

文章编号: 0253-2239(2006)06-0878-7

深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法研究*

刘世元^{1,2} 吴小健^{1,2}

(¹ 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074
² 武汉光电国家实验室光电材料与微纳制造研究部, 武汉 430074)

摘要: 提出了一种面向步进扫描投影光刻机的深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法。通过建立扫描曝光过程的抽象模型并分析准分子激光器单脉冲能量波动特性, 提出采用闭环反馈控制进行实时调节, 着重研究了抑制单脉冲能量超调和随机波动的有效算法。在一台波长为 193 nm、重复频率为 4 kHz、单脉冲能量为 5 mJ 的 ArF 准分子激光器上进行了实验研究。结果表明, 当脉冲个数仅为 20 时算法控制下的剂量精度即可达 0.89%, 不但满足亚微米光刻越来越严的剂量要求, 而且有助于提高光刻机生产效率和激光器使用效率。

关键词: 应用光学; 深紫外准分子激光; 剂量控制; 扫描曝光; 光刻机; 能量超调; 脉冲能量随机波动

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Real-Time Exposure Dose Control Algorithm for DUV Excimer Lasers

Liu Shiyuan^{1,2} Wu Xiaojian^{1,2}

(¹ School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074
² Division of Optoelectronic Materials and Micro-Nano Manufacture, Wuhan National Laboratory
for Optoelectronics, Wuhan 430074)

Abstract: A real-time exposure dose control algorithm for DUV excimer lasers in a step and scan projection lithography is presented. By establishing an abstract scan exposure model and analyzing the pulse to pulse energy fluctuation characteristics of DUV excimer lasers, a real-time dose regulation is implemented based on closed loop feed back control, which especially focuses on reducing the pulse energy overshoot and the pulse to pulse stochastic fluctuation. The experiment conducted on an ArF excimer laser with 193 nm of wavelength, 4 kHz of repetition rate, and 5 mJ of pulse energy confirms that such a real-time dose control algorithm is able to achieve a dose accuracy of above 0.89% even with only 20 pulses. It is fully expected that this algorithm will not only meet the more and more stringent dose accuracy requirement for sub-half-micron lithography, but also be helpful to improve the lithography throughput as well as the efficiency.

Key words: applied optics; DUV excimer laser; dose control; scan exposure; lithography; energy overshoot; pulse energy stochastic fluctuation

1 引言

曝光剂量是光刻机极为重要的一个特征^[1], 是指在曝光过程中硅片单位面积上光刻胶所吸收的特定波长的光能量, 即硅片面上某一点处曝光光强对曝光时间的积分:

$$D = \int_0^T I(t) dt, \quad (1)$$

式中 D 为曝光剂量; T 为曝光时间; I 为曝光光强, 是时间 t 的函数。

曝光剂量直接影响光刻机的性能指标, 如关键尺寸 (Critical dimension, CD)、关键尺寸均匀性、生产效率等, 必须加以严格控制, 才能实现最佳的曝光均匀性和稳定性^[2~4]。

目前光刻技术已从步进曝光方式发展为扫描曝光方式, 普遍采用波长 248 nm 和 193 nm 的深紫外

* 国家自然科学基金(50205009, 50575078)资助课题。

作者简介: 刘世元(1970~), 男, 湖北监利人, 博士, 华中科技大学副教授, 主要从事微机电系统、微电子制造设备、光学精密机械与控制等方面的研究。E-mail: shyliu@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-06-07; 收到修改稿日期: 2005-11-03

准分子激光^[5,6]。由于预热、气体退化或更新、以及运行时间等因素影响,准分子激光器总会存在单脉冲能量波动和平均脉冲能量漂移,除此之外还有能量超调(overshot)现象。能量超调是指一组脉冲与一组脉冲之间气体处于不放电状态,导致每一组脉冲的前若干个脉冲在相同的高电压下输出能量值要高很多,超调幅度可达 20%^[7,8]。扫描曝光时,曝光场内各点匀速经过曝光狭缝,从而接收到一定数量的脉冲,其累积值就是该点处的曝光剂量^[9]。显然,脉冲能量波动特别是超调现象直接影响最终的曝光剂量,多个脉冲则能起到平滑效应,且理论上脉冲个数越大效果越好;但在实际光刻应用中,单纯增加脉冲个数往往通过调整衰减片角度来实现,其结果是降低光刻生产率且增加激光器能耗。

单脉冲能量波动和超调现象是准分子激光器的固有特性,通过改善激光器本身性能特别是从光学

上改善其性能尚不足以消除这种现象及其不利影响,必须采用算法控制进行补偿^[7]。为此,本文提出一种实时剂量控制算法,采用闭环反馈控制方式对激光器发出的每个脉冲进行严格控制,以抑制单脉冲能量的随机波动特别是超调现象;同时尽可能采用少的脉冲个数,以保证在满足剂量精度要求的情况下,尽可能提高光刻生产率和激光器使用效率。

2 实时剂量控制算法

2.1 光刻机扫描曝光模型

扫描曝光过程的抽象模型如图 1 所示。激光器发出的脉冲光束经过光路传输系统,从开口大小可调的狭缝中投影到工件台上,形成投影光斑。当曝光场前沿与光斑前沿重合时,扫描开始;此后曝光场匀速经过投影光斑;当曝光场后沿与光斑后沿重合时,扫描结束。

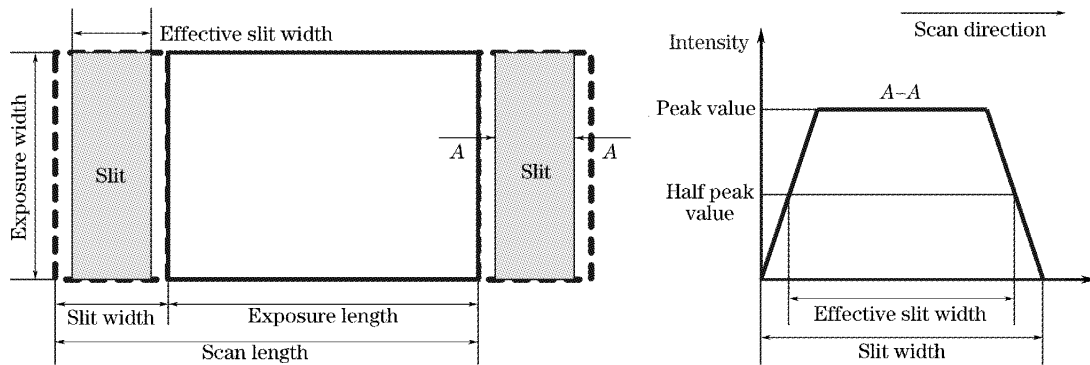


图 1 步进扫描投影光刻机扫描曝光过程抽象模型

Fig. 1 Abstract model of the scan exposure process for a step and scan projection lithography

在扫描曝光过程中,激光器的重复频率 f 固定,狭缝等效宽度 L 为定值,工件台以匀速 v 经过扫描狭缝,则曝光场中每个点经过狭缝时都接收到相同数量的脉冲,其个数 N 为

$$N = \frac{fL}{v}, \quad (2)$$

曝光场中第 i 点获得的总能量即为曝光剂量 D_i :

$$D_i = \frac{\eta}{A} \sum_{k=1}^N E(k), \quad (3)$$

其中 N 为脉冲个数, η 为光传输效率, A 为狭缝等效面积; $E(k)$ 为第 k 个脉冲的单脉冲能量。

曝光剂量的性能一般用剂量精度 σ 来衡量:

$$\sigma = \frac{\max |D_i - D_r|}{D_r} \times 100\%, \quad (4)$$

其中 D_r 为剂量需求值; \max 表示取最大值; D_i 为曝光场中第 i 点的实际剂量值。光刻分辨力为 100 nm 时的剂量精度要求不超过 1%。

2.2 光刻机剂量控制器结构

扫描投影光刻机剂量控制系统如图 2 所示,从准分子激光器发出的脉冲激光,先经过底端照明光路(包括光束扩充镜组、定位-定向镜组、缩放-锥形镜组等)和可变透过率衰减片,到达能量传感器,再经过顶端照明光路(包括光能量均匀棒、扫描狭缝、照明镜组等)、掩模版和投影物镜,最终投射到硅片表面。光路中安装有一个能量传感器,测量每个激光脉冲的能量并结合实时调节算法,计算出下一个单脉冲能量的设定值;最后通过能量-电压转换关系将能量设定值转换成电压设定值,以达到控制激光器单脉冲能量并保证剂量精度的目的。

剂量控制器的结构如图 2 中虚框所示,其中,能量-电压转换关系是通过校准和标定流程来获得的。激光器一般有三个指标:最小、最大和标称能量,校准时使激光器分别以这三个量值发出一定数量的脉

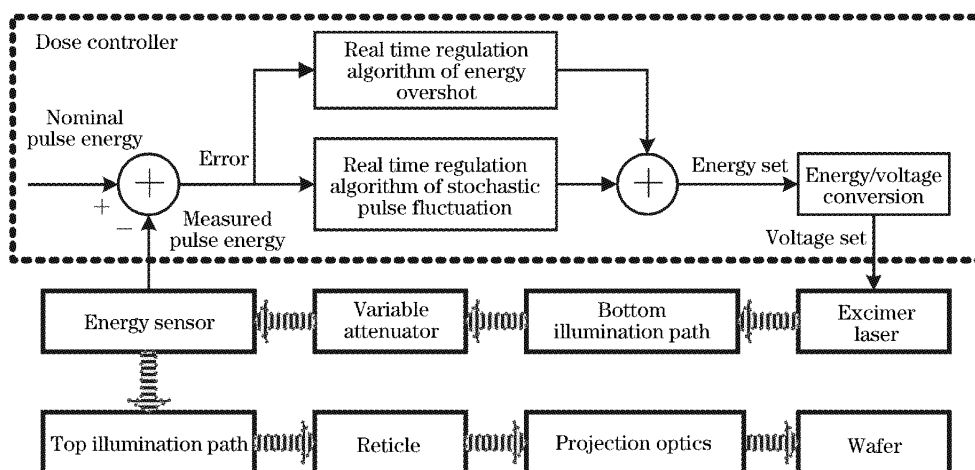


图 2 步进扫描投影光刻机剂量控制器结构

Fig. 2 Architecture of dose controller for a step and scan projection lithography

冲,统计所加电压,近似认为在这个范围内电压与能量为线性关系,通过在两极值点间线性插值,得到一组电压与能量的匹配关系。经过校准后,若给定某个脉冲能量 E ,则其对应的电压值 V 为

$$V = V_N + (E - E_N) \frac{\Delta V}{\Delta E}, \quad (5)$$

$$\Delta E = E_{\max} - E_{\min}, \quad (6)$$

$$\Delta V = V_{\max} - V_{\min}, \quad (7)$$

其中 E_N 为标称能量实测均值, V_N 为标称能量对应的电压实测均值, E_{\max} 为最大能量实测值, E_{\min} 为最小能量实测值, V_{\max} 为最大电压实测值, V_{\min} 为最小电压实测值, ΔE 为实测最大与最小能量差值; ΔV

为最大与最小能量对应的实测电压差值。

2.3 激光器单脉冲能量实时控制算法

实时控制算法包括随机波动和能量超调两部分实时调节算法。随机波动实时调节算法的目的是减小单脉冲能量的随机波动。待发脉冲能量的设定值偏差源自一组脉冲能量实测值与标称能量值的偏差累积,而一组脉冲的个数不超过各点经过扫描狭缝所需的激光脉冲个数 N 。待发的每个脉冲因此都受到之前已发多个脉冲的调节,从而减小了偶然性因素的影响。具体算法如下:

$$\Delta E_s(1) = 0, \quad \text{第 1 个脉冲的能量设定值偏差} \quad (8)$$

$$\Delta E_s(i) = -k_s \sum_{f=1}^{i-1} \left[\frac{E_m(f)}{\epsilon} - E_N \right], \quad 2 \leq i \leq N \text{ 时} \quad (9)$$

$$\Delta E_s(i) = -k_s \sum_{f=i-N+1}^{i-1} \left[\frac{E_m(f)}{\epsilon} - E_N \right], \quad i > N \text{ 时} \quad (10)$$

式中 $\Delta E_s(i)$ 为考虑随机波动的第 i 个脉冲的能量设定值偏差; k_s 为随机波动控制调节系数; ϵ 为实测能量等效为激光器输出能量的系数; $E_m(f)$ 为第 f 个脉冲的实测能量; N 为硅片上每个点经过扫描狭缝所需的激光脉冲个数。

超调算法的目的是抑制脉冲能量超调现象。超调相对而言是一种局部行为,其调节可以采用加权移动平均。具体算法如下:

$$\delta E_s(1) = 0, \quad \text{第 1 个脉冲的能量设定值偏差} \quad (11)$$

$$\delta E_s(i) = -k_o \frac{1}{i-1} \sum_{g=1}^{i-1} \left[\frac{E_m(g)}{\epsilon} - E_s(g) \right], \quad M \neq 1 \text{ 且 } 2 \leq i \leq M \text{ 时} \quad (12)$$

$$\delta E_s(i) = -k_o \frac{1}{M} \sum_{g=i-M}^{i-1} \left[\frac{E_m(g)}{\epsilon} - E_s(g) \right], \quad i > M \text{ 时} \quad (13)$$

式中 $\delta E_s(i)$ 为考虑超调的第 i 个脉冲能量设定值偏差; k_o 为超调控制调节系数; $E_s(g)$ 为第 g 个脉冲的能量设定值; M 为超调移动平均个数,一般取值为 5。

综合两部分算法,可以得到准分子激光器单脉冲能量实时调节的综合控制算法:

$$E_s(1) = E_N, \quad (14)$$

$$E_s(i) = E_N - k_s \sum_{f=1}^{i-1} \left[\frac{E_m(f)}{\epsilon} - E_N \right] - k_o \frac{1}{i-1} \sum_{g=1}^{i-1} \left[\frac{E_m(g)}{\epsilon} - E_s(g) \right], \quad M \neq 1 \text{ 且 } 2 \leq i \leq M \quad (15)$$

$$E_s(i) = E_N - k_s \sum_{f=1}^{i-1} \left[\frac{E_m(f)}{\epsilon} - E_N \right] - k_o \frac{1}{M} \sum_{g=i-M}^{i-1} \left[\frac{E_m(g)}{\epsilon} - E_s(g) \right], \quad M < i \leq N \quad (16)$$

$$E_s(i) = E_N - k_s \sum_{f=i-N+1}^{i-1} \left[\frac{E_m(f)}{\epsilon} - E_N \right] - k_o \frac{1}{M} \sum_{g=i-M}^{i-1} \left[\frac{E_m(g)}{\epsilon} - E_s(g) \right], \quad i > N \quad (17)$$

$$V_s(i) = V_N + [E_s(i) - E_N] \frac{\Delta V}{\Delta E}. \quad (18)$$

3 实验研究与结果分析

为研究准分子激光器的单脉冲能量特性并验证上述控制算法,在一台 ArF 准分子激光器上进行了相关实验,其波长为 193 nm,标称脉冲能量 5 mJ,最大重复频率 4 kHz,功率 20 W。

该 ArF 准分子激光器上实测的脉冲能量变化曲线如图 3 所示。工作模式为恒电压控制方式,高

电压(HV)设定值恒定为 1690 V,重复频率为 4 kHz。图 3(a)显示了光刻机步进扫描曝光过程的数据,每个硅片有 70 个曝光场(图中显示了其中的 20 个),每个曝光场的脉冲总数为 375,曝光场之间的时间间隔为 100 ms(图中以符号“+”表示曝光场间隔),即每个曝光场的扫描时间为 93.75 ms,步进时间为 100 ms。图 3(b)显示了单个曝光场的脉冲能量变化细节。

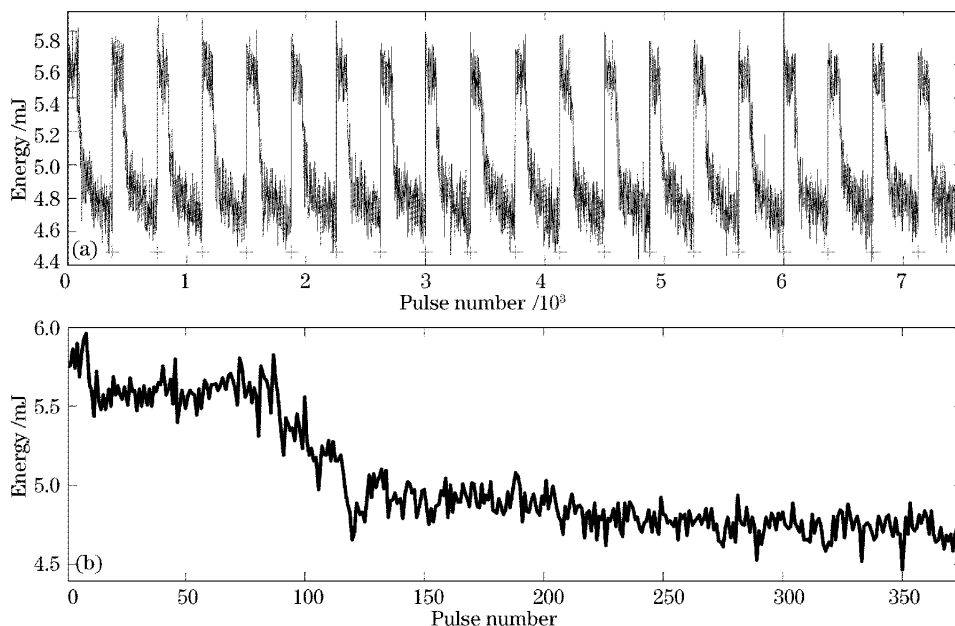


图 3 实测的脉冲能量变化曲线(恒电压 1690 V)

Fig. 3 Measured pulse to pulse energy fluctuation (Constant HV mode with HV = 1690 V)

从图 3 可以清楚地看出,准分子激光器的单脉冲能量呈现非常明显的波动现象,体现在两个方面:一是能量超调,二是随机波动。能量超调以一个曝光场为周期,因为在曝光场与曝光场之间有时间间隔(图 3 中为 100 ms),激光器处于不放电状态,所以每到达下一个曝光场时激光器放电电极之间会有更多的新鲜气体,从而在相同的电压值触发下获得

的脉冲能量要高些。此后随着激光器充放电过程逐渐趋于稳定,实际脉冲能量也逐渐趋向于其标称能量值,但由于各种不确定因素的影响,脉冲能量总是围绕其标称能量进行随机波动。

恒电压控制方式下单个曝光场扫描曝光时的剂量测量值如图 4 所示。图 4(a)~图 4(f)对应的剂量需求值分别为 5 mJ/cm², 10 mJ/cm², 20 mJ/cm²,

30 mJ/cm², 40 mJ/cm² 和 50 mJ/cm², 在其它扫描参量如扫描速度、激光器重复频率和标称脉冲能量等不变的情况下, 对应的狭缝脉冲个数 N 分别为 10, 20,

40, 60, 80 和 100。从中可以看出, 曝光剂量是多个脉冲能量的累积, 这种累积对随机波动起到了很好的平滑效应, 而且脉冲个数越大其平滑效应越明显。

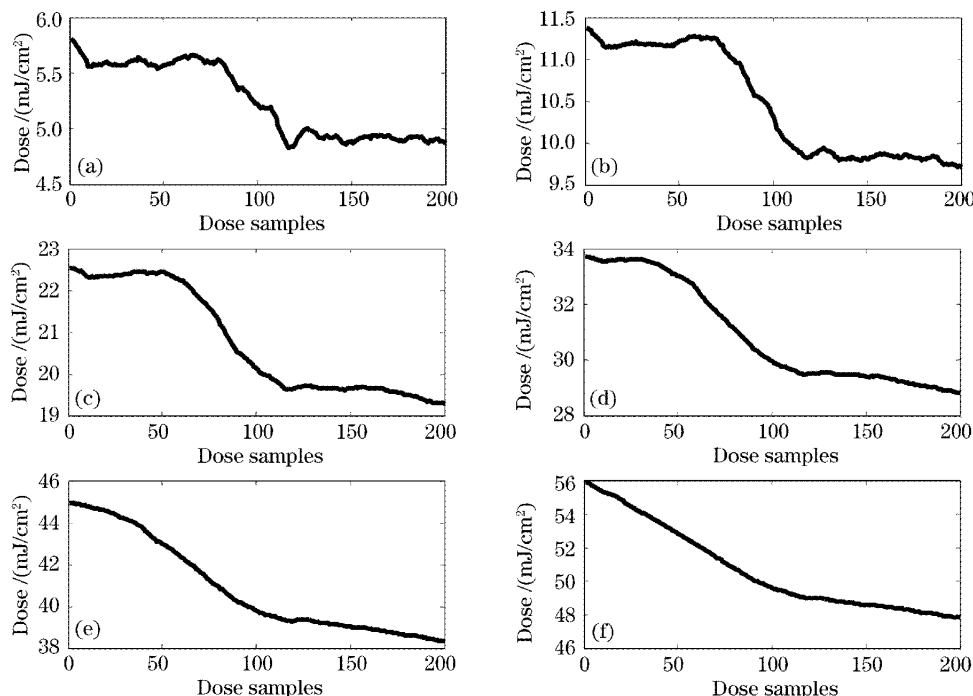


图 4 恒电压控制方式下的曝光剂量测量值

Fig. 4 Measured exposure dose during a scan exposure (Constant HV mode)

对多种剂量需求值下的恒电压控制方式进行了多个曝光场的步进扫描曝光实验, 所得统计分析结果如表 1 所示, 其中 D_{\max} 为最大剂量, D_{\min} 为最小剂量, σ 为剂量精度。从中可以看出, 尽管脉冲累积对随机波动确实起到了很好的平滑效应, 但脉冲个数增大到一定程度后, 这种平滑效果趋于平缓。更为

重要的是, 由于能量超调现象的存在, 恒电压控制方式下的剂量精度非常差, 即使在脉冲个数为 100 时剂量精度也仅为 11.9%, 根本不能满足亚微米光刻的要求, 因而有必要采用高性能的实时算法进行剂量控制。

表 1 恒电压控制方式下的剂量测量值统计分析结果

Table 1 Statistical results of measured exposure dose (constant high-voltage mode)

$D_t / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	Number of pulses	$D_{\max} / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	$D_{\min} / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	$\sigma / \%$
5.00	10	5.81	4.66	16.2
10.00	20	11.37	9.32	13.7
20.00	40	22.54	18.87	12.7
30.00	60	33.73	28.35	12.4
40.00	80	44.93	37.87	12.3
50.00	100	55.93	47.32	11.9

采用本文提出的实时剂量控制算法获得的脉冲能量变化曲线如图 5 所示, 即利用本文提出的控制算法进行激光器外部单脉冲高电压控制, 其余实验参量与图 3 相同。图 5(a) 显示了光刻机步进扫描曝光过程的数据, 图 5(b) 显示了单个曝光场的脉冲能量变化细节。剂量控制算法的相关参量为

$N=20, M=5, k_s=0.8, k_o=0.8$ 。

从图 5 中可以明显看出, 采用本文提出的外部高电压实时剂量控制算法, 不仅明显减小了单脉冲能量的随机波动, 而且有效抑制了能量超调现象。这在观察多个脉冲能量的累积和即观察曝光剂量时更为显著, 如图 6 所示, 图 6(a)~图 6(f) 对应狭缝脉

冲个数分别为 10, 20, 40, 60, 80 和 100, 剂量需求值分别为 $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 和 $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。
别为 $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, $10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, $20 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,

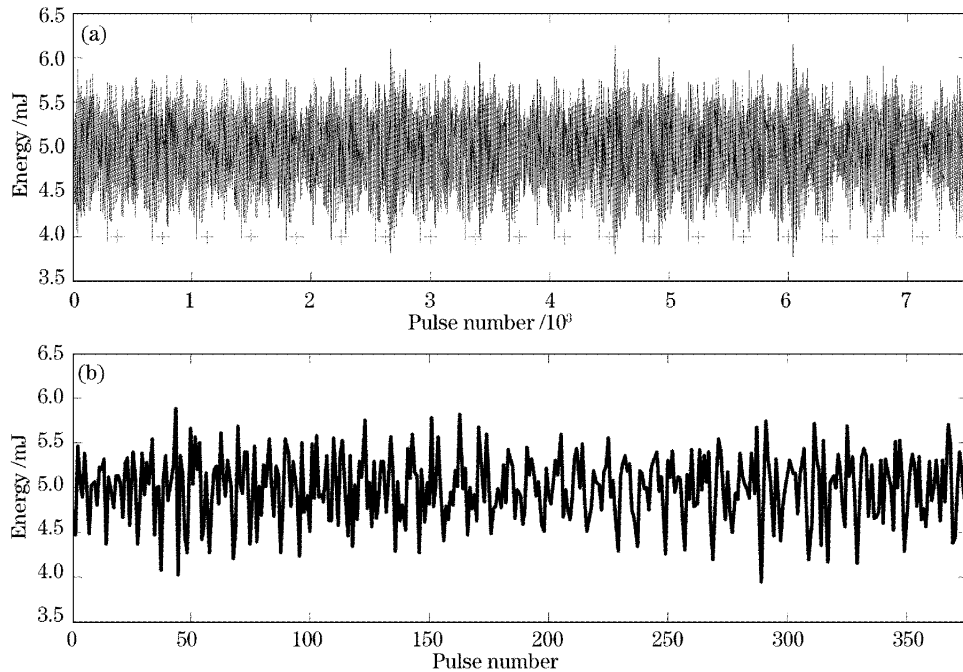


图 5 实测的脉冲能量变化曲线(外部高电压实时剂量控制算法)

Fig. 5 Measured pulse to pulse energy fluctuation (External high-voltage mode with dose control algorithm)

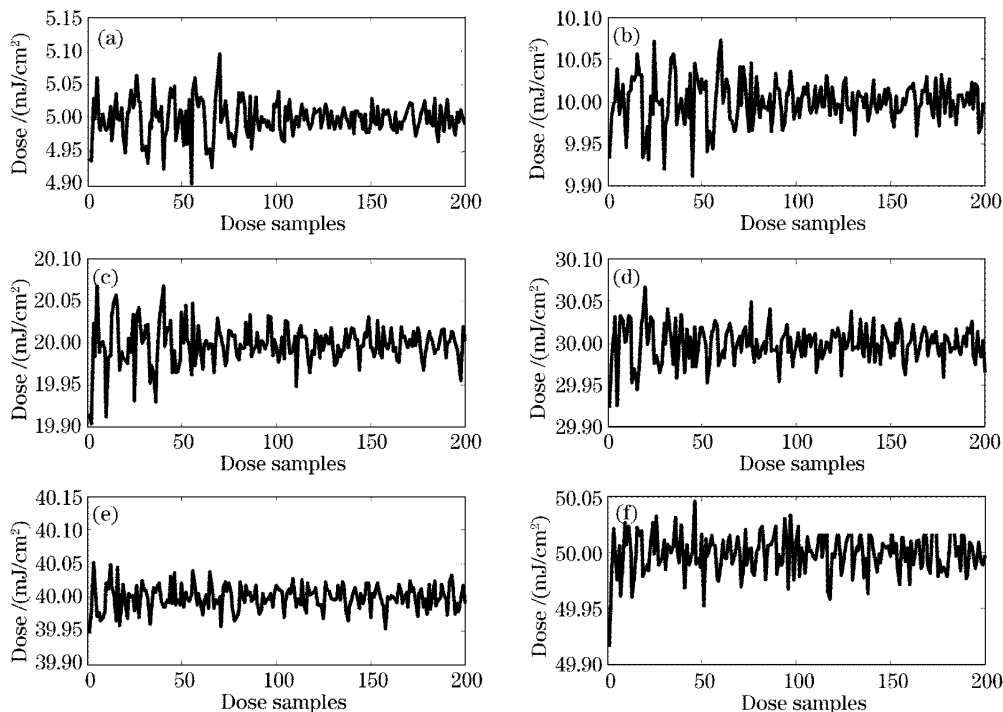


图 6 外部高电压实时控制方式下的剂量测量值

Fig. 6 Measured exposure dose during a scan exposure (External high-voltage mode with dose control algorithm)

多种剂量需求值时外部高电压实时控制方式下的剂量测试统计分析结果如表 2 所示。从中可以看出,采用本文提出的外部高电压实时控制算法,曝光

剂量可以达到相当高的精度,在脉冲个数 N 为 20 时剂量精度可达 0.89%, N 大于 20 时均完全满足亚微米光刻的苛刻要求,且 N 越大,精度越高。注

意到脉冲个数 N 为 10 时,虽然剂量精度比恒电压控制方式下有大幅提高,但是由于所需曝光剂量太小即脉冲个数太少,误差平滑效应表现得不明显,剂量精度仅为 1.94%。这也表明,为满足剂量精度要

求,在剂量参量优化决策时必须保证脉冲个数大于某个临界值;如果参量优化计算的结果不能保证脉冲个数大于该临界值,可以采用衰减片对单脉冲能量进行衰减,从而提高脉冲个数。

表 2 外部高电压实时控制方式下的剂量统计分析结果

Table 2 Statistical results of measured exposure dose (external high-voltage mode with dose control algorithm)

$D_r/(\text{mJ}/\text{cm}^2)$	Number of pulses	$D_{\max}/(\text{mJ}/\text{cm}^2)$	$D_{\min}/(\text{mJ}/\text{cm}^2)$	$\sigma/\%$
5.00	10	5.096	4.903	1.94
10.00	20	10.073	9.911	0.89
20.00	40	20.068	19.905	0.48
30.00	60	30.067	29.924	0.25
40.00	80	40.052	39.932	0.17
50.00	100	50.045	49.935	0.13

4 结 论

提出了一种面向步进扫描投影光刻机的深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法,并在一台 ArF 准分子激光器上开展了相关实验。研究结论如下:

1) 准分子激光器的单脉冲能量呈现非常明显的波动现象,波动幅度可达 20% 以上,这种波动现象主要体现在两个方面:一是能量超调,二是随机波动。

2) 曝光剂量是多个脉冲能量的累积,尽管累积对随机波动起到了很好的平滑效应,但由于超调的存在,恒电压控制方式下的剂量精度非常差,无法满足亚微米光刻苛刻的剂量要求。

3) 提出的外部高电压实时控制算法,明显减小了单脉冲能量的随机波动,而且有效抑制了能量超调现象,在脉冲个数较小的情况下即可获得很高的剂量精度。

Washington: SPIE Press, 2001

- Ming L. Yu, Allan Sagle, Benny Buller. Exploring the fundamental limit of CD control: a model for shot noise in lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5751**: 687~698
- Soichi Inoue, Tadahito Fujisawa, Kyoko Izuha. Effective exposure dose measurement in optical microlithography[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **3998**: 810~818
- Gregory J. Kivenzor. Self-sustaining dose control system: ways to improve the exposure process[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4000**: 835~842
- Palash Das. Excimer laser as a total light source solution for DUV microlithography[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4184**: 323~329
- G. M. Blumenstock, C. Meinert, N. R. Farrar *et al.*. Evaluation of light source technology to support immersion and EUV lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5645**: 188~195
- G. de Zwart, M. van den Brink, R. George *et al.*. Performance of a step-and-scan system for DUV lithography[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3051**: 817~835
- Wolfgang Zschocke, Hans-Stephan Albrecht, Thomas Schröder *et al.*. High repetition rate excimer lasers for 193 nm lithography [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4691**: 1722~1733
- Martin van den Brink, Hans Jasper, Steve Slonaker *et al.*. Step-and-scan and step-and-repeat, a technology comparison[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2726**: 734~753

参 考 文 献

- Havry J. Levinson. *Principles of Lithography* [M].