

## MOPA 结构准分子激光同步触发设计

王 晨<sup>1,2</sup>, 梁 勳<sup>1</sup>, 林 颖<sup>1</sup>, 方晓东<sup>1,3</sup>

- (1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 深圳盛方科技有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘 要:** 介绍了一种 MOPA 结构的准分子激光全隔离型、高精度的同步触发系统。首先, 提出锁相环移相技术结合传统计数脉冲的方法实现了系统的高分辨率与大范围; 其次, 采用全电气隔离的方式实现了系统在复杂的电磁干扰环境下长期稳定运行以及实时控制。系统主要参数达到分辨率 1 ns、延时及脉宽调节范围 0~325  $\mu$ s、各通道间的抖动 < 60 ps、前后沿 < 1.5 ns。同步触发系统应用于一套 193 nm 深紫外 MOPA 结构准分子激光装置, 在 4 kHz 的高重频下实现了对 MOPA 双腔放电延时的精准实时控制, 相对放电延时可严格控制在最佳时间段, 放电时序抖动  $\leq \pm 4$  ns, 最后成功获得 PA 腔对 MO 腔种子光的脉冲能量放大, 最大放大率达到 19.2, 最大输出脉冲能量达到 7.1 mJ, 满足深紫外光刻应用需求。

**关键词:** 同步触发; 振荡放大; 全隔离; 高精度; 延时

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200516

## Synchronization trigger design of MOPA structure excimer laser

Wang Chen<sup>1,2</sup>, Liang Xu<sup>1</sup>, Lin Ying<sup>1</sup>, Fang Xiaodong<sup>1,3</sup>

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Shenzhen ShengFang Tech Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** A fully isolated, high-precision synchronous trigger system with MOPA structure of excimer laser was introduced. Firstly, the phase-locked loop phase shift technology combined with the traditional pulse counting method was proposed to realize the high resolution and large range of the system; Secondly, the full electrical isolation way was used to achieve long-term stable operation and real-time control of the system in a complex electromagnetic interference environment. The main parameters of the system reached a resolution of 1 ns, a delay and pulse width adjustment range of 0-325  $\mu$ s, the jitter between each channel was less than 60 ps, and the front and back edges were less than 1.5 ns. Synchronous trigger system applied to a set of 193 nm deep ultraviolet MOPA structure excimer laser device. It realized the precise real-time control of MOPA dual cavity discharge sequence under the high repetition frequency of 4 kHz, the relative discharge delay can be strictly controlled in the best time period, the discharge timing jitter was less than  $\pm 4$  ns, and the pulse energy amplification of the MO cavity seed light was successfully obtained by the PA cavity. The magnification rate reached 19.2, and the

收稿日期: 2020-12-25; 修订日期: 2021-02-22

基金项目: 中国科学院青促会资助项目 (2018481); 深圳市科技计划项目 (KQTD20170331115422184)

作者简介: 王晨, 男, 硕士生, 主要从事高精度多路激光同步触发系统的研究。

导师简介: 梁勳, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光和光电子技术及应用方面的研究。

方晓东, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事准分子激光器以及功能性薄膜的激光制备等方面的研究。

maximum output pulse energy reached 7.1 mJ. It meets the needs of deep ultraviolet lithography applications.

**Key words:** synchronous trigger; oscillation amplification; full isolation; high precision; delay

## 0 引言

多路激光的复杂系统中<sup>[1-2]</sup>,通常对各部件的同步触发特性要求较高,包括精度、抖动、上升沿、抗干扰等。例如在深紫外(Deep Ultra-Violet, DUV)光刻光源系统中,ArF 准分子激光器通常采用主控振荡功率放大结构(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA),由于主振腔的种子光束必须在功率放大腔粒子数发生反转期间通过其放电区域,即当 MO 腔先于 PA 腔 20~40 ns 放电,才能被放大<sup>[3-5]</sup>;同时系统的光输出效率对种子光到来的时间非常敏感<sup>[6]</sup>,通常要求系统在 4~6 kHz 的高重频<sup>[7]</sup>下放电时序抖动在 $\pm 5$  ns 内。另外,在极紫外(Extreme Ultra-violet, EUV)光刻光源系统中,要求预、主脉冲激光精确地在焦点处对液滴进行照射,从而产生 EUV 辐射<sup>[8]</sup>。EUV 辐射的转化效率对激光和液滴的作用时间匹配要求也很高,通常需要在 50-100 kHz 的高重复频率下同步在百纳秒量级内。同时,由于多路激光系统中复杂的电磁干扰环境<sup>[9-10]</sup>、不同的负载特性等因素存在,采用精度高、调节范围宽、抖动低、同步性好<sup>[11]</sup>、沿变陡峭且电气全隔离结构<sup>[12]</sup>的同步触发系统,是保证系统稳定可靠运行<sup>[13-14]</sup>、实现高性能参数的必要条件。

在 MOPA 结构准分子激光的同步触发方案中,目前主要包括,微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)以及 FPGA 等中控器件的软件计数、数字芯片的硬件计数、光纤延时技术<sup>[15]</sup>、以及专用的高精度延时电路等。其中,采用软、硬件计数的方式产生的同步延时控制,同步信号抖动较低,但同步精度均与芯片的主频有关,对于要求精度和抖动在 ns 和亚 ns 量级的延时同步触发应用中则不能满足要求。对于光纤延时技术,一般通过严格控制光纤长度来控制延时,系统精度高且稳定,但光纤一般较长,系统移动性较差,调节局限性很大。如采用专用的高精度延时电路,虽然可以获得 ns 至 10 ps 量级的精度,但这种方案电路复杂、成本较高、控制难度较大,而且通常延时芯片在延时范围不同的情况下抖动特性不同。

文中介绍了一种 MOPA 结构的准分子激光全隔离型、高精度的同步触发系统设计,系统先采用 FPGA 主频倍频后计数实现粗延时范围,结合内部锁

相环移相技术实现细延时范围,粗、细延时结合实现了系统的高分辨率与大范围;然后再采用板级上全电气隔离以及外壳静电屏蔽的方式实现了系统在复杂的电磁干扰环境下长期稳定运行以及实时控制。系统应用于一套 193 nm 深紫外 MOPA 结构准分子激光装置,在 4 kHz 的高重频下实现了对 MOPA 双腔放电延时的精准实时控制,调节步进达 1 ns,放电时序抖动小于 $\pm 4$  ns,成功获得 PA 腔对 MO 腔种子光的脉冲能量放大,满足了 MOPA 结构的准分子激光在光刻等领域的应用需求。

## 1 多路同步触发系统设计

多路同步触发系统主要由隔离输入模块、基于 FPGA 芯片的脉冲处理模块、微控制单元模块、隔离输出及电平调幅模块等组成。系统整体框架如图 1 所示。隔离输入模块负责检测外触发信号并将信号电气隔离后传送至脉冲处理模块;脉冲处理模块负责将外触发信号经过延时及脉宽调制后进行输出;微控制单元模块一方面负责与 FPGA 芯片进行 SPI 通讯,另一方面负责对通道电压值、延时值、脉宽值进行控制和显示;隔离输出及电平调幅模块负责接收脉冲处理模块的信号,并进行幅值调节和纹波处理,最后将信号以光、电两种信号方式进行输出。此系统在输入、输出以及通讯中皆采用光耦将内部电气结构与外界隔离开,有效避免了在设备放电激励时存在的强电磁干扰问题。

传统的同步触发方案中,采用 FPGA 等中控器件主频计数的方式控制延时等参数的方法,工作时序如图 2 所示。通常这种方案的同步信号抖动较低,但同步精度与调节步进均取决于系统时钟的周期,仅适用于大范围、精度不高的应用场合。

文中提出一种粗、细延时相结合的延时方案,粗延时采用 FPGA 主频倍频后计数,细延时采用内部锁相环移相技术配合简单电路。系统的每一路输出均通过 FPGA 内部组建的四个 D 触发器、两个计数器、一个反相器和三路时钟信号实现,搭建的内部电路如图 3 所示。其中,CLK\_0 为 FPGA 主频倍频后的时钟,时钟周期为  $T$ ;将时钟  $N$  等分,获得相对于 CLK\_0 精确移相周期数量  $Q_D$  的 CLK\_1 以及精确移相周期数

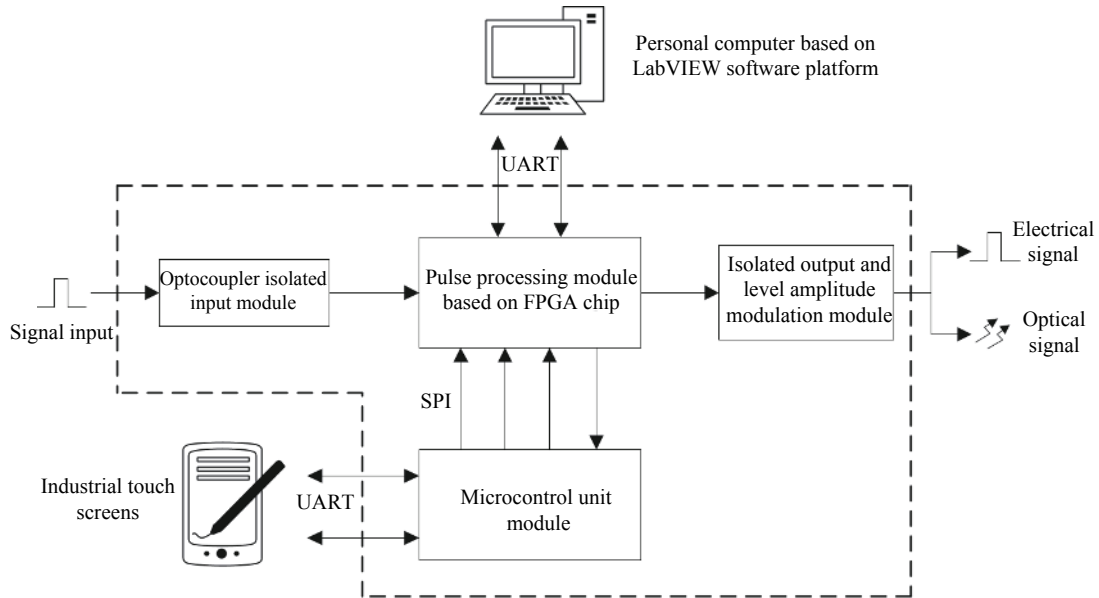


图 1 多路同步触发系统整体框架图

Fig.1 Overall frame diagram of the multichannel synchronous triggering system

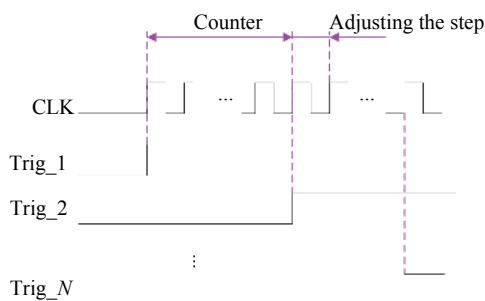


图 2 传统计数型同步触发时序图

Fig.2 Timing diagram of traditional counting synchronous trigger

量  $Q_w$  的  $CLK_2$ 。

脉冲处理模块的工作过程: 首先, FPGA 获得上一

路触发信号  $Trig_N$ , 通过计算获得下一路触发信号  $Trig_{N+1}$  的延时  $T_D$  所需的粗延时计数周期数量  $P_D$  和细延时移相周期数量  $Q_D$ , 即可实现延时时间  $T_D = P_D \times T + Q_D \times \frac{T}{N}$ 。同理, 也可实现脉宽时间  $T_w = P_w \times T + Q_w \times \frac{T}{N}$ , 工作时序如图 4 所示。脉冲处理模块细延时电路简单, 延时及脉宽的调节精度高, 无需添加专用芯片即可实现系统调节步进精度  $\leq 1$  ns, 系统具体分辨率取决于时钟周期等分数  $N$ 。

延迟信号经高速隔离后进行电平调幅, 以适应系统对不同负载特性的需求。电平调幅同样通过高速隔离控制实现, 满足强电磁干扰环境的应用需求。

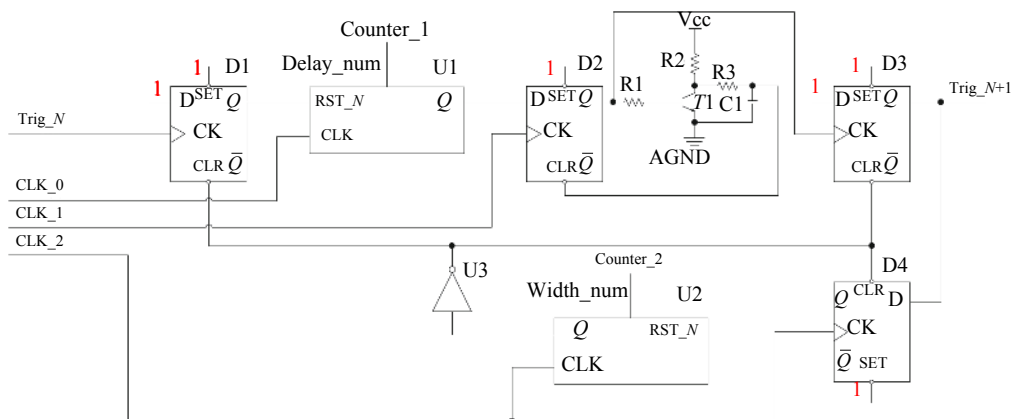


图 3 脉冲处理模块电路示意图

Fig.3 Circuit diagram of pulse processing module

系统具有两种控制方式,第一种为基于嵌入式的触摸屏,其空间小、方便灵活且易操作,可以直接通过触摸屏对系统参数进行修改和显示;第二种为基于 LabVIEW 的 PC 端控制,具有匹配多种硬件接口,可搭建图形化软面板,开发周期短,易集成等特性,方便复杂系统的整体控制和数据采集、记录等。LabVIEW 控制下的流程框架如图 5 所示。

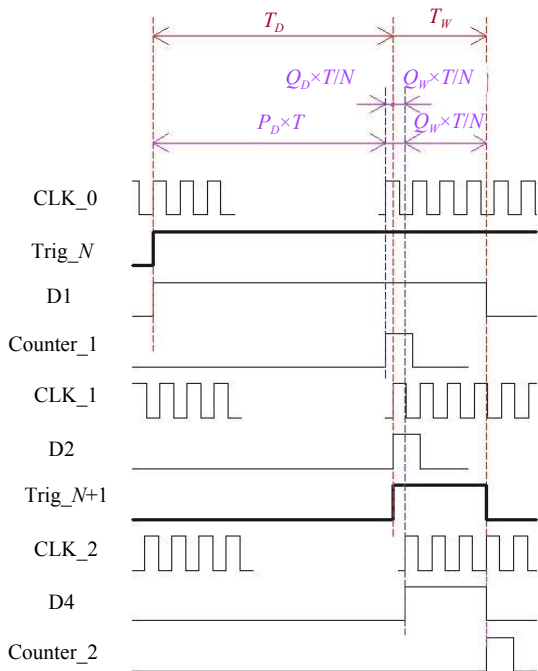


图 4 脉冲处理模块时序图

Fig.4 Sequence diagram of pulse processing module

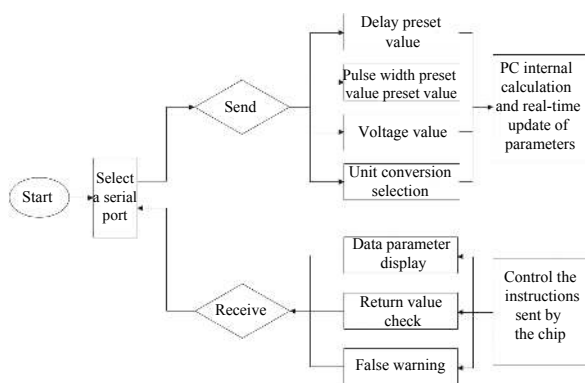


图 5 LabVIEW 流程框架图

Fig.5 Flow diagram of LabVIEW framework

## 2 实验测试与结果分析

### 2.1 系统性能测试

采用 LeCroy 的 44Xs-A 示波器对系统性能进行

测试,带宽 400 MHz,采样率为 2.5 GS/s。图 6 和图 7 中,C1、C2、C3 为三路输出。在外部 TTL 电平信号触发下,测得系统最大延时、脉宽达到 325  $\mu$ s,调节步进为 1 ns;测得任意两输出信号之间的抖动标准差为 58.24 ps,如图 6 所示。

触发系统中,较快的上升沿以及下降沿可以更有效地触发时序控制,开启与关断电信号,降低系统抖动。选择系统任意输出通道测得上升沿平均值为 1.09 ns,下降沿平均值为 1.35 ns,如图 7 所示。

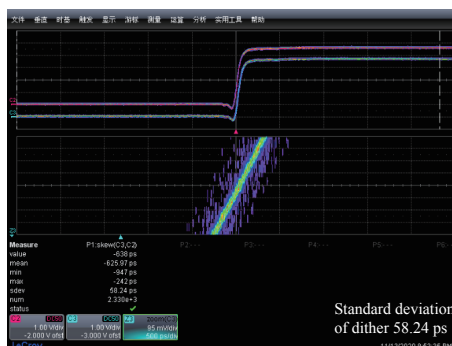


图 6 抖动测试数据及波形图

Fig.6 Diagram of jitter test data and waveform

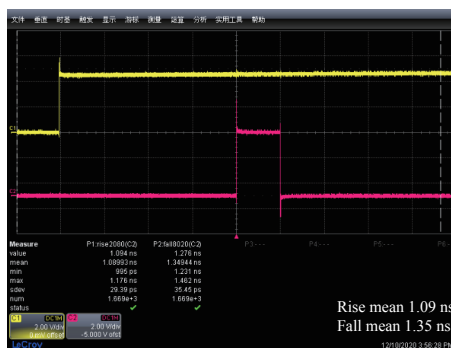


图 7 沿变数据以及波形图

Fig.7 Edge data and waveform

### 2.2 MOPA 准分子激光实验平台

利用文中设计的高精度同步触发系统,和课题组研发的高重频准分子激光器,搭建如图 8 所示的 MOPA 结构 193 nm 准分子激光系统,其工作原理如图 9 所示。其中,同步触发系统控制 MO、PA 两腔的放电,MO 腔输出窄线宽、低能量的种子光,种子光在 PA 腔中获得增益,输出放大后的高能量激光脉冲。系统测试示波器采用 Tektronix 的 DPO7254,带宽为 2.5 GHz,采样率为 40 GS/s;高压探头采用 Tektronix 的 P6015A,带宽 75 MHz,峰值 40 kV。



图 8 实验平台

Fig.8 Experiment platform



图 10 MOPA 双腔放电时间图

Fig.10 Time diagram of MOPA dual chamber discharge

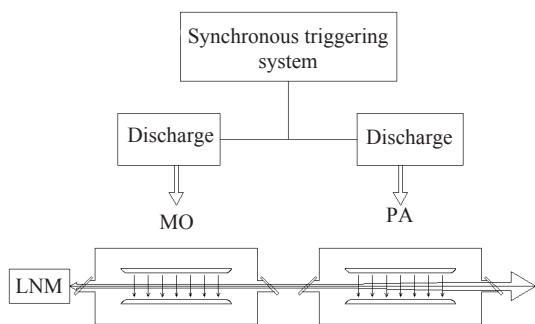


图 9 MOPA 准分子激光器工作原理

Fig.9 Work principle of MOPA excimer laser

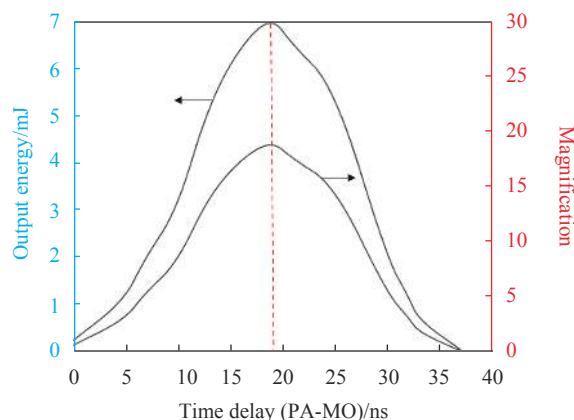


图 11 放大率-放电延时曲线图

Fig.11 Magnification - discharge delay graph

### 2.3 实验测试数据

系统的输出能量和两腔的放电激励延时及抖动密切相关,即要求相对放电延时时间在 20~40 ns 之间可调,且两路放电激励的相对抖动 $<\pm 5$  ns。对于两腔的相对放电时间,可通过设置同步触发系统通道的延时值进行精准控制。但由于存在主回路开关的抖动、磁开关复位电流、谐振充电电压的波动,且两腔功能的不同和内部气体的配比不同,这些都会影响双腔放电时序的需求。测得两腔放电时间如图 10 所示,放电时序抖动小于 $\pm 4$  ns。

针对该系统的光路结构,在 4 kHz 重频运行下,以步进 1 ns 的方式调节 PA 腔相对 MO 腔放电的延时值,测试放大率-延时的相对变化情况,如图 11 所示,系统的放大率在相对延时 18~20 ns 处获得峰值,此时整体系统获得最大放大率 19.19,最大输出脉冲能量 7.1 mJ。

上述实验现象表明,系统可以灵活地调节两腔放电的相对延时值,使相对延时时间处于最佳放电时间段,实现 MOPA 两腔同步放电时序抖动控制在 $\pm 4$  ns 以内,成功对种子光脉冲能量进行放大。同时,系统

可以在强干扰、高重频下保持稳定运行,且具备高精度、低抖动、调节范围宽等特性,提高了激光器输出能量的稳定性,满足光刻光源的应用要求。

### 3 结论

文中设计了一种 MOPA 结构的准分子激光全隔离型、高精度的同步触发系统,系统先采用 FPGA 主频倍频后计数实现粗延时范围,结合内部锁相环移相技术实现细延时范围,这种方案调节范围宽,同时调节精度高;然后再采用全电气隔离以及外壳静电屏蔽的方式实现了系统在复杂的电磁干扰环境下长期稳定运行以及实时控制。系统应用于一套 193 nm 深紫外 MOPA 结构准分子激光装置,在 4 kHz 的高重频下对系统进行了测试,该系统具有精度高、调节范围宽、抖动低、同步性好、沿变陡峭且电气全隔离结构等特点,最后成功获得 PA 腔对 MO 腔种子光的脉冲能量放大,最大放大率达到 19.2,最大输出脉冲能量

达到 7.1 mJ。该设计满足 MOPA 结构的准分子激光装置在光刻、科研等领域的使用需求。

#### 参考文献:

- [1] Zhu Haohan, Wang Xiaochao, Huang Wenfa, et al. High precision time synchronization fiducial system of SG-II high-power laser driver [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1101011. (in Chinese)
- [2] Dang Z, Yuan X D, Yuan X B, et al. The research of automatic control system of XG II laser facility [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(4): 36-39. (in Chinese)
- [3] Qian X D, Li X R, Liang X, et al. Synchronous control for MOPA excimer laser systems [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 233-236. (in Chinese)
- [4] Dong L, Liu X Y, Chen H. Properties of pulse single-frequency laser and extra-cavity double frequency green laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 800-805. (in Chinese)
- [5] Fujita E, Mashiko Y, Asaya S, et al. High power narrow-line-width linearly-polarized 1610 nm Er: Yb all-fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26255.
- [6] Takahito Chibana, Hitoshi Nakano, Hideo Hata, et al. Development status of a 193 nm immersion exposure tool[C]//Proc of SPIE, 2006, 6154: 61541V.
- [7] Liang X, Zhao D L, Lin Y, et al. High repetition rate and high accuracy capacitor charging pulse power supply based on controllable LC series resonance [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 3022-3027. (in Chinese)
- [8] Qi L H, Ni Q L, Chen B. Experimental investigation of laser-produced-plasma EUV source based on liquid target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(5): 604-607.
- [9] Yu F, Li D H, Xue L. Electromagnetic compatibility design in optics and image processing equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004(1): 100-106. (in Chinese)
- [10] Pan N, Liang X, Lin Y, et al. Transmission method of analog signal in excimer laser system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0905003. (in Chinese)
- [11] Liu R J, Ma C, Shi W, et al. Study on time jitter and trigger synchronization characteristics of ns pulsed laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20200147. (in Chinese)
- [12] Wang X Y, Tang G F, Wei X G, et al. Discussion on isolation requirement of high voltage DC/DC converter for MMC-HVDC transmission system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(8): 172-178. (in Chinese)
- [13] Shi H Y, Zhao J S, Song X L, et al. Analysis on factors affecting energy stability of excimer laser for lithography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3540-3546. (in Chinese)
- [14] Zhao D L, Li W J, Liang X, et al. Study on energy stability for excimer laser skin therapeutic apparatus [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1206001. (in Chinese)
- [15] Wang Y, Ding K, Xu Y L. Optical fiber vibration sensing system using delay line method [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(3): 853-857.