

文章编号: 0258-7025(2010)02-0374-05

# 实时调节工作电压实现稳定准分子脉冲能量

梁 勳 游利兵 王 涛 余吟山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 介绍了一种准分子激光脉冲能量稳定系统。它由能量检测、开关电源和控制器组成。其组成部分均良好屏蔽, 组件之间由光纤传递信息, 通过均值算法进行脉冲-脉冲的放电电压调节, 在闸流管放电的强电磁干扰条件下实现了可靠的闭环控制。该系统实验于一重复频率 5 Hz, 采用火花预电离的 KrF 激光器。在气体状态好的情况下, 将脉冲能量波动相对标准差由 4.71% 降低至 3.01%; 在气体状态较差、放电电压较低的情况下, 将脉冲能量波动相对标准差由 7.18% 降低至 3.62%, 有效地提高了脉冲能量的稳定性。

**关键词** 激光器; 准分子; 能量稳定; 闭环控制; 实时检测

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0374

## Excimer Pulse Energy Stabilization Realized by Charging Voltage Realtime Adjusting

Liang Xu You Libing Wang Tao Yu Yinshan

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A closed-loop feedback system for excimer laser pulse energy stabilization was introduced, which included a pulse energy detecting part, a switching mode power supply and a controller. Each part of the system was well shielded and the signals between the parts were transmitted by fibers. With average algorithm of pulse-pulse discharge voltage, the reliable close-loop control can be realized under the condition of strong electromagnetic interference. Tested on a 5 Hz spark discharged KrF laser, the system effectively reduced the laser pulse energy fluctuations standard deviation from 4.71% to 3.01% with a gas fill in a sound situation and from 7.18% to 3.62% with the gas in a poor situation and low discharge voltage. The method can effectively improve the stability of pulse energy.

**Key words** lasers; excimer; energy stability; closed-loop; real time testing

### 1 引 言

使用输出能量反馈的方式使激光输出稳定的控制方法在多种不同的激光器中已有应用, 但国内在准分子激光器件方面这类成功的研究尚不多见, 究其原因主要为以下几点:

1) 高压脉冲开关电源。国内目前固体激光器的脉冲开关电源已经商品化, 技术相当成熟。其指标一般为电压小于 2 kV, 放电速度数百微秒, 放电电流数百安培; 而准分子激光器要求工作电压达 30 kV 以上, 闸流管放电速度约 100 ns(电极间更短),

放电电流上万安培。高电压大电流放电干扰使这类开关电源不易稳定工作, 国内电源行业尚无成熟产品。由 50 Hz 电网直接升高压的准分子电源在电压调节上的慢节奏使得实时调节难以实现。

2) 系统各部分运行的可靠性。激光放电激励时超强的电磁干扰使整个控制系统可靠性下降甚至无法工作。

3) 脉冲能量的实时检测。通常重复频率运行激光器的脉冲能量可通过平均功率推算获得, 但丢失了脉冲能量起伏的信息; 在脉冲能量稳定性要求

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-04-07

作者简介: 梁 勳(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光器控制系统方面的研究。E-mail: liangxu-lx@ustc.edu

导师简介: 余吟山(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事准分子激光方面的研究。E-mail: ysyu@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

高的应用中,如光刻光源,需要关注单个脉冲的能量状况,以便使控制系统实现根据前面单个或若干脉冲的能量起伏来控制后序脉冲能量的调节<sup>[1~3]</sup>。这就要求探测器能够实现对单个脉冲的实时测量、记录及运算的功能,目前亦无产品。

本文介绍了一种准分子激光器输出脉冲能量稳定系统,其探测部分能检测并反馈每个脉冲能量信号,控制器采用均值算法实时提供调节信号,开关电源具备 100  $\mu$ s 内实现在可调范围内任意调节输出高压的能力。系统各部分均良好屏蔽,通过光纤完成内部的信号传输,避开了闸流管放电的强干扰,在低重复频率下实现了准分子激光的脉冲-脉冲调节,提高了激光脉冲能量的稳定性。

## 2 系统设计

### 2.1 能量检测部分

激光能量的检测采用热释电探头,其光电转换输出的电压波形如图 1 所示;电压波形的峰-峰值  $V_{pp}$  与接收激光脉冲的能量成正比,如图 2 所示<sup>[4~6]</sup>。

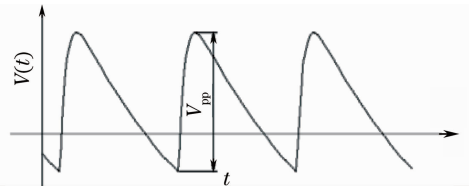


图 1 热释电探头对准分子激光的响应波形  
Fig. 1 Response waveform of pyroelectric

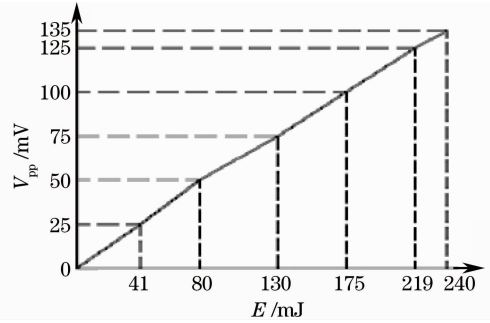


图 2 输出波形峰-峰值和脉冲能量的对应关系  
Fig. 2 Relationship between  $V_{pp}$  and pulse energy

设计了如图 3 所示的能量检测电路,由热释电探头、前置放大、放大、峰值保持电路、微控制单元(MCU)和各种通信器件组成。

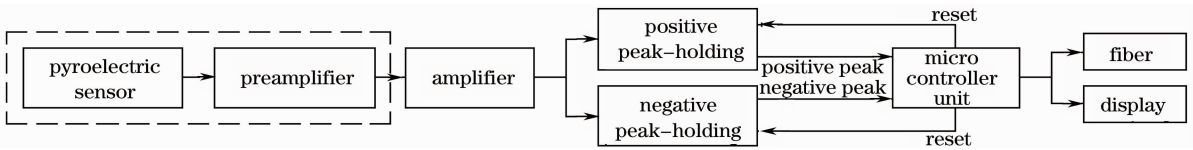


图 3 能量检测电路原理图

Fig. 3 Circuit schematic of energy detecting

热释电探头输出阻抗高,前置放大器兼有阻抗变换功能,两者被良好屏蔽(图中虚框部分)。

利用芯片 PKD01 搭建的正峰值保持电路和负峰值保持电路分别如图 4,图 5 所示。

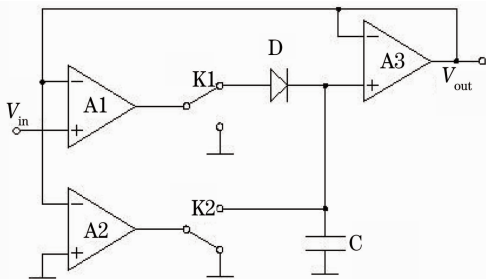


图 4 正峰值保持电路

Fig. 4 Positive peak-holding circuit

调节集成在芯片内部的两个逻辑开关 K1,K2 可实现跟踪、保持和复位三种状态。图中 K1,K2 的接法对应于峰值跟踪的状态。

为实现对每个脉冲的检测设计了如图 6 所示的工作时序。

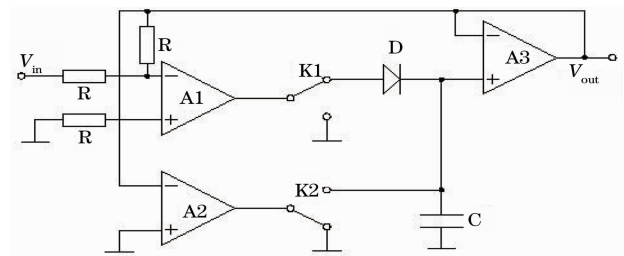


图 5 负峰值保持电路

Fig. 5 Negative peak-holding circuit

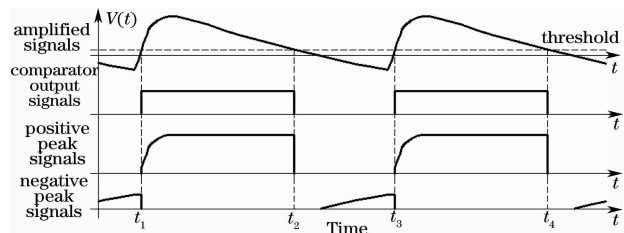


图 6 信号波形示意图

Fig. 6 Signal waveform

在电压信号输入端设置了一个抗干扰阈值,当被测信号大于该阈值时才启动峰值跟踪过程:

当信号上升高于触发阈值时,系统跟踪正峰值,同时将负峰值转化为数字信号后并复位;

当信号下降低于触发阈值时,系统跟踪负峰值,同时将正峰值转化为数字信号后并复位。

此时,单片机将保存在其内部的正、负峰值信号相加,即获得上一个激光脉冲的能量信号,然后进行显示和电光数字化转换以便采用 I<sup>2</sup>C 串行通信方式实现光纤信息传递<sup>[7]</sup>。

## 2.2 开关电源部分

自行设计的开关电源指标如下:高压输出 20~32 kV,最高重复频率 30 Hz,电容器最大储能 41 J。

如图 7 所示,开关电源的输出通过参考电压(图中虚线)来控制,电容器充电高压经取样后和参考电压进行比较,一旦达到参考电压设定值,则开关管停止工作。激光器储能电容上的电压不再上升,等待闸流管触发导通。

这种工作模式下,只需实时调节参考电压即可实现电源输出的实时调节,本系统电源输出高压可

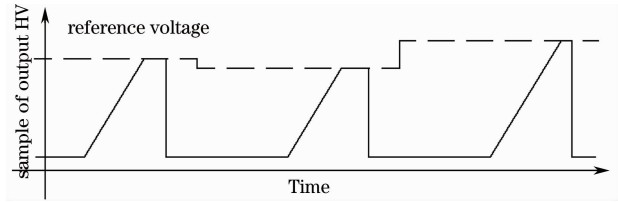


图 7 开关电源输出波形

Fig. 7 Output waveform of the switching mode power supply(SMPS)

在 100  $\mu$ s 以内实现可调范围内的自由调节。

## 2.3 控制器

控制器的电路原理如图 8 虚框所示,脉冲能量信号通过光纤导入并转换为电信号后输入至 MCU (PIC16F873),经与能量设定信号进行比较和运算,生成对开关电源参考电压信号的调节量。新的参考电压信号经压频转换后由光纤输出至开关电源。

恒能量模式下的能量数据存储是通过 PIC16F873 内置的 EEPROM 实现的。EEPROM 中存储的数据在掉电后不会流失。

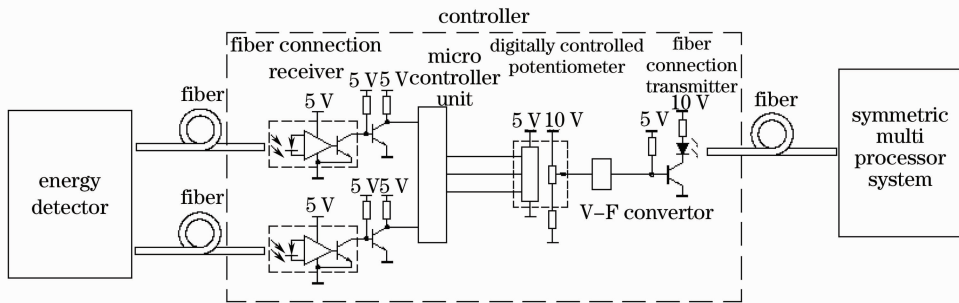


图 8 控制器电路原理

Fig. 8 Circuit schematic of the controller

## 2.4 控制方法

通过调节电压来稳定脉冲能量,根据激光器的电压-能量的对应关系,用线性关系式

$$\Delta V = k \Delta E \quad (1)$$

来估计这一对应关系的趋势。式中  $\Delta E$  为脉冲能量与设定值的偏差量,  $\Delta V$  为电压的补偿量,  $k$  为常数。

虽然这是一种非常粗糙的近似,但是由于其收敛性,几次调节后  $\Delta E$  会降至允许的误差范围内。事实上不同型号的准分子激光器以及工作气体的老化程度不同,常数  $k$  不尽相同。

电压调节器的最小步进量记为  $\Delta V_p$ ,每次调节都是  $\Delta V_p$  的  $N$  倍(含  $N$  步)

$$N = \frac{\Delta V}{\Delta V_p} = k \frac{\Delta E}{\Delta V_p} \quad (2)$$

控制程序采用均值算法,即取当前脉冲能量值

及其前 7 个脉冲能量值的平均值跟预设定的能量值进行比较,从而确定下一次放电的参考电压,最后算出电压调节器的增减步数

$$N = k \frac{\Delta V}{\Delta V_p} = k \frac{1}{\Delta V_p} \left( E_{\text{set}} - \frac{E_n + E_{n-1} + \dots + E_{n-7}}{8} \right) \quad (3)$$

式中  $E_n$  为当前脉冲的能量,  $E_{n-1}, E_{n-2}, \dots, E_{n-7}$  为前 7 个脉冲的能量,  $E_{\text{set}}$  为能量稳定的设定值。  $N$  为正则提高参考电压,反之则降。计算并调节完参考电压后,队列  $E_n, E_{n-1}, \dots, E_{n-7}$  释放  $E_{n-7}$ ,等待  $E_{n+1}$  的到来。

## 3 实验及结果分析

本能量稳定系统在一台 TOL 型 KrF 准分子激光器上进行实验<sup>[8]</sup>,其结构如图 9 所示。其中激光腔、

分光镜、能量检测部分的位置均相对固定,激光器以 5 Hz 的重复频率运行。

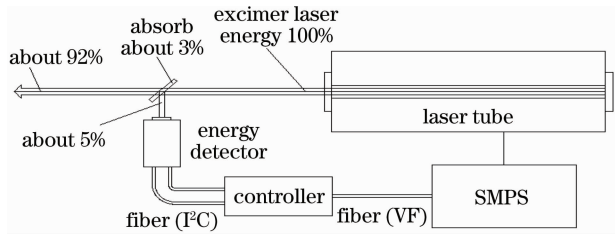


图 9 系统原理图

Fig. 9 Schematic of the system

### 3.1 恒电压模式和恒能量模式下激光器的输出对比

表 1 为恒电压模式下的 50 个随机取样脉冲能量,其平均值、标准差、相对标准差分别为<sup>[9]</sup>:

$$\bar{x} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i = 130.14, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{50-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} \approx 6.13, \quad (5)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \approx 4.71\%. \quad (6)$$

表 1 恒电压模式数据

134	133	139	125	132	112	138	135	136	138
130	134	121	128	125	134	124	136	130	124
138	127	122	131	130	138	137	127	127	128
135	137	127	133	132	129	131	137	135	127
127	121	141	126	120	134	122	128	121	131

表 2 为恒能量模式(预其设定值为 130 mJ)下的 50 个随机取样脉冲能量。

$$\bar{x} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i = 131.66, \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{50-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} \approx 3.96, \quad (8)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \approx 3.01\%. \quad (9)$$

表 2 恒能量模式数据

129	132	134	131	127	132	132	126	128	131
129	129	131	132	133	127	131	135	126	135
137	139	133	133	132	127	139	129	129	135
133	133	122	132	133	139	122	135	130	133
134	137	137	130	128	133	133	138	131	127

对比(6)式和(9)式可以看到,恒能量模式下,激光器的输出波动性明显比恒电压模式下要小。

图 10 为激光器 5 Hz 运行时,恒能量模式下的开关电源输出高压的调节信号变化波形,其中的竖条纹为闸流管放电对示波器的干扰信号。

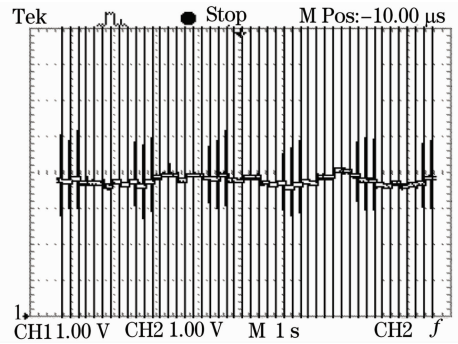


图 10 恒能量模式下参考电压的变化波形

Fig. 10 Waveform of the reference voltage at the energy constant mode

### 3.2 恒能量模式下引入扰动后的能量输出情况

首先令激光器工作在恒电压模式输出,将其调偏至脉冲能量下降 30 mJ,并确定此偏离的位置。再将谐振腔片恢复到原始位置并进行恒能量模式输出,然后逐步将谐振腔片调偏到上述的偏离位置。

为了获得更好的实验对比效果,此次实验是在激光器工作两星期后的情况下进行的,此时的准分子激光脉冲能量波动会稍大一些。

表 3 为恒电压模式下谐振腔片处于原始位置情况的 50 个随机取样输出脉冲。

$$\bar{x} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i = 124.32, \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{50-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} \approx 8.92, \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \approx 7.18\%. \quad (12)$$

表 3 谐振腔片处于原始位置时的恒电压模式输出

Table 3 Voltage constant mode pulse energy with

118	128	131	123	128	129	139	129	105	133
133	131	127	120	121	116	121	127	130	132
125	108	120	119	140	120	140	108	132	120
130	105	122	118	115	108	118	140	117	131
125	127	136	134	123	125	125	115	130	119

表 4 为恒能量模式下(预设定值为 125 mJ)谐振腔片由原始位置调偏至特定位置过程中的 50 个随机取样输出脉冲。

$$\bar{x} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i = 125.94, \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{50-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} \approx 4.56, \quad (14)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \approx 3.62\%. \quad (15)$$

表 4 恒能量模式下谐振腔片由原始位置调偏过程中的激光输出

Table 4 Energy constant mode pulse energy with mirrors turned deviated mJ

130	127	129	131	127	126	127	132	131	121
131	130	133	128	128	135	109	129	124	127
125	126	131	126	126	126	124	125	123	123
120	125	125	124	127	128	119	120	122	117
126	125	132	124	132	125	122	128	122	124

对比(12)式和(15)式可以看到,恒能量模式下控制系统会自动调节工作电压维持住激光器的输出脉冲能量,且可以有效地减弱激光器的输出能量波动。

图 11 为上述恒能量模式下谐振腔片调偏过程中的开关电源的输出高压调节信号变化波形。

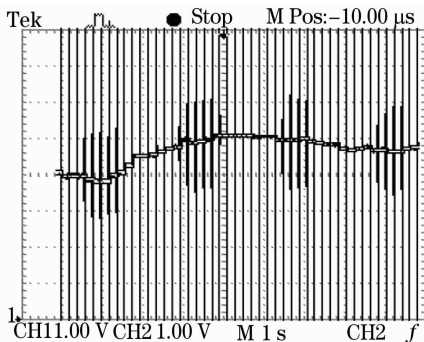


图 11 恒能量模式下腔片调偏过程中参考电压的变化

Fig. 11 Change of the reference voltage with mirrors turned deviated

## 4 结 论

设计的准分子激光输出能量稳定系统,涉及高压开关电源、脉冲能量检测以及控制器、控制方法和信号传输等单元技术,克服了闸流管强干扰等问题,实现了均值算法下准分子激光器放电电压的实时调节,有效地减小了准分子激光的输出能量波动,有助于提高准分子激光器的性能。

## 参 考 文 献

- 1 Walter D. Gillespie, Toshihiko Ishihara, William N. Partlo *et al.*. 6 kHz MOPA light source for 193 nm immersion lithography [C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 1293~1303
- 2 Uwe Stamm, Rainer Paetzel, Igor Bragin *et al.*. High repetition rate ultra-narrow bandwidth 193 nm excimer lasers for DUV lithography[C]. *SPIE*, 2000, **4000**: 1390~1396
- 3 Heinz P. Huber, Tobias Pflanz, Andreas Görtler *et al.*. High repetition-rate compact excimer laser: UV light source for metrology, inspection, direct writing and material testing[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 1092~1099
- 4 Gan Dechang. Response of pyroelectric detector to absorbed radiation power [J]. *Acta Physica Sinica*, 1995, **44** (1): 137~141  
甘德昌. 热电探测器对辐射功率的响应[J]. *物理学报*, 1995, **44**(1): 137~141
- 5 Standard Pyroelectric OEM Heads-Introduction [M]. Ophir Optronics. INC. <http://www.ophiropt.com>
- 6 Zbigniew Bielecki, Krzysztof Chmielewski, Mirosław Nowakowski *et al.*. Microprocessor energy meter of laser radiation[C]. *SPIE*, 1995, **2202**: 322~326
- 7 He Xinlong, Li Xueyin. PIC16F87X Fast Start [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002  
何信龙,李雪银. PIC16F87X 快速上手[M]. 北京:清华大学出版社,2002
- 8 Deng Guoqing, Yu Yinshan, Zhu Zhiqiang. Study on discharge circuit of excimer laser[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(4): 456~458  
邓国庆,余吟山,朱志强. 准分子激光放电回路的研究[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(4): 456~458
- 9 D. Basting. Excimer Laser Technology[M]. Lambda Physik, 2001