

激光与光电子学进展

高重复频率大能量簇式脉冲输出激光器技术

陈忆兰^{1,2}, 朱小磊^{1,2*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 簇式脉冲输出激光器在非平面激光诱导荧光诊断、激光精细加工、激光遥感探测等领域具有广泛的应用前景。根据技术路线不同,系统阐述了基于调制选取脉冲法和基于泵浦脉冲调Q法实现的簇式脉冲序列输出的激光器发展历程,着重分析了各自的技术特点,并对簇式脉冲序列输出激光器的发展趋势进行了展望。

关键词 激光技术; 簇式脉冲激光器; 高重复频率; 大能量; 主振荡功率放大技术

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1700003

Burst-Mode Laser Technology with High Repetition Frequency and High Pulse Energy Output

Chen Yilan^{1,2}, Zhu Xiaolei^{1,2*}¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Burst-mode lasers have wide applications in nonplanar laser-induced fluorescence diagnosis, laser fine processing, and laser remote sensing detection. Based on the different key technical schemes, the research progresses of burst-mode lasers based on pulse-slicer method and pump pulse Q-switched method are summarized respectively, analyzing their technical characteristics in detail, and the development tendency of burst-mode lasers is prospected.

Key words laser technique; burst-mode laser; high repetition frequency; high energy; master-oscillator and power-amplifier technology

OCIS codes 140.3538; 140.3580; 140.3460

1 引言

自1960年激光器发明以来,激光技术在医疗、生物、科研、工业等领域得到越来越普遍的应用^[1-2]。而高重复频率、大能量脉冲激光器因具有脉冲峰值功率高、脉冲间隔时间短等特性,在激光主动照明

瞬态成像^[3-4]、高空间分辨率激光探测^[5-6]、激光精细加工^[7-8]、高速率激光通信^[9-10]等应用领域显示出独特优势,尤其在基于高峰值功率激光脉冲的快速诊断、超高分辨率激光主动遥感、瞬变动态过程成像监测等特殊应用中,往往要求激光脉冲的重复频率大于1 kHz,有的甚至要求大于10 kHz^[3,11]。对于瞬

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-01-07; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 上海张江专项重大项目(ZJ2020-ZD-006)

通信作者: *xlzhu@siom.ac.cn

变动态过程的探测,为了有效降低背景噪声的干扰,提高信噪比,更是要求探测光脉冲具有高峰值功率的同时,满足足够短脉冲宽度的要求,或压缩激光脉冲的辐照时间。最典型的是,在非平面激光诱导荧光(PLIF)诊断系统中,由于被探测流场的时间变化尺度在 ms 量级甚至更短,传统的 PLIF 系统很难精确观测到动态变化的全过程,必须要求激光光源输出高重复频率的大能量激光脉冲序列,既能激发出足够强的荧光信号,又能实现足够高的荧光分辨率^[4, 12-13]。此外,在远距离激光雷达应用系统中,为了增加激光雷达探测时的空间网格点云密度和回波信号的信噪比,同样要求激光发射源具有输出高重复频率、大能量脉冲的能力^[14-16]。类似的,在激光精细加工应用中,高重复频率、大能量脉冲的激光器能高效地加热、熔融、气化材料,实现材料快速去除,获得较高的激光加工效率^[17-19]。

为了获得应用所需的大脉冲能量和高重复频率激光输出,半导体激光抽运的全固态激光器(DPSSL)是当前最有效的激光技术。全固态激光器不仅具有结构紧凑、电光效率高、稳定性好等优点,通过采用调 Q 技术和锁模技术,还可以获得高峰值功率激光脉冲输出。但是,随着激光输出重复频率的提高,当保持大脉冲能量激光输出时,激光器的平均功率随之提高,势必导致泵浦激光二极管(LD)和激光增益介质内部热功耗及热沉积显著增大,不但需要引入更强制冷能力的复杂冷却结构,而且固体激光增益介质内部产生严重的热效应(如热致双折射和热透镜效应)现象,造成激光器整体效率的下降和光束质量的劣化。很显然,LD 抽运全固态激光器的大脉冲能量输出和高重复频率运转存在相互制约的关系,并且两者往往是难以兼顾的^[20]。此外,对于此类高重复频率、大脉冲能量激光器,激光脉冲持续输出时,需要足够大的电功率输入,激光器结构和制冷系统规模庞大,严重制约了可使用平台的选择,在拓展应用领域方面受到严重限制。

目前,为了获得高重复频率激光脉冲输出,往往要牺牲脉冲能量。同样的,为了提升激光脉冲的输出能量,激光器的重复频率会被人为降低。为了解决全固态激光器同时获得高重复频率和大能量脉冲序列输出的技术难题,满足在诸如瞬态过程探测和特殊星载平台的应用要求,簇式激光脉冲输出的工作模式被巧妙地提出来,并被应用到实际中。所谓“簇式激光脉冲输出”,是指激光器驱动源工作

在低重复频率(典型的小于 10 Hz)的低占空比状态,而在每一个抽运脉冲包络内,激光器采用高速调制技术[电光调制器(EOM)或声光调制器(AOM)]实现高重复频率、大能量的调 Q 或锁模窄脉冲输出。激光器每个簇周期持续时间和每个簇周期内包含的激光脉冲个数可以按应用需求设计。簇式激光脉冲序列通过后续的激光脉冲放大器放大后,最终实现大脉冲能量和高重复频率的同时输出。而激光器本身,由于驱动源抽运簇脉冲占空比小,显著降低了整体的平均功率,长时间工作会产生热效应,热效应会对激光的光束质量、输出脉冲能量及稳定性会有影响。

针对簇式脉冲激光输出激光器的技术特点,本文综述了基于调制选取脉冲法和基于泵浦脉冲调 Q 法的簇式脉冲输出激光器的发展历程,分析了其技术特点和关键所在,最后对簇式脉冲输出激光器的发展趋势进行了展望。

2 簇式脉冲输出激光器

从表象上看,簇式脉冲输出激光是激光脉冲“间断式”输出的激光,其时序控制和输出激光脉冲序列分布如图 1 所示。在抽运脉冲持续时间内(简称簇脉冲包络),激光器输出高重复频率脉冲序列;在抽运脉冲持续时间外,无激光脉冲输出。这样,尽管输出激光脉冲具有很高的重复频率和脉冲能量,但由于抽运脉冲占空比相对较低,最终有效降低了激光器的平均功率,并显著减弱增益内部晶体热效应造成的负面影响。利用主振荡结合功率放大(MOPA)技术,可进一步提高输出激光脉冲能量。

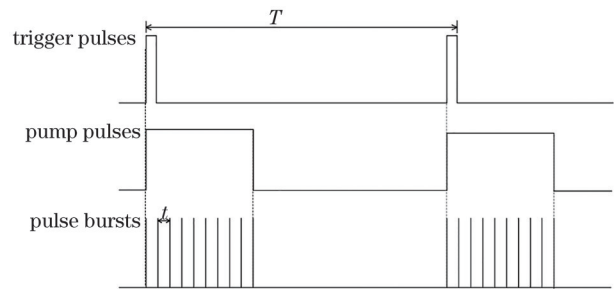


图 1 脉冲序列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse trains

目前,实现簇式脉冲激光输出主要有 3 种典型方法,多光束组合法^[21]、调制选取脉冲法^[22]、脉冲泵浦调 Q 法^[23]。多光束组合法需要在光路中配置多个激光振荡级和激光放大级,导致系统体积庞大,并且需要精确调控多组光束,存有较大的工程实现

难度,稳定性难以保障。因此,关于采用多光束组合法实现簇式脉冲输出的报道较少。调制选取脉冲法和脉冲泵浦调 Q 法已发展为获得簇式脉冲激光输出的主流方法。

2.1 基于外调制法的簇式脉冲输出激光器

外调制法选脉冲的原理是,由激光振荡器输出低功率、高重复频率脉冲激光或连续激光,通过对输出激光进行腔外调制,周期性选取片段脉冲序列,最后由多级激光放大器对片段脉冲序列进行能量放大,从而获得高重复频率大能量激光脉冲。外调制法具有简单易实现的特点,脉冲宽度和脉冲间隔主要由外调制器控制。2000 年,普林斯顿大学采用外调制法,以窄线宽 Nd:YAG 连续激光器作为种子光源,经过一级四程预放大器后,用一对普克尔盒对放

大后的连续激光进行脉冲调制,获得 500 kHz 重复频率的脉冲激光。调制后的脉冲激光再次经过一级双程预放大和三级主放大器放大,成功获得单脉冲能量为 10 mJ 的簇式脉冲激光输出,每个簇脉冲包络内激光脉冲个数为 1~99,簇脉冲的重复频率为 10 Hz,激光器结构示意图如图 2 所示^[24]。后续工作通过增加激光放大器数量,将单脉冲能量最终提升到了 60 mJ,脉冲宽度约为 20 ns。在控制簇脉冲包络内激光脉冲数为 30 的条件下,成功将重复频率提升到 1 MHz,成为文献报道的首个单个脉冲能量达到数十 mJ,重复频率达到 MHz 量级的簇式脉冲输出激光器。应用该激光源,结合能在 MHz 重复频率下工作的 CCD 相机,成功实现了激波和边界层相互作用的可视化探测,探测重复频率高达 500 kHz^[22]。

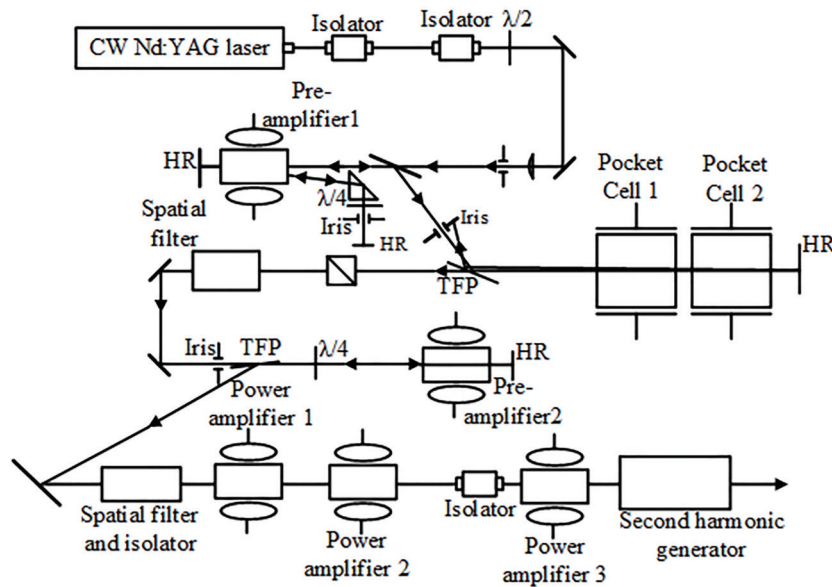


图 2 簇式脉冲输出激光器结构示意图^[24]

Fig. 2 Structure schematic of pulse-burst laser^[24]

立足于外调制法的思路,俄亥俄州立大学于 2004 年报道了第二代簇式脉冲输出激光器,最大的改进是在中继光路中插入相位共轭镜(PCM)保持光束质量,并达到显著抑制自发辐射放大(ASE)、消除脉冲基底的目的,提升激光脉冲对比度。该簇式脉冲输出激光器实现了单脉冲能量为 100 mJ、重复频率为 1 MHz、簇脉冲包络持续时间为 100~150 μs 的稳定输出,通过非线性谐波转换,首次获得绿光和紫外激光的簇式脉冲输出,拓展了输出激光波长。随后这台簇式脉冲输出激光器被成功应用于多普勒雷达中,用于高速流场的可视化探测,空间分辨率达到 1 mm,测速精度达到 15 m/s^[11]。2006 年,进一步采用泵浦脉宽调节技术,在重复频率被设置为 20 kHz

时,该簇式脉冲输出激光器单个脉冲能量被再一次提升至 400 mJ,簇脉冲包络持续时间为 1 ms,簇脉冲的重复频率为 10 Hz,脉冲能量不稳定性保持在 5% 以内^[16]。2012 年,这台簇式脉冲输出激光器最终被成功应用于 PLIF 诊断系统中,成像信号信噪比高达 55,为当时 kHz 尺度主动成像的最高信噪比^[3]。显然,这样的激光源,作为激光雷达的光发射源,具备显著提升远程探测距离和空间分辨率的能力。

由于常用的电光调制器(如 KDP 晶体普克尔盒)存在高驱动电压、高重复频率工作时的压电环效应,制约了激光脉冲重复频率的提高和使用便利性。2009 年,采用声光调制器的新一代簇式脉冲输出激光器首先被报道^[23],如图 3 所示。种子光源为

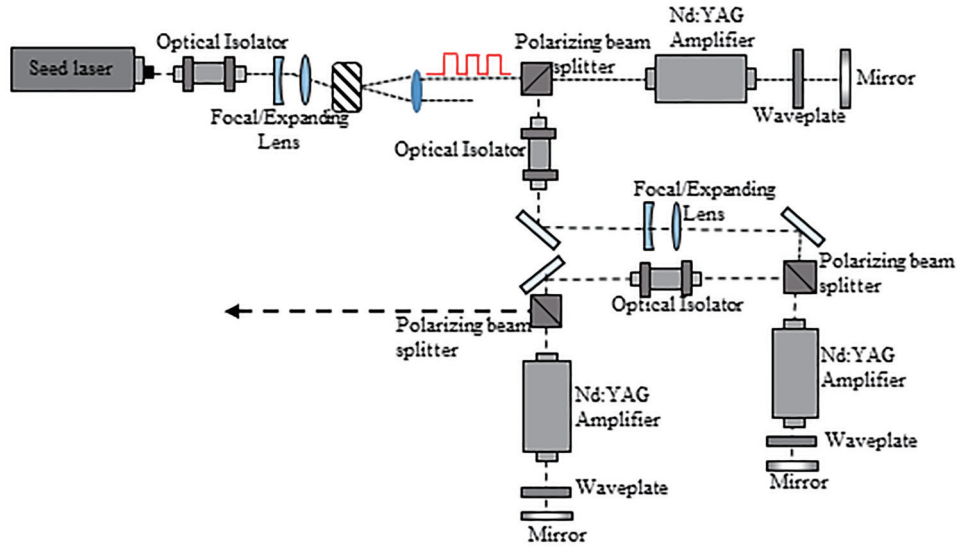


图 3 AOM腔外调制脉冲序列激光器结构示意图^[23]

Fig. 3 Structure schematic of AOM extra-cavity modulation pulse train laser^[23]

单频连续Nd:YAG激光器,经声光调制器实施脉冲选取,获得簇式脉冲序列,激光脉冲重复频率为1 MHz,簇脉冲包络持续时间为700 μs。簇脉冲序列经过透镜准直后进入第一级激光放大,激光束再往返两次λ/4波片后,激光偏振方向旋转90°,从偏振分束棱镜(PBS)输出。激光束经过后续透镜组扩束后,被后续三级单通、双通激光放大器链路放大,单脉冲能量被放大到100 mJ,脉冲消光比大于2000:1,激光脉冲间的间隔为20 ns~50 μs。很显然,采用声光调制器来产生脉冲序列,在有效提高脉冲重复频率的同时,更是可以主动调节激光单脉冲时间间隔,适应更多的应用场景。

2012年,美国光谱物理公司开发了连续输出光纤激光器作为种子源的外调制簇式脉冲输出全固态激光器。采用光纤激光器作为振荡器,振荡级输出脉冲重复频率为100 kHz,通过电光调制器控制

脉冲重复频率,再经过四级激光放大器(Amp 1~Amp 4)链路放大后,由非线性晶体KTP和LBO倍频、和频组合,实现三次谐波紫外355 nm激光脉冲输出,激光器结构如图4所示。采用激光二极管抽运,成功获得脉冲重复频率10 kHz条件下的单个脉冲最大能量为150 mJ的簇式输出,簇脉冲重复频率低至0.5 Hz,簇脉冲包络持续时间长达10 ms。利用其三倍频354.8 nm激光脉冲序列,在重复频率为10 kHz和20 kHz的条件下,分别测试了甲醛的高速PLIF,对应得到了100幅和200幅流体-火焰相互作用的连续图像,该项工作被认为是首次以20 kHz的重复频率在甲烷-空气扩散火焰中开展的甲醛高速PLIF实验^[25]。2013年,进一步采用全LD泵浦设计,并将簇脉冲包络持续时间延长至30 ms,降低簇脉冲重复频率至0.25 Hz,同样在激光脉冲重复频率为10 kHz的条件下,获得单个脉冲

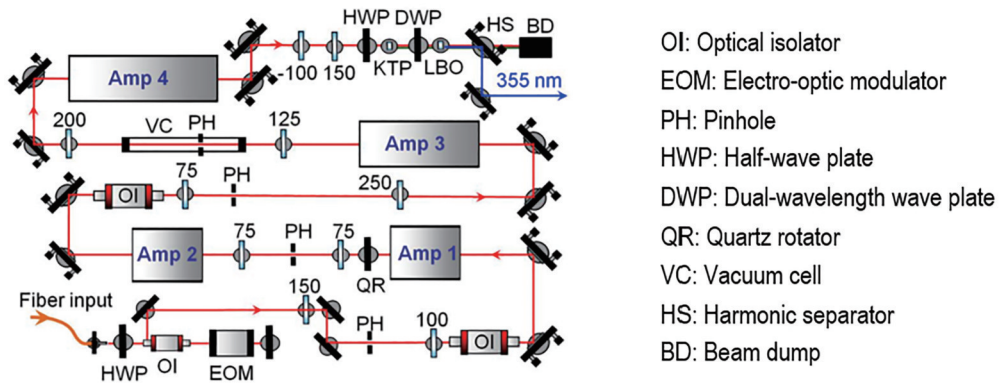


图 4 光纤振荡器腔外调制簇式脉冲输出激光器示意图^[25]

Fig. 4 Schematic of fiber oscillator extra-cavity modulation burst pulse laser^[25]

能量大于 120 mJ 的簇式脉冲输出,满足基于拉曼散射和瑞利散射的平面激光诊断应用需求^[26]。为了缓解簇脉冲包络持续时间过长导致的泵浦 LD 温度剧烈上升和激光输出稳定性下降的现象,双波长泵浦设计被提出。通过主动控制进入激光放大器链路的信号光脉冲能量大小,获得了输出激光脉冲能量波动优于 2.1% 的结果。此时,簇脉冲包络内激光脉冲序列总能量达到 400 J,簇脉冲包络时间为 100 ms,包络内共包含 10000 个脉冲^[27]。

实际应用中,激光脉冲能量稳定性是衡量簇式脉冲输出激光器性能的一项重要指标参数,文献[11, 23, 28]均提出了提升激光脉冲能量稳定性的具体技术方案,典型的有调节信号脉冲和抽运脉冲之间的延时、增加激光脉冲时间间隔等。2015 年,

耶拿大学提出一种通过预先整形输入信号脉冲时域曲线以补偿放大器增益饱和效应的方案,成功实现激光脉冲稳定输出,输出激光脉冲能量不稳定性优于 5%^[29]。

图 5 为美国普渡大学于 2018 年报道的一款结构紧凑的簇式脉冲输出全固态激光器示意图。与前文的外调制技术不同,该激光器的高重复频率脉冲序列由种子激光自身直接调制产生,可输出 500 kHz/1 MHz 的单脉冲/双脉冲体制的簇式脉冲序列,再经过三级激光放大器放大后,簇脉冲包络内激光脉冲序列总能量达到 14 J,双脉冲体制的转换效率达到 42%。该激光器另一个特点是在 10 ms 的时间内,用 kHz 到 MHz 重复频率的激光脉冲实现速度和物质种类的准确测量^[30]。

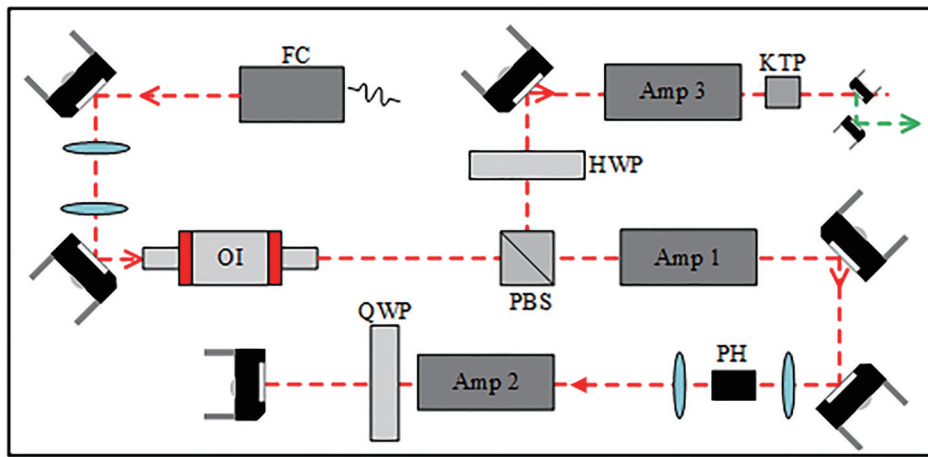


图 5 紧凑型脉冲序列激光器结构示意图^[30]

Fig. 5 Structure schematic of compact pulse train laser^[30]

已有的研究工作表明,采用腔外调制技术获得簇式脉冲输出的最大优势在于能够对脉冲重复频率、脉冲间隔、脉冲波形实现灵活的自主调控,非常容易实现大能量、高重复频率的单频窄线宽脉冲激光输出,能保持 100% 的单频稳定性,已被广泛应用于快速激光诊断、流场分析、荧光分析等领域。但是由于腔外调制技术是一种通过调制连续输出激光获得相应的脉冲波形的技术,存在效率低的问题,调制获得的激光脉冲能量往往在 μJ 量级,需要多级放大器链路实施能量放大,势必造成激光器系统规模相对庞大,对供电系统的要求也较高。

2.2 基于脉冲泵浦法的簇式脉冲输出激光器

脉冲泵浦簇式脉冲输出激光器通过改变调 Q 开关工作频率的手段实现高重复频率激光振荡脉冲输出,激光放大器同步采用脉冲泵浦对簇式脉冲序列进行能量放大,激光器簇脉冲包络持续时间由

泵浦脉冲宽度决定。早在 1994 年,英国剑桥大学采用电光调 Q 的方式在红宝石激光器中获得重复频率为 500 kHz、单脉冲能量为 10 mJ、脉冲宽度为 75 ns 的簇式脉冲输出。实验中通过改变普克尔盒上的驱动电压工作频率,激光脉冲重复频率最终提升到 1 MHz。此时,发现脉冲能量稳定性有所下降^[31]。1998 年,英国物理科学公司在类似的主振荡和功率放大的 MOPA 结构中,在 250 kHz 的重复频率下,获得 1 J 的单脉冲能量输出。提升重复频率至 500 kHz,输出脉冲能量下降至 350 mJ,此时激光脉冲宽度为 10 ns,簇脉冲包络时间长度为 140 μs 。该激光器应用于高速摄影时,通过低能量状态下的模式选择,成功获得了一幅清晰的激光三维全息图,表现出在高速摄影方面广阔的应用前景^[32]。

Nd:YAG 激光器实现簇式脉冲输出的报道出现在 2000 年,日本三菱电气公司首次在声光调 Q 的

Nd:YAG 激光器中,通过在两个 Nd:YAG 晶体中间插入一个 90° 旋光器件并使两个晶体的光轴相互垂直以补偿热致光斑畸变,泵浦脉宽为 $250\ \mu\text{s}$,重复频率为 $1\ \text{kHz}$,一个脉冲序列内包含 5 到 15 个子脉冲。激光器结构如图 6 所示。当进一步把激光脉冲重复

频率提升到为 $20\ \text{kHz}$ 后,获得 $7.5\ \text{mJ}$ 激光脉冲能量输出,光束质量因子 M^2 为 1.1 ^[33]。2005 年,该公司报道的簇式脉冲输出 Nd:YAG 激光器输出单脉冲能量被提升至 $50\ \text{mJ}$,最大峰值功率达到 $2.3\ \text{MW}$ ^[34],但没有进一步提升脉冲重复频率的实验结果。

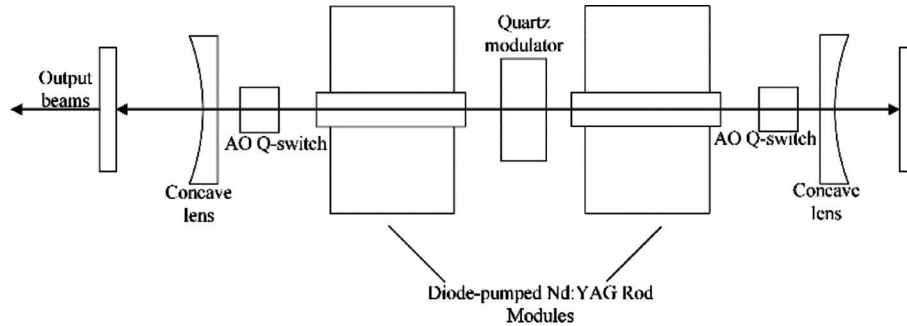


图 6 声光调 Q Nd:YAG 脉冲序列激光器结构示意图^[33]

Fig. 6 Structure schematic diagram of acousto-optic Q-switched Nd:YAG pulse train laser^[33]

2010 年,美国威斯康星大学采用电光调 Q 方式实现 Nd:YAG 激光器簇式脉冲输出,激光单脉冲能量达到 $2\ \text{J}$,脉冲宽度为 $9\ \text{ns}$,重复频率可在 $1\sim 12.5\ \text{kHz}$ 之间连续调节,簇脉冲包络持续时间长度可以在 $0.15\sim 0.39\ \text{ms}$ 之间调节,一个簇脉冲包络内包含 15 个激光脉冲,簇脉冲重复频率为 $0.01\ \text{Hz}$ ^[35]。该台簇式脉冲输出激光器被成功应用于汤姆森散射诊断系统中,成功记录到了电子温度分布和温度波动的动态演化过程。2014 年,该激光器的调 Q 脉冲重复频率被进一步提高,达到 $200\ \text{kHz}$,每个簇脉冲包络包含 5 个激光脉冲,簇脉冲周期为 $1\ \text{ms}$ 。此时,由于簇脉冲包络时间内增益晶体热效应等原因,每个激光脉冲的输出能量由原来的 $2\ \text{J}$ 下降到 $1.5\ \text{J}$ ^[36]。

不难看出,基于泵浦脉冲法的簇式脉冲输出激光器的高重复频率脉冲由激光器 Q 开关直接控制产生,而簇脉冲周期由抽运脉冲宽度决定。激光脉冲的波形和脉宽完全由激光振荡器腔参数决定。由于调 Q 激光振荡器输出的脉冲能量为 mJ 量级,获得大脉冲能量时激光放大器数量可以相对减少,具备小型化的潜力。但是,想获得单频窄线宽簇式脉冲输出,则需要在激光振荡器中引入种子注入功能模块。

与国外研究相比,我国基于泵浦脉冲法获得簇式脉冲输出的研究多是采用外腔调制法。2006 年,华北光电技术研究所国内首先报道了电光调 Q 簇式脉冲输出激光器^[37]。2009 年,秘国江等^[38]研发了一款用于远程人造卫星测距的高重复频率、大

能量簇式脉冲输出锁模激光器,在激光重复频率高达 $100\ \text{MHz}$ 、簇脉冲重复频率为 $20\ \text{Hz}$ 的工作条件下, $1064\ \text{nm}$ 单脉冲输出能量超过 $500\ \text{mJ}$,脉冲宽度小于 $300\ \text{ps}$,倍频后 $532\ \text{nm}$ 激光脉冲输出能量大于 $240\ \text{mJ}$ 。该簇式脉冲输出激光器用于远程人造卫星测距时,测距精度达到 $2\ \text{cm}$ 左右,并在国内首次成功实现星-地时间对比实验。2010 年,北京理工大学研制了基于电光调 Q 的 Nd:YAG 激光振荡器的人眼安全波段簇式脉冲输出激光器系统^[39-40],以 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长簇式脉冲激光作为抽运光泵浦光参量振荡器(OPO),获得了 $1.57\ \mu\text{m}$ 波长的人眼安全脉冲激光输出,簇脉冲的重复频率为 $1\ \text{Hz}$,在 OPO 激光脉冲重复频率为 $4.23\ \text{kHz}$ 的情况下,单脉冲输出最大能量达到 $158\ \text{mJ}$,脉冲宽度约为 $6\ \text{ns}$,光光效率达到 30.5% 。

针对远程激光测距的应用需求,北京东方锐镭科技有限公司于 2016 年研发成功了 LD 抽运的电光调 Q 全固态 Nd:YAG 簇式脉冲输出激光器,当激光脉冲间隔为 $180\ \mu\text{s}$ 时,获得单脉冲能量为 $554\ \text{mJ}$ 的双脉冲输出,脉冲宽度为 $8\ \text{ns}$,簇脉冲重复频率为 $5\ \text{Hz}$ 。该激光器通过对每段“阶梯”式驱动电流的幅值进行单独设定,达到有效补偿脉冲能量下降的效果,实现稳定的脉冲序列输出^[41]。

2016 年,哈尔滨工业大学在声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器中实现簇式脉冲输出。当激光脉冲重复频率为 $10\ \text{kHz}$,簇脉冲重复频率为 $10\ \text{Hz}$,簇脉冲包络时间 $1\ \text{ms}$ 时,获得单个脉冲输出能量为 $4.4\ \text{mJ}$,脉冲宽度为 $9.4\ \text{ns}$,光束质量因子 M^2 约为

1.5。每个簇脉冲包络内包含 10~100 个激光脉冲^[42]。同年,该课题组又在 GdVO₄/Nd:GdVO₄ 激光器 MOPA 系统中获得激光脉冲重复频率分别为 100, 200, 500 kHz 的簇式脉冲输出,簇脉冲包络内激光脉冲总能量最大达到 220 mJ,激光脉冲宽度约为 14.5 ns^[43-45]。

为了获得亚 ns 量级的簇式脉冲激光输出,2019

年,哈尔滨工业大学在腔倒空式电光调 Q Nd:YAG 激光器中实现簇式脉冲输出,激光器原理光路如图 7 所示。腔倒空振荡器输出的簇式脉冲序列经过两级放大器放大后,获得激光单脉冲能量大于 81 mJ 的放大输出,此时的激光脉冲重复频率为 1 kHz,激光脉冲宽度为 0.9 ns,簇脉冲重复频率为 10 Hz^[46]。

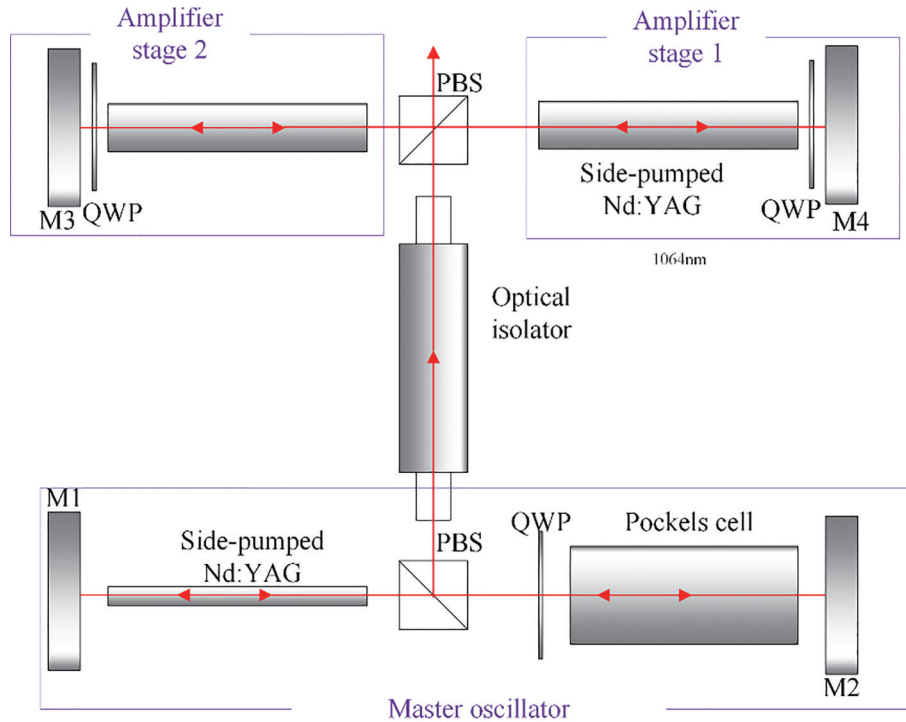


图 7 腔倒空技术脉冲序列激光器结构示意图^[46]

Fig. 7 Structure schematic diagram of cavity-dumped pulse train laser^[46]

2018年,哈尔滨工业大学在声光调 Q 簇式脉冲输出 Nd:YAG 激光器中获得了目前最大的单脉冲能量输出,达到 456 mJ,此时激光脉冲重复频率为 10 kHz,簇脉冲重复频率为 10 Hz,簇脉冲包络时间长度为 2 ms^[47]。

此外,具有被动调 Q 机制的簇式脉冲输出激光器因结构简单、紧凑、成本低等优势同样得到了一定的发展^[48-54]。代表性的工作是暨南大学 2015 年报道的端面抽运 Yb:YAG/Cr:YAG/YAG 被动调

Q 簇式脉冲输出激光器,如图 8 所示。当调 Q 激光脉冲重复频率为 5.71 kHz 时,获得单脉冲能量大于 446.25 μJ、脉冲宽度小于 11.5 ns 的簇式脉冲输出^[49]。输出单脉冲能量最大的被动调 Q 簇式脉冲输出激光器是哈尔滨工业大学于 2019 年报道的,其簇脉冲包络包含的脉冲序列总能量达到 117 mJ,对应单脉冲能量达到 4.8 mJ^[54]。

显然,基于泵浦脉冲调 Q 法获得簇式脉冲输出的激光器整体尽管具有结构简单、紧凑的优势,但

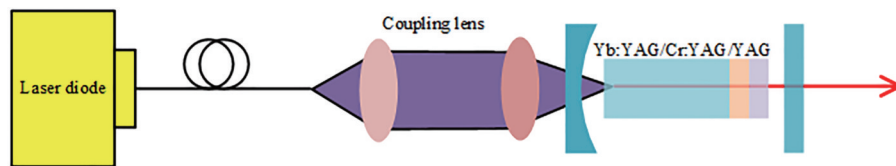


图 8 Yb:YAG/Cr:YAG/YAG 被动调 Q 簇式脉冲输出激光器结构示意图^[49]

Fig. 8 Structure schematic diagram of Yb:YAG/Cr:YAG/YAG passively Q-switched burst-mode laser^[49]

其输出激光脉冲重复频率受到 Q 开关最高闭合工作能力限制,且其输出脉冲的时间波形难以主动编辑,最终输出激光脉冲能量稳定性存在一定的局限性。因此,针对簇式脉冲输出激光器在 PLIF、激光精密加工及激光雷达等特殊领域的应用,基于泵浦脉冲调 Q 法的簇式脉冲输出激光器,在进一步提升光束质量和脉冲能量稳定性,以及获得稳定单频窄线宽激光输出方面,仍需要继续突破制约激光器性能的瓶颈技术。

3 总 结

综述了采用外调制法和泵浦脉冲调 Q 法实现簇式脉冲输出激光器技术的研究进展,总结了簇式脉冲输出激光器在输出脉冲能量、脉冲序列长度自主可控等方面的独特优势,这些性能优势能充分满足高分辨率激光测距、PLIF 等领域的应用需求。但也发现该簇式脉冲输出激光器技术本身依然存在一些技术瓶颈有待突破。

1) 簇周期内激光脉冲个体能量的稳定性存在随机性,需要进一步优化泵浦驱动电流参数(如采用阶梯形泵浦电流)、MOPA 系统放大级数量、泵浦脉冲与信号脉冲时间同步匹配程度等;

2) 在高平均功率运转下,激光晶体内仍然易出现热效应导致的光束质量劣化现象,需要进一步优化谐振腔和放大器的结构参数设计。

总之,从激光技术发展及应用需求上分析,激光脉冲波形可自主编辑、输出脉冲能量大小和脉冲重复频率连续可调、簇脉冲包络内脉冲个数自主可控的小型化、转换效率高、平均功率低全固态激光器,是未来簇式脉冲输出激光器技术发展的趋势,也将发展成为快速诊断、超高分辨率激光主动遥感、瞬变动态过程成像监测等特殊应用领域的标配高端光源,更是空间卫星平台急需需要发展的高性能激光光源。

参 考 文 献

- [1] Shi X C, Chen W B, Hou X, et al. Application of all solid state laser in space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 127-131.
施翔春, 陈卫标, 侯霞. 全固态激光技术在航天领域的应用[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 127-131.
- [2] Liu X X, Li Y L. State-of-art of foreign military solid state laser[J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(1): 7-10, 41.
刘兴新, 李燕兰. 国外军用固体激光技术发展现状[J]. *激光与红外*, 2000, 30(1): 7-10, 41.
- [3] Gabet K N, Patton R A, Jiang N, et al. High-speed CH₂O PLIF imaging in turbulent flames using a pulse-burst laser system[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3): 569-575.
- [4] Kaminski C F, Hult J, Aldén M, et al. High repetition rate planar laser induced fluorescence of OH in a turbulent non-premixed flame[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(4): 757-760.
- [5] Lemmerz C, Lux O, Reitebuch O, et al. Frequency and timing stability of an airborne injection-seeded Nd:YAG laser system for direct-detection wind lidar[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 9057-9068.
- [6] Liu D, Yang Y Y, Zhou Y D, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2535-2546.
刘东, 杨雨英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2535-2546.
- [7] Gaspard S, Forster M, Huber C, et al. Femtosecond laser processing of biopolymers at high repetition rate[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2008, 10(40): 6174-6181.
- [8] Jaeggi B, Canguero L, Bruneel D, et al. Micromachining using pulse bursts: influence of the pulse duration and the number of pulses in the burst on the specific removal rate[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10519: 1051905.
- [9] Liu T, Wang J, Petrov G I, et al. Photoacoustic generation by multiple picosecond pulse excitation[J]. *Medical Physics*, 2010, 37(4): 1518-1521.
- [10] Fleury J, Lanini M, Pose C, et al. Wide band-pass FSS with reduced periodicity for energy efficient windows at higher frequencies[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(6): 417.
- [11] Thurow B, Jiang N B, Samimy M, et al. Narrow-linewidth megahertz-rate pulse-burst laser for high-speed flow diagnostics[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 5064-5073.
- [12] Li X D, Mei F, Yan R P, et al. Review of burst-mode lasers for high-speed PLIF imaging diagnostics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2116-2126.
李旭东, 梅峰, 闫仁鹏, 等. 高速 PLIF 成像诊断应用的脉冲串激光器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2116-2126.
- [13] Li X D, Zhou Y P, Yan R P, et al. Study on laser

- for applications in high-speed planar laser induced fluorescence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1205001.
- 李旭东, 周益平, 闫仁鹏, 等. 应用于高速平面激光诱导荧光的激光器研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12): 1205001.
- [14] Cosentino A, Mondello A, Sapia A, et al. High energy, single frequency, tunable laser source operating in burst mode for space based lidar applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10568: 1056817.
- [15] Ni X X, Hu K. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112005.
- 倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112005.
- [16] Zhong S Y, Li S S. Study of multi-pulsed laser ranging technology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(S1): 797-799.
- 钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(S1): 797-799.
- [17] Gattass R R, Cerami L R, Mazur E, et al. Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5279-5284.
- [18] Hu W Q, Shin Y C, King G, et al. Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate[J]. *Applied Physics A*, 2009, 98(2): 407-415.
- [19] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.
- 朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1200001.
- [20] 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.
- [21] Hult J, Richter M, Nygren J, et al. Application of a high-repetition-rate laser diagnostic system for single-cycle-resolved imaging in internal combustion engines [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 5002-5014.
- [22] 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.
- [23] Thurow B S, Satija A, Lynch K, et al. Third-generation megahertz-rate pulse burst laser system [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 2086-2093.
- [24] Wu P F, Lempert W L, Miles R B, et al. Megahertz pulse-burst laser and visualization of shock-wave/boundary-layer interaction[J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(4): 672-679.
- [25] 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): 1346-1348.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Jiang N B, Webster M C, Lempert W R, et al. Advances in generation of high-repetition-rate burst mode laser output[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B23-B31.
- [29] Korner J, Reiter J, Hein J, et al. Operation and beam profiling of an up to 200 kHz pulse-burst laser for Thomson scattering[J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 1790-1802.
- [30] 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): 735-738.
- [31] 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.
- [32] Grace J M, Nebolsine P E, Goldey C L, et al. Repetitively pulsed ruby lasers as light sources for high-speed photography[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(8): 2205-2212.
- [33] Koyata Y, Yamamoto S, Hirano Y, et al. Burst-mode Q-switching operation of a Nd:YAG rod laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3889: 224-230.
- [34] Furuta K, Kojima T, Fujikawa S, et al. Diode-pumped 1 kW Q-switched Nd:YAG rod laser with high peak power and high beam quality[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19): 4119-4122.
- [35] Hartog D J D, Ambuel J R, Borchardt M T, et al. Pulse-burst laser systems for fast Thomson scattering [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10D513.
- [36] Young W C, Hartog D J D. Operation and beam profiling of an up to 200 kHz pulse-burst laser for Thomson scattering[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11D808.

- [37] Guo J L, Xia Y, Li J Z, et al. Study on pulse-series of electro-optical Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 12(36): 1130-1132.
郭嘉亮, 夏云, 李建章, 等. 电光 Q 调制序列脉冲 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与红外*, 2006, 12(36): 1130-1132.
- [38] Mi G J, Yang W S, Zhu X B, et al. High repetition frequency and big energy mode-locking laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1822-1825.
秘国江, 杨文是, 朱相帮, 等. 高重复频率大能量锁模激光器技术[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1822-1825.
- [39] 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): 791-794.
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): 791-794.
- [40] Liu J W, Gao C Q, Gao M W, et al. Eye-safe optical parametric oscillator with pulse string output [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(12): 1444-1447.
刘嘉巍, 高春清, 高明伟, 等. 脉冲串输出人眼安全光学参量振荡器研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(12): 1444-1447.
- [41] Zhao H, Yan X J, Deng M F, et al. All solid-state large energy Nd:YAG laser with electro-optical Q-switched pulse sequence[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 819-822.
赵虎, 延新杰, 邓明发, 等. 大能量电光调 Q 脉冲序列输出全固态 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 819-822.
- [42] Pan H, Yan R P, Fa X, et al. High-peak-power, high-repetition-rate LD end-pumped Nd:YVO₄ burst mode laser[J]. *Optical Review*, 2016, 23(3): 386-390.
- [43] Li X D, Han X H, Yan R P, et al. Stable 500 kHz, 1 ms, 40 mJ pulse-burst GdVO₄/Nd:GdVO₄ laser oscillator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10152: 101521E.
- [44] Pan H, Yan R P, Li X D, et al. LD-pumped acousto-optical Q-switched burst-mode Nd:YAG laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9893: 98930X.
- [45] Li X D, Zhou Y P, Yan R P, et al. Investigation on LD-pumped acousto-optically Q-switched pulse burst 1064 nm laser[J]. *Optik*, 2017, 148: 167-171.
- [46] Wu W T, Li X D, Mei F, et al. 30 mJ, 1 kHz sub-nanosecond burst-mode Nd:YAG laser MOPA system [J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36129-36136.
- [47] Li X D, Xu G C, Yan R P, et al. A 2.2 J all-diode-pumped Nd:YAG burst-mode laser at repetition rate of 10 kHz[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10964: 109645Y.
- [48] Li H B, Dong Y, Wang P F, et al. Passive Q-switch high power burst laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 762-765.
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, 42(7): 762-765.
- [49] Jiang W, Liu Y M, Chen W D, et al. Composite Yb:YAG/Cr³⁺:YAG/YAG crystal passively Q-switched lasers at 1030 nm[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1834-1838.
- [50] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er, Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 918-921.
- [52] 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.
- [53] Li X D, Zhou Y P, Yan R P, et al. A compact pulse burst laser with YAG/Nd:YAG/Cr³⁺:YAG composite crystal[J]. *Optik*, 2017, 136: 107-111.
- [54] Yan R P, Li X D, Zhou Y P, et al. 2.5 MW, 2.0 ns MOPA burst mode laser at 86 kHz[J]. *Optik*, 2019, 185: 418-422.