

# 准分子激光脉冲能量探测器的设计与性能测试

谢承科<sup>1,2</sup> 陈 明<sup>1,2</sup> 杨宝喜<sup>1</sup> 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在以准分子激光为光源的步进扫描投影光刻机中,为了精确控制曝光剂量,需要用能量探测器实时、精确地监测单个激光脉冲的能量。研制了一种主要由聚光镜、积分棒、特殊晶体、滤光片、光电探测器和信号处理电路组成的准分子激光脉冲能量探测器;提出采用二阶有源低通滤波电路对窄脉冲信号进行整形处理以降低后续信号处理的难度;搭建测试装置对所研制的能量探测器进行了性能测试。测试结果表明,能量探测器输出的脉冲信号时间参数的实测值与设计值的相对误差约为3%,且其响应时间满足4 kHz高重频的应用要求;采用双光束比对法消除准分子激光单个脉冲能量波动对测试结果的影响,得到能量探测器的测量重复性为0.26%,在入射光束脉冲能量为0.1~1 μJ的动态范围内具有良好线性,其线性拟合方程为 $V=0.59841E-0.01508$ ,相应的线性相关系数 $R^2=99.976\%$ 。测试结果证明二阶有源低通滤波电路可以实现窄脉冲信号整形;设计的能量探测器具有良好的重复性和线性,可用于光刻机中高重频准分子激光单个脉冲能量的精确测量。

**关键词** 探测器;准分子激光;脉冲整形;重复性;线性度

中图分类号 TN247; TN248.2; TN721.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102006

## Development and Performance Testing of Pulsed Excimer Laser Energy Detector

Xie Chengke<sup>1,2</sup> Chen Ming<sup>1,2</sup> Yang Baoxi<sup>1</sup> Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In step and scan lithographic tools whose laser sources are excimer lasers, an energy detector is needed to monitor excimer laser pulse energy in real-time and accurately so as to realize precise exposure dose control. An energy detector, which is composed by focusing lens, an integration rod, a special crystal, a filter, a photodiode and a signal processing circuit, is designed. Specially, the second-order active low-pass filter is used for narrow pulse shaping so as to reduce the difficulty of the signal processing circuit. Also, an experimental setup is designed to testing the performances of the energy detector. The results show that the relative error between the measured value and the designed value of the shaped pulse for the energy detector is about 3%, and the response time of the energy detector can meet the application of pulse energy measurement with pulse's repetition rate up to 4 kHz. Secondly, with a double-beam ratiometric method which is used to remove excimer laser pulse energy fluctuation, the performances of the energy detector are tested; the energy detector's repeatability is 0.26%; within a dynamic range of pulse energy from 0.1 μJ to 1 μJ per pulse, the linear fit is  $V=0.59841E-0.01508$  and  $R^2=99.976\%$ . Experimental results prove that the second-order active low-pass filter can be used for pulse shaping; the repeatability and the linearity of the designed energy detector are perfect, and the energy detector can be used to accurately measure the energy of high

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-08-20

作者简介: 谢承科(1982—),男,博士研究生,主要从事精密光电测量技术方面的研究。E-mail: xchke@126.com

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,博士,研究员,主要从事光学生物传感器、光学检测技术、光学光刻技术等方面的研究。

E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

repetition rate pulse for excimer lasers in lithographic tools.

Key words detectors; excimer laser; pulse shaping; repeatability; linearity

OCIS codes 140.7240; 140.3538; 250.0040

## 1 引 言

光学光刻技术的发展先后经历了接触式光刻机、接近式光刻机、全硅片扫描投影式光刻机、分步重复投影光刻机和目前作为主流的步进扫描投影光刻机<sup>[1]</sup>。对步进扫描投影光刻机,其最关键的三项技术指标是光刻分辨率、套刻精度和产率<sup>[2]</sup>。根据瑞利定理,光刻分辨率 $R$ 与曝光波长 $\lambda$ 、投影物镜的数值孔径 $NA$ 和工艺因子 $k_1$ 的关系为 $R=k_1\lambda/NA^{1.5}$ 。由该公式可知,要提高光刻分辨率,可以减小工艺因子 $k_1$ 、缩短曝光波长 $\lambda$ 或增大数值孔径 $NA$ 。其中,缩短曝光波长 $\lambda$ 是提高光刻分辨率的最有效途径。自20世纪70年代以来,为了缩短曝光波长以提高光刻分辨率,曝光光源已从436 nm、365 nm波长紫外与近紫外汞灯发展到目前的248 nm、193 nm波长深紫外准分子激光器,再发展到即将成为主流技术的13.5 nm波长极紫外光源<sup>[4-7]</sup>。然而,不断缩短曝光波长将涉及曝光光源、光学设计、光学材料、光学加工、光学镀膜、机械加工、机械装配、曝光抗蚀剂等一系列技术问题。因此,准分子激光器目前仍是光刻机的主流曝光光源<sup>[8-11]</sup>。

曝光剂量是光刻机的一个重要特征参数,在扫描曝光过程中,它是指硅片单位面积上光刻胶所接收到的一定数量激光脉冲的能量累积值。根据曝光剂量控制的要求,每个曝光光束的脉冲能量不同,若以 $I_{Max}$ 表示单个脉冲的最大能量,则其动态变化范围为 $10\% I_{Max} \sim I_{Max}$ 。另外,由于预热、气体老化或更新、运行时间等因素的影响,准分子激光器存在单个脉冲能量波动和平均脉冲能量的漂移<sup>[12-13]</sup>。因此,为了实现精确的曝光剂量控制,光刻机在扫描曝光过程中需要一个能量探测器来实时、精确地监测准分子激光器的单个脉冲能量大小<sup>[14]</sup>。目前,国内有关准分子激光脉冲能量测量技术研究的报道不多。胡俊涛等<sup>[15]</sup>利用激光感生热电电压效应研制了眼科准分子激光实时监控能量计,对0~50 Hz重复频率的248 nm准分子激光器输出能量的测量值的相对标准偏差为8.6%~10.7%,对眼科手术机中10 Hz重复频率的193 nm准分子激光器输出能量的测量值的相对标准偏差为8.3%。梁勛等<sup>[16]</sup>介绍了一种基于热释电探头的准分子激光脉冲能量监测系统,可实现0~200 Hz重复频率激光脉冲能量的实时测量,测量精度达到 $\pm 3\%$ 。上述两项研究工作,虽然实现了对准分子激光脉冲能量的实时测量,但其可测量的激光脉冲重复频率较低,且测量精度不高。为了满足光刻机中高重频、高精度激光脉冲能量测量的要求,本文研制了一种准分子激光脉冲能量探测器并对其进行了性能测试。该能量探测器包括光学取样模块和信号处理电路,其中光学取样部分包括聚光镜、积分棒、特殊晶体、滤光片和光电探测器。特别地,本文采用二阶有源低通滤波电路对窄脉冲信号进行整形处理,降低了后续信号处理电路设计的难度;提供了一种可以消除准分子激光单个脉冲能量波动对测试结果产生影响的能量探测器性能测试方法。

## 2 能量探测器的设计

### 2.1 光学设计

如图1所示,能量探测器的光学取样模块包括聚光镜、积分棒、特殊晶体YAG:Ce、滤光片BG39和光电探测器。深紫外激光束通过聚光镜聚焦到积分棒的入射端面上,被积分棒内壁多次全反射后在出射端面迭加形成均匀照明面;经均匀化处理的深紫外激光束投射到特殊晶体上并被转换成可见光;滤光片滤除深紫外光而透过可见光;可见光被高速、低噪声PIN光电二极管接收,激光脉冲信号被转换成电流脉冲信号输出。采用积分棒对入射光束进行均匀化处理可以抑制入射光束状态变化对测量结果的影响,采用特殊晶体将深紫外激光转换成可见光后再测量可以消除深紫外激光对光电探测器的损伤而导致的测量结果变化。

### 2.2 信号处理电路设计

能量探测器的信号处理电路由前置放大电路、脉冲整形电路和主放大电路组成,如图2所示。

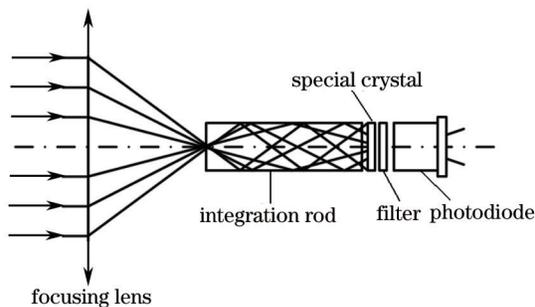


图1 能量探测器光学取样工作原理图

Fig.1 Schematic illustration of the optical system of an energy detector

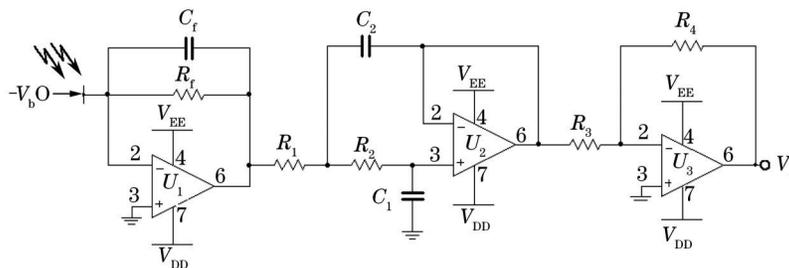


图2 能量探测电路原理图

Fig.2 Circuit schematic of the energy detector

### 2.2.1 前置放大电路

前置放大电路由  $C_f$ 、 $R_f$  和  $U_1$  组成。由准分子激光脉冲转换后的可见光脉冲辐照在光电二极管上产生一个电流脉冲信号,该信号经前置放大电路转换成电压脉冲信号,其幅度为

$$V_{u1}(s) = I(s) \cdot \frac{1}{sC_f + 1/R_f}, \quad (1)$$

式中  $s=j\omega$ ,  $I(s)$  表示输入的电流脉冲信号的幅度。当  $R_f \gg 1$  时, (1) 式变为

$$V_{u1}(s) = I(s)/(sC_f). \quad (2)$$

则前置放大电路在时域上等效于积分器。因此,前置放大电路输出的电压大小可表示为

$$V_{u1} = \frac{Q}{C_f} = \frac{\int i(t) \cdot dt}{C_f}, \quad (3)$$

其与光电二极管产生的电荷量  $Q$ , 也即准分子激光脉冲转换后的可见光脉冲产生的电流脉冲信号的积分值成正比。前置放大电路输出的脉冲信号的上升时间由电流脉冲信号的持续时间决定, 其下降时间由反馈电路的时间常数  $\tau_f = R_f C_f$  决定 ( $t_f \approx 2.2 \tau_f$ )。由于前置放大电路的输入为电流信号且脉冲持续时间短, 因此应选取偏置电流低、增益带宽大的高速运算放大器。

### 2.2.2 脉冲整形电路

由于准分子激光脉冲转换后的可见光脉冲的脉宽只有几十纳秒, 前置放大电路的带宽需很高以便获得窄脉冲响应信号。如果直接放大前置放大电路输出的窄脉冲信号, 则需要整个信号处理电路有很高的带宽, 这不仅会增加信号采集的难度, 还会降低系统的信噪比。因此, 有必要对前置放大电路输出的窄脉冲信号进行整形处理。

采用二阶有源低通滤波电路对窄脉冲信号进行整形处理。如图2所示, 二阶有源低通滤波电路由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  和  $U_2$  组成, 其传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{s^2 \cdot R_1 R_2 C_1 C_2 + s \cdot (R_1 C_1 + R_2 C_1) + 1}. \quad (4)$$

取  $R_1 = R_2 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , 且令  $\tau = RC$ , 则(4)式可简化为

$$H(s) = \frac{1}{(s\tau + 1)^2}. \quad (5)$$

(5)式表示的传递函数在  $s$  域的左平面有 2 个相同的负实极点,为稳定系统。其冲激响应为

$$F(s) = L[\delta(t)] \cdot H(s) = \frac{1}{(s\tau + 1)^2} \quad (6)$$

对(6)式进行反拉普拉斯变换,得到二阶有源低通滤波电路冲激响应的时域表达式为

$$f(t) = \frac{t}{\tau^2} \exp(-t/\tau), \quad (7)$$

其时域波形如图 3 所示,为类高斯脉冲信号。

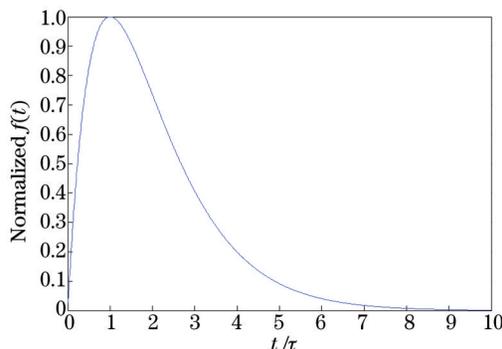


图 3 二阶有源低通滤波电路的冲激响应信号

Fig.3 Impulse response of the second-order active low-pass filter

用 Matlab 对(7)式进行求解,得到二阶有源低通滤波电路冲激响应信号的上升时间  $t_r$ (10% ~ 90%)、峰值时间  $t_p$ (0 ~ 100%)、脉冲半峰全宽  $t_{whm}$ (50% ~ 50%)和下降时间  $t_f$ (90% ~ 10%)与电路时间常数的关系如表 1 所示。

表 1 脉冲信号时间参数与电路时间常数的关系

Table 1 Relationship of the pulse time parameters and the circuit time constant

$\tau / \mu\text{s}$	$t_r / \mu\text{s}$	$t_p / \mu\text{s}$	$t_{whm} / \mu\text{s}$	$t_f / \mu\text{s}$
1.00	0.57	1.00	2.46	3.41
2.00	1.15	2.00	4.91	6.81
3.00	1.73	3.00	7.37	10.22
4.00	2.30	4.00	9.82	13.62
5.00	2.88	5.00	12.28	17.04
6.00	3.46	6.00	14.74	20.44
7.00	4.03	7.00	17.20	23.84
8.00	4.61	8.00	19.65	27.25
9.00	5.19	9.00	22.10	30.66
10.00	5.77	10.01	24.56	34.07

以二阶有源低通滤波电路的时间常数  $\tau$  为横坐标,分别以脉冲信号的时间参数  $t_r$ 、 $t_p$ 、 $t_{whm}$  和  $t_f$  为纵坐标,采用最小二乘法进行线性拟合,得到的拟合结果如图 4(a)~(d)所示,相应的计算公式分别为

$$t_r = 0.57727\tau - 0.006, \quad (8)$$

$$t_p = 1.00055\tau - 0.002, \quad (9)$$

$$t_{whm} = 2.45594\tau + 0.00133, \quad (10)$$

$$t_f = 3.40667\tau - 0.00067. \quad (11)$$

当二阶有源低通滤波电路的时间常数  $\tau$  远大于前置放大电路输出脉冲信号的下降时间  $\tau_f$  时,二阶有源低通滤波电路对脉冲信号的响应可近似看作冲激响应。因此,可根据(8)~(11)式对前置放大电路输出的窄脉冲信号进行整形处理。研制的准分子激光脉冲能量探测器需满足 4 kHz 的重复频率,且需满足后续信号采样周期为 10  $\mu\text{s}$  的时间特性。同时,为了能准确测量脉冲能量的大小,需对能量探测器输出的脉冲信号采用 3 点加权平均处理。因此,能量探测器输出的脉冲信号应满足:  $t_p > 10 \mu\text{s}$ 、 $t_{whm} > 30 \mu\text{s}$ 、 $t_r + t_f < 250 \mu\text{s}$ 。根据上述要求可选取二阶有源低通滤波电路的时间常数  $\tau = 15 \mu\text{s}$ ,则所设计的脉冲信号时间参数  $t_r$ 、 $t_p$ 、 $t_{whm}$  和  $t_f$  的理论值分别为 8.65、15.01、36.84 和 51.10  $\mu\text{s}$ 。

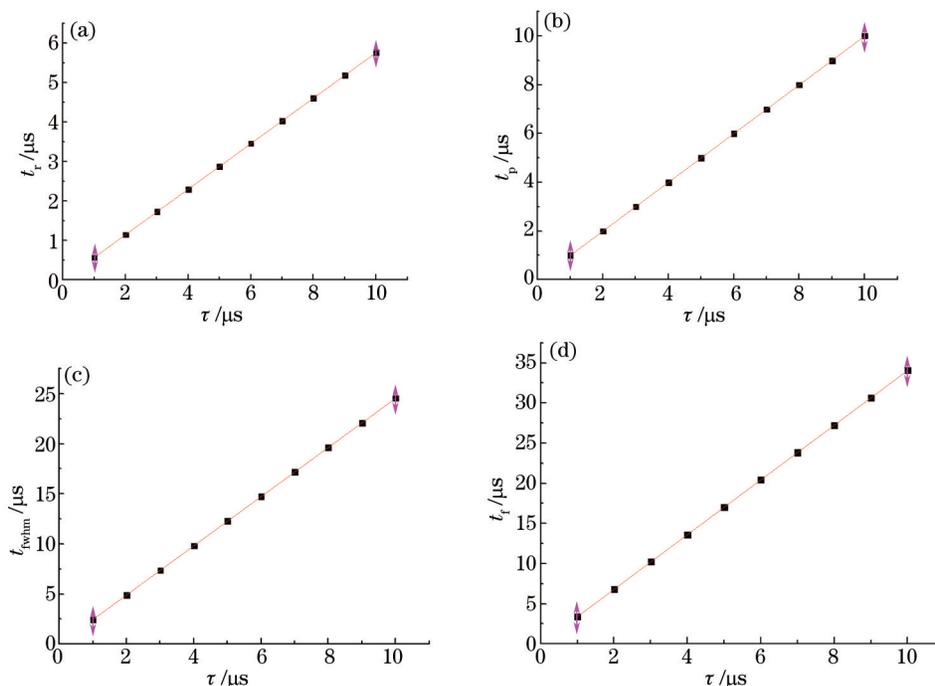


图4  $t_r$  (a)、 $t_p$  (b)、 $t_{fwhm}$  (c)和  $t_l$  (d)的线性拟合结果

Fig.4 Linear fit for  $t_r$  (a),  $t_p$  (b),  $t_{fwhm}$  (c) and  $t_l$  (d)

### 2.2.3 主放大电路

主放大电路由  $R_3$ 、 $R_4$  和  $U_3$  组成,其作用是将信号放大到信号采集器的最大输入电压值,从而尽可能提高系统的信噪比。结合上述设计方案,能量探测器的元器件选型如表 2 所示。

表 2 能量探测电路的元器件选型

Table 2 Component value of the energy detector

$U_1, U_2, U_3$	$C_1 / \text{pF}$	$R_1 / \text{k}\Omega$	$R_2 / \text{k}\Omega$	$C_2 / \text{nF}$	$R_3 / \text{k}\Omega$	$R_4 / \text{k}\Omega$
OPA656	20	51	15	1	1	56

## 3 实验结果与分析

采用双光束比对法对所研制的准分子激光脉冲能量探测器的性能进行测试。如图 5 所示,准分子激光器输出的激光脉冲经光阑和起偏器得到线偏振光,线偏振光照射在分束镜上被分为两束,反射光路中的参考光束直接被参考能量探测器(R-ED)接收,透射光路中的测量光束经可变衰减片后照射在待测能量探测器(T-ED)上,待测能量探测器和参考能量探测器输出的电压脉冲信号被多功能信号采集卡同步采集,以待测能量探测器和参考能量探测器的比值作为待测能量探测器的相对测量值,输入到计算机中进行处理。其中,可变衰减片是利用光学镀膜的方法使不同角度入射的光线的透射率不同,从而通过转动衰减片就可以达到连续改变测量光束透射率的效果;待测能量探测器和参考能量探测器为两个相同的能量探测器,由于两者的性能相同,以两者的比值作为测量结果可以消除准分子激光脉冲能量波动对测试结果的影响。

本测试中,使用的准分子激光器是 GAM LASER 公司的 EX5/500 型 ArF 准分子激光器,其中心波长为 193.368 nm、最大重复频率为 500 Hz、单个脉冲最大能量为 5 mJ、脉冲宽度为 8~16 ns。使用的信号采集卡是 NI 公司的 USB-6356,其模数变换器(ADC)的分辨率为 16 bit。测试过程中,为了得到可变衰减片的偏转角度和透射率的准确对应关系,先利用 OPHIR 公司的能量计对可变衰减片在不同偏转角下的透射率进行标定;准分子激光器的重复频率设置为 100 Hz,入射到能量探测器的脉冲能量最大值为 1  $\mu\text{J}$ 。利用图 5 所示的装置分别对能量探测器输出的脉冲波形、重复性和线性进行了测试。

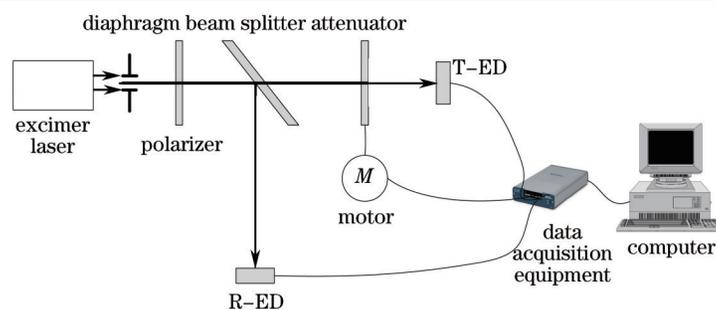


图5 能量探测器性能测试装置原理图

Fig.5 Schematic representation of the performance testing setup of the energy detector

### 3.1 能量探测器的脉冲波形测试

控制电机使测量光束截面不经过可变衰减片(即测量光束的透射率为100%),此时测量光束的脉冲能量最大。图6是示波器测得的能量探测器的输出电压脉冲信号波形,相应的时间尺度为20 μs/div,其响应时间远小于250 μs,满足光刻机中4 kHz高重频准分子激光脉冲能量实时测量的应用要求。利用示波器测得的时间参数如表3所示,实测值与理论设计值的相对误差约为3%。误差来源有:1)前置放大电路输出的脉冲信号与理想冲激信号之间存在差异;2)实际的信号处理系统为有限带宽系统;3)电子元器件的真实值与标称值存在偏差;4)主观测量误差。此外,光源输出激光脉冲特性不同以及响应信号幅值大小也会导致测量结果的差异。因此,不同实验条件下得到的脉冲波形的时间参数不同,但本文所述的窄脉冲信号整形方法仍具有一定的参考意义。

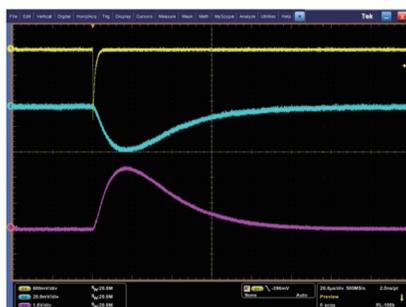


图6 能量探测器脉冲波形测试结果(通道1、2和3分别为前置放大器、脉冲整形电路和主放大电路的输出信号)

Fig.6 Pulse shape of the energy detector (channel 1, 2 and 3 are the output of the pre-amplifier, the pulse shaping circuit and the main amplifier respectively)

表3 能量探测器脉冲信号时间参数测量值

Table 3 Measured time parameters of pulses from the energy detector

Time parameter	$t_r / \mu s$	$t_p / \mu s$	$t_{fwhm} / \mu s$	$t_f / \mu s$
Measured value	8.89	15.41	37.92	52.49
Theoretical value	8.65	15.01	36.84	51.10
Relative error	2.77%	2.66%	2.93%	2.72%

### 3.2 能量探测器的重复性测试

重复性是衡量能量探测器是否稳定和可靠的重要指标。测试过程中,对待测能量探测器和参考能量探测器同步采集200个激光脉冲,得到的测量结果如图7所示。图7(a)为待测能量探测器和参考能量探测器的归一化测量值,可见两个探测器各自的单个脉冲测量值起伏很大,这是准分子激光单个脉冲能量波动导致的结果。但是,两个探测器的测量值之间具有很好的一致性,基本重合。图7(b)为待测能量探测器的相对测量值,可见以待测能量探测器和参考能量探测器的比值作为测量值可消除准分子激光单个脉冲能量波动对测量结果的影响,从而能真实地反映能量探测器本身的性能。能量探测器的重复性以200个激光脉冲测量值的相对标准差来表示。

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{200-1} \sum_{i=1}^{200} (x_i - \bar{x})^2}{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} x_i}} \quad (12)$$

计算得到待测量能量探测器测量值、参考能量探测器测量值和待测量能量探测器相对测量值的相对标准差分别为 11.59%、11.53% 和 0.26%。这进一步证明了采用的双光束比对法可消除准分子激光单个脉冲能量波动的影响。但是,由于入射光束偏振态的变化、测量光路和参考光路的不完全对称性、信号处理和采集电路的噪声等因素的影响,实际场合中只能尽量抑制而无法根本消除准分子激光单个脉冲能量波动的影响。

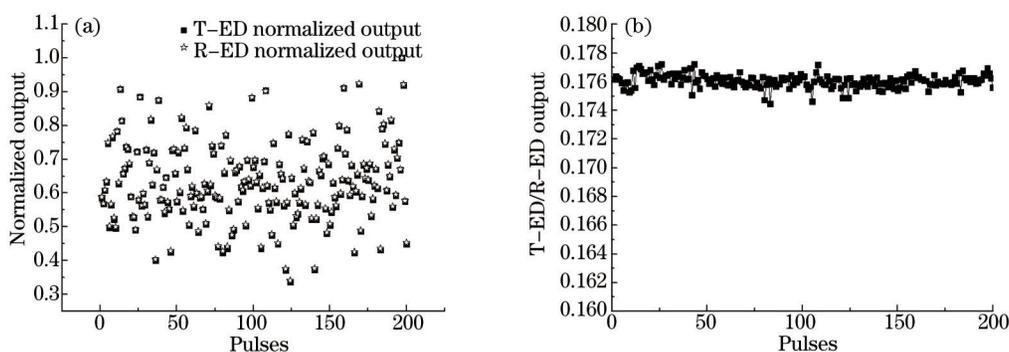


图 7 (a) 待测能量探测器和参考能量探测器的归一化测量值; (b) 待测能量探测器的相对测量值

Fig.7 (a) Normalized outputs of the T-ED and the R-ED; (b) pulse value of the T-ED/R-ED

### 3.3 能量探测器的线性测试

由于扫描曝光过程中曝光光束的脉冲能量变化范围为  $10\% I_{Max} \sim I_{Max}$ , 待测能量探测器的动态测量范围取入射光束的脉冲能量为  $0.1 \sim 1 \mu J$ 。实际测试过程中,通过改变测量光路中可变衰减片的透过率使脉冲能量从约  $0.1 \mu J$  开始、每次步进约  $0.1 \mu J$ 。对每个能量测试点采样 200 个脉冲,并以待测能量探测器的 200 个脉冲相对测量值的均值作为该能量测试点的最终测量值。以待测能量探测器输入的脉冲能量为横坐标、待测能量探测器的相对测量值为纵坐标,采用最小二乘法对测量结果进行线性拟合,得到的拟合曲线如图 8 所示,其线性方程为

$$V=0.59841E-0.01508, \quad (13)$$

式中  $V$  表示能量探测器的测量值,  $E$  表示入射光束的脉冲能量大小。线性方程的相关系数  $R^2=99.976\%$ , 表明能量探测器具有良好的线性。

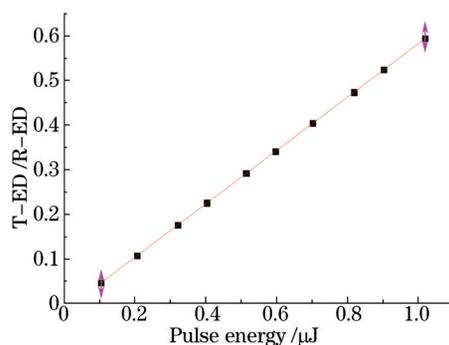


图 8 能量探测器响应的线性拟合曲线

Fig.8 Linear fit for the energy detector's response

## 4 结 论

研制了一种高重频、高精度准分子激光脉冲能量探测器;提出了采用二阶有源低通滤波电路对窄脉冲信号进行整形处理;搭建性能测试装置对能量探测器的脉冲波形、重复性和线性进行了测试。测试结果表明,采用二阶有源低通滤波电路可实现窄脉冲信号整形,并可通过提出的(8)~(11)式来预估整形后的脉冲波

形的时间参数;采用双光束比对法测试了能量探测器的性能,得到其测量重复性为0.26%,在10倍动态测量范围内其响应曲线的线性相关系数为99.976%;设计的能量探测器具有良好的重复性和线性,可用于光刻机中准分子激光脉冲能量的准确测量。

脉冲信号是物理学领域中常见的信号形式之一,不同脉冲信号探测的区别在于所使用的传感器不同,而对脉冲信号的处理方法基本相同。因此,提出的准分子激光脉冲能量信号处理电路对其他类型的脉冲信号同样适用。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Qiongyan, Wang Xiangzhao. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 57-64.  
袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.
- 2 Zhang Qiang, Hu Song, Yao Hanmin, *et al.*. Current progress of optical lithography in ASML[J]. Microfabrication Technology, 2002, (3): 8-11.  
张 强, 胡 松, 姚汉民, 等. ASML公司光学光刻技术最新进展[J]. 微细加工技术, 2002, (3): 8-11.
- 3 Levinson Harry J. Principles of Lithography[M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- 4 Bernard Fay. Advanced optical lithography development, from UV to EUV[J]. Microelectronic Engineering, 2002, 61-62: 11-24.
- 5 M Switkes, R R Kunz, R F Sinta, *et al.*. Immersion liquids for lithography in the deep ultraviolet[C]. SPIE, 2003, 5040: 690-699.
- 6 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying, *et al.*. An novel technique for measuring full Image quality of lithography tools in situ[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 543-548.  
王 帆, 王向朝, 马明英, 等. 一种新的光刻机多成像质量参数的原位检测技术[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 543-548.
- 7 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- 8 Gong Yan, Zhang Wei. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 25-35.  
巩 岩, 张 巍. 193 nm光刻曝光系统的现状及发展[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 25-35.
- 9 Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.*. Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.  
余吟山, 游利兵, 梁 勳, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- 10 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Design of Wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616002.  
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 用于ArF光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616002.
- 11 Chen Jinxin, Xu Xiangyu, Wang Yu. Electrodes system design and electric field simulation research of ArF excimer laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011402.  
陈进新, 徐向宇, 王 宇. ArF准分子激光光源电极系统设计及电场仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011402.
- 12 David H Tracy, Fred Y Wu. Exposure dose control techniques for excimer laser lithography[C]. SPIE, 1988, 922:437-443.
- 13 Liu Shiyuan, Wu Xiaojian. Real-time exposure dose control algorithm for DUV excimer lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 878-884.  
刘世元, 吴小健. 深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 878-884.
- 14 Liang Xu, You Libing, Wang Tao, *et al.*. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage realtime adjusting[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 374-378.  
梁 勳, 游利兵, 王 涛, 等. 实时调节工作电压实现稳定准分子激光能量[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 374-378.
- 15 Hu Juntao, Liu Xiang, Zhang Guoyong, *et al.*. A real-time energy meter for medical excimer laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(12): 1732-1735.  
胡俊涛, 刘 翔, 张国勇, 等. 眼科准分子激光实时监控能量计[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1732-1735.
- 16 Liang Xu, You Libing, Yu Yinshan. Excimer laser pulse energy detection under pulse repetition running mode[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(3): 281-287.  
梁 勳, 游利兵, 余吟山. 重复率激光的单个激光能量检测技术[J]. 量子电子学报, 2010, 27(3): 281-287.

栏目编辑: 何卓铭