

文章编号: 1001-3806(2012)06-0763-04

高重复频率 ArF 准分子激光器能量控制算法研究

王效顺 梁 勘 游利兵 赵家敏 方晓东*

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了实现工业用高重复频率 ArF 准分子激光器脉冲能量稳定, 从电源控制的角度进行了脉冲能量控制技术的基础研究。介绍了高重复频率 ArF 准分子激光器能量稳定闭环控制原理, 使用近似方法建立了准分子激光器脉冲能量和放电电压的函数模型, 提出一种基于实时检测脉冲能量的电压调节比例积分算法, 并结合函数模型和控制算法进行了 MATLAB 仿真。结果表明, 建立的脉冲能量模型是合理的, 且提出的比例积分算法在提高激光器脉冲输出能量稳定性方面是有效的。

关键词: 激光器; 能量稳定; 比例积分算法; 高重复频率; ArF 准分子激光器

中图分类号: TN248.2; TP13

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.013

Study on energy control algorithm for high-repetition-rate ArF excimer lasers

WANG Xiao-shun, LIANG Xu, YOU Li-bing, ZHAO Jia-min, FANG Xiao-dong

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

Abstract: In order to achieve the pulse energy stability of high-repetition-rate ArF excimer lasers, the technology of pulse energy control was studied from the perspective of power supply adjustment. The closed-loop control principle for pulse energy stability of high-repetition-rate ArF excimer lasers was introduced. The function model between the output energy of excimer laser and the discharge voltage was established with approximation method, and the proportion-integration(PI) algorithm for real-time adjustment of discharge voltage based on the real-time detection of pulse energy was proposed. Combined with the function model and the control algorithm, simulation was carried out with MATLAB software. The simulation results indicate that the pulse energy model is reasonable and the PI algorithm is feasible for improving the laser pulse energy stability.

Key words: lasers; energy stability; proportion-integration algorithm; high-repetition-rate; ArF excimer laser

引言

193nm ArF 准分子激光器在大规模集成半导体器件的生产过程中得到广泛应用^[1-2]。准分子激光器作为光刻光源要满足大规模生产需具备高重复频率(1kHz~6kHz)、高能量稳定性、窄线宽、高波长稳定性以及长气体寿命等特点。光刻过程中, 激光器的能量稳定性直接影响着集成芯片电路关键尺寸的控制, 而光刻生产的吞吐量则受制于激光器的平均功率和运行频率^[3-5]。一般运行频率越高, 能量越大, 平均功率越大, 光刻生产的吞吐量越大。

高重复频率 ArF 准分子激光器连续运行时, 高压快放电使卤素气体转变为稳定的化合物, 卤素气体浓度逐渐降低, 激光输出能量明显下降^[6]。因此, 能量稳定控制系统对该类准分子激光器而言, 尤为重要。

作者简介: 王效顺(1983-), 男, 博士研究生, 现从事准分子激光器自动控制方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xdfang@ aofm.ac.cn

收稿日期: 2012-04-06; 收到修改稿日期: 2012-04-11

在激光器正常运行允许的电压和气压范围内, 通过调节激励电压和补充卤素气体, 可以使激光输出能量稳定在目标能量附近^[7-8]。相对补气而言, 电压调节精度更高, 更具有实时性, 更加适合在高重复频率激光器上应用。此外, 调节电压使能量稳定在一定程度上延长了气体工作时间, 节约了气体, 降低了光刻系统的运行成本。

本文中针对高重复频率 ArF 准分子激光器, 设计了通过实时调节激励电压来稳定脉冲能量的控制方案, 建立了激光脉冲能量简化模型, 提出了一种电压调节的比例积分算法(proportion-integration, PI)。使用 MATLAB 工具, 仿真了准分子激光器在该算法调节下运行情况, 验证了该算法的可行性。

1 准分子激光能量稳定控制原理

光刻用高重复频率 ArF 准分子激光器一般使用全固态脉冲电源驱动^[9]。该类电源由直流高压电源、可控谐振充电模块、升压变压器和磁脉冲压缩模块等几部分组成。全固态 ArF 准分子激光器放电主回路如图

1 所示。

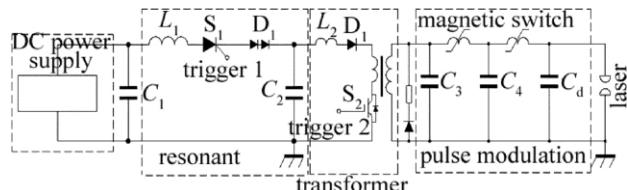


Fig. 1 Discharge circuit of a solid-state ArF excimer laser

ArF 准分子激光器气体放电激励需要上万伏高压,高压信号不易调节。但在全固态脉冲电源中,由于直流高压电源输出电压由其参考电压决定,可以通过控制直流高压电源参考电压实现对气体放电激励电压的调节。此外,气体放电激励电压还可以通过控制谐振电容 C_2 两端电压进行调节。将设定的谐振参考电压与 C_2 取样电压进行比较,用于控制 S_1 的导通与断开,完成对谐振充电电压的控制。

激光器能量稳定闭环控制原理如图 2 所示。使用热释电探测器对每一个激光脉冲能量进行实时监测,并将采集到的数据传送至主控制器,主控制器根据前面能量数据,利用 PI 算法,计算出下次激光放电对应的直流高压电源或谐振充电参考电压,从而实现对激光器脉冲输出能量的实时调节。

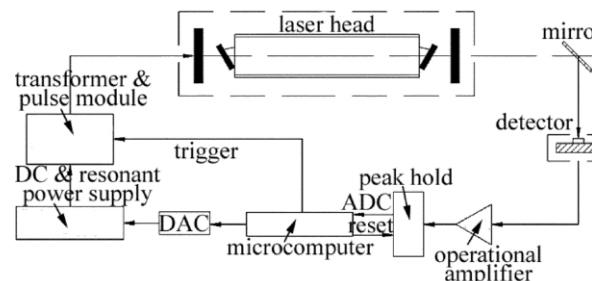


Fig. 2 Closed-loop control principle of the energy stability

2 电压调节算法及仿真

2.1 高重复频率 ArF 准分子激光器数学建模

2.1.1 建立脉冲能量模型 ArF 准分子激光器作为光刻光源使用时,其脉冲能量稳定性会受到激光器运行时间、激励电压、光刻系统随机抖动、充电电压误差以及激光器硬件性能(预电离均匀性、电极面型紧凑性、腔内气体流速和均匀性、腔体洁净程度和光学元件劣化)等的影响。对光刻用 ArF 准分子激光器脉冲能量的描述,本文中建立了一种简单近似模型。只关注激励电压和放电次数对激光器脉冲能量稳定性的影响,其它因素的影响包含在初始能量方差中。

建模时,综合考虑以下 3 点因素影响。

(1) 据 PHYSIK 研究成果:理想状态下,准分子激光器脉冲输出能量波动符合高斯分布^[5],即 $E_j \sim N(E, \sigma^2)$ 。其中 j 为单次脉冲数, E 为能量平均值, σ^2

为能量方差,表达式见下:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum (E_j - E)^2 \quad (2)$$

此外,描述脉冲能量稳定性时,多使用能量相对标准差 σ_r ,表达式见下:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{E} \cdot 100\% \quad (3)$$

(2) 仅考虑放电次数的影响时:随着高重复频率准分子激光器放电次数的增加,气体老化加速,放电状况变差,脉冲能量平均值 E 明显降低,能量抖动增加,方差 σ^2 增大^[10]。能量平均值 E 和能量方差 σ^2 与脉冲数的近似关系表达式如下:

$$E_i \propto \sqrt{E_0^2 - i^2 / (2 \times 10^6)} \quad (\sigma_i^2 \propto i^{0.1}) \quad (4)$$

模型中, $j = i \times 10^6$, j 每增加 1 代表激光器有 10^6 个脉冲输出, E_0 为激光器初始能量。

(3) 仅考虑激励电压影响时:在激光器正常工作范围内,提高放电激励电压,激光脉冲输出能量显著提高,能量抖动下降^[11]。能量平均值 E 和能量方差 σ^2 与激励电压 V 的近似关系见下式:

$$E \propto V^{0.5} \propto V_{DC}^{0.5},$$

$$(\sigma^2 \propto \frac{1}{(V/V_0)^4} \propto \frac{1}{(V_{DC}/V_{DC,0})^4}) \quad (5)$$

式中, V_{DC} 为直流电源输出电压, $V_{DC,0}$ 为直流电源初始电压。

综上 3 点,高重复频率 ArF 准分子激光器脉冲能量分布模型可以用下式描述:

$$E_i \sim N(E_i + \Delta E_{V_{DC}}, \frac{\sigma^2 \times i^{0.1}}{(V_{DC}/V_{DC,0})^4}) \quad (6)$$

2.1.2 MATLAB 仿真验证能量模型 目前,国际上成熟的光刻用 ArF 准分子激光器产品,像 Cymer 的 XLR500ix 系列^[12]、XLR600ix 系列^[13]和 Gigaphoton 的 G42A 系列^[1]、GT62A 系列^[14]等,其脉冲输出能量一般在 5mJ ~ 15mJ 之间,并且在约 10^{10} 个脉冲以内保持很高的稳定性,输出功率为 20W ~ 90W。

为了验证第 2.1.1 节中脉冲能量模型的合理性,使用 MATLAB 仿真一台高重复频率 ArF 准分子激光器在不进行能量稳定调节时的运行情况。该激光器初始参数如下: $V_{DC} = 850V$ 且保持不变,能量为 10mJ。由于光刻系统随机抖动、充电电压误差以及激光器硬件性能等因素造成能量初始方差 $\sigma^2 = 0.25$ 。

假设 $E \sim V$ 边界条件为: $V_{DC} = 750V$, $E = 5mJ$; $V_{DC} = 950V$, $E = 15mJ$, $V_{DC}(j)$ 可以近似求出能量平均值随电压的变化关系式:

$$\Delta E_{V_{DC}(j)} = \Delta V_{DC} \times \frac{dE}{dV_{DC}(j)} = 1.5 \times [V_{DC}(j) - 850] \quad (7)$$

在恒电压模式下 $\Delta E_{V_{DC}} = 0$,能量应按下式描述的情况发展:

$$E_i \sim N(\sqrt{E_0^2 - i^2/(2 \times 10^6)} \sigma^2 \times i^{0.1}) \quad (8)$$

取 $i = 10000$,即激光器连续输出 10^{10} 个脉冲 ,仿真结果如下: 激光器在恒电压模式下运行 ,激光器输出能量平均值降为 9.10mJ ; 能量方差 σ^2 变为 1.03 相对标准差 $\sigma_r \approx 11.1\%$ 。图 3 为仿真的激光器输出能量随脉冲数的变化波形。随着脉冲数增加 ,能量均值逐渐降低 ,能量波动逐渐变大。图 4 为仿真的激光器输出能量分布直方图。仿真结果与理论结果符合得很好 ,说明使用上述模型描述高重复频率 ArF 准分子激光器实际运行环境是可取的。

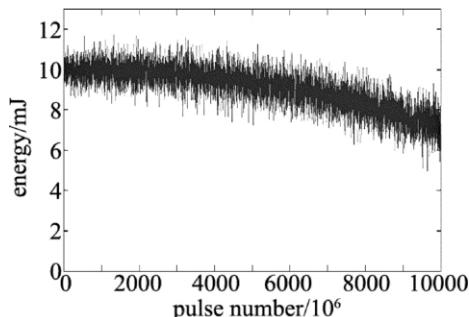


Fig. 3 Energy vs. gas lifetime of discharge-voltage-constant mode

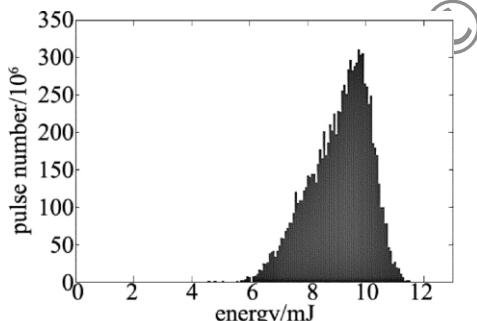


Fig. 4 Energy distribution histogram of constant-discharge-voltage mode

2.2 PI 算法设计

为了保证高重复频率 ArF 准分子激光器连续运行时脉冲输出能量能够稳定在设定的目标能量附近 ,设计了针对电压调节的 PI 算法。在获得的前面脉冲能量数据的基础上 ,使用 PI 算法计算出下次激光放电所需要的激励电压 ,达到提高脉冲能量稳定性的目的。

2.2.1 电压调节 PI 算法 PI 算法即比例积分算法。相比其它算法 ,如平均值算法等 ,PI 算法控制及时 ,能够快速地减小波动使系统稳定 ,且控制精度较高。准分子激光器脉冲输出能量属于离散系统 ,其积分为单个离散量之和。根据设计 ,PI 算法表达式如下:

$$V_{DC}(j) = V_{DC}(j-1) - [k_p \times e(j-1) + k_i \times \sum_{n=1}^{j-1} e(n)] / \left(\frac{dE}{dV_{DC}} \right) \quad (9)$$

式中 , $V_{DC}(j)$ 为直流电源输出电压 $e(j-1)$ 为单次能量偏差 , $\sum_{n=1}^{j-1} e(n)$ 为能量偏差的积分 k_p 为比例系数 , k_i 为积分系数 , $\frac{dE}{dV_{DC}}$ 为脉冲输出能量对直流电源输出电压的导数。

2.2.2 MATLAB 仿真 PI 算法调节效果 引入 PI 算法控制以后 ,激光器放电激励电压将被不断调节 ,将会对脉冲能量平均值和方差产生影响。激光器初始参量设为: $\sigma^2 = 0.25$,初始电压取 850V ,目标能量为 10mJ 。在 PI 算法控制下脉冲能量建模表达式为:

$$E_i \sim N\left(\sqrt{E_0^2 - i^2/(2 \times 10^6)} + 1.5 \times [V_{DC}(j) - 850] \frac{\sigma^2 \times i^{0.1}}{[V_{DC}(j)/850]^4}\right) \quad (10)$$

式中 ,比例系数 k_p 和积分系数 k_i 的大小组合直接影响着 PI 算法的调节效果。由仿真结果可知: 当 $k_p = 0.2$, $k_i = 0.02$ 时 ,控制系统响应速率快、调节效果好 ,能够保证激光器系统长期稳定运行。如图 5 所示 ,使用 PI 算法调节电压后 ,激光能量稳定在初始目标能量 10.0mJ 附近 ,能量波形毛刺变小。 $\sigma^2 = 0.32$,相对标准差 $\sigma_r \approx 5.67\%$,相比恒电压模式有显著下降。图 6 为激光能量分布直方图 ,能量呈高斯型分布 ,在横坐标上的能量分布范围明显缩小 ,更能直观反映出能量波动性变小。图 7 反映了在该算法调节下直流电源输出

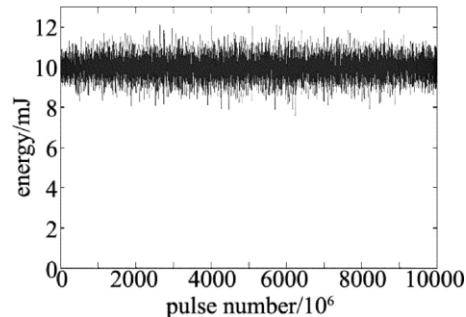


Fig. 5 Energy vs. gas lifetime of PI-control mode

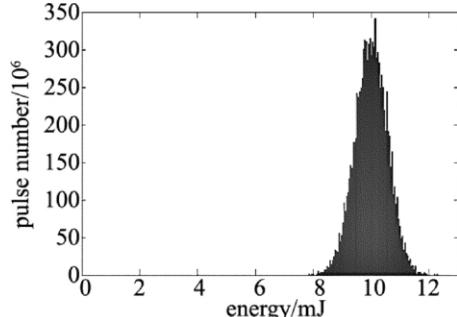


Fig. 6 Energy distribution histogram of PI-control mode

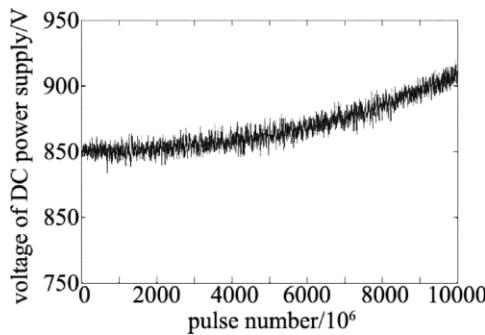


Fig. 7 Simulation voltage waveform of DC power supply

电压呈上升趋势,说明激光器在该算法调解下通过不断提高放电电压来弥补气体状况变差带来的能量下降。

3 结 论

主要阐述了高重复频率 ArF 准分子激光器能量稳定控制原理,使用近似方法建立了脉冲能量模型,提出了用于稳定脉冲能量的电压调节 PI 算法。通过 MATLAB 仿真,验证了脉冲能量模型的合理性和 PI 算法的调节效果。该 PI 算法能够保证激光器在满足光刻要求的时间内以恒能量模式运行,并能明显降低能量波动,可以实际应用到光刻光源的能量稳定控制系统中。

参 考 文 献

- [1] SAITO T , SUZUKI T , MASAYA Y , *et al*. Ultra line-narrowed ArF excimer laser G42A for sub-90nm lithography [J]. Proceedings of SPIE ,2003 ,5040: 1704-1711.
- [2] MIAO X Q , HU L L , CHEN H , *et al*. Double patterning combined with shrink technique to extend ArF lithography for contact holes to 22nm node and beyond [J]. Proceedings of SPIE ,2008 ,6924: 69240A/1-69240A/8.
- [3] SAITO T , MATSUNAGA T , MITSUHASHI K , *et al*. Ultra-narrow bandwidth 4kHz ArF excimer laser for 193nm lithography [J]. Proceedings of SPIE 2001 ,4346: 1229-1237.
- [4] KUMAZAKI T , SUZUKI T , TANAKA S , *et al*. Reliable high power injection locked 6kHz 60W laser for ArF immersion lithography [J]. Proceedings of SPIE 2008 ,6924: 2R1-2R10.
- [5] KAKIZAKI K , SASAKI Y , INOUE T. High-repetition-rate(6kHz) and long-pulse-duration(50ns) ArF excimer laser for sub-65nm lithography [J]. Review of Scientific Instruments ,2006 ,77 (3): 035109/1-035109/6.
- [6] BASTING D. Excimer laser technology: laser sources ,optics ,systems and applications [M]. Göttingen , Germany: Lambda Physik AG , 2001: 56-57 256-257.
- [7] LIANG X , YOU L B , HUANG D W. Excimer gas charging system based on microprocessor [J]. Laser Journal ,2010 ,31 (1): 32-33 (in Chinese) .
- [8] LIANG X , YOU L B , YU Y Sh , *et al*. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage real-time adjusting [J]. Chinese Journal of Lasers 2010 ,37 (2): 374-378 (in Chinese) .
- [9] YOU L B , LIANG X , YU Y Sh , *et al*. Design and experimental study of all solid state pulse power module for excimer laser [J]. High Power Laser and Particle Beams ,2009 ,21 (11): 1750-1754 (in Chinese) .
- [10] PFLANZ T , HUBER H. Compact excimer laser light source for optical (mask) inspection systems [J]. Proceedings of SPIE ,2001 ,4349: 180-184.
- [11] DELMDAHL R F , NIKOLAUS B. Solid-state pulsed high-repetition rate excimer lasers [J]. Proceedings of SPIE 2004 ,5339: 284-291.
- [12] BROWN D J W , KEEFFE P O , FLEUROV V B , *et al*. XLR500i: recirculating ring ArF light source for immersion lithography [J]. Proceedings of SPIE 2007 ,6520: 652020.
- [13] FLEUROV V , ROKITSKI S , BERGSTEDT R , *et al*. XLR 600i: recirculating ring ArF light source for double patterning immersion lithography [J]. Proceedings of SPIE 2008 ,6924: 1R1-4R5.
- [14] 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 [J]. Proceedings of SPIE 2008 ,6924: 2S1-2S10.