

文章编号 1004-924X(2024)08-1122-08

## 2.79 $\mu\text{m}$ 高速转镜调 Q Er,Cr:YSGG 纳秒 窄脉冲激光器

朱永斌<sup>1,2</sup>, 马圣洁<sup>2</sup>, 程庭清<sup>2</sup>, 王礼<sup>3</sup>, 陈月明<sup>1</sup>, 江海河<sup>1,2\*</sup>

- 安徽医科大学 生物医学工程学院, 安徽 合肥 230032;
- 中国科学院 合肥物质科学研究院健康与医学技术研究所, 安徽 合肥 230031;
- 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 转镜调 Q 无插入损耗, 是获得窄脉冲、高峰值功率输出激光的直接方式。纳秒脉冲需要使用高速转镜调 Q, 并精准控制电机转速与氙灯放电延时, 以使激光介质上能级粒子数反转最大, 获得最大激光能量输出。本文设计了以 Arduino mega 2560 单片机为核心的高速转镜调 Q 控制系统, 通过精确单片机解析串口屏指令控制激光电源的充放电和高速电机启停, 同时通过对转镜脉冲信号整合降频控制氙灯放电时刻, 实现对延迟时间的精准控制, 实现了灯泵 Er,Cr:YSGG 激光纳秒窄脉冲调 Q 输出。在 5 Hz 重复频率下, 转镜转速为 650 r/s 时, 获得的最高单脉冲激光能量为 45.7 mJ、脉冲宽度为 86.2 ns, 相应的峰值功率为 530.2 kW。

**关键词:** 转镜调 Q; 固体激光器; Er,Cr:YSGG 激光; Arduino; 氙灯泵浦

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi:10.37188/OPE.20243208.1122

## High-speed rotating-mirror Q-switched Er,Cr:YSGG nanosecond narrow pulse laser at 2.79 $\mu\text{m}$

ZHU Yongbin<sup>1,2</sup>, MA Shengjie<sup>2</sup>, CHENG Tingqing<sup>2</sup>, WANG Li<sup>3</sup>, CHEN Yue ming<sup>1</sup>, JIANG Haihe<sup>1,2\*</sup>

- School of Biomedical Engineering, Anhui Medical University, Hefei 230032, China;
- Anhui Province Key Laboratory of Medical Physics and Technology, Institute of Health and Medical Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
- Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn

**Abstract:** Rotating mirror Q-switched technology incurs no intracavity insertion loss, making it a direct method for obtaining narrow pulses and high peak power output lasers. Nanosecond pulses require the use of high-speed rotating mirror Q-switch, along with precise control of motor speed and xenon lamp discharge delay. This ensures maximum population inversion of in the laser medium, leading to the highest laser energy output. This paper presented the design of a high-speed rotating mirror Q-switched control

收稿日期: 2023-10-30; 修订日期: 2023-11-20.

基金项目: 国家重点研发项目 (No. 2018YFB0407204)

system with the Arduino Mega 2560 microcontroller as its core. The system utilized precise parse of serial screen instructions by the microcontroller to control the charging and discharging of the laser power supply and the start-stop operations of the high-speed motor. Additionally, it integrated and downshifted the pulse signals from the rotating mirror to control the precise delay time for triggering the xenon lamp discharge, thereby achieving precise control over the delay time for the nanosecond narrow pulse Q-switched output of the lamp-pumped Er,Cr:YSGG laser. The highest single-pulse laser energy of 45.7 mJ, pulse width of 86.2 ns, and corresponding peak power of 530.2 kW were obtained at a repetition frequency of 5 Hz with a rotating mirror speed of 650 r/s.

**Key words:** rotating mirror Q-switch; solid state laser; Er,Cr:YSGG laser; Arduino; Xe flash lamp

## 1 引言

参量下转换、超连续谱产生等方法<sup>[1]</sup>可获得中红外波段的激光输出,但较大的量子亏损导致输出能量较低。调Q技术是目前获得纳秒激光的另一种重要方法,其中转镜调Q技术不需要在谐振腔内插入光学元器件,无腔内损耗,因此在相同泵浦条件下,其激光输出脉冲能量高于电光、声光和被动等调Q方式<sup>[2-7]</sup>。在一些中红外波段上,转镜调Q可以弥补饱和吸收体、电光和声光调Q器件的缺失,成为获得窄脉冲高峰值功率的唯一手段<sup>[8]</sup>。伴随着高速电机的发展,转镜调Q技术受到越来越多关注。

在转镜调Q激光系统中,精准控制氙灯放电时刻是获得高峰值功率输出的关键<sup>[9]</sup>。传统方法利用磁感应产生脉冲信号触发氙灯放电,这无疑会增加电机转轴的负荷,且重复频率不可控。2010年,Skorzakowski等<sup>[10]</sup>在转镜转速为115 r/s时,重复频率为25 Hz下,实现了氙灯泵浦2.94  $\mu\text{m}$  Er:YAG激光器单脉冲能量30 mJ,脉冲宽度300 ns的激光输出,其激光峰值功率为100 kW。2011年,Bizjak等<sup>[11]</sup>使用高反射率的硅作为转镜调Q激光器中的转镜,由转镜触发脉冲发生器激活电源的绝缘栅双极晶体管(Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT)模块,在转镜转速为200 r/s时,实现了2.87 Hz灯泵Er:YAG激光系统单脉冲能量16 mJ、脉冲宽度270 ns的2.94  $\mu\text{m}$ 调Q激光输出,相应的峰值功率为59.3 kW。2015年,Murphy等<sup>[12]</sup>采用高速旋转的多面扫描镜作为斩波器,当其高速旋转时,顶点周期性的进出光路,从而起到机械Q开关作用。同时以布鲁斯特角切割Er,Cr:YSGG晶体,在6.25

Hz重复频率下,获得了3.8 mJ的单脉冲调Q输出,脉冲持续时间为305 ns,峰值功率为12.5 kW,此时多面镜转速达400 r/s。2022年,Pushkin等<sup>[6]</sup>开展了Er:YAG和Er,Cr:YSGG转镜调Q激光研究,在450 r/s转速下,Er:YAG激光器中获得了能量75 mJ、脉冲宽度123 ns的10 Hz激光脉冲输出,而在Er,Cr:YSGG激光器实验中,虽然经过多方面改进,但仍未实现单脉冲激光输出。由于上述实验中的转镜转速不高,所获得的激光调Q脉冲宽度多在数百纳秒量级并伴随多脉冲现象。为了进一步压窄调Q激光脉冲宽度,需要提高转镜的转速,这就需要更为精准的放电延迟控制<sup>[13]</sup>。为此,通常使用信号发生器控制转镜调Q激光器放电延迟时间,成本高昂且无法实现激光器一体化,阻碍高峰值功率激光器应用发展。

本文通过高速转镜获得亚百纳秒调Q激光窄脉冲,针对高速转镜调Q激光器对精准控制延迟的需求,以Arduino Mega 2560为控制核心设计了转镜调Q脉冲延时控制系统,利用光电开关获得与转镜同步脉冲信号,控制氙灯放电合适的延迟时间,使转镜转至成腔位置时激光介质能级粒子数反转最大,获得最强的激光输出。在转镜转速为650 r/s下,实现了5 Hz脉冲灯泵Er,Cr:YSGG转镜调Q亚百纳秒窄脉冲激光的稳定输出。

## 2 高速转镜调Q延迟控制系统设计

### 2.1 电源和高速电机控制系统设计

为了精准控制激光电源充放电和高速电机启停,选择Arduino Mega 2560作为主控单片机系统(Microcontroller Unit, MCU),该单片机拥有AT-

mega2560 微处理器, 16 MHz 的时钟频率和 8 位的 AVR 架构, 能够处理复杂的计算任务和大量的输入/输出操作, 适用于需要高性能的应用<sup>[14-15]</sup>。通过串口屏指令设置激光电源和高速电机的工作参数, 实现对电源充放电和高速电机调速控制。同时, 还可采集获得激光放电频率、脉宽、能量强度等参数。系统的整体控制框图如图 1 所示。

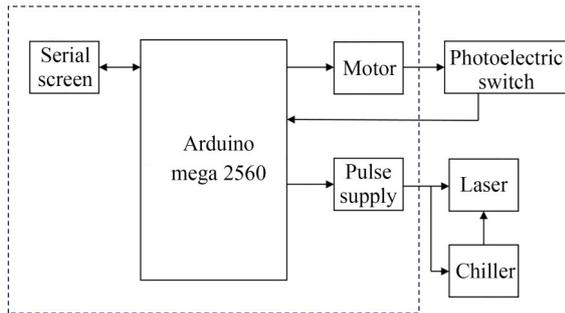


图 1 转镜调 Q 激光器系统整体架构框图

Fig. 1 Overall architecture diagram of rotating mirror Q-switched laser system

## 2.2 延迟控制系统设计

在转镜调 Q 激光控制系统中, 放电延迟时间  $\Delta t$  会对激光输出产生较大的影响, 获得稳定的高峰值功率激光输出, 关键点在于精准控制氙灯放电时刻, 以使得腔内反转粒子数达到饱和时, 转镜镜面正好转至与光轴垂直位置, 形成标准的平平激光振荡腔, 短时间内产生巨脉冲激光输出。

如图 2 所示, 设计的转镜调 Q 延迟控制装置, 可精准控制延迟时间。圆形转盘和镜片架一体成型, 固定在电机转轴上, 并在转盘上沿垂直于光轴方向开一条 3 mm 宽的长矩形透光缝。将转盘置于光电开关的感光槽之间, 随电机高速旋转, 光电开关检查转盘透光狭缝位置并同步转镜脉冲信号。当转镜转至图 2(a) 所示位置时, 单片机接收到光电开关电平变化信号, 转至图 2(b) 所示位置时, 转镜与输出镜形成平平激光振荡腔, 激光调 Q 发生。

随着电机转速变化, 由图 2(a) 所示位置转至图 2(b) 所示位置的时间也不同, 因此需要设置合适的延迟时间  $\Delta t_1$ , 使单片机在接收到光电开关电平变化信号一定时间后, 输出信号给激光电源开始氙灯放电。而从氙灯放电后也需要一定的时间  $\Delta t_2$  以保证反转粒子数积累到极大值, 经过  $\Delta t_1 +$

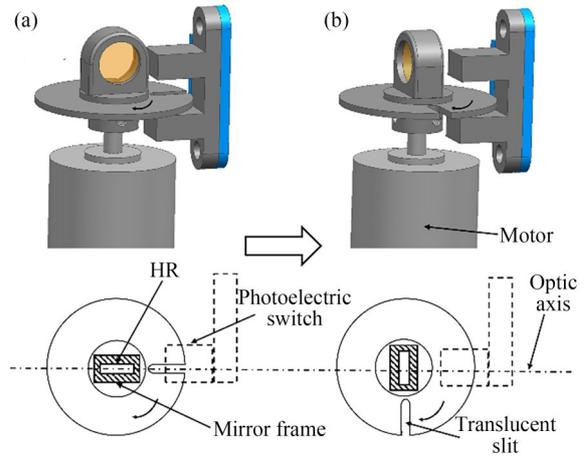


图 2 转镜调 Q 控制装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rotating mirror Q-switched laser control device

$\Delta t_2$  时间, 后腔镜刚好转到成腔位置, 此时可获得巨脉冲输出。转镜从图 2(a) 转至 2(b) 所示位置的时间  $\Delta t$  减去氙灯放电后反转粒子数积累时间  $\Delta t_2$ , 便是单片机在接收到光电开关信号后的延迟时间  $\Delta t_1$ 。调整  $\Delta t_1$  来改变氙灯放电的时刻, 直到输出的激光最强。延迟时间的控制时序图如图 3 所示。此外, 由于实验所用的激光电源最高重复频率只能达到 100 Hz, 远小于电机转动频率, 所以还需要单片机对脉冲信号进行降频处理。

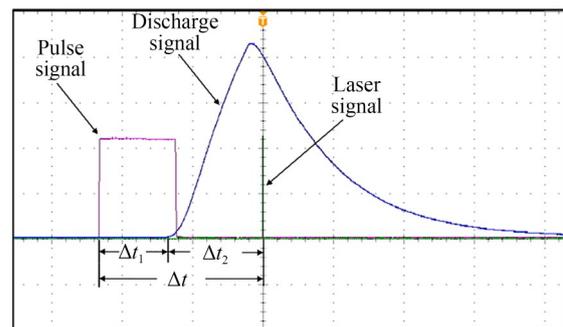


图 3 延迟时间控制时序图

Fig. 3 Delay time control timing diagram

当高速转镜转至图 2(a) 所示位置时, 光电开关槽中无遮挡, 接收管导通, OUT 模块输出由低变高, MCU 进入外部中断并开始计数, 当计数值达到设定倍率后, 单片机延迟设定好的时间输出 PWM 信号给激光电源对氙灯放电。通过 MCU 将转镜的脉冲信号整合降频并实现延迟时间可

调,相较于传统磁钢装置,提供了更精准的延时控制,整个转镜调Q系统更稳定可靠。

### 3 实验装置

实验装置如图4所示,激光增益介质Er,Cr:YSGG晶体的尺寸为 $\Phi 4\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ ,其中 $\text{Cr}^{3+}$ 和 $\text{Er}^{3+}$ 掺杂浓度分别为3 at. %和30 at. %,两端面均镀有 $2.79\text{ }\mu\text{m}$ 增透膜。转镜作为后腔平面全反镜,镀有 $2.79\text{ }\mu\text{m}$ 全反膜,反射率 $> 99\%$ ;OC为前腔平面输出镜,其 $2.79\text{ }\mu\text{m}$ 处反射率为70%,几何腔长为460 mm。实验采用氙灯泵浦,泵浦脉宽为 $250\text{ }\mu\text{s}$ 。后腔镜固定在直流电机主轴上随电机高速转动,光电开关用于检查转盘狭缝位置并同步转镜脉冲信号,MCU用于接收光电开关信号并延迟一段时间后触发激光电源对氙灯放电泵浦。为保证激光器长时间稳定运行,实验过程中采用循环去离子水带走泵浦时产生的多余热量,水温设置为 $(283\pm 0.3)\text{ K}$ ,流量为 $33\text{ L/min}$ 。

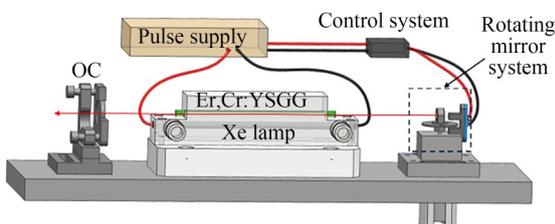


图4 转镜调Q激光实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rotating mirror Q-switched laser experimental device

## 4 实验结果与分析

### 4.1 延迟时间对激光输出的影响

转镜调Q激光器的最佳延迟时间一般在闪光灯放电脉冲的峰值之后。过早或过晚开始激光振荡都会影响激光器输出。为了找到最佳延迟时间,固定电机转速 $600\text{ r/s}$ ,泵浦能量 $26\text{ J}$ ,通过调节 $\Delta t$ 改变氙灯开始放电的时刻,用能量计(Coherent J-50MB-IR)测量不同延时下的激光输出脉冲能量。

由图5可以看出,在氙灯泵浦脉宽为 $250\text{ }\mu\text{s}$ 时,激光器在氙灯放电后 $330\text{ }\mu\text{s}$ 获得的调Q输出

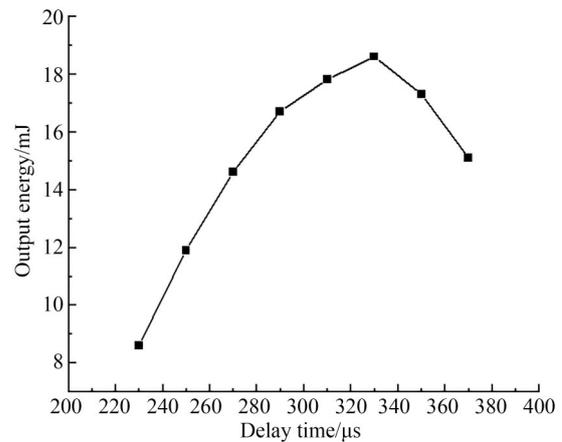


图5 脉冲能量随延迟时间变化曲线

Fig. 5 Characteristic curve of pulse energy changing with delay time

脉冲能量达到最大。若延时小于该最佳延时,反转粒子数未达到饱和值,增益介质还在继续储存能量,所以输出能量相对较小。而如果延时大于该最佳延时,由于自发辐射的增加,同样会导致输出能量下降。因此,本文研制的转镜调Q激光器系统最佳延迟时间为 $330\text{ }\mu\text{s}$ 。

### 4.2 转镜转速对激光输出的影响

为了探究转镜的转速对调Q激光输出的影响,固定泵浦能量 $26\text{ J}$ ,利用光电探测器(VIGO PVI-ZTE-10.6)测量不同转速下的调Q激光脉冲波形。如图6所示,低转速下由于Q脉冲振荡时间过长,第一个脉冲形成后无法消耗全部的上能级粒子数,剩余的上能级粒子足够多以至于多脉冲生成。这应该是Pushkin等人未能在Er,Cr:YSGG激光实验中获得单脉冲激光脉冲输出的主要原因<sup>[6]</sup>。随着电机转镜转速的提高,能够有效消除输出脉冲激光中的多脉冲。在转速为 $650\text{ r/s}$ 和 $700\text{ r/s}$ 时,均已获得单脉冲激光输出,脉宽分别为 $92.9\text{ ns}$ 和 $90.6\text{ ns}$ ,此时的单脉冲能量分别为 $21.6\text{ mJ}$ 和 $19.5\text{ mJ}$ 。而更高转速时将产生较大的机械振动,影响装置的稳定性和可靠性;同时随着转速的增加,增益介质内存储的反转粒子数无法全部转化为激光输出,造成激光输出能量降低。综合考虑,转速取 $650\text{ r/s}$ 最佳。

在转镜调Q激光器系统中,谐振腔腔长越短,谐振腔损耗降低,输出激光模式增加,更容易出现多脉冲现象。适当增加腔长可以减小开关时间,获得更高的单脉冲输出。为了提高单脉冲

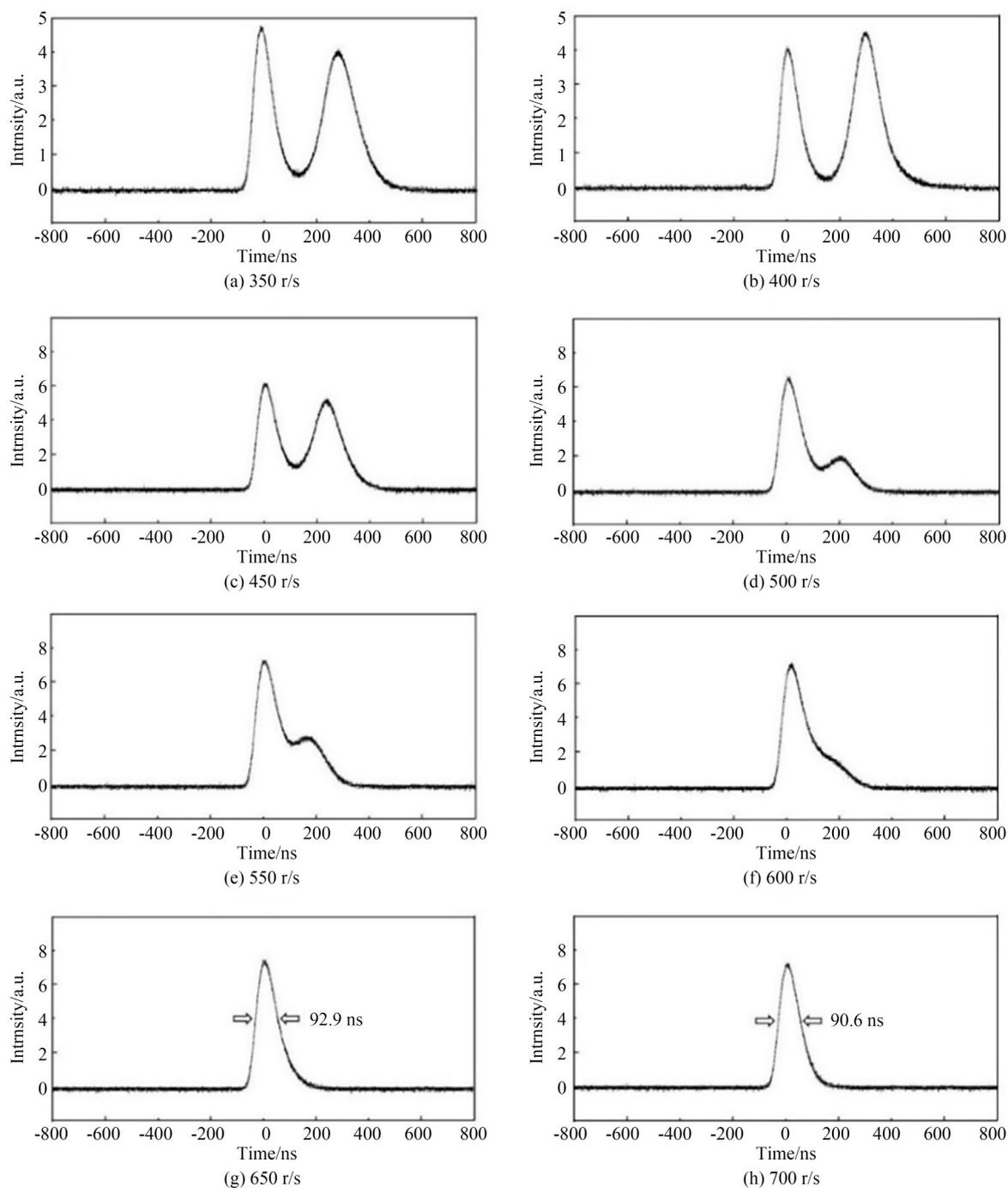


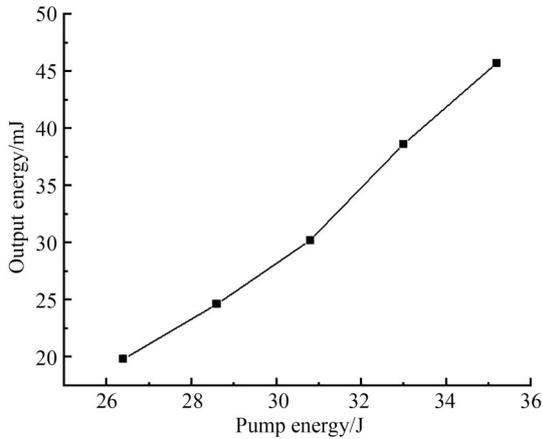
图 6 不同转速下的激光脉冲波形图

Fig. 6 Waveform diagram of laser pulse at different speeds

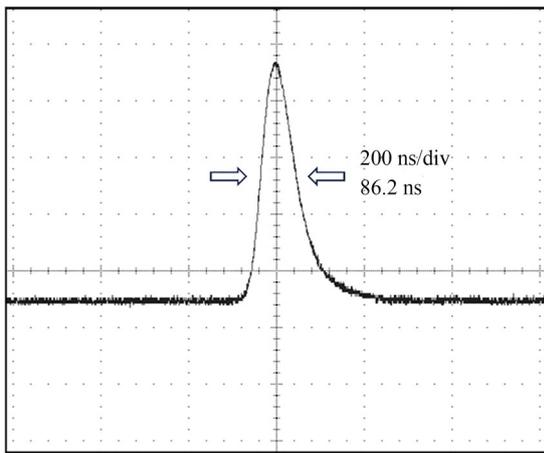
激光能量输出,将腔长增加至460 mm,并在输出镜与增益介质之间加上小孔光阑,这样不仅可限制高阶激光模振荡,也可协同控制精度。逐渐增加泵浦能量得到如图7(a)所示的激光输出能量曲线图,在5 Hz重复频率下,泵浦能量为35.2 J时,得到最大单脉冲能量45.7 mJ,相应的脉冲宽

度为86.2 ns,对应的峰值功率达530.2 kW。此时的调Q激光脉冲波形如图7(b)所示。考虑到继续增加泵浦能量可能会损坏光学元件膜层,本实验就没有进行更大泵浦能量的实验。

在重复频率10 Hz下,激光器转镜调Q输出脉冲波形如图8所示,最大单脉冲能量为



(a) 脉冲能量随泵浦能量的变化曲线  
(a) Pulse energy versus pump energy



(b) 45.7 mJ时的脉冲图  
(b) Pulse profile at 45.7 mJ

图 7 不同泵浦能量下的调 Q 输出特性  
Fig.7 Q-switched output characteristics changed with pump energy

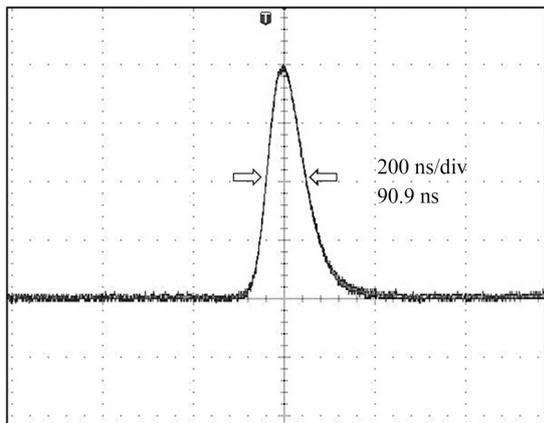


图 8 21.8 mJ 的脉冲图  
Fig. 8 Pulse profile at 21.8 mJ

21.8 mJ, 相应的脉宽为 90.9 ns。由于未对激光热效应进行补偿, 10 Hz 运行下的激光脉冲能量较 5 Hz 时有所下降, 且脉宽相应增大。

### 4.3 激光光束质量与稳定性测量

利用光斑相机 (LaserDecCR200) 对所研制的高速转镜调 Q Er,Cr:YSGG 激光器进行光斑测量, 并通过  $M^2$  因子分析激光光束质量, 结果如图 9 所示。在 5 Hz 重复频率下、单脉冲能量 45.7 mJ 时, 激光束在 X, Y 方向的  $M_x^2/M_y^2$  分别为 7.3 和 7.41。

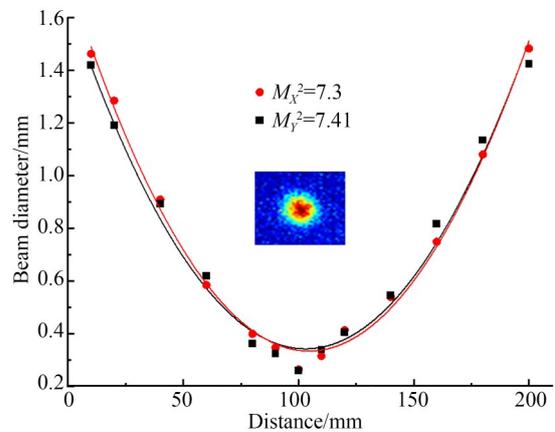


图 9  $M^2$  因子及远场光斑图

Fig. 9 Factor of  $M^2$  and the far-field beam profile

另外, 为了探究高速转镜调 Q Er,Cr:YSGG 激光器的稳定性, 测试了 30 min 的激光输出能量。结果如图 10 所示, 激光器输出的能量波动标准偏差 SD 小于 4.25%。说明所研制的转镜调

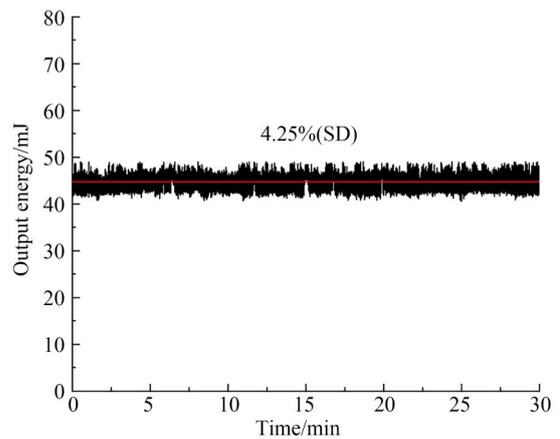


图 10 30 min 脉冲能量波动性

Fig. 10 Pulse energy fluctuation over 30 min

Q Er,Cr:YSGG 激光器具有较高的稳定性,能够长时间稳定工作。

## 5 结 论

综上所述,本文基于 Arduino 设计研制了高速转镜调 Q 控制系统,通过串口屏指令控制激光电源泵浦和高速电机启停,通过光电开关同步装置精准控制转镜调 Q 的延迟时间以获得最大激光输出。基于此控制系统研制的氙灯泵浦 Er,Cr:YSGG 激光器,实现了 5 Hz 重复频率下脉冲宽

度亚百纳秒的高峰值功率转镜调 Q 激光输出,在转速为 650 r/s 时,获得的最高单脉冲能量为 45.7 mJ,最窄脉冲宽度达 86.2 ns,相应的峰值功率为 530.2 kW。此外激光器在 30 min 内能量波动标准偏差小于 4.25%,具有较高的稳定性。该高速转镜控制系统无插入损耗,不仅突破性获得了亚百纳秒调 Q 激光脉冲,而且也提高了激光脉冲峰值功率。高速转镜调 Q 控制系统能够直接获得窄脉冲,可弥补一些中红外波段上饱和吸收体、电光和声光调 Q 器件的缺失,为窄脉冲高功率中红外激光应用提供手段。

## 参考文献:

- [1] 董航舟,葛廷武,刘伟,等.皮秒脉冲近红外超连续谱激光器[J].光学精密工程,2022,30(20):2430-2435.  
DONG H Z, GE T W, LIU W, *et al.* Picosecond pulsed near infrared supercontinuum laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(20): 2430-2435. (in Chinese)
- [2] WANG L, WANG J T, YANG J W, *et al.* 2.79  $\mu\text{m}$  high peak power LGS electro-optically Q-switched Cr, Er: YSGG laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2150-2152.
- [3] YANG J W, WANG L, WU X Y, *et al.* High peak power Q-switched Er: YAG laser with two polarizers and its ablation performance for hard dental tissues[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15686-15696.
- [4] JIANG L L, WU Z C, CHENG T Q, *et al.* 2.79- $\mu\text{m}$  efficient acousto-optic Q switched Er, Cr: YSGG laser with an LiNbO<sub>3</sub> crystal modulator[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(23): 6193-6196.
- [5] XIONG Z D, JIANG L L, CHENG T Q, *et al.* 100Hz repetition-rate 2.794 $\mu\text{m}$  Cr, Er: YSGG passively Q-switched laser with Fe<sup>2+</sup>: ZnSe saturable absorber [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 122: 104087.
- [6] PUSHKIN A V, POTEKIN F V. Features of the high-power (up to 1 MW, 100 mJ) 3- $\mu\text{m}$  nanosecond laser pulse generation in erbium-doped crystals in the repetitively pulsed regime[J]. *JETP Letters*, 2022, 116(8): 514-521.
- [7] KARKI K, FEDOROV V, MARTYSHKIN D, *et al.* High energy (0.8 J) mechanically Q-switched 2.94  $\mu\text{m}$  Er: YAG laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 4287.
- [8] 王希军,耿小涛,岱钦,等.棱镜转镜 Q 开关的驱动设计及稳定性分析[J].光学精密工程,2009,17(2):257-261.  
WANG X J, GENG X T, DAI Q, *et al.* Design and stability analysis of driving system in spinning prism Q-switch[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 257-261. (in Chinese)
- [9] WANNOP N M, DICKINSON M R, CHARLTON A, *et al.* Q-switching the erbium-YAG laser [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(10): 2043-2053.
- [10] SKÓRCZAKOWSKI M, PICHOLA W, ŚWIDERSKI J, *et al.* 30 mJ, TEM<sub>00</sub>, high repetition rate, mechanically Q-switched Er: YAG laser operating at 2940 nm [J]. *Opto-Electronics Review*, 2011, 19(2): 206-210.
- [11] BIZJAK A, NEMEŠ K, MOŽINA J. Rotating-mirror Q-switched Er: YAG laser for optodynamic studies[J]. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 57(1): 3-10.
- [12] MURPHY F J, ARBABZADAH E A, BAK A O, *et al.* Optical chopper Q-switching for flash-lamp-pumped Er, Cr: YSGG lasers [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(4): 045802.
- [13] 柳祝平,唐景平,胡丽丽,等. Cr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐钕玻璃转镜调 Q 激光性质研究[J]. 物理学报, 2005, 54(9): 4422-4426.  
LIU Z P, TANG J P, HU L L, *et al.* Laser properties of rotating prism Q-switched Cr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>: phosphate glasses[J]. *Acta Physica Sinica*,

2005, 54(9): 4422-4426. (in Chinese)

- [14] UZAIR M, YACOUB AL-KAFRAWI S, MANAF AL-JANADI K, *et al.* A low-cost IoT based buildings management system (BMS) using arduino mega 2560 and raspberry pi 4 for smart monitoring and automation[J]. *International Jour-*

*nal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2022, 13(3): 219-236.

- [15] YUE Z, XINGJIAN S, YINGYING T. Design of intelligent tracking car based on Arduino Mega 2560 [J]. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, 2023, 6(3): 50-56.

#### 作者简介:



朱永斌(1998—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,2020年于安徽工业大学获得学士学位,主要从事激光技术及应用研究。Email: 18855576267@163.com

#### 通讯作者:



江海河(1961—),男,安徽桐城人,研究员,博士生导师,主要从事激光技术及应用研究,特别是中红外激光技术。Email:hjiang@aiofm.ac.cn