

文章编号 1004-924X(2019)10-2116-11

# 高速 PLIF 成像诊断应用的脉冲串激光器研究进展

李旭东<sup>1</sup>, 梅峰<sup>1</sup>, 闫仁鹏<sup>1\*</sup>, 刘志祥<sup>2</sup>, 姜玉刚<sup>3</sup>, 陈德应<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 深圳航天工业技术研究院, 广东 深圳 518000;

3. 天津津航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308)

**摘要:**平面激光诱导荧光是基于片状激光光束, 激发流场中自由基或示踪粒子辐射荧光, 通过对该荧光成像获得流场空间分布信息的一种成像诊断技术。脉冲串激光器是目前能够满足高速平面激光诱导荧光技术对高重复、大能量激光光源需求的有效光源。本文针对应用于高速平面激光诱导荧光成像诊断中的脉冲串激光器进行了综述, 对比了脉冲串激光不同产生方式的特点, 阐述了发展状况, 并对作为高速激光诊断光源的脉冲串激光器的发展前景做了展望。

**关键词:**平面激光诱导荧光; 脉冲串激光; 调 Q 技术; 半导体激光器泵浦

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2116

## Review of burst-mode lasers for high-speed PLIF imaging diagnostics

LI Xu-dong<sup>1</sup>, MEI Feng<sup>1</sup>, YAN Ren-peng<sup>1\*</sup>, LIU Zhi-xiang<sup>2</sup>, JIANG Yu-gang<sup>3</sup>, CHEN De-ying<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Shenzhen Aerospace Industry Technology Research Institute, Shenzhen 518000, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film,

Tianjin Jinhang Technical Physics Institute, Tianjin 300308, China)

\* Corresponding author, E-mail: dychen@hit.edu.cn

**Abstract:** Planar Laser-induced Fluorescence (PLIF) is an imaging diagnostic technique that is based on the sheet laser beam, fluorescence emission from free radicals or tracer particles in a stimulated flow field, and the spatial distribution information of the flow field obtained through fluorescence imaging. Currently, the burst-mode laser is an effective light source that can satisfy the requirements of a high repetition rate and high energy laser source for high-speed PLIF technology. The study provides a comprehensive overview of burst-mode lasers used in high-speed PLIF imaging diagnosis. The characteristics and development of different burst-mode lasers are compared and explained. The prospects of burst-mode lasers as high-speed laser diagnostics light sources are also presented.

**Key words:** laser diagnosis; burst-mode; Q-switched; LD-pumped

**收稿日期:** 2019-04-01; **修订日期:** 2019-06-04.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 61605032, No. 61705165); 深圳市科技计划项目(No. JSGG20170414141239041); 中国博士后科学基金面上资助项目(No. 2015M80263); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. HIT.NSRIF.2017018)

## 1 引言

平面激光诱导荧光 (Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF) 是利用片状激光, 选择性激发自由基或示踪粒子产生荧光来记录瞬态流场分布或燃烧场结构的技术。通过激光对自由基和示踪粒子的激发, 利用增强电荷耦合器件 (Intensified Charged Coupled Device, ICCD) 接收荧光, 并对荧光强度和二维空间分布进行分析, 从而得到某些气体分子的温度分布、浓度分布以及火焰结构等信息<sup>[1-7]</sup>, 进而实现对整个流场的二维测量, 具有高时间分辨率、高空间分辨率以及非接触测量等特点, 目前被广泛应用于空气动力学、燃烧学和能源动力学等领域<sup>[7-11]</sup>。

在姿轨控发动机点火等能源动力领域, 绝大部分流场是非稳态的, 传统帧频 10 Hz 的 PLIF 诊断技术难以有效反映流场的动态演化过程, 此时需要发展高速 (帧频 kHz-MHz) PLIF 诊断技术。在高速 PLIF 诊断系统中, 激光光源要具有尽可能大的单脉冲能量以激发出更强的荧光信号, 以及尽可能高的重复频率运转以达到更高的时间分辨。然而, 受激光器高平均功率下热效应的影响, 对于传统“连续式”的脉冲激光器而言, 高重复频率与大单脉冲能量通常是难以兼得的<sup>[12-13]</sup>。在实际应用中, 考虑到流场变化大部分在短时间内 (几十毫秒) 完成, 因此用于 PLIF 诊断系统的激光光源并不需要长时间连续工作, 而只需要在诊断的短时间内以高重复频率工作即可。因此, 针对 PLIF 诊断系统的工作特点, J. M. Huntley 等<sup>[14]</sup>提出了一种新式的脉冲输出方案, 即“脉冲串”激光输出。脉冲串激光是指在一段时间内输出连续脉冲的激光器, 由于工作时间较短, 可以有效降低热效应给激光运转稳定性带来的负面影响, 保证高重复频率运转的条件下实现大能量脉冲激光输出, 这可从一定程度上解决传统“连续式”全固态脉冲激光器中高重复频率和大脉冲能量难以兼得的问题。

基于脉冲串技术的激光光源, 由于可实现一段时间内的高重复频率与大脉冲能量输出, 是目前用于高速 PLIF 成像诊断技术的最合适的光源。本文针对脉冲串激光的实现手段和脉冲串激光的研究现状, 综述了用于高速 PLIF 诊断技术

的脉冲串激光器。

## 2 脉冲串激光实现方案

脉冲串激光是指在一段时间内具有“连续式”脉冲输出的激光, 其输出脉冲示意图如图 1 所示。衡量脉冲串激光的常用参数主要有: 脉冲串重复频率  $f$ , 脉冲串内子脉冲间隔  $t$ , 脉冲串内子脉冲个数  $N$  等。目前, 脉冲串激光输出大体可通过腔外调制和腔内调制两种方法实现。

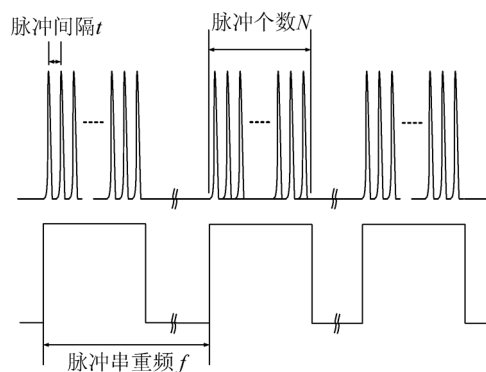


图 1 脉冲串示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse trains

### 2.1 基于腔外调制的脉冲串实现方案

腔外调制的脉冲串激光输出方案, 是指利用调制器 (声光或电光) 对激光器产生的高重复频率激光或连续激光进行腔外调制, 通过改变调制信号在腔外实现一段时间的脉冲选取, 选取具有良好频率特性及稳定性高且持续时间和脉冲个数任意可调的激光脉冲作为种子源, 以此实现脉冲串激光输出。此种情况下获得的脉冲串激光单脉冲能量通常较小, 在 nJ~ $\mu$ J 量级。为满足 PLIF 诊断需要, 通常会选择对腔外调制获得的脉冲串激光进行 MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 放大, 即通过多程放大技术实现高重复、大能量的脉冲串激光输出。其典型结构如图 2 所示, 利用一个商品化激光器输出激光作为待调制光, 该激光在  $M_1$  和  $M_3$  构成的谐振腔之间形成振荡, 在振荡过程中经过了一个一级双程预放大提高激光能量, 再通过  $M_3$  输出镜将预放大后的激光输出, 然后通过电光 (或声光) 装置将它调制成脉冲个数及间隔可调的脉冲串激光。进而将它作为种子脉冲注入到 MOPA 中进行放大, 最终可形成高重复、大能量的脉冲串激光。

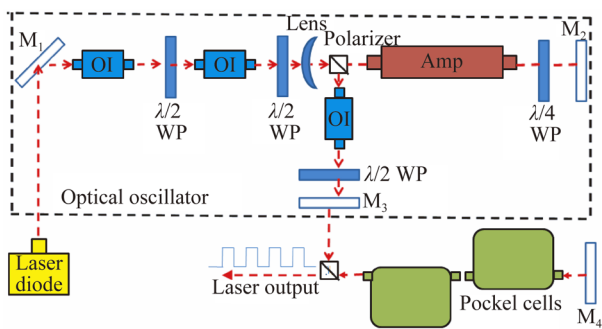


图 2 脉冲串激光器腔外调制结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of external cavity modulated pulse burst laser system

2000 年,普林斯顿大学的 Wu 和 Miles<sup>[15]</sup> 将一个二极管泵浦的窄线宽 Nd:YAG 激光器作为待调制光,利用一对定制的普克尔器盒作为脉冲切割器以获得脉冲串激光输出,然后让输出的激光脉冲通过 5 个放大器,最终使得激光器以高达 1 MHz 的重复频率工作。一个脉冲串中包括超过 30 个脉冲,平均脉冲能量为 70 mJ,结合工作频率为兆赫兹的 CCD 相机,实现了激波与边界层相互作用的可视化,探测重复频率高达 500 kHz,其具体结构如图 3 所示。这是国际上首次报道的重复频率 MHz 级、单脉冲能量在几十毫焦级的高重频大能量脉冲串激光。

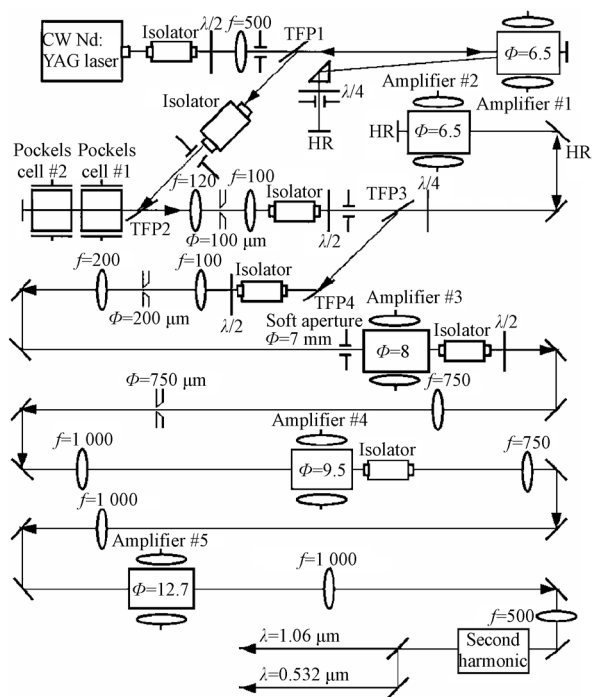


图 3 脉冲串激光装置示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of pulse-burst laser system

2008 年,俄亥俄州立大学的 Jiang 等<sup>[16]</sup> 利用连续波二极管泵浦的 Nd:YAG 环形激光器作为主振荡器,其输出激光在双程闪光灯泵浦的脉冲放大器中预放大,之后利用定制的普克尔盒调制所产生的脉冲,其输出的脉冲串激光在 4 个闪光灯泵浦的放大器中进一步放大。此激光器实现了子脉冲间隔 20 μs、单脉冲能量 230 mJ 的脉冲串激光输出;同时,在子脉冲间隔为 50 μs 时单脉冲能量高达 400 mJ。当脉冲串持续时间增加到 1 ms 时,脉冲串均匀性提高到 5% 左右(甚至更好),并在 500 kHz 的 Mach 3 风洞中获得了时间相关的 NO-PLIF 图像序列,如图 4 所示。

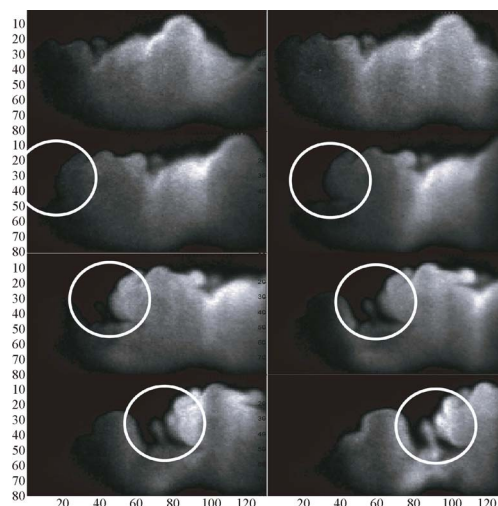


图 4 500 kHz 重频 Mach 3 风洞的 NO-PLIF 图像<sup>[16]</sup>

Fig. 4 NO-PLIF image sequence of Mach 3 obtained at 500 kHz burst frequency

2012 年,美国光谱能量公司的 Slipchenko 等<sup>[17]</sup> 将光纤激光器作为主振荡器并结合电光调制器,采用二极管泵浦的 Nd:YAG 放大器,利用三次谐波 354.8 nm 激光对甲烷-空气扩散火焰中甲醛的高速 PLIF 进行了评价。分别以 10 kHz 和 20 kHz 的重复频率获得了 100 幅和 200 幅非定常流体-火焰相互作用的连续图像。该系统采用的放大器与闪光灯泵浦的放大器相比有更高的效率,将之前所报道的脉冲串激光系统的持续时间提高了将近十倍,并首次以 20 kHz 的重复频率在甲烷-空气扩散火焰中进行了甲醛的高速 PLIF 实验。但由于二极管波长随温度变化等因素的影响,脉冲持续时间被限制在 10 ms 以内。该激光系统的结构示意图如图 5 所示。

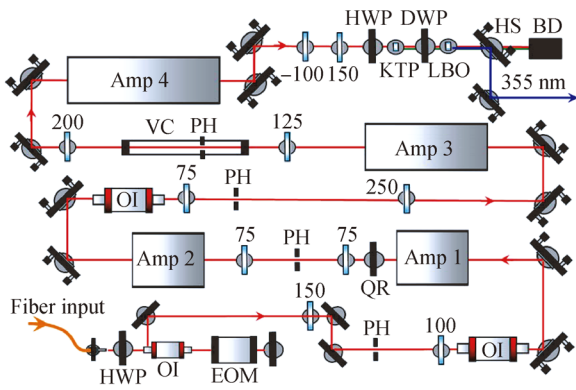


图 5 美国光谱能量公司脉冲串激光器示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of burst-mode laser system of Spectral Energies of USA

在此基础之上,2013 年美国光谱能量公司的 Slipchenko 和 Miller 等<sup>[18]</sup> 又利用两个单程二极管泵浦放大器和一个双程二极管泵浦放大器,将脉冲串持续时间增加至 30 ms,并开展了 354.8 nm 的甲醛 PLIF 实验。激光在 1 064.3 nm 处的单脉冲能量为 120 mJ,重复频率为 10 kHz,满足基于拉曼散射和瑞利散射的平面激光诊断应用。此激光器的示意图如图 6 所示,另外两图分别为放大器的单通和双通增益与二极管驱动电流的关系和单脉冲能量与脉冲重复频率的关系。

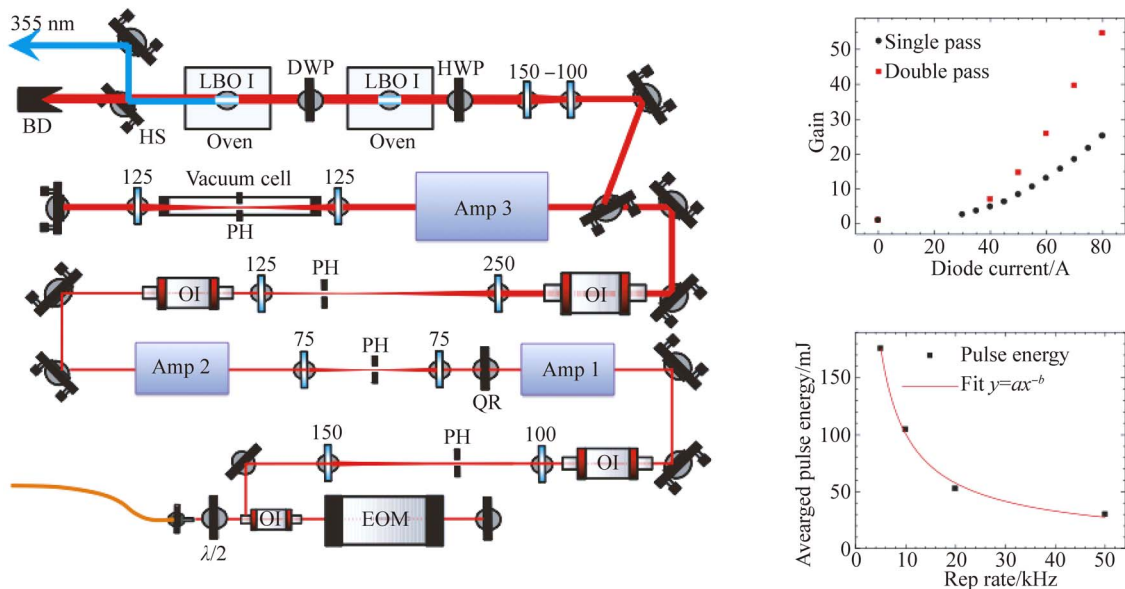


图 6 美国光谱能量公司 10 kHz 的脉冲串激光器示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of 10 kHz burst-mode laser system of Spectral Energies of USA

Slipchenko 等在研究过程中发现,当重复频率超过 5 kHz,脉冲序列的持续时间超过 30 ms 时,脉冲串激光的输出性能受限于二极管波长随温度的变化。为减小波长漂移带来的不利影响,使脉冲持续时间更长并在此更长的持续时间内达到更高的重复频率,2014 年 Slipchenko 等<sup>[19]</sup> 采用双波长泵浦方式,对获得的脉冲串种子光利用三对二极管泵浦的 Nd : YAG 放大器(Nd 掺杂浓度 0.6 at. %)进行功率放大,在 100 ms 泵浦时间内,子脉冲重频为 10 kHz 和 100 kHz 时的脉冲串能量分别达到 225 J 和 400 J。研究中还发现,这种激光器结构与先前 10 ms 泵浦时间的设计相比,脉冲能量在整个脉冲串中具有极好的均匀性。Slipchenko 等改进的脉冲串激光器实验装置

如图 7 所示。

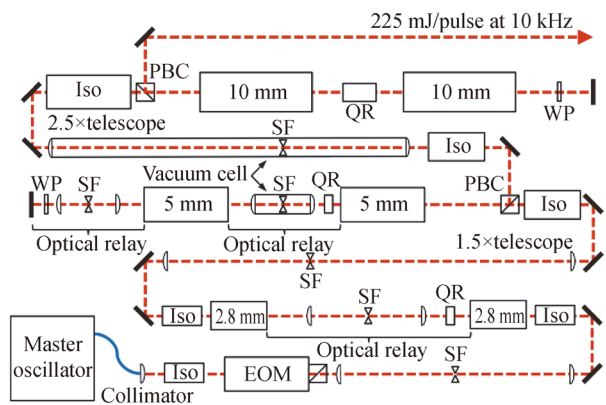


图 7 Slipchenko 等研制的脉冲串激光器结构示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of burst-mode laser system developed by Slipchenko et al.

2017年,普渡大学的 Smyser 等<sup>[20]</sup>报道了一种能在 kHz~MHz 频率条件下稳定工作、基于闪光灯泵浦 Nd:YAG 的紧凑型(0.18 m<sup>2</sup>)MOPA 脉冲串激光器系统。其基本输出波长为 1 064 nm,每个脉冲串内能量超过了 14 J。在最低重频下,系统在 10 ms 的脉冲串内产生 50 个脉冲单峰或双峰序列,每个串的总能量为 2.5 J(1 064 nm)。当重频为 1 MHz 时,在 1 064 nm 处每个脉冲串的总能量增加至 14 J。Smyser 等采用灵活的脉宽来平衡双脉冲能量分布,使二次谐波的转换效率达到了 42%,同时还进一步评估了波长在 1 064 nm 处脉冲单峰的实用性,即使用激光感应白炽度(Laser-Induced Incandescence, LII)和 532 nm 处脉冲双峰检测烟尘体积分数,以测量 kHz~MHz 速率下的平面速度。该脉冲串激光器系统紧凑简便,具有较高的能量以及脉冲稳定性,可以在长达 10 ms 的时间内用 kHz~MHz 带宽实现速度和种类的准确测量。其实验装置如图 8 所示。

2018年,德国埃尔兰根-纽伦堡大学的 Pan 等<sup>[21]</sup>使用一个倍频的 Nd:YAG 脉冲串激光器(通过腔外调制获得)来泵浦一个定制的染料激光系统,分别在重频为 7.5, 10 和 20 kHz 下获得了

566 nm 处的高能量脉冲。继续倍频,得到了每脉冲能量为 2.2 mJ 的 283 nm 激光。此波长下的激光能量足以用于燃烧自由基的 PLIF 诊断成像。在产生相同波长脉冲下,该脉冲能量与连续脉冲染料激光系统相比,每脉冲能量高出一个数量级,总效率也比脉冲串光学参量振荡器高出约 3 倍。同时,通过测量不同波长下的脉冲波形,也分析了不同重频下脉冲串的波动性,283 nm 波长处的整体波动为 8%。这种能够产生较为稳定脉冲的激光系统显示了高速 OH-PLIF 诊断研究的巨大潜力,其装置示意图如图 9 所示。

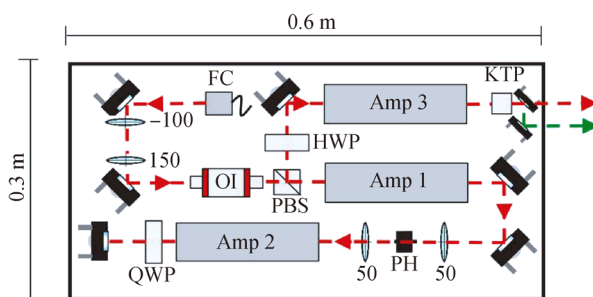


图 8 Smyser 等研制的脉冲串激光器实验装置图<sup>[20]</sup>

Fig. 8 Schematic of burst-mode laser developed by Smyser *et al.*

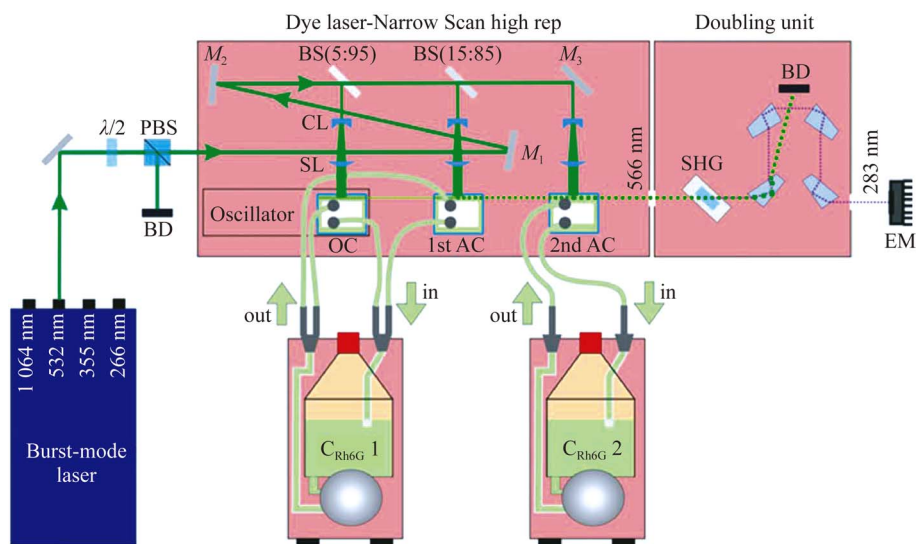


图 9 Pan 等研制的脉冲串染料激光系统实验装置图<sup>[21]</sup>

Fig. 9 Schematic of burst-mode dye laser system developed by Pan *et al.*

## 2.2 基于腔内调制的脉冲串输出方案

区别于腔外调制,腔内调制法是指在激光谐振腔内放置调制元件改变谐振腔参量从而实现激光输出特性的控制。在这种方案下,泵浦源通

常以脉冲方式工作,且泵浦时间可调;在泵浦时间内进行调 Q 操作,最终获得脉冲串激光输出。

腔内调制示意图如图 10 所示。激光二极管泵浦源采用脉冲方式工作,通过在 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 构成的

谐振腔内加入调 Q 开关便可直接实现激光脉冲串输出。谐振腔内插入的 Q 开关可以是声光 Q 开关、电光 Q 开关或者被动可饱和吸收体 Q 开关。

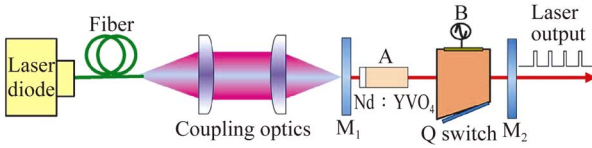


图 10 腔内调制的脉冲串激光器装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of external cavity modulated pulse burst laser system

2006 年,中国科学院物理研究所彭钦军等<sup>[22]</sup>利用 6 个相同的 400 W 级准连续半导体激光侧泵激光头串接振荡的系统方案,采用高效抽运耦合、高效冷却、大基模体积谐振腔、多级串接热补偿以及最佳输出耦合优化等设计,产生了高质量准连续的脉冲串激光。当准连续半导体激光抽运的平均功率为 3 750 W 时,激光输出的平均功率达 1 906 W,光-光转换效率为 50.8%。在此输出功率下,测得激光重复频率为 1.1 kHz,脉冲宽度为 224  $\mu$ s。其实验装置如图 11 所示。

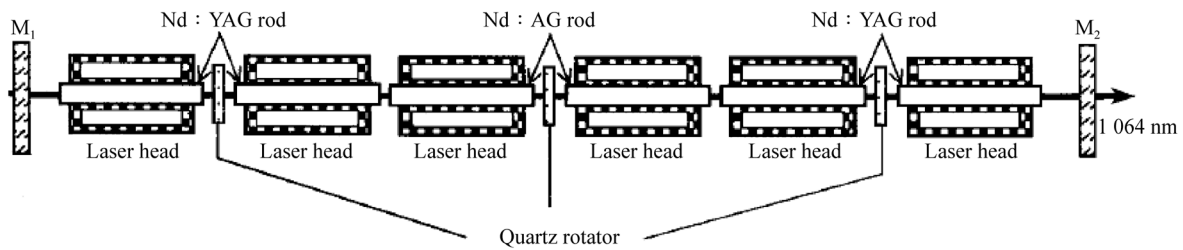


图 11 彭钦军等研制的脉冲串激光器实验装置<sup>[22]</sup>

Fig. 11 Schematic of burst-mode laser developed by PENG *et al.*

2010 年,北京理工大学的刘嘉巍等<sup>[23]</sup>设计了一台高能量输出的电光调 Q Nd:YAG 脉冲串激光器,实现了对脉冲串重复频率、脉冲数目、脉冲间隔的调节。当重复频率为 1~10 Hz 时,每一个脉冲串内含有 1~3 个脉,其间隔大于 200  $\mu$ s 且可调。同时还采用了平凸腔的结构,对一定重频下的热透镜效应进行补偿。在 10 Hz 的重频下获得了稳定的激光输出。

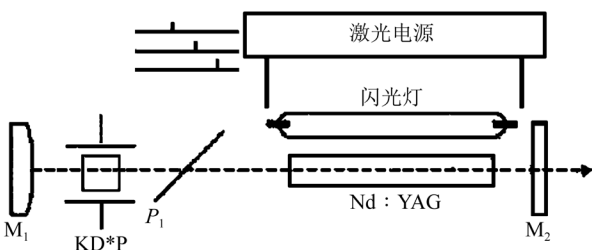


图 12 刘嘉巍等研制的的脉冲串激光器实验装置图<sup>[23]</sup>

Fig. 12 Schematic of burst-mode laser developed by LIU *et al.*

其典型的实验结果为:当重频为 10 Hz、脉冲间隔为 548  $\mu$ s 时,三脉冲最大输出能量为 608 mJ,双脉冲最大输出能量为 405 mJ,单脉冲最大输出能量为 200 mJ,其中单个脉冲的脉宽约为 8 ns,发散角为 3.4 mrad。根据现有的实验数据,激光光束经过扩束准直后可满足远程测距激光雷达的探测需求。其实验装置如图 12 所示。

2012 年,华北光电技术研究所的李宏斌等<sup>[24]</sup>以激光测距机为主要应用背景,采用紧包漫反射聚光腔单只氙灯泵浦 Nd:YAG,应用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体被动调 Q 技术,获得了脉冲串内含 3 个间隔为 200~500  $\mu$ s 可调的高峰值功率激光脉冲,实现了稳定的脉冲串方式工作状态。在 10 Hz 频率下,脉冲串输出能量大于 800 mJ。同时,该激光器在设计上还利用有限元分析软件分析了冷却液流路,改进了聚光腔端盖结构设计,提高了激光器的环境适应性及器件可靠性。其实验装置如图 13 所示。

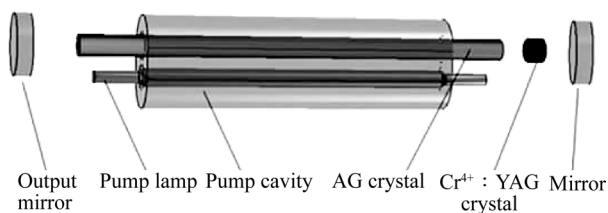


图 13 李宏斌等设计的激光器实验装置<sup>[24]</sup>

Fig. 13 Schematic of burst-mode laser developed by LI *et al.*

2016 年,哈尔滨工业大学的 Pan 等<sup>[25]</sup>采用 878.6 nm 直接泵浦方式,利用声光调 Q 实现了一种紧凑的高峰值功率、高重复频率的 Nd:YVO<sub>4</sub> 1 064 nm 脉冲串激光器。在泵浦重频为 10 Hz,泵浦时间 1 ms 内,声光调 Q 重频为 10~100 kHz 下,获得了 10~100 个子脉冲的脉冲串激光。在 108.5 mJ 的入射泵浦能量下,脉冲串能量达到 44 mJ,单脉冲最大峰值功率为 468.1 kW,脉冲宽度为 9.4 ns,脉冲光强分布如图 14 所示。

同年,哈尔滨工业大学李旭东等<sup>[26]</sup>进一步开展了脉冲持续时间为 2 ms 的脉冲串激光器的研究工作。利用脉冲 LD 端面泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub>

声光调 Q 激光器作为主振荡器,LD 侧泵 Nd:YAG 作为功率放大器,实现了 10~100 kHz 的 1 064 nm 脉冲串激光输出。振荡级输出光经过 3 个 LD 侧面泵浦的 Nd:YAG 放大器后,重频 10 kHz 的脉冲串激光器的单脉冲能量达到 73 mJ,峰值功率为 7.8 MW。此激光器具有 kHz 的高重复频率,峰值功率达到兆瓦级别,且脉冲的重复性较好。其实验装置如图 15 所示。将该装置集成到 10 kHz-PLIF 成像装置中,获得了酒精喷灯火焰 OH-PLIF 图像序列,如图 16 所示。

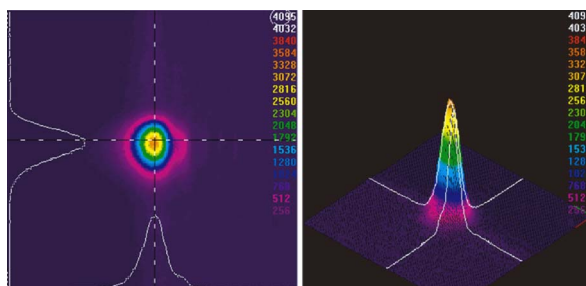


图 14 脉冲串激光器输出激光光束分布<sup>[25]</sup>

Fig. 14 Beam distribution of burst-mode laser

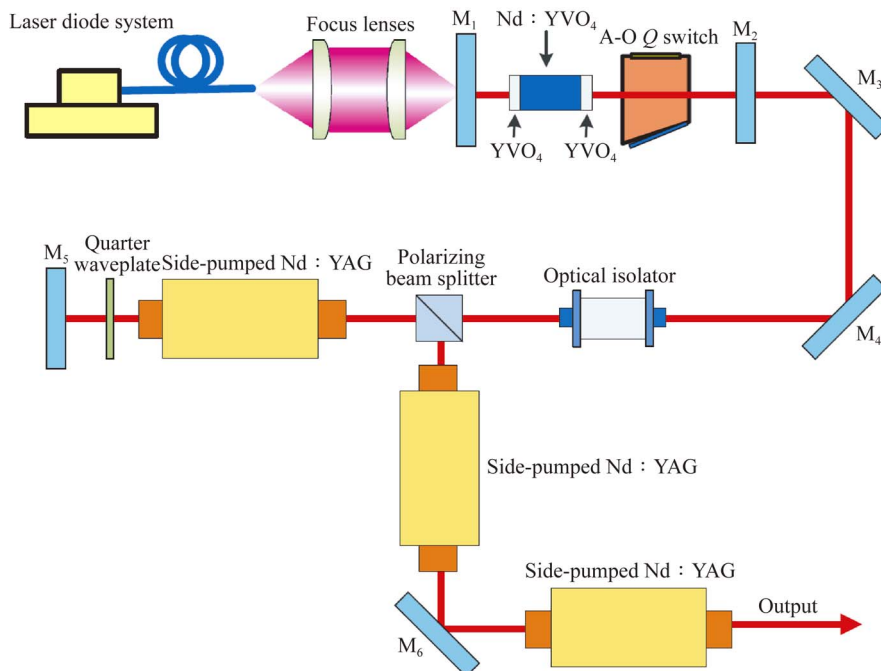


图 15 哈尔滨工业大学研制的脉冲串激光器装置示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 15 Schematic diagram of burst-mode laser developed by Harbin Institute of Technology

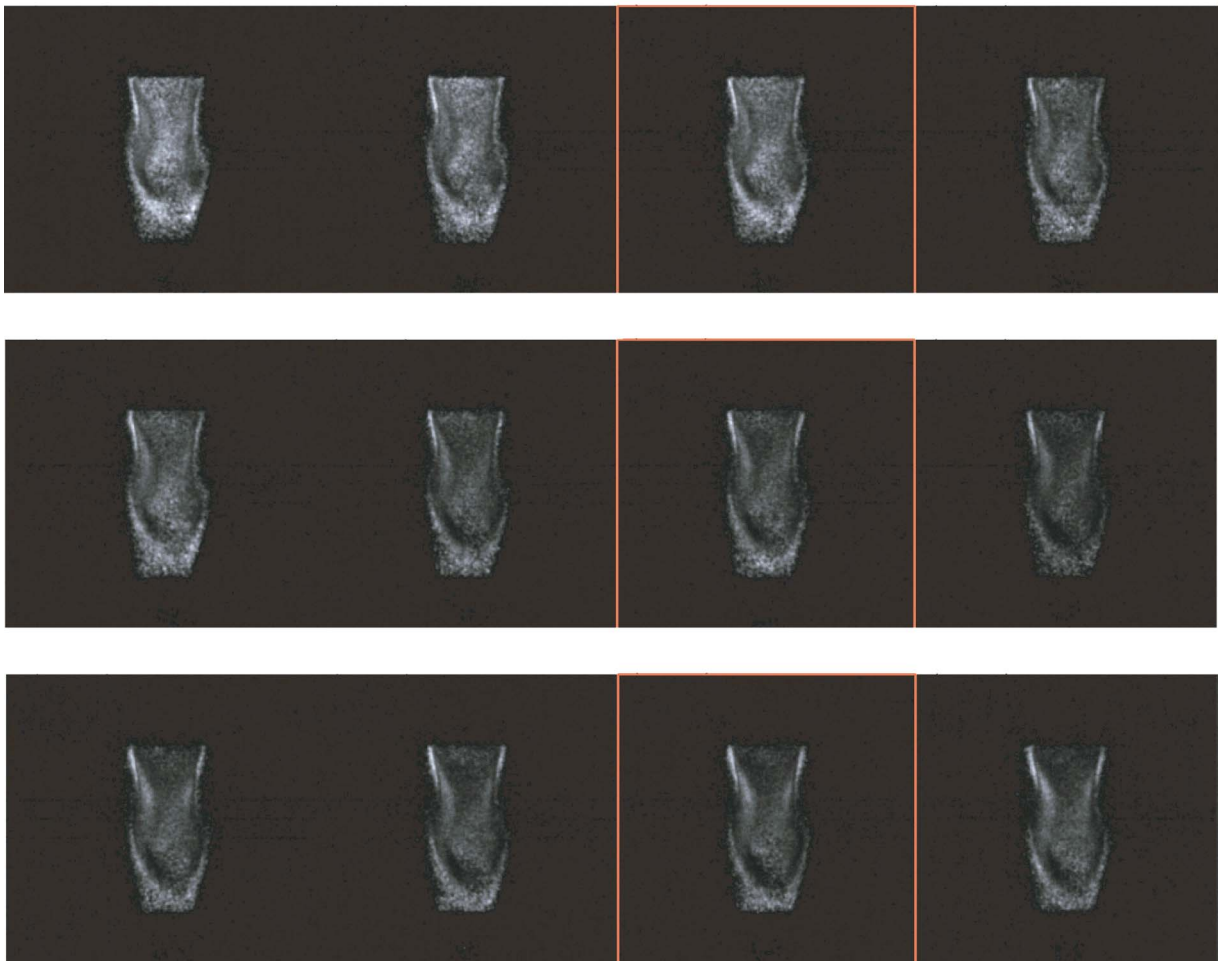


图 16 酒精喷灯火焰 OH-PLIF 图像序列(10 kHz)

Fig. 16 OH-PLIF image sequence of alcohol burner flame

2017年,哈尔滨工业大学武文涛等<sup>[27]</sup>为进一步压缩脉宽,采用脉冲LD侧泵Nd:YAG电光调Q腔倒空的方法获得窄脉宽的脉冲串种子激光,利用2个侧泵模块作为放大级对脉冲串种子激光进行放大,最终实现了窄脉宽、大能量的脉冲串激光输出。在泵浦时间为2ms、泵浦频率为10Hz,Q开关重复频率为100kHz时,脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度分别达到1.89J,2.87MW和 $(3.1\pm 0.3)$ ns,放大级的最大能量提取效率达到30%。其实验装置示意图如图17所示。

2017年,哈尔滨工业大学又开展了基于被动调Q的脉冲串激光器的研究工作<sup>[28]</sup>。采用复合YAG/Nd:YAG/Cr:YAG晶体作为激光介质和可饱和吸收体,利用885nm激光二极管直接泵浦被动调Q的方法,实现了高重频、窄脉宽的脉冲串激光输出。经过优化,实现了脉宽为1.4ns的1064nm脉冲串激光。当最大泵浦能量为124.6mJ时,重复率达到86.3kHz,单脉冲能量达到239 $\mu$ J,峰值功率达到117.2kW。此激光器由于采用被动调Q方式,结构简单、脉宽很窄。其实验装置如图18所示。

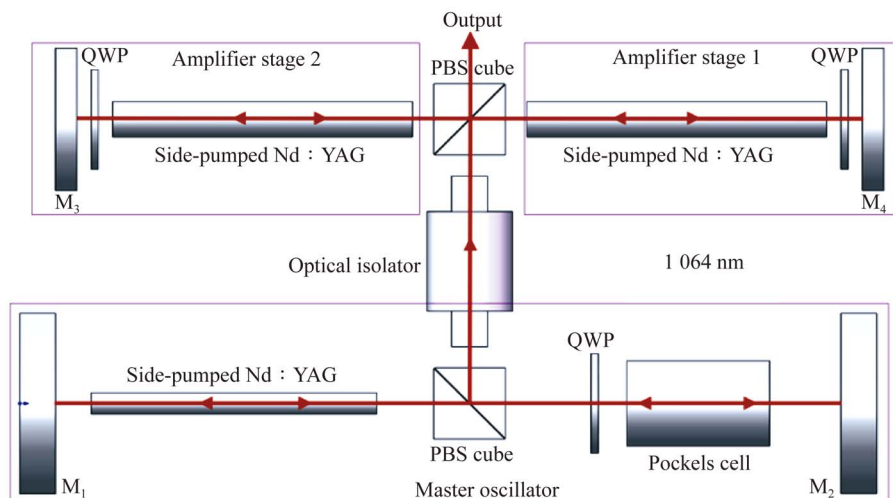
图 17 腔倒空窄脉宽脉冲串激光器实验装置示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of experimental device for cavity-dumped narrow pulse-width burst-mode laser

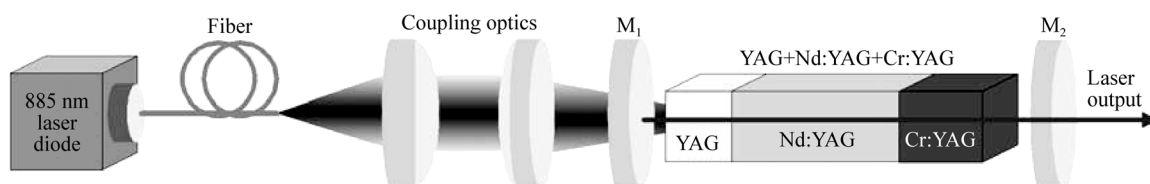
图 18 基于被动调 Q 的脉冲串激光器装置示意图<sup>[28]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of burst-mode laser device based on passive Q-switching

### 3 脉冲串输出方案对比

纵观国内外脉冲串激光器的发展现状可看出,实现脉冲串激光输出的方案主要有腔外调制和脉冲泵浦腔内调制法。这两种方法针对不同的应用需求,其优缺点也各有不同。基于腔外调制获得脉冲串激光输出的方案,从技术手段来讲较为简单,只需要对一个商品化的单频激光器进行外部调制则可以获得任意参量的脉冲串激光,最短脉冲间隔可达  $\mu\text{s}$  量级,其余的工作则是对激光放大器的设计以获得满足应用需求的脉冲能量。不过,这种方案较为不利的一点则是:调制后产生的脉冲串种子光能量很小( $\text{nJ} \sim \mu\text{J}$  量级),从而加大了后续激光放大系统设计的难度和复杂度。因此,通常利用这种方法研制的脉冲串激光系统结构复杂、体积庞大,在实际应用中会带来诸多不便。此种脉冲串激光器输出能量大,可输出单频激光,适合用于泵浦光学参量振荡器获得可调谐激光输出。基于脉冲泵浦腔内调制获得脉冲串激

光输出的方案,技术方案较为简单,由于采用腔内调制的方法,输出的脉冲串种子光单脉冲能量较高( $\text{mJ}$  量级),因此后续激光放大系统的设计难度要小,激光系统不至于非常庞大。此种脉冲串激光器适合用于泵浦染料激光器并获得可调谐激光输出。综上所述,根据实际应用场合,可选用不同的脉冲串激光实现方案。

### 4 结 论

利用高速 PLIF 成像诊断技术可以捕捉高速流场和燃烧场中的信息,对于新一代超高速飞行器、姿轨控发动机以及大型燃气轮机的设计和研制具有重要意义。脉冲串工作模式的激光器,特别适用于高速 PLIF 成像诊断技术中,且由于其间歇式高重频工作,可以有效降低热效应对激光器稳定运转带来的负面影响,很好地解决了常规“连续式”全固态脉冲激光器中高重复频率与大脉冲能量难以兼顾输出的问题。本文主要综述了脉冲串激光器的特点、工作原理以及近年来脉冲串激光器的国内

外研究状况。综合近些年高速激光诊断技术的发展状况,为满足高速流场、燃烧场的诊断需求,未来应用于高速激光诊断应用的脉冲串激光器将更加专注于以下几方面的研究:一是提高脉冲串中子脉冲的重复频率,达 MHz 量级或更高,以满足动态变化尺度在  $\mu\text{s}$  量级的高速非稳流场的诊断需求;二

是增加脉冲串持续时间,以实现高速流场完整变化范围内的高速诊断;三是改善脉冲串中脉冲的一致性,这其中包括子脉冲能量稳定性及子脉冲光斑尺寸一致性等。另外,为应对高速流场和燃烧场诊断环境的复杂性,对脉冲串激光器系统的高可靠性和工程设计也是今后的研究重点。

### 参考文献:

- [1] BOXX I, SLABAUGH C, KUTNE P, *et al.*. 3 kHz PIV/OH-PLIF measurements in a gas turbine combustor at elevated pressure [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3793-3802.
- [2] MANSOUR M S, ALKHESHO I, CHUNG S H. Stabilization and structure of *n*-heptane flame on CWJ-spray burner with kHz SPIV and OH-PLIF [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 73: 18-26.
- [3] MA L, WU Y, XU W J, *et al.*. Comparison of 2D and 3D flame topography measured by planar laser-induced fluorescence and tomographic chemiluminescence [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(20): 5310.
- [4] RICHARDSON D R, SUKESH R, GORD J R. Femtosecond, two-photon, planar laser-induced fluorescence of carbon monoxide in flames [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 875.
- [5] 胡洋, 尹尚先, ARNTZENJ. BJØRN, 等. 矿井瓦斯/空气预混气体爆燃研究中的激光纹影测试系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1045-1051. HU Y, YIN SH X, ARNTZENJ. BJØRN, *et al.*. Design of laser schlieren test system for mine gas/air premixed gas deflagration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1045-1051. (in Chinese)
- [6] 李星, 蒋利桥, 杨浩林, 等. 利用平面激光诱导荧光技术及 CH 滤镜测量微喷管射流火焰 OH 及 CH 基元 [J]. *光学精密工程*, 2017(5): 1119-1125. LI X, JIANG L Q, YANG H L, *et al.*. Measurement of OH and CH radicals in micro-jet flames using planar laser induced fluorescence and CH filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017(5): 1119-1125. (in Chinese)
- [7] THUROW B, JIANG N B, LEMPERS W. Review of ultra-high repetition rate laser diagnostics for fluid dynamic measurements [J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 24(1): 012002.
- [8] BECKER H, ARNOLD A, SUNTZ R, *et al.*. Investigation of flame structure and burning behaviour in an IC engine simulator by 2D-LIF of OH radicals [J]. *Applied Physics B*, 1990, 50(6): 473-478.
- [9] KAMINSKI C, HULT J, ALDÉN M. High repetition rate planar laser induced fluorescence of OH in a turbulent non-premixed flame [J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(4): 757-760.
- [10] 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 284-296. LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [11] 王晟, 刘晶儒, 胡志云, 等. 用于燃烧场诊断的分子滤波瑞利散射技术 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 445-451. WANG SH, LIU J R, HU ZH Y, *et al.*. Development of filtered Rayleigh scattering for combustion diagnostic application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 445-451. (in Chinese)
- [12] KHAN M H, SINK R K, MANSTEIN D, *et al.*. Intradermally focused infrared laser pulses: Thermal effects at defined tissue depths [J]. *Lasers in Surgery & Medicine*, 2005, 36(4): 270-280.
- [13] ZHU S Q, JIANG W, LIU Y M, *et al.*. Pulse fluctuations caused by the thermal lens effect in a passively Q-switched laser system [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2015, 36(4): 377-384.
- [14] HUNTLEY J M. High-speed laser speckle photography. Part 1: repetitively Q-switched ruby laser light source [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(5): 1692-1699.
- [15] WU P P, MILES R B. High-energy pulse-burst laser system for megahertz-rate flow visualization [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(22): 1639-1641.
- [16] JIANG N B, WEBSTER M C, LEMPERS W R. Advances in generation of high-repetition-rate burst mode laser output [J]. *Appl Opt*, 2009, 48

- (4): 23-31.
- [17] SLIPCHENKO M N, MILLER J D, ROY S, *et al.*. Quasi-continuous burst-mode laser for high-speed planar imaging [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1346.
- [18] SLIPCHENKO M N, MILLER J D, ROY S, *et al.*. All-diode-pumped quasi-continuous burst-mode laser for extended high-speed planar imaging [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 681-689.
- [19] SLIPCHENKO M N, MILLER J D, ROY S, *et al.*. 100 kHz, 100 ms, 400 J burst-mode laser with dual-wavelength diode-pumped amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4735-4738.
- [20] SMYSER M E, RAHMAN K A, SLIPCHENKO M N, *et al.*. Compact burst-mode Nd:YAG laser for kHz-MHz bandwidth velocity and species measurements [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 735.
- [21] PAN R C, RETZER U, WERBLINSKI T, *et al.*. Generation of high-energy, kilohertz-rate narrow-band tunable ultraviolet pulses using a burst-mode dye laser system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1191.
- [22] 彭钦军, 张鸿博, 薄勇, 等. 1 906 W 高效准连续全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1318.
- PENG Q J, ZHANG H B, BO Y, *et al.*. 1 906 W highly efficient quasi-continuous-wave all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(10): 1318. (in Chinese)
- [23] 刘嘉巍, 高春清, 王磊, 等. 电光调 Q 脉冲串 Nd:YAG 激光器研究 [J]. *光学技术*, 2010, 36(5): 154-157.
- LIU J W, GAO C Q, WANG L, *et al.*. Study on multi-pulse of high power electro-optical Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 154-157. (in Chinese)
- [24] 李宏斌, 董怡, 王鹏飞, 等. 被动调 Q 高功率脉冲串激光器 [J]. *激光与红外*, 2012(7): 762-765.
- LI H B, DONG Y, WANG P F, *et al.*. Passively Q-switched high power burst laser [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 762-765. (in Chinese)
- [25] PAN H, YAN R P, FA X, *et al.*. High-peak-power, high-repetition-rate LD end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> burst mode laser [J]. *Optical Review*, 2016, 23(3): 386-390.
- [26] LI X D, YAN R P, ZHOU Y P, *et al.*. Laser-diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:YAG MOPA burst-mode laser [J]. *Optical Review*, 2017, 24(5): 611-616.
- [27] WU W T, LI X D, YAN R P, *et al.*. 100 kHz, 31 ns, 189 J cavity-dumped burst-mode Nd:YAG MOPA laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26875.
- [28] LI X D, ZHOU Y P, YAN R P, *et al.*. A compact YAG/Nd:YAG/Cr:YAG passively Q-switched pulse burst laser pumped by 885 nm laser diode [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2017, 38(4): 387-391.

## 作者简介:



李旭东(1980—),男,山东莱州人,博士,副研究员,博士生导师,2005年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事固体激光技术的研究。E-mail: kevin2025@163.com

## 通讯作者:



闫仁鹏(1986—),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,硕士生导师,2010年、2015年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事固体激光技术及应用的研究。E-mail: yanrenpeng@126.com