kavaya M J 2004 *Appl. Opt.* **43** 5092
- [14] Li X L, Luo P 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 6270
- [15] Elkhazraji A, Shakfa M K, Abualsaud N, Mhanna M, Sy M, Marangoni M, Farooq A 2023 *Appl. Opt.* **62** A46
- [16] Seddon A B 2013 *Phys. Status Solidi B* **250** 1020
- [17] Gong Y, Bu L B, Yang B, Mustafa F 2020 *Sensors* **20** 2211
- [18] Pan R C, Retzer U, Werblinski T, Slipchenko M N, Meyer T R, Zigan L, Will S 2018 *Opt. Lett.* **43** 1191
- [19] Thurow B, Jiang N B, Samimy M, Lempert W 2004 *Appl. Opt.* **43** 5064
- [20] Wu W T, Li X D, Yan R P, Zhou Y P, Ma Y F, Fan R W, Dong Z W, Chen D Y 2017 *Opt. Express* **25** 26875
- [21] Li X D, Xu H B, Yan R P, Jiang Y G, Fan R W, Dong Z W, Chen D Y 2021 *Optik* **228** 165789
- [22] Slipchenko M N, Miller J D, Roy S, Gord J R, Danczyk S A, Meyer T R 2012 *Opt. Lett.* **37** 1346
- [23] Mao J, Wang C, Hong T X, Yu Y J 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 071404
- [24] Degnan J J 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 214
- [25] Pinnow D 1970 *IEEE J. Quantum Electronics* **6** 223
- [26] Tucker A, Birnbaum M, Fincher C, Erler J 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 4907
- [27] Sun D H, Zhang Y W, Wang D Z, Wei S, Liu X Y, Pang J B, Geng D Q, Sang Y H, Liu H 2020 *Light: Sci. Appl.* **9** 197
- [28] 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]

# 3.4 $\mu\text{m}$ mid-infrared pulse train laser based on stepped acousto-optic $Q$ -switched external cavity pumped MgO:PPLN optical parametric oscillator<sup>\*</sup>

Yao Xiao-Dai<sup>1)</sup> Wu Shuang<sup>1)</sup> Zhao Rui<sup>1)</sup> Wu Miao-Xin<sup>1)</sup>  
Liu Hang<sup>1)</sup> Jin Guang-Yong<sup>1)</sup> Yu Yong-Ji<sup>1)2)†</sup>

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

2) (*Chongqing Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China*)

(Received 18 August 2023; revised manuscript received 19 October 2023)

## Abstract

3.4  $\mu\text{m}$  mid-infrared pulse train laser generates the characteristic spectral lines of absorption peaks of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  and other molecules. Its pulse train working mode can increase the signal-to-noise ratio of laser detection echo signal. It has broad application prospects in radar detection, environmental monitoring, spectral analysis and other fields, which has aroused great interest of scientists. Compared with the traditional intra-cavity control method, the step  $Q$ -switching method has the advantages of simple structure, high energy utilization rate and accurate control. Therefore, in this paper, both the theoretical study and the experimental study of a 3.4  $\mu\text{m}$  mid-infrared pulse train laser pumped by a step-type acousto-optic  $Q$ -switched external cavity in MgO:PPLN optical parametric oscillator are carried out. The theoretical model of fundamental frequency step acousto-optic  $Q$ -switching is established. The change trends of photon number density at different step intervals are simulated. The optimal trigger time of step signal required for step acousto-optic  $Q$ -switching is obtained. The possibility of obtaining pulse train laser output by step acousto-optic  $Q$ -switching is determined. In the simulation, the single pulse envelope contains 3 sub-pulse train waveforms. The pulse width of the sub-pulse in the pulse envelope gradually increases, the sub-pulse interval is 5  $\mu\text{s}$ , and the pulse envelope repetition frequency is 20 kHz. At the same time, the optimal trigger times for the step signal are obtained to be 16.00, 21.00, 26.00, 50.00  $\mu\text{s}$ . The mid-infrared pulse train laser experiment of step acousto-optic  $Q$ -switched external cavity pumped MgO:PPLN optical parametric oscillator is carried out, and the 3.4  $\mu\text{m}$  mid-infrared pulse train laser output containing three sub-pulses in a single pulse envelope is obtained. The sub-pulse interval is 5  $\mu\text{s}$ , the narrowest pulse width is 12.8 ns, and the pulse envelope repetition frequency is 20 kHz, when the maximum average output power is 1.08 W, the maximum optical-to-optical conversion efficiency of 1064 nm fundamental light and 3.4  $\mu\text{m}$  parametric light is 10.05%, and the beam quality factor  $M^2$  is 2.01. The output position of the sub pulses in each repetition period in the experiment is basically consistent with the simulation result, and it is found in both simulation and experiment that the width of the sub pulses within each pulse envelope gradually increases. The experimental results show that 3.4  $\mu\text{m}$  mid-infrared pulse train laser output can be obtained by using step AOQS combined with OPO. This innovative method provides theoretical and technical support for detecting atmospheric pollutant concentration by using mid-infrared pulse train laser.

**Keywords:** mid-infrared laser, pulse train, step acousto-optic  $Q$ -switching, optical parametric oscillation

**PACS:** 42.60.Gd, 42.65.Yj, 42.55.Xi

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231348

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U20A20214, 62275031, 11974060), the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. CSTB2022NSCQ-MSX1027), and the Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No. 20210101154JC).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yuyongji@cust.edu.cn



基于台阶声光调Q外腔泵浦MgO:PPLN光参量振荡器的3.4  $\mu\text{m}$ 中红外脉冲串激光器

姚晓岱 吴爽 赵锐 吴淼鑫 刘航 金光勇 于永吉

**3.4  $\mu\text{m}$  mid-infrared pulse train laser based on stepped acousto-optic Q-switched external cavity pumped MgO:PPLN optical parametric oscillator**

Yao Xiao-Dai Wu Shuang Zhao Rui Wu Miao-Xin Liu Hang Jin Guang-Yong Yu Yong-Ji

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 044206 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231348

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231348>

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

基于铋纳米片可饱和吸收被动调Q中红外单晶光纤激光器

Bismuth nanosheets based saturable-absorption passively Q-switching mid-infrared single-crystal fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200337>

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>

基于层状WS<sub>2</sub>调制激光泵浦的光学参量振荡中红外运转特性

Operation characteristics of mid-infrared optical parametric oscillation pumped by layered WS<sub>2</sub> modulated laser

物理学报. 2022, 71(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211409>

声光调Q Nd:YVO<sub>4</sub>晶体级联拉曼倍频窄脉宽657 nm激光器

Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657 nm laser

物理学报. 2021, 70(22): 224209 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210695>

基于二维纳米材料可饱和吸收体的中红外超快光纤激光器

Two-dimensional material as a saturable absorber for mid-infrared ultrafast fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200472>

基于光学参量振荡器的可调谐红外激光的强度噪声特性

Intensity noise of tunable infrared laser based on singly resonant optical parametric oscillator

物理学报. 2020, 69(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191952>