

短脉冲间隔脉冲组输出电光调 Q Nd:YAG 激光器

连亚霄, 王超*, 王颀, 段育盛, 郭俊文, 金光勇

长春理工大学学院吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 提出了一种短脉冲间隔、子脉冲峰值功率高的脉冲组输出电光调 Q 激光器。以激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 晶体, 谐振腔单次储能, 控制 Q 开关台阶式多次开启, 将单次抽运能量分多次调 Q 输出, 实现短脉冲间隔脉冲组激光输出, 为高重复频率、高峰值功率激光器提供研究思路。实验结果表明, 用一组半环形激光二极管模块作为工作物质 Nd:YAG 的抽运源, 铌酸锂(LN)晶体作为 Q 开关, 激光二极管模块单次抽运工作物质储能, 台阶式开启 Q 开关, 激光器在 1~20 Hz 频率范围内能够稳定运行, 得到子脉冲间隔最小为 100 ns 的脉冲组输出, 子脉冲频率在 1.1~10.0 MHz 范围内可调, 子脉冲能量大于 23 mJ, 能量波动小于 10%, 单个脉冲宽度小于 37 ns, 子脉冲峰值功率接近 1 MW, 光-光转换效率为 22.5%。

关键词 激光器; 电光开关; 脉冲间隔可调; 脉冲个数可调; 台阶式开启

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0601001

Electro-Optic Q-Switched Nd:YAG Laser with Short Pulse Interval and Pulse Group Output

Lian Yaxiao, Wang Chao, Wang Di, Duan Yusheng, Guo Junwen, Jin Guangyong

Key Laboratory of Solid Laser Technology and Applications of Jilin Province, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A kind of electro-optic Q-switched laser in the form of pulse group output with short pulse interval and high subpulse peak power is proposed. The Nd:YAG crystal is pumped by the diode laser (LD) module, and the single energy storage of resonant cavity is achieved. On the basis of controlling the Q-switch steps open repeatedly, single pump energy can be divided into multiple times Q-switched outputs and the short pulse interval and pulse group laser output are obtained, providing a research way for high repetition frequency and high peak power laser. Results show that with a group of half ring laser diode module as the source for Nd:YAG crystal, lithium niobate (LN) crystal as the Q-switch, storage material is single pumped by laser diode module, and the Q-switch is stepped opened, the laser can be stably operation in the range of 1-20 Hz, minimum subpulse interval of 100 ns is obtained and subpulse frequency ranges in 1.1-10.0 MHz, subpulse energy is greater than 23 mJ and energy fluctuation is less than 10%, single pulse width is less than 37 ns, subpulse peak power is close to 1 MW, and the optical-optical conversion efficiency is 22.5%.

Key words lasers; electro-optic switch; adjustable pulse interval; adjustable pulse number; stepped open

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 140.3480

1 引 言

多脉冲全固态激光器在脉冲激光测距、激光精密加工、激光与物质相互作用方面有巨大的应用需

求^[1-4]。调 Q 技术有电光调 Q、声光调 Q、被动调 Q 等, 电光调 Q 技术能够实现脉冲宽度为 10 ns 的激光输出^[5], 在重复频率为几 Hz 至几十 Hz 时产生峰值功率达到 MW 的激光脉冲, 峰值功率为 MW 级

收稿日期: 2017-11-14; 收到修改稿日期: 2017-12-18

作者简介: 连亚霄(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。

E-mail: 1945057326@qq.com

导师简介: 金光勇(1971—), 男, 教授, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用和全固态激光器方面的研究。

E-mail: jgyciom@163.com

* 通信联系人。E-mail: 105665608@qq.com

别且重复频率达到 MHz 的激光脉冲少有报道; 声光调 Q 技术能够达到脉冲宽度为 20~40 ns 的激光输出, 在重复频率为几百 kHz 时产生的峰值功率也只有 kW 量级; 被动调 Q 技术能达到脉冲宽度为 30 ns 左右, 且输出峰值功率能达到 kW 量级, 但是不易控制输出脉冲的稳定性^[6]; 锁模技术能够达到 GHz 的工作频率, 经过放大后可以输出高峰值功率激光, 但结构较为复杂^[7]。针对高峰值功率、高重复频率激光器市场的需求, 越来越多的研究人员开始通过改变传统激光器调 Q 控制方式来实现高功率、高频率激光输出。

2006 年, Li 等^[8] 实现了掺钕离子钒酸钪 (Nd:GdVO₄) 晶体的双被动调 Q 激光器的运转, 说明双被动调 Q 能有效提高脉冲对称性和压缩脉冲宽度; 2011 年, 王学军等^[9] 研究了纳秒双脉冲激光的控制方法, 采用两台闪光灯抽运电光调 Q 激光器偏振组产生了 100 ns 间隔双脉冲激光, 这为研究高重复频率多脉冲提供了研究思路; 2012 年, 李峰等^[10] 研究了电光调 Q 双脉冲输出 Nd:YAG 激光器, 采用一个抽运周期内两次调 Q 的工作方式, 实现了脉冲间隔为 200~230 μs 的双 Q 脉冲输出, 说明改变调 Q 电源与抽运源工作时序能够实现本振激光器输出多脉冲; 2017 年, Hu 等^[11] 开展了光纤激光器产生双脉冲方面的研究, 工作频率为 783.3 kHz, 输出能量为 72.5 nJ, 实现了子脉冲频率为 10 MHz、峰值功率为 18.1 W 的短脉冲激光输出; 2017 年, 赵鑫等^[12] 通过优化普克尔盒消光比、下降沿来压缩脉冲宽度, 提高激光峰值功率, 获得重复频率为 200 Hz、脉冲宽度为 2.85 ns、峰值功率为 1 MW 的脉冲激光。目前所报道的短脉冲间隔脉冲组输出激光器中, 子脉冲重复频率达到 MHz 且子脉冲峰值功率达到 MW 的研究未见报道。

本文针对子脉冲频率达到 MHz 级别且子脉冲峰值功率达到 MW 级别的激光进行研究, 通过对电

光调 Q 电源输出波形的控制来改变激光输出脉冲, 研究不同台阶电压和台阶间隔条件下调 Q 的输出特性, 获得了激光脉冲能量可调节、激光脉冲间隔可调节的脉冲组激光输出, 子脉冲宽度小于 37 ns, 子脉冲能量达到 23 mJ, 子脉冲峰值功率最大达到 0.96 MW, 子脉冲频率在 1.1~10.0 MHz 范围内可调, 光-光转换效率为 22.5%。最终在激光输出峰值功率达到 MW 时, 子脉冲输出频率在 1.1~10.0 MHz 范围内可调。

2 实验装置与原理分析

图 1 为激光二极管 (LD) 侧面抽运 Nd:YAG 多脉冲激光器光路图。几何腔长为 300 mm, 激光增益介质选用掺杂浓度为 1% 的 Nd:YAG 圆柱激光棒, 长度为 25 mm, 直径为 4 mm, 激光棒置于两个半环配合的 LD 抽运模块中, 以传导冷却方式散热^[13-15]。LD 抽运源采用 808 nm 的准连续半导体激光器二极管阵列, 抽运频率为 1 Hz, 抽运脉冲宽度为 200 μs。采用两个焦距为 2000 mm 的平凹镜构成输出镜、全反镜, 全反镜反射率为 100%, 输出镜反射率为 50%, 由于平凹镜焦距远大于谐振腔长度, 故谐振腔可视为平平腔。Nd:YAG 激光棒为各向同性晶体, 产生非偏振光, 谐振腔插入偏振片产生线偏振光, 偏振片采用水平 p 光高透和垂直 s 光高反的石英玻璃。电光调 Q 晶体采用铌酸锂 (LN) 以退压方式工作, 调 Q 晶体 LN 与偏振片组成电光 Q 开关, 关门电压为 $\lambda/4$ (λ 为波长) 电压。本课题组采用自主研发的台阶式工作电光调 Q 电源, 退压台阶间隔为 100~1000 ns, 退压间隔最小为 100 ns, 总电压工作范围为 1~4 kV, 关门电压为 2 kV, 台阶时间相对抖动 ≤ 5 ns, 台阶幅值相对抖动 $\leq 1\%$, 可设置 1~3 个台阶, 每个台阶电压幅值可调。LD 电源抽运激光棒且给调 Q 电源发送同步信号, 调 Q 电源在抽运结束后产生台阶式退压信号加载到 LN 上。

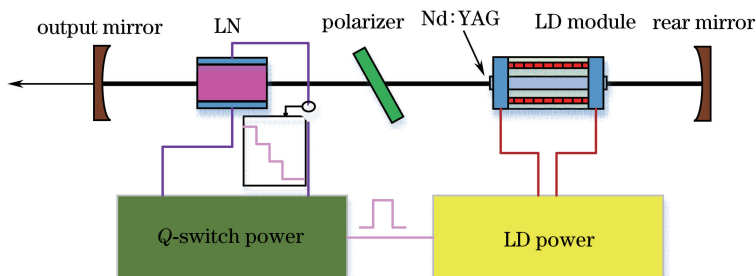


图 1 LD 侧面抽运 Nd:YAG 脉冲组激光器光路图

Fig. 1 Light path diagram of LD side pumped Nd:YAG pulse group laser

常规调 Q 方式与脉冲组调 Q 控制方式的区别如表 1 所示。常规调 Q 方式中,激光器单次储能,Q 开关单次打开,谐振腔在 Q 开关打开后迅速振荡输出单个巨脉冲;脉冲组调 Q 方式中,激光器单次储能,Q 开关

台阶式释放谐振腔储存的能量,输出的子脉冲能量可相同或不同。根据 Koechner 论述,精确控制谐振腔内损耗变化能够控制谐振腔释放激光能量的大小,控制谐振腔损耗阶梯变化能够实现多个脉冲输出。

表 1 常规调 Q 与脉冲组调 Q 的控制方式比较

Table 1 Comparison of control modes between ordinary Q-switched and pulse group Q-switched

Type	Control mode	Quarter wave voltage /V	Operation pattern	Transition time /ns
Ordinary Q-switched	Single energy storage while single open	2000	Decrease or increase voltage	<10
Pulse group Q-switched	Single energy storage while steps open	2000	Decrease or increase voltage	<10

Q 晶体上的电压工作波形如图 2 所示,为方便说明 Q 开关工作的过程,将抽运结束后 Q 开关打开时刻作为零时刻。激光器获取脉冲组输出的工作机制为合理控制 Q 开关上的电压变化形式,即在抽运结束后,Q 开关台阶式开启,可以获取多个调 Q 脉冲输出。在抽运结束后,Q 开关开启,按照第一个台阶打开 Q 开关,Q 开关的透过率增加,即由 Q 开关形成的谐振腔单端等效反射率发生变化,谐振腔起振消耗增益介质中的反转粒子数,输出第一个 Q 脉冲,系统达到稳态阈值;按照第二个台阶打开 Q 开关,Q 开关的透过率增加,系统的阈值降低,谐振腔起振消耗增益介质中的反转粒子数,输出第二个 Q 脉冲,系统达到另一个稳态阈值;按照第三个台阶打开 Q 开关,Q 开关的透过率继续增加,系统的阈值降低,谐振腔起振消耗增益介质中的反转粒子数,输出第三个脉冲。通过改变加载到 Q 开关上的电压来控制 Q 开关的透过率,进而控制由 Q 开关形成的谐振腔单端的等效反射率,谐振腔内的小信号增益也随之确定,从而控制谐振腔损耗的变化量,最终实现由加载到 Q 晶体上的电压变化对应的激光输出能量变化,通过调整加载到 Q 开关上的台阶次

数、台阶幅度、台阶时间,能够调整电压差对应谐振腔内的损耗,实现激光器输出子脉冲幅值、子脉冲间隔均可调节。

3 实验结果与分析

在实验过程中采用 Tektronix 的 P6015A 高压探头测量高压驱动源输出的高压信号,采用 OPHIR 的 NOVA II 能量计测量输出的能量,采用 Thorlabs 光电探测器 DET10A1M 和 Tektronix 示波器 DPO3054 测量激光输出子脉冲宽度。在 LD 抽运一个周期结束后,调 Q 电源开始台阶式退压,在谐振腔达到平衡时开启 Q 开关,谐振腔迅速振荡输出激光脉冲后达到平衡态,再次开启 Q 开关输出激光脉冲,谐振腔经过多个振荡-平衡过程,从而实现多个脉冲输出。图 3 所示为光电调 Q 电源一个周期内的工作波形图,调 Q 电源退压后恢复到 $V_{\lambda/4}$ 的时间约为 100 μs ,测试常规调 Q 电源恢复到 $V_{\lambda/4}$ 的时间约为 100 μs ,说明台阶式调 Q 电源与常规调 Q 电源的区别主要在于退压方式,其他参数相同。图 3 中台阶退压波形放大后为黑色框内波形,台阶退压边沿的时间约为 10 ns,与常规调 Q 时间相同,

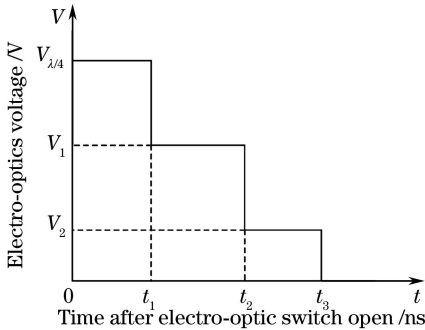


图 2 Q 开关打开后 Q 晶体上电压随时间的变化
Fig. 2 Variation of Q crystal voltage with time after Q switch open

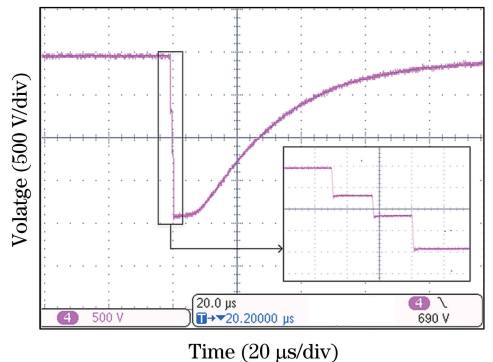


图 3 光电调 Q 电源工作波形图
Fig. 3 Work waveform of electro-optic Q-switched power

台阶时间为 400 ns, 台阶幅值分别为 620, 480, 800 V, 此波形为电源调试时的测试波形, 在调试多脉冲输出时, 通过设置不同台阶工作电压可以调整谐振腔内调 Q 损耗相同, 进而调整 Q 损耗对应激光输出能量相同, 通过调整电压可以实现脉冲组输出幅值基本相同。

图 4 所示为调 Q 后三个子脉冲输出序列, 子脉冲时间间隔为 400 ns, 与台阶退压时间间隔相同, 子脉冲时间间隔由台阶式调 Q 触发信号控制。调整不同台阶的电压可以调整三个子脉冲输出幅值相同, 改变触发信号的时间间隔可以获得不同子脉冲间隔的调 Q 脉冲组。

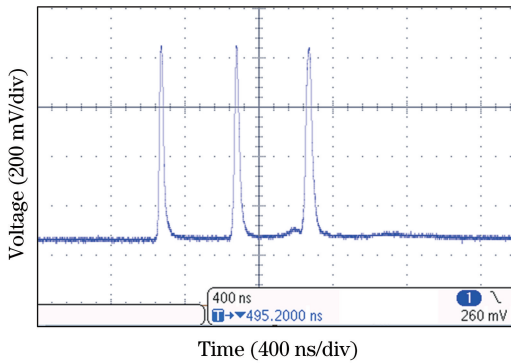


图 4 电光调 Q 输出的三个子脉冲

Fig. 4 Three subpulses outputs of electro-optic Q-switched

LD 抽运增益介质的能量直接影响到调 Q 脉冲组输出能量的大小, 在实验台阶式调 Q 之前, 测试常规调 Q 输出参数, 在抽运能量为 307 mJ 时, 静态输出能量为 93 mJ, 动态输出能量为 78 mJ, 动静比为 83.8%, 光-光转换效率为 25.4%。实验台阶式调 Q 输出参数, 在抽运能量为 307 mJ 时, 静态输出能量为 93 mJ, 动态输出能量为 69 mJ, 动静比约为 74.2%, 光-光转换效率为 22.5%。比较台阶式调 Q 与常规调 Q 的区别, 由于谐振腔存在多个振荡-稳态过程, 在谐振腔达到稳态过程中会损耗一部分能量, 因而脉冲组激光器相对单脉冲激光器, 其光-光转换效率有所降低。在抽运能量为 307 mJ 的条件时, 获取三个子脉冲总能量为 69 mJ, 实验中通过调整调 Q 电源的台阶幅值, 实现示波器上三个子脉冲幅值相同, 则表明三个子脉冲能量基本相同, 子脉冲能量约为 23 mJ。在抽运能量为 307 mJ 条件时, 对三个瞬时脉冲宽度分别测量如图 5 所示。第一个调 Q 脉冲宽度为 24 ns, 峰值功率达到 0.96 MW; 第二个调 Q 脉冲宽度为 28 ns, 峰值功率达到 0.82 MW; 第三个调 Q 脉冲宽度为 36.6 ns, 峰值功率达到 0.62 MW。第三个脉冲宽度相对于第一个脉冲、第二个脉冲增加较多, 因为前两个脉冲消耗了较多的工作物质上能级反转粒子数, 谐振腔内激光在振荡消耗剩余反转粒子数过程中经历较长的时间, 故脉冲宽度相对于前两个脉冲较宽。

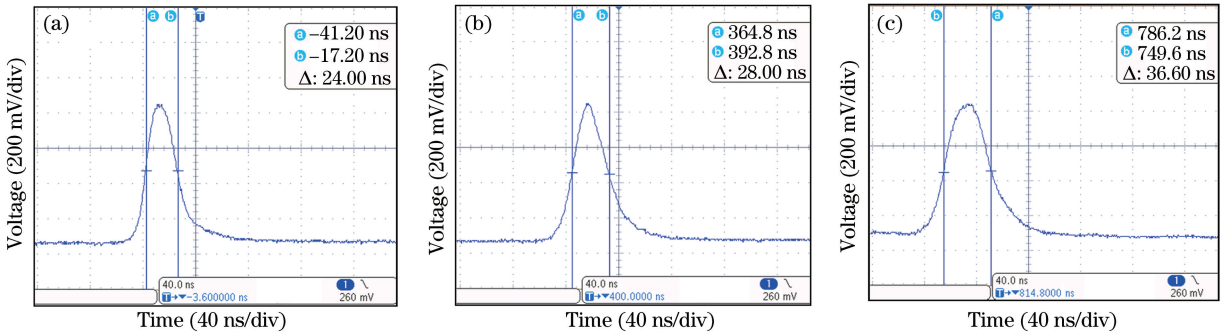


图 5 三个子脉冲的瞬时波形。(a) 第一个脉冲; (b) 第二个脉冲; (c) 第三个脉冲

Fig. 5 Instantaneous waveforms of three subpulses. (a) The first pulse; (b) the second pulse; (c) the third pulse

图 6 给出了该激光器输出能量随输入能量的变化曲线, 对于耦合率为 50% 的输出镜, 当抽运源工作脉冲宽度为 200 μ s 时, 三脉冲输出激光器的斜率效率达到 28%。抽运脉冲频率范围为 1~20 Hz, 改变抽运频率, 子脉冲输出脉冲间隔、子脉冲输出峰值功率变化不大。由于抽运频率低于 20 Hz, Q 开关工作结束后, 在下次 Q 开关打开之前, 工作物质上能级粒子数密度能够恢复到初始状态, 工作物质内储存的能量能够满足 Q 开关台阶式多次释放, 即

低抽运功率条件下抽运频率变化对脉冲组输出的子脉冲间隔、子脉冲峰值功率影响不大。

图 7 为子脉冲间隔为 1 μ s 的脉冲组输出波形, 在子脉冲时间间隔接近 1 μ s 以及大于 1 μ s 时, 激光在三个子脉冲序列之间有小脉冲输出, 这是由于 Nd:YAG 的热效应时间约为 1 μ s, 由于谐振腔内激光自激振荡, 达到当前激光器稳态下输出阈值, 从而输出小脉冲。在子脉冲间隔为 100~900 ns 的实验中, 实验脉冲组能够稳定输出。记子脉冲间隔为

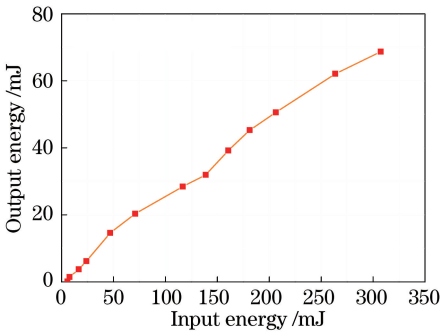


图 6 激光输出能量与输入能量的关系

Fig. 6 Relationship between laser output energy and input energy

T , 则脉冲组频率为 $F = 1/T$, 对应子脉冲间隔为 100~900 ns 的脉冲组频率范围为 1.1~10.0 MHz。

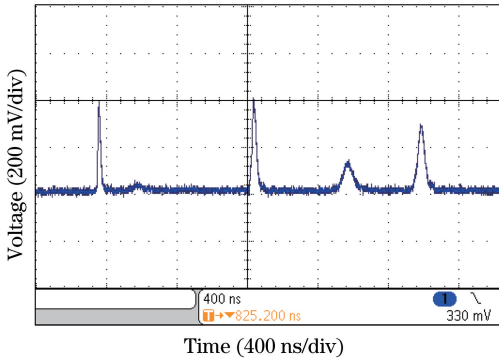


图 7 子脉冲间隔为 1 μ s 时激光输出子脉冲

Fig. 7 Laser output subpulse when subpulse interval is 1 μ s

在实验过程中, 触发信号由现场可编程门阵列 (FPGA) 产生, FPGA 的时钟周期为 50 ns, 子脉冲在 50 ns 间隔时不能明显区分开, 这是由于 Q 开关打开后输出一个脉冲, 谐振腔未达到稳态时 Q 开关再次开启, 输出另外的子脉冲, 波形不能完整区分开。实验测量台阶间隔为 100 ns 的脉冲组能量为 69.5 mJ, 三个子脉冲的脉冲宽度分别为 24.8, 28.4, 34 ns, 对应的子脉冲峰值功率分别为 0.93, 0.81, 0.68 MW, 三个子脉冲与 400 ns 脉冲间隔的三个子脉冲参数接近。

4 结 论

本课题组实现了一种子脉冲间隔时间短、子脉冲峰值功率高的电光调 Q 固体激光器, 激光器采用单级本振输出, 结构简单。采用自研电光调 Q 开关驱动电源, 在 LD 侧面抽运条件下, 得到子脉冲间隔在 100~900 ns 范围内可调, 子脉冲输出能量大于 23 mJ, 子脉冲宽度小于 37 ns 的激光输出。LD 抽运模块、增益介质若能有效散热, 工作频率还可以继

续增加。由于器件限制, 几何腔长没有减小, 缩短谐振腔几何腔长后子脉冲宽度可变窄, 子脉冲激光峰值功率会增加。在缩短谐振腔几何腔长的基础上, 如果减小电光调 Q 电源台阶间隔, 子脉冲间隔还可以减小, 子脉冲重复频率还可以增加。该激光器采用平平腔结构, 经实验验证, 具有系统简单、结构紧凑、稳定性好的特点, 为研究高重复频率、高峰值功率激光器提供了研究思路。

参 考 文 献

- [1] Hu M N, Ge L C, Zhang J P, *et al.* Hole-drilling with high depth-diameter ratio using multi-pulse femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403006.
胡梦宁, 葛励成, 张晋平, 等. 多脉冲飞秒激光深小孔的加工[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403006.
- [2] Zhang W, Li G Z, Wang C M, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203003.
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
- [3] Hong L, Li L J. A study of laser cutting engineering ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31(8): 531-538.
- [4] Zhong S Y, Li S S. Study of multi-pulsed laser ranging technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(s): 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(s): 797-799.
- [5] Feng Y T, Zhu X L, Tang H, *et al.* Characteristics of RbTiOPO₄ electro-optic Q-switch operation at high repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 617-621.
冯宇彤, 朱小磊, 唐昊, 等. 磷酸钛氧铷高重复率电光调 Q 特性[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 617-621.
- [6] Dong J, Ueda K, Shirakawa A, *et al.* Composite Yb:YAG/Cr³⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14516-14523.
- [7] Wang H L, Kong L, Pan J Q, *et al.* Recent progress of semiconductor mode-locked lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050001.
王火雷, 孔亮, 潘教青, 等. 半导体锁模激光器的最新研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050001.
- [8] Li G Q, Zhao S Z, Yang K J, *et al.* Investigation of a diode-pumped double passively Q-switched Nd:

- GdVO₄ laser with a Cr³⁺:YAG saturable absorber and a GaAs coupler[J]. *Journal of Optics A*, 2006, 8(2): 155-163.
- [9] Wang X J, Meng F Y, Li M, *et al.* Nanosecond dual pulse laser controlling method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 0203004.
王学军, 孟繁禹, 李猛, 等. 纳秒双脉冲激光的控制方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0203004.
- [10] Li F, Wang J T, Yin S Y, *et al.* Electro-optical Q-switched double-pulse output Nd:YAG all solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0802005.
李峰, 王君涛, 殷苏勇, 等. 电光调 Q 双脉冲输出 Nd:YAG 全固态激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802005.
- [11] Hu M, Zheng Y, Yang Y F, *et al.* Nanosecond double-pulse fiber laser with arbitrary sub-pulse combined based on a spectral beam combining system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 22-26.
- [12] Zhao X, Li Y J, Feng J X, *et al.* High-peak-power narrow-pulse-width single-longitudinal-mode pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501006.
赵鑫, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 高峰值功率窄脉宽单纵模脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501006.
- [13] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched lasers [J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1989, 25(2): 214-220.
- [14] Huang J, Hu X H, Chen W B. LD-pumped electro-optically Q-switched 946 nm Nd:YAG laser with pulse repetition rates of 1 kHz[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602008.
黄晶, 胡秀寒, 陈卫标. LD 抽运 1 kHz 电光调 Q 946 nm Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602008.
- [15] Wang X, Sun Z, Cheng G H. High repetition rate and short pulse width electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ Laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601007.
王旭, 孙哲, 程光华. 高重复频率窄脉宽电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601007.