

ArF 准分子激光器脉冲参数高精度在线测量系统设计与实现

赵万琦^{1,2,3}, 江 锐³, 冯泽斌^{1,3}, 许 泽³, 郭 宁³, 蒋 衍¹, 朱精果^{1*}

- (1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京科益虹源光电技术有限公司, 北京 100176)

摘 要: 保持激光光源输出能量稳定是光刻的关键环节, 需要对深紫外准分子光源脉冲参数进行高精度在线测量。传统的准分子激光器能量测量装置多工作于低重复频率, 针对高重频准分子激光器脉冲测量需求, 设计了激光脉冲参数在线测量系统, 使用峰值保持电路配合模数转换器实现脉冲能量采集, 通过建立并仿真峰值保持电路寄生等效模型, 优化了高重频准分子激光脉冲峰值保持电路设计方法。所设计的系统在 193 nm ArF 准分子光源平台上测试, 实现了准分子光源脉冲参数的在线提取和能量实时高精度测量。经测试, 光源在 6 kHz 频率时, 系统能量测量值相对于标准能量计的平均相对误差为 0.22%, 最大相对误差为 0.56%, 线性度为 99.83%, 为光刻深紫外准分子光源脉冲参数在线高精度测量系统的实际应用做了有益探索。

关键词: 能量探测; 在线测量; 准分子激光; 脉冲参数; 线性度

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240124

0 引 言

光刻工艺中的精度、良率和关键尺寸等参数都表征着光刻质量, 而准分子光源作为深紫外光刻的激光光源, 其性能是决定以上参数的关键^[1]。例如, 准分子激光的主要参数中激光脉冲的能量、线宽和波长, 都对光刻工艺参数有着至关重要的影响^[2]。其中, 激光脉冲能量的稳定性和准确测量, 直接影响到光刻机的曝光剂量进而影响半导体加工工艺的关键尺寸^[3-6]。因此, 对于准分子激光器脉冲能量的准确测量极为关键。

准分子激光器输出的激光脉冲宽度窄、上升时间短, 通常在几纳秒到十几纳秒之间, 所以对其测量装置的时间响应要求高; 而且对于紫外光或极紫外光, 热释电或 PIN(Positive-Intrinsic-Negative) 型传感器, 其响应度都不高, 要实现高速高精度测量存在困难^[7]。

针对准分子激光的能量或功率测量, 国内开展了相关研究, 如常利用热释电探头实现的能量探测系

统, 热释电探头对温度较为敏感, 由于激光器的长时间曝光, 对测量精度有一定影响^[8]; 利用特殊晶体将紫外光转化为可见光的测量方法, 消除了紫外光对光电二极管的损伤, 但在光谱干扰上会产生一定影响, 同时晶体本身的性质和变化也会影响测量精度^[9]; 基于 PIN 型光电探测器的测量系统^[10], 相比于热释电型测量精度更高, 响应速度更快, 但选取激光器泄露的光存在一定环境光杂散干扰。而对于纳秒级窄脉冲高速信号, 硬件测量电路常采用峰值保持的方式, 但尖峰效应及电容的选择都会对测量精度造成干扰^[11-12]。如何实现高精度在线测量是设计的难点之一。

传统的准分子激光器能量测量装置, 探测结果多基于激光器低重复频率, 且脉冲较宽, 测量精度不高(相对误差大于 3%), 当前, 光刻用深紫外准分子光源激光重频当前可达 6 kHz, 如何高精度对每个激光脉冲进行在线精确测量是实际应用中亟需解决的问题。为提高准分子激光器脉冲参数测量精度, 文中提

收稿日期: 2024-03-15; 修订日期: 2024-04-20

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2016ZX02201002)

作者简介: 赵万琦, 男, 硕士生, 主要从事准分子激光应用技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 朱精果, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光应用技术、光电子集成等方面的研究。

出了一种针对 ArF 准分子光源的激光脉冲参数测量系统,该系统的硬件电路首先采用对紫外光灵敏且低噪声的 PIN 型光电二极管对衰减后的激光进行直接测量,采用跨阻放大电路对光电管的电流信号进行预处理,再经过巴特沃斯滤波器对信号进行整形,通过峰值保持电路对峰值电压进行保持和展宽,然后经过 16 位 20 MHz 高精度 ADC 进行峰值采样,采集到的信号由 FPGA 进行处理。该脉冲参数测量系统应用在 193 nm 的准分子激光器上,激光器的重复频率最大为 6 kHz,测试结果表明硬件电路响应时间为 40 ns,远小于激光器最小重复周期 166 μ s,对激光脉冲参数实现了在线提取;测量能量值与标定后的紫外探测标准能量计进行对比试验,最大相对误差低于 0.56%,平均相对误差为 0.22%,实现实时高精度能量测量,满足准分子激光脉冲在线测量需求。

1 脉冲参数测量原理及系统总体设计

准分子激光器放电腔的气体状态、放电不均匀等都会影响输出光的能量,为实现稳定的激光能量,建立图 1 所示的闭环控制系统。

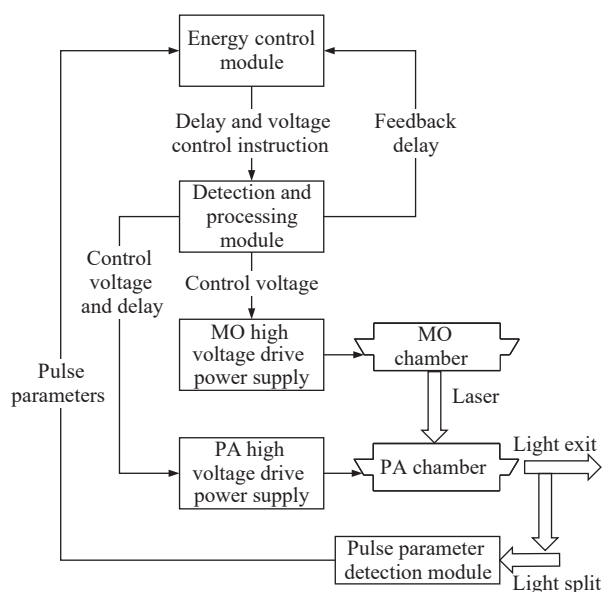


图 1 准分子激光能量闭环控制系统

Fig.1 The excimer laser energy closed-loop control system

在激光器的出光口进行分光检测,将脉冲参数传递到能量控制模块,能量控制模块发出调节电压和延时的指令,经处理后调节激光器的高压驱动电源,进

而调节主振荡放电腔 (Main Oscillating, MO) 和功率放大放电腔 (Power Amplifier, PA) 的输出光,使得在最佳状态最佳时刻在激光器出光口汇聚输出。

脉冲参数的精确测量和在线提取是其中的重要一环。准分子激光脉冲参数主要有重复频率、峰值功率等^[13-14]。激光脉冲参数的测量原理主要包括两个方面,即激光器能量在线测量和激光脉冲参数在线提取。

理想的激光器单脉冲功率密度符合高斯分布 $P \sim N(\mu, \sigma^2)$, 如图 2 所示。单脉冲的能量即功率密度函数的积分,约等于 3σ 处的面积。

$$E = \int P dt \quad (1)$$

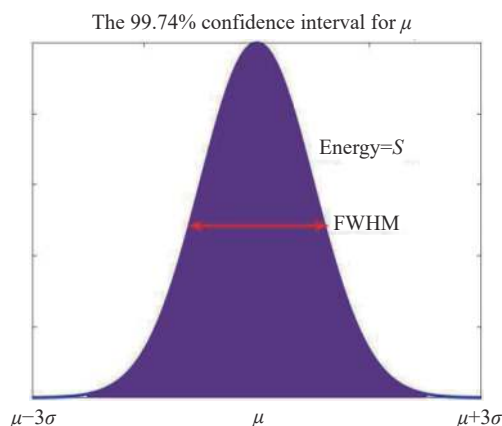


图 2 理想单脉冲功率密度曲线

Fig.2 Ideal single pulse power density curve

理想的单脉冲能量时域计算方法可近似为峰值功率与半高宽 (Full-width at the half of the maximum, FWHM) 的乘积,即:

$$E \approx P_{\text{peak}} \cdot FWHM \quad (2)$$

而真实的激光单脉冲往往是非规则的近高斯曲线。对于准分子激光器的单脉冲能量,除了与放电高压、气体状态以及在 Burst 序列中所处的位置有关外,还具有一定的随机性^[15],无法用简单高斯函数拟合的形式计算能量值。激光脉冲能量的测量方法主要有直接测量法 (高速光电探测或热释电探测) 和相关函数转换法。文中选用高速光电探测方法。该方法的测量原理为:

$$E = \int I \cdot \frac{D}{K} dt \quad (3)$$

式中: I 为光电管的光电流大小; D 为光电管的光响应度; K 为光学系统的衰减倍数, 可标定得到。

而准分子激光器脉冲参数的在线提取采用高速低噪声光电探测器配合高分辨率实时采样模块进行采集和测量。

激光脉冲参数在线测量系统主要由四部分组成, 分别是准分子激光器、前端光路系统、探测及处理电路、信号采集模块, 整体结构由如图 3 所示。其中, 光电探测器由示波器传输实时单脉冲波形, 用以在线提取脉冲参数 (单脉冲宽度、重复频率) 并计算能量的理论值。信号采集模块在线采集单脉冲能量, 与理论值对比验证测量方法的可行性。

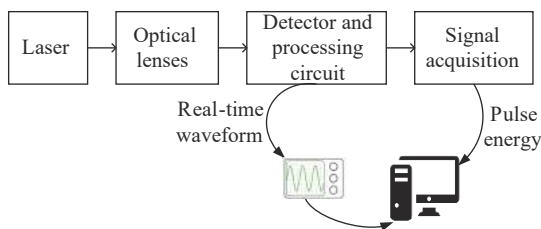


图 3 能量测量系统总体设计

Fig.3 Overall design of energy measurement system

ArF 准分子激光器的最大重复频率为 6 kHz, 脉冲宽度经展宽后在 100~130 ns, 满足光刻需求的能量范围是 8~12 mJ。

2 脉冲参数在线测量系统设计与实现

2.1 光路系统设计

为减小谱线重叠及杂散光干扰, 且避免损坏探测器。测量系统在激光器的输出端进行分光测量。

激光器输出光经过分光镜将 95% 能量的输出光用在后续光刻工作, 将 5% 能量的输出光作为测量光, 分光镜选用 Layertec 和其他厂商定制的激光窗片, 窗片类型为高透 (Anti-Reflectance), 使用窗片而不是镀膜型镜片是为了减少紫外阈值损伤的影响。测量光经过白片衰减及毛玻璃匀化后利用半透半反镜分别将 0.5% 输出能量的光传输到聚光镜, 聚光后均匀照射到探测装置上, 利用双光束对比法, 测量系统和经过标定的标准能量计分别对激光能量进行测量, 如图 4 所示。

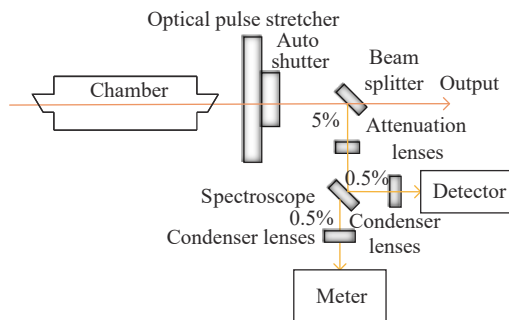


图 4 前端光路系统设计

Fig.4 Design of front-end light path system

2.2 脉冲参数测量电路设计

测量系统中的光电传感器选择对紫外光敏感的高速低噪声 PIN 光电二极管, 波长探测范围 190~1100 nm, 在 193 nm 的响应度为 $D=0.1$ A/W。传感器后级的电路对光电二极管传出的电流信号转变为电压信号, 并且进行放大滤波等处理后, 传输到峰值保持电路进行信号峰值探测及保持, 测量电路设计框图如图 5 所示。

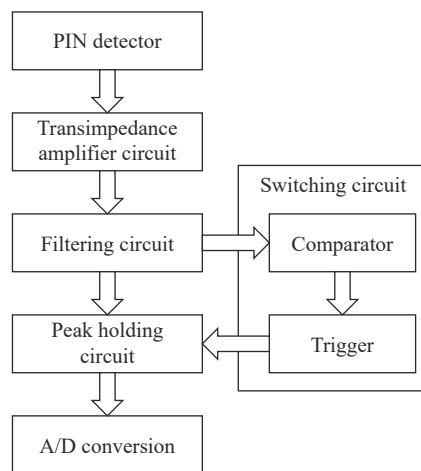


图 5 测量电路原理框图

Fig.5 Schematic diagram of measurement circuit

测量电路包括跨阻放大电路、滤波电路、峰值保持电路、开关电路等。跨阻放大电路 (TIA) 的直流增益为 92.67 dBΩ。滤波器采用巴特沃斯低通滤波结构, 带宽为 12.5 MHz, 增益为 0.83 dB, 探测电路的总增益 $G=93.50$ dBΩ。

峰值保持电路是保证信号峰值准确和长时间保持的关键模块^[16-17], 在实际应用中, 峰值保持电路的输出端会出现尖峰效应。

2.2.1 峰值保持电路尖峰效应分析

图 6 为跨导型峰值保持电路的简化原理图。高速运放 OTA1, 具有低输出阻抗和大的压摆率 ($R_{in1} = 455 \text{ k}\Omega$, $R_{out1} = 1.4 \text{ }\Omega$, $C_{in1} = 2.1 \text{ pF}$, $\text{Slew rate} = 3500 \text{ V}/\mu\text{s}$) 和电压缓冲器 OA2, 具有高输入阻抗和小偏置输入电流 ($R_{in2} = 1 \text{ M}\Omega$, $C_{in2} = 2.1 \text{ pF}$, $I_{Bias} = \pm 3 \text{ }\mu\text{A}$), 肖特基二极管 D 有很小的反向漏电流和寄生参数 (寄生电容 $C_d = 0.4 \text{ pF}$, 寄生电感 $L_d = 1.4 \text{ nH}$, 导通电阻

$R_d = 500 \text{ m}\Omega$, 反向漏电流 $I_r = 0.25 \text{ }\mu\text{A}$), 峰值保持电容 $C_s = 75 \text{ pF}$ 。

由于电路中存在电容 C_s 、二极管 D 及寄生电容电感等非线性元件, 会影响到最后输出信号。因此, 对图 6 中电路进行等效, 如图 7 所示, 并推导响应分析。利用拉普拉斯变换分析, 给出 x 节点与 y 节点之间的阻抗函数如公式 (4) 所示:

$$Z_{xy} = R_a + \frac{s^2 L_h C_t R_t + s(L_h + R_b C_t R_t) + R_b + R_t}{s^3 L_h C_h C_t R_t + s^2 (L_h C_h + R_b C_h C_t R_t) + s(R_t C_h + R_b C_h + C_t R_t) + 1} \quad (4)$$

y 节点和 z 节点之间的阻抗为:

$$Z_{yz} = \frac{R_0}{s R_0 C_s + 1} \quad (5)$$

$$K_s = \frac{R_0 (s^3 \tau_1 \gamma + s^2 (\gamma + \zeta_1 \tau_1) + s (\zeta_1 + \zeta_2 + \tau_1) + 1)}{L_h A_s + R_0 B_s - R_t C_s + \Phi_s} \quad (6)$$

利用公式 $K_s = \frac{Z_{yz}}{Z_{yz} + Z_{xy}}$ 计算传递函数为:

其中

$$A_s = s^3 a + s^2 b + s \quad (7)$$

$$B_s = s^3 \tau_1 \gamma + s^2 (\gamma - b) + s(c - \tau_2) \quad (8)$$

$$C_s = s^2 a + s \tau_1 \quad (9)$$

$$\Phi_s = \frac{R_M A_s}{s} + R_a (s^4 \gamma a + s^3 m + s^2 n + s c) \quad (10)$$

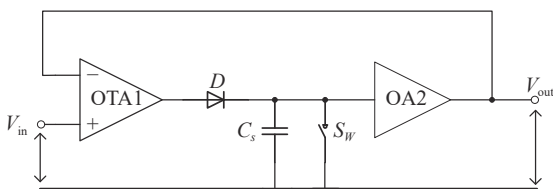


图 6 峰值保持简化电路图

Fig.6 Simplified circuit diagram for peak holding

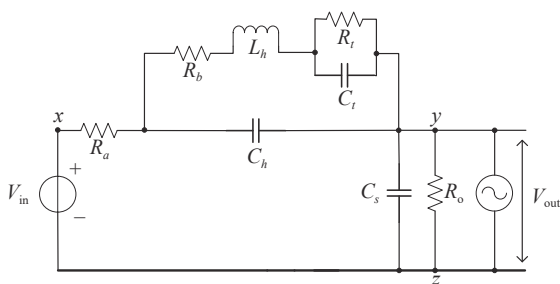


图 7 峰值保持等效电路图

Fig.7 Peak holding equivalent circuit diagram

而 $a = \tau_1 \tau_2$, $b = \tau_1 + \tau_2$, $c = \zeta_1 + \zeta_2$, $m = \zeta_1 \tau_1 \tau_2 + \tau_1 \gamma + \tau_2 \gamma$, $n = \zeta_1 \tau_2 + \zeta_2 \tau_2 + \zeta_1 \tau_1 + \gamma$ 且 $\tau_1 = R_t C_t$, $\tau_2 = R_0 C_s$, $\gamma = L_h C_h$, $\zeta_1 = R_b C_h$, $\zeta_2 = R_t C_h$, $R_M = R_a + R_b + R_t + R_0$ 。

利用 Ltspice 对等效模型进行仿真, 其中 $R_a = R_{out1} = 1.4 \text{ }\Omega$, $R_t = R_d = 500 \text{ m}\Omega$, $R_b = 1 \text{ }\Omega$, $R_0 = R_{in2} = 1 \text{ M}\Omega$, $C_t = C_d = 0.4 \text{ pF}$, $C_h = 0.3 \text{ pF}$, $L_h = L_d = 1.4 \text{ nH}$ 。仿真波形图如图 8 所示, 图 (a) 为幅值为 1 V , 上升、下降时间 1 ns , 持续时间 100 ns 的输入信号; 图 (b) 为对应的 $R_a = 1.4 \text{ }\Omega$ 时 V_{out} 输出脉冲波形, 由于电路中寄生元件的存在而产生谐振, 会在输出脉冲顶部形成尖峰; 图 (c) 为对应的 $R_a = 5 \text{ }\Omega$ 时 V_{out} 输出脉冲波形。通过减小寄生电感 (选择合适的二极管) 以及增大 R_a 的值可以有效削弱输出端的尖峰

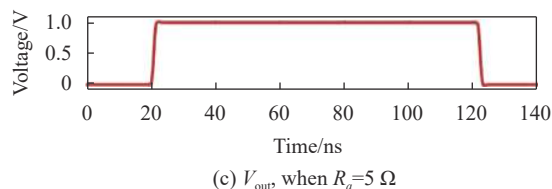
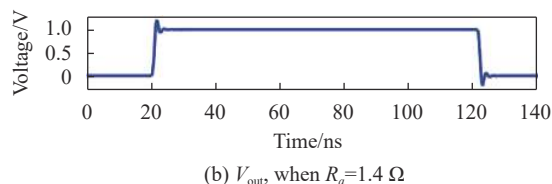
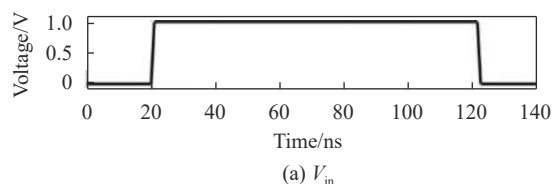


图 8 仿真脉冲波形图

Fig.8 Simulation pulse waveform

效应。

该尖峰的出现与放电电容的容值选择及信号的上升、下降时间有很大关系,信号上升沿越短,尖峰效应越明显。因此在峰值保持电路中增大 OTA₁ 的串接电阻、选择合适的放电电容以及在峰值保持电路之前延长信号的上升、下降时间都可有效降低尖峰效应。

2.3 脉冲参数采集

采集模块核心为 Zynq 7020,其内部核心结构为 FPGA+ARM 的双核结构,数模转换器为 16 位 20 MHz 的 ADC,通过配置 FPGA 的内部的锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) IP 核进行倍频或分频设定系统时钟,使得与 ADC 和 Flash 缓存速度一致。ADC 的采样率为 20 MSPS,由 FPGA 对转换信号、片选和时钟信号的控制完成 ADC 的采样。采集到的数字信号通过 FPGA 的 IP 核控制存储到 RAM(Random Access Memory) 中。峰值保持电路的输出端接到 ADC 的前端处理电路,ADC 前端电路将信号转换为差分信号后输入到 ADC 中。经 ADC 采样后,进行高频滤波,带宽为 1 MHz,之后进行电压寻峰查找。对于电压值的采集流程如图 9 所示。电压采集过程中需要对峰值电压进行电压值判断防止误触发,阈值电压为 500 mV。如果电压信号峰值大于 500 mV,启动定时器并且计算峰值电压,定时时间到处理完成之后对峰值电压进行存储。

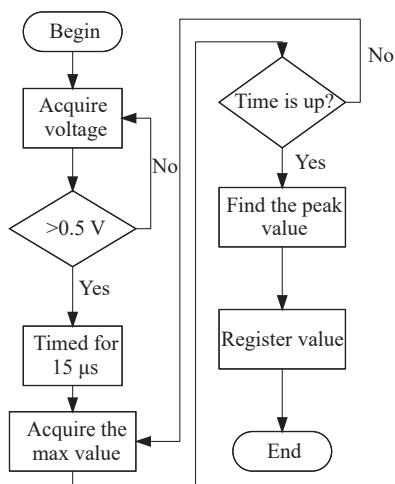


图 9 峰值电压采集流程

Fig.9 Peak voltage acquisition process

光刻用准分子激光器的工作模式为 Burst 模式,

即激光器会以固定频率发出一定数量的脉冲激光,这段时间被称之为一个 Burst,然后停止工作一段时间,这段时间则被称之为 Burst 间隔时间,在一个 Burst 内一般含有 250~300 个单脉冲能量值。

在 Burst 工作模式下,进行脉冲计数时,设置 Burst 间的时间间隔为 20 ms, Burst 时间间隔进行识别如图 10 所示。在同一个 Burst 内,分别对脉冲序数和脉冲总数进行计数。

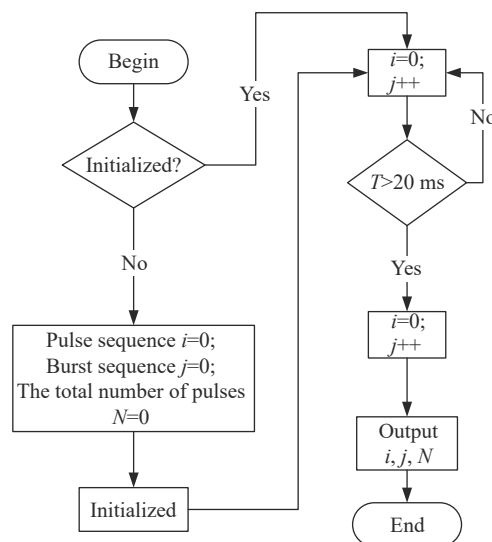


图 10 单个 Burst 内脉冲及 Burst 计数流程

Fig.10 Pulse and Burst counting processes in 1 Burst

3 脉冲参数测量系统性能测试

3.1 脉冲重频、脉宽测试及脉冲能量计算

在一台自研 ArF 准分子激光器上进行了脉冲参数测量系统的波形检测实验,所用实验设备包括探测器、测量电路、脉冲采集模块、上位机及图 4 中的光路系统。其中光路系统及光电探测器置于设计好的机械封装盒内,测量过程置于黑暗环境,通过 BNC 端口输出测量电路及后续采集模块和上位机。激光器的重复频率为 6 kHz,工作模式为 Burst 输出模式,能量设定模式为恒能量 10 mJ。

激光器的重复频率实测波形如图 11 所示。准分子激光器在 Burst 模式下测得的脉冲时间间隔为 166 μs,激光重频稳定。

激光器的工作模式为恒能量模式,但单脉冲能量依然是波动的,其原因是激光器要根据之前的脉冲对

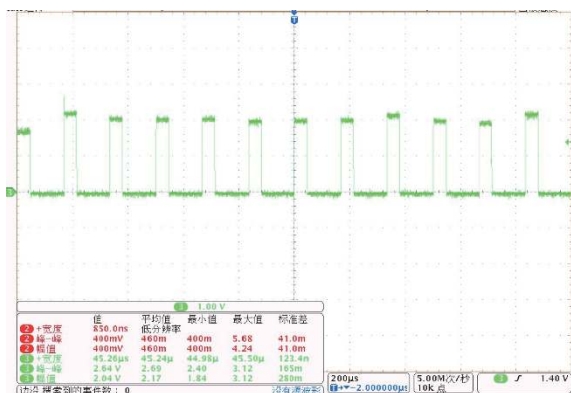


图 11 6 kHz 激光器重复频率实测波形

Fig.11 The repetition frequency waveform of the laser measured when laser works at 6 kHz

高压电源进行调节,单脉冲能量的波动来自驱动高压电源高压值的波动。图 11 中,示波器的电压值波动所反映的是激光器单脉冲能量值的波动,满足光刻需求的光源能量稳定性不超过 15%。

脉冲信号的在线波形通过光电探测器传到示波器进行采样,单脉冲波形采样间隔为 16 ns,采样点数据长度为 6 250。输出响应时间约为 150 ns,如图 12 所示。

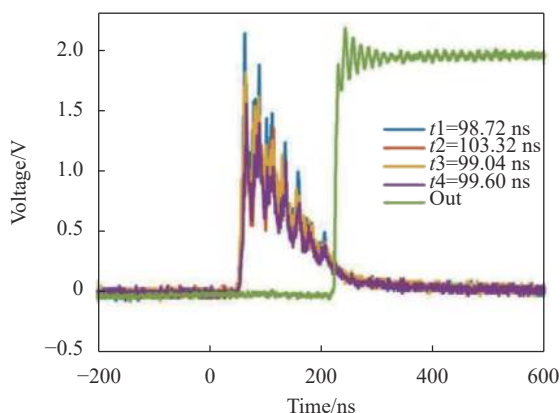


图 12 激光器 6 kHz 脉冲参数测量系统输出波形

Fig.12 Measurement system for pulse parameters output waveform when laser works at 6 kHz

得到的单脉冲数据通过寻峰查找峰值电压,数据插值后计算半高宽,随机抽取激光器恒能量模式下的单脉冲,脉冲宽度如图 12 所示,激光器发出的单脉冲宽度并不稳定。在线监测准分子激光器的单脉冲宽度,对处理后的单脉冲信号进行时域积分,由公式 (3) 计算单脉冲能量的理论值:

$$E = \int \frac{U}{R_0 \cdot G} \cdot \frac{D}{K} dt \quad (11)$$

式中: R_0 为示波器负载 $R_0 = 50 \Omega$; U 为示波器显示电压值; G 为探测电路增益 $G = 93.50 \text{ dB}\Omega$; K 为光路系统衰减倍数 $K = 0.5\%$, 计算图 12 中脉宽 $t_1 = 98.72 \text{ ns}$ 单脉冲理论能量值为 $E = 7.05 \text{ mJ}$ 。

3.2 脉冲能量测量重复性与一致性测试

将标准能量计和能量测量电路接入 16 位 ADC 中,对能量测量电路的电压值和能量计的能量值进行同步采集,在激光器 6 kHz 重复频率时,对准分子激光器的能量进行测试,将采集到的数据进行处理。

激光器工作在恒能量模式下,图 13 为激光器能量设定值为 7 mJ 时,标准能量计的参考能量值与能量探测电路测量值的对比图,测量系统能量值与参考能量值具有较好的一致性。

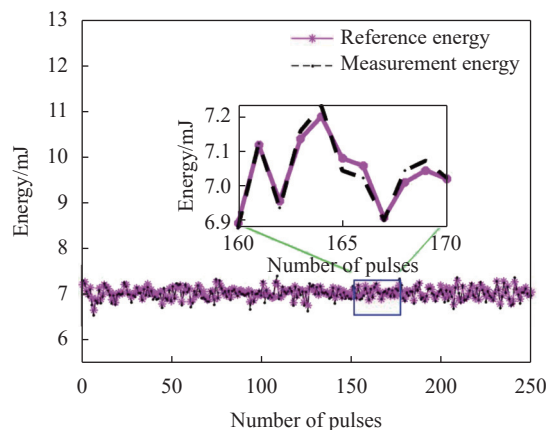


图 13 激光器能量设定 7 mJ 时参考值与测量值对比

Fig.13 Comparison between the reference value and measured value when the pulse energy of the laser is set as 7 mJ

衡量测量系统性能的指标包括均值 (Mean)、标准差 (Standard Deviation, SD)、相对标准差 (Relative Standard Deviation, RSD)^[18]。

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

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N-1)}}{1/N \sum_{i=1}^N x_i} \quad (13)$$

式中: $N=250$ 表示脉冲数。

激光器在恒能量模式不同能量设定值下,利用公式 (12) 和 (13) 计算测量系统能量测量值与标准能量计参考能量值的均值、标准差、相对标准差如表 1 所示。激光器在气体状态较好时,在低能量设定值下的

波动较大,相对标准差值大,而在高能量设定值下,激光器的输出更稳定。

由表 1 得到设定 7 mJ 测得的能量均值为 7.04 mJ,与公式 (11) 计算的理论值偏差在 0.01 mJ,验证测量系统的可行性。

表 1 测量系统测量值与标准能量计的对比

Tab.1 Comparison between the measured values of the measurement system and the standard energy meter

Energy setting/mJ	Standard energy meter			Measurement system for pulse parameters		
	Mean/mJ	SD/mJ	RSD	Mean/mJ	SD/mJ	RSD
6	6.02	0.139	2.30%	5.99	0.130	2.17%
7	7.04	0.179	2.55%	7.04	0.180	2.56%
8	8.05	0.210	2.61%	8.02	0.234	2.99%
9	9.07	0.094	1.03%	9.10	0.124	1.37%
10	10.09	0.117	1.16%	10.09	0.154	1.53%
11	11.11	0.114	1.03%	11.12	0.142	1.28%
12	12.12	0.128	1.06%	12.13	0.129	1.07%

利用测量系统相对于能量计相对测量值的相对标准差衡量重复性,由表 1 计算得平均相对标准差为 0.29%,测量系统具有较好重复性。

$$\varepsilon = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (14)$$

式中: x 为测量值; μ 为参考值; ε 为相对误差。

最终利用表 1 均值及公式 (14) 计算相对于标准能量计的相对误差,最大值为 0.56%,平均相对误差为 0.22%。

3.3 脉冲能量测量线性度测试

实验在激光器 6 kHz 恒能量模式下,激光器能量设定为 6~12 mJ,分别采集 500 个单脉冲的电压值与标准能量计的能量值进行标定,对 500 个单脉冲数据分别取均值,得到测量系统的输出电压与标准能量计参考能量值关系如图 14 所示,通过最小二乘法进行曲线拟合,得到的拟合关系式如下所示:

$$U = kE + l \quad (15)$$

式中: U 为输出电压,单位 mV; E 为输入激光能量,单位 mJ,而 $k = 188.93 \text{ V/J}$ 为转换系数,直流电压偏置 $l = 339.94 \text{ mV}$,采集时会被滤除。

计算拟合方程的相关系数^[19]可得 $R^2 = 99.83\%$ 。测试激光能量范围为 6~12 mJ,准分子激光器重频

6 kHz,在满足的动态范围内,待测能量探测电路具有良好的线性度,满足设计需求。

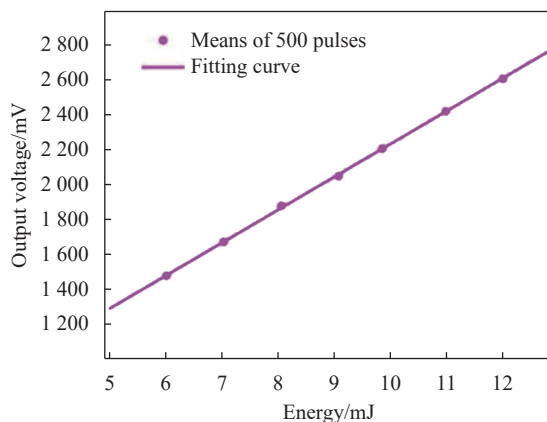


图 14 能量与输出电压拟合曲线

Fig.14 Fitting curve of energy and output voltage

4 结 论

文中设计了一种针对光刻用深紫外准分子光源的脉冲参数测量系统,对于准分子激光器脉冲参数实现了在线精确测量。通过硬件电路等效模型及响应分析,研究了峰值保持电路尖峰效应的原因及消除方法,减少电路本身对探测的干扰,提高了测量系统的精度。测量系统在 193 nm ArF 准分子光源机台上

6 kHz 恒能量模式下进行测试,实现了重复频率、脉冲宽度的在线提取和脉冲能量的重复性、一致性及线性度测试,实验验证脉冲参数测量系统线性度高为99.83%,与标准能量计对比误差不高于0.56%,平均误差为0.22%,实现了高精度测量,满足ArF准分子光源脉冲参数在线测量的需求。

参考文献:

- [1] DAS P, MORTON R, FOMENKOV I, et al. Performance of 1 kHz KrF excimer laser for DUV lithography[C]//XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference (GCL/HPL 96), 1996: 467-470.
- [2] YOSHINO M, NAKARAI H, OHTA T, et al. High-power and high-energy stability injection lock laser light source for double exposure or double patterning ArF immersion lithography - art. no. 69242S[C]//Conference on Optical Microlithography XXI, 2008: S9242.
- [3] LI Yanli, LIU Xianhe, WU Qiang. Evolution and updates of advanced photolithography technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922006.
- [4] STAMM U, PAETZEL R, BRAGIN I, et al. High-repetition-rate ultranarrow-bandwidth 193-nm excimer lasers for DUV lithography[C]//Optical Microlithography XIII, 2000: 1390-1396.
- [5] XU Liang, SHEN Qihui, SHAO Jingzhen, et al. Discharge-pumped excimer laser technologies and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 1900006. (in Chinese)
- [6] JIANG Rui. Key technologies and applications of excimer laser as light sources in lithography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 337-354. (in Chinese)
- [7] LIANG Xu, YOU Libin, YU Yinshan. Excimer laser pulse energy detection under pulse repetition running mode [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(3): 281-287.
- [8] LIANG Xu, YOU Libin, WANG Tao, et al. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage realtime adjusting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 374-378. (in Chinese)
- [9] XIE Chenke, CHEN Ming, YANG Baoxi, et al. Development and performance testing of pulsed excimer laser energy detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0102006. (in Chinese)
- [10] LI Wenjie, ZHAO Duliang, LIN Yin, et al. Design of highly sensitive on-line detecting system for ultraviolet pulse lasers energy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1222002. (in Chinese)
- [11] XIONG Yan, LU Yaodong, ZHU Min, et al. Design of peak holding circuit for narrow laser pulse [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(12): 1377-1380. (in Chinese)
- [12] FELLNER G, SPECKBACHER L, MOUSAVI S M, et al. Nanosecond peak detect and hold circuit with adjustable dynamic range[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72(200): 5501-5508.
- [13] CAI Ying. Design of wide-band and high-precision laser energy meter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 488. (in Chinese)
- [14] ZHOU Guoqing, TAN Yizhi, ZHOU Xiang, et al. Testing method and experiment of large dynamic range energy of pulsed laser with wavelength of 1 064 nm and 532 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20200417. (in Chinese)
- [15] 冯泽斌. 基于深度学习的准分子激光器能量稳定性控制技术 [D]. 北京: 中国科学院微电子研究所, 2021.
- [16] LIPIKA P, BHARATH M, SUGANYA S, et al. Design of high precision peak detect sample & hold architecture for spectroscopy applications[C]//3rd IEEE International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (IEEE-ESCI), 2021: 87-91.
- [17] JIANG Yan, ZHU Jingguo, LIU Ruqing, et al. Design of pulse laser multi-echo peak detection circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 20220625. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局. GB/T 38853-2020, 用于数据采集和分析的监测和测量系统的性能要求 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2020. <https://www.antpedia.com/standard/1493255526.html>
- [19] MORGAN J A, TATAR J F. Calculation of the residual sum of squares for all possible regressions [J]. *Technometrics*, 1972, 14(2): 317-325.

Design and implementation of high precision on-line measurement system for pulse parameters of ArF Excimer laser

ZHAO Wanqi^{1,2,3}, JIANG Rui³, FENG Zebin^{1,3}, XU Ze³, GUO Ning³, JIANG Yan¹, ZHU Jingguo^{1*}

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing RSLaser Opto-Electronics Technology Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract:

Objective The laser with stable output energy is critical for lithography. For the closed-loop control of the deep-ultraviolet excimer light source, the laser pulse parameters need to be measured on-line with high precision. Traditional excimer laser energy measurement devices are based on low repetition rate. In order to meet the pulse measurement requirements of high repetition rate excimer lasers, the on-line measurement system for pulse parameters of high repetition rate excimer laser is designed. The pulse energy acquisition is realized by using peak holding circuit and high speed ADC. The optimization method for peak holding circuit design is proposed by simulating the parasitic equivalent model of peak holding circuit.

Methods The measurement system for pulse parameters that is designed includes the light path of the former stage and the processing circuit of the latter stage. The measurement system for pulse parameters is placed at the output of the main optical path, and the laser output light passes through the beam splitter, with 95% of the energy output light being used for subsequent lithography work, and 5% of the output light being used for detection, which effectively reduces the loss of the output signal, as shown in Fig.4. The block diagram of the detection circuit is shown in Fig.5. The principle and transient analysis of the peak holding circuit are shown in Fig.6-8. The detection circuit includes a trans-impedance amplification circuit, a filter circuit, a peak holding circuit, and a switching circuit for synchronous triggering of the signal. The peak voltage is maintained and broadened by the peak holding circuit, then the peak value is sampled by a 16-bit 20 MHz high-speed and high-precision ADC, and the collected signal is processed by FPGA.

Results and Discussions The test performance of the measurement system for pulse parameters is carried out with an ArF excimer laser. The output of the measurement system for pulse parameters is square wave signal with wide pulse width, which is convenient for ADC acquisition. The response time of the measurement system for pulse parameters is about 150 ns. Besides, the repeatability experiment of the measurement system for pulse parameters yielded a relative error of 0.22% relative to the standard energy meter while the ArF excimer laser works at 6 kHz. And the max relative error is 0.56%. A comparison of the reference energy values of a standard energy meter and those measured by the measurement system for pulse parameters is shown in Fig.13 with the laser operated in constant energy mode. The relationship between the output voltage of the measurement system for pulse parameters and the energy of input signal is shown in Fig.14 with 500 pluses, and the curve is fitted by the least squares method to obtain the fitting relationship. According to the analysis, the correlation coefficient of the linearity is 99.83%.

Conclusions The system is designed for measuring the pulse parameters of a deep ultraviolet excimer light source for photolithography, and on-line accurate measurement of the pulse parameters of an excimer laser is achieved. The feasibility of the measurement scheme is verified by comparing the theoretical calculation with the

measured results. Based on the equivalent model and response analysis of the hardware circuit, the reason and elimination method of the peak effect of the peak holding circuit are studied. The measurement system was tested on a 193 nm ArF excimer light source at a constant energy mode of 6 kHz, and realized the on-line extraction of repetition frequency and pulse width and the measurement of repetition, consistency and linearity of pulse energy, the results verify that the linearity of the pulse parameter measurement system is 99.83%, the relative error with the standard energy meter is not more than 0.56%, and the average error is 0.22%. It can meet the requirement of on-line measurement of pulse parameters of ArF excimer light source.

Key words: energy detection; on-line measurement; excimer laser; pulse parameters; linearity

Funding projects: Major National Science and Technology Projects (2016ZX02201002)