

文章编号: 0253-2239(2006)08-1192-6

# 步进扫描投影光刻机剂量控制参量优化新算法研究\*

刘世元<sup>1,2</sup> 吴小健<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学机械学院微系统研究中心, 武汉 430074  
<sup>2</sup> 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:** 提出了一种以生产率、剂量精度与激光器使用成本三者最佳匹配为优化目标的步进扫描投影光刻机剂量控制参量优化新算法及其数学模型, 通过将激光器重复频率作为可调参量并引入有效脉冲个数的概念, 获得了有效剂量区间内任意给定剂量所应采取的优化策略并给出了剂量控制参量的具体计算方法。理论推导和模拟计算结果表明, 新算法既保持了原算法在生产率和剂量精度优化方面的优势, 又改进了原算法在激光器成本优化目标上的缺陷。随着准分子激光器及其剂量控制技术的进一步发展, 新算法可望更能显示出其优越性并具有更广阔的应用前景。

**关键词:** 深紫外准分子激光; 剂量控制; 扫描曝光; 光刻术; 优化算法

中图分类号: TN248.2 文献标识码: A

## Novel Optimization Algorithm for Dose Control Parameters in Step and Scan Lithography

Liu Shiyuan<sup>1,2</sup> Wu Xiaojian<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> *Research Center of Microsystems, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*  
<sup>2</sup> *Division of Optoelectronic Materials and Micro-Nano Manufacture, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074*)

**Abstract:** A novel optimization algorithm along with the mathematical model for dose control parameters in a step and scan lithography, aiming at an optimal match of the throughput, dose accuracy and cost of ownership of deep ultraviolet (DUV) excimer laser simultaneously is proposed. With the help of variable laser repetition frequency and introduction of a new concept called effective number of pulses, the optimization strategy for a given dose in the effective dose range is achieved and the detailed method to calculate values of all the dose control parameters is proposed. The theoretical study and numerical simulation demonstrate that the new algorithm not only maintains the advantages in throughput and dose accuracy of the currently used one, but also overcomes its drawback of not considering the reduction of laser cost of ownership. It is fully expected that the novel algorithm will show its superiority and provide a better application with the further improvement of DUV excimer laser and its dose control technology.

**Key words:** deep ultraviolet excimer laser; dose control; scan exposure; lithography; optimization algorithm

## 1 引 言

步进扫描投影光刻机普遍采用波长为 248 nm 或 193 nm 的深紫外准分子激光<sup>[1]</sup>。这类激光的光强是非连续的脉冲形式, 时间间隔由重复频率来衡

量。在扫描曝光时, 工件台和掩模台同步运动, 硅片曝光场内各点匀速经过曝光狭缝, 从而接收到同样数量的激光脉冲, 其累积值就是该点处的曝光剂量, 由工件台扫描速度、可变衰减片透射率、激光器重复频率、狭缝内激光脉冲个数等曝光剂量控制参

\* 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, 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: 2005-07-05; 收到修改稿日期: 2005-11-28

量所确定<sup>[2~4]</sup>。在每个曝光场开始扫描曝光之前，已给定了剂量需求值，上述参量则需要通过优化算法计算得到。

光刻精度、生产率和使用成本等的最优组合是优化算法的出发点，反映在剂量控制参量上，则要求激光脉冲个数不能过少、扫描速度尽量快、可变衰减片透射率尽可能大。但实际应用上，三者是矛盾的，不能单独考虑。例如，加快扫描速度有利于提高生产率，但会导致投射到硅片上的脉冲数减少，进而会降低剂量精度，因此又必需增大重复频率，但脉冲数可能因此超过精度要求的水平且累积过多的能量，从而需要减小单脉冲的透射率。结果生产率和剂量精度得到了保证，但单脉冲能量没有被充分利用，激光器能耗增加，成本增加。

就目前光刻机市场上而言，以高成本换取高生产率和高精度的弊病相当普遍。为此，通过研究剂量精度、生产率和激光器使用成本这三大优化目标之间的内在联系，结合考虑准分子激光器及其剂量控制技术的最新进展<sup>[5~7]</sup>，提出一种新的优化算法，以确定上述剂量控制参量，进而实现各优化目标的最佳平衡。

## 2 剂量控制参量优化问题描述

在扫描曝光时，对于某个曝光场而言，场内各点匀速经过一个狭缝，从而接收到一定数量的激光脉冲，其累积值就是该点处的曝光剂量  $D$ ：

$$D = \int_0^{\Delta t} I(t) dt = \frac{\eta}{A} T \sum_{k=1}^N E_p(k) = \frac{\eta}{A} TN \bar{E}_p, \quad (1)$$

其中  $\Delta t$  为该点经过狭缝的曝光时间， $N$  为该点经过狭缝接收到的激光脉冲个数， $I$  为时刻  $t$  的曝光光强， $\eta$  为光传输效率， $A$  为狭缝等效面积， $T$  为可变衰减片透射率， $E_p(k)$  为第  $k$  个脉冲的单脉冲能量， $\bar{E}_p$  为  $N$  个脉冲的平均能量。

扫描曝光过程中，激光器的重复频率固定为  $f$ ，狭缝等效宽度  $L$  为定值，工件台以匀速  $v$  经过扫描狭缝，则曝光场中每点经过狭缝接收到的激光脉冲个数为

$$N = L \cdot f/v, \quad (2)$$

(1)式可改为

$$D = \eta T \frac{L}{A} \frac{f}{v} \bar{E}_p. \quad (3)$$

(3) 式给出了控制和确定扫描曝光剂量的相关参量，分析该式可知：光传输效率  $\eta$ 、狭缝等效宽度  $L$ 、狭缝等效面积  $A$  等 3 个参量为固定值； $\bar{E}_p$  值在实

际扫描曝光之前无法获得，只能用事先可以确定的单脉冲能量标称均值  $E_{pNom}$  来代替。记  $E_p$  为考虑光传输效率的单脉冲能量密度，即

$$E_p = \eta \frac{\bar{E}_p}{A} = \eta \frac{E_{pNom}}{A}, \quad (4)$$

则(1)式和(3)式定义的曝光剂量计算公式可分别改写为

$$D = E_p TN, \quad (5)$$

$$D = LE_p Tf/v. \quad (6)$$

因此，剂量控制参量优化问题可以描述为：在一定的优化目标和约束条件下，对任意给定的某个剂量需求值  $D$ ，要求确定剂量控制参量  $v$ ， $f$  和  $T$ 。

在上述描述中，脉冲个数  $N$  并没有当作直接的剂量控制参量。事实上，由于预热、气体退化或更新，以及运行时间等各种因素的影响，准分子激光总会存在单脉冲能量波动特别是能量超调(overshot)现象，其波动幅度可达 20%。由于脉冲能量波动直接影响最终的曝光剂量精度，多个脉冲对于曝光剂量则起到了平滑效应，而且理论上脉冲个数越大，其平滑效果越好，即脉冲个数  $N$  越大其脉冲能量实际均值  $\bar{E}_p$  越接近脉冲能量标称均值  $E_p$ ，因此，为满足剂量精度要求，在剂量控制参量优化时必须保证脉冲个数  $N$  不小于某一临界值，即脉冲个数  $N$  作为一个间接的剂量控制参量，既可看作是一个优化目标，也可看作是一个约束条件。

目前光刻机中普遍应用的剂量控制参量优化算法，其优化目标为剂量精度和生产率，但没有考虑用户成本，即存在以用户的高成本来换取高生产率和高精度的不利现象。该算法的出发点是尽可能采用最大的脉冲个数，来获得最佳的剂量精度，因而该算法首先固定激光器重复频率为最大频率，进而确定其它剂量控制参量，其优化数学模型可表示为

$$\begin{cases} \forall f = f_{\max}, D_{\text{req}} > D_{\min} = LE_p T_{\min} f_{\max}/v_{\max} \\ \exists T, v \\ s. t. \sigma = \min(\sigma), \delta = \max(\delta) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $D_{\text{req}}$  为需求的曝光剂量； $D_{\min}$  为剂量下限； $\sigma$  为剂量误差； $s. t.$  表示“受限于”， $\delta$  为生产率。即基于  $f$  为最大频率的前提下，对于任意给定的有效剂量，寻求某个衰减片透射率  $T$  和工件台扫描速度  $v$ ，使得  $\sigma$  最小且  $\delta$  最大。

由于生产率为优化的首要目标，所以扫描速度将尽可能保持为最大速度  $v_{\max}$ ，直到需求的剂量超过最大速度所能承受的剂量上限

$$D_{\max} = LE_p T_{\max} f_{\max}/v_{\max}. \quad (8)$$

最大扫描速度  $v_{\max}$  将曝光剂量有效区间一分为二:  $[D_{\min}, D_{\max}]$  和  $[D_{\max}, \infty)$ 。当  $D_{\text{req}} \in [D_{\min}, D_{\max}]$  时,  $v = v_{\max}$ ; 若  $D_{\text{req}} \in [D_{\max}, \infty)$ , 则扫描速度  $v$  成为唯一可调的参量, 且总有  $v < v_{\max}$ 。参见(3)式, 在其它参量不变的情况下, 频率和脉冲个数成正比, 则在区间  $[D_{\min}, D_{\max}]$  内由于频率固定为  $f_{\max}$ , 因此脉冲个数也为定值, 而且已经是  $v_{\max}$  下的最大值。

不加衰减地将每个脉冲都投射到硅片表面可能导致累积剂量超过剂量需求值, 尤其是剂量需求值在  $D_{\min}$  附近的情况, 此时只能借助于衰减片来衰减多余能量, 可参见(5)式。这样做看似合理, 其实存在几点明显缺点。首先, 对不同的剂量需求值使用相同的频率曝光, 同样数量的脉冲在低需求值时利用率很低, 结果低剂量导致成本相对较高。其次, 在可曝光范围内, 总以最大频率发射脉冲, 因而脉冲个数总是最大, 大的脉冲个数无非为了扩大移动平均窗口以平滑单脉冲能量的随机波动, 这样剂量精度确实得到了保证, 但如此高的精度是否有必要则有待商榷; 如果采用最大的脉冲个数而又不得不同时使用衰减片来衰减单脉冲能量, 则激光器使用成本必然会高居不下。此外, 可曝光剂量范围受到重复频率的限制, 采用固定的最大频率使得剂量下限较高, 很大一部分剂量需求值落入了不可曝光区间  $[0, D_{\min}]$ 。

### 3 剂量控制参量优化新算法

剂量控制优化新算法模型不仅考虑剂量精度和生产率的优化, 同时充分考虑优化激光器使用成本, 即在能够满足剂量精度的前提下, 尽可能采用少的脉冲个数来曝光。新算法的特点是: 激光器重复频率  $f$  不再固定为最大频率, 而是一个可调参量, 并且剂量下限的计算是在最小频率下进行的, 从而有效拓展了剂量范围。其优化数学模型表示为

$$\begin{cases} \forall f_{\min} < f < f_{\max}, \\ D_{\text{req}} > D_{\min} = LE_p T_{\min} f_{\min} / v_{\max} \\ \exists T, v, f \\ \text{s. t. } \sigma = \min(\sigma), \delta = \max(\delta), c = \min(c) \end{cases} \quad (9)$$

其中  $c$  为激光器使用成本。

脉冲个数  $N$  的取值范围中存在一个临界值  $N_D$ , 称为有效脉冲个数,  $N_D$  个脉冲的能量累积值就可达到曝光要求的剂量精度。  $N_D$  一般总是小于最大频率对应的脉冲个数, 因此, 完全可以通过减小脉冲个数并尽可能保持其恒定为  $N_D$ , 以实现激光器使用成本的最优化。作者前期的研究工作表明, 通过采用一种新的实时剂量控制算法, 脉冲个数  $N$  仅为 20

即可获得很高的剂量精度(0.89%)<sup>[7]</sup>。

新算法将生产率放在优化的首要位置, 即首先保证  $v = v_{\max}$ , 这与原算法相同。此时, 可以分别得到剂量上、下限:

$$\begin{cases} D_{\min} = LE_p T_{\min} f_{\min} / v_{\max}, \\ D_{\max} = LE_p T_{\max} f_{\max} / v_{\max}, \end{cases} \quad (10)$$

有效的曝光剂量区间为  $[D_{\min}, \infty)$ , 低于剂量下限的剂量无法曝光:

$$\emptyset = \{(\sigma, \delta, c) \mid D < D_{\min}\}. \quad (11)$$

当剂量需求值取值在  $D_{\min}$  附近时, 由于对应的重复频率  $f$  太小, 计算出的脉冲个数  $N$  往往也极少, 即  $N \ll N_D$ 。显然这样少的脉冲个数无法满足最基本的剂量精度要求, 因此  $D_{\min}$  仅仅是一个理论上的剂量下限。实际有意义的剂量下限是衰减片透射率取最小值时  $N_D$  个脉冲累积的剂量, 即

$$D_{N1} = E_p T_{\min} N_D, \quad (12)$$

此时对应的重复频率为

$$f_D = N_D v_{\max} / L. \quad (13)$$

当  $D_{\text{req}} \in [D_{\min}, D_{N1}]$  时,  $N < N_D$ , 剂量精度无法得到满足; 但在此区间内, 随着剂量需求值  $D_{\text{req}}$  的不断增大, 若增大重复频率  $f$  而非透射率, 精度就会得到提高, 这正是小剂量情况下可采取的优化路线

$$\begin{aligned} (\sigma, \delta, c) = \{[\min(\sigma), \max(\delta), c] \mid D_{\min} \leq \\ D_{\text{req}} \leq D_{N1}\}, \quad (14) \\ v = v_{\max}, \quad T = T_{\min}. \end{aligned}$$

当  $f$  增大到使  $N = N_D$  时,  $f$  仍有进一步增大的空间。但再增大  $f$  将导致脉冲个数继续增大, 其结果是不得不通过降低衰减片透射率来避免剂量超标, 这样做不仅对于提高精度意义不大, 而且与成本优化的目标背道而驰。前面提到  $N_D$  个脉冲已经足以达到精度要求, 因此应优先考虑降低成本, 即不再提高重复频率  $f$ , 而是固定  $f = f_D$  并尽可能提高衰减片透射率  $T$ ,

$$\begin{aligned} (\sigma, \delta, c) = \{[\sigma, \max(\delta), \min(c)] \mid D_{N1} < \\ D_{\text{req}} \leq D_{N2}\}, \quad (15) \\ v = v_{\max}, \quad f = f_D, \end{aligned}$$

其中  $D_{N2}$  为透射率取最大值时  $N_D$  个脉冲累积的曝光剂量, 即

$$D_{N2} = N_D E_p T_{\max}. \quad (16)$$

当剂量进一步增大直到剂量上限时的范围内, 即  $D_{\text{req}} \in [D_{N2}, D_{\max}]$ , 衰减片已设置为最大透射率, 此时只能通过提高重复频率  $f$  来达到剂量需求:

$$\begin{aligned} (\sigma, \delta, c) = \{[\min(\sigma), \max(\delta), \min(c)] \mid D_{N2} < \\ D_{\text{req}} \leq D_{\max}\}, \quad (17) \end{aligned}$$

$$v = v_{\max}, \quad T = T_{\max}.$$

当剂量超出剂量上限时,即  $D_{\text{req}} \in [D_{\max}, \infty)$ ,  $f$  和  $T$  均已取到最大值,此时唯有  $v$  可调,唯有降低扫描速度  $v$  即牺牲生产率,才能符合大剂量曝光的需求。此时仅是剂量精度得到了优化:

$$(\sigma, \delta, c) = \{[\max(\sigma), \delta, c] \mid D_{\text{req}} > D_{\max}\}, \quad (18)$$

$$T = T_{\max}, \quad f = f_{\max}.$$

新算法的(14)式、(15)式、(17)式和(18)式将有

效剂量划分为 4 个子区间:  $[D_{\min}, D_{N1}]$ 、 $[D_{N1}, D_{N2}]$ 、 $[D_{N2}, D_{\max}]$  和  $[D_{\max}, \infty)$ ,每一区间采取了不同的优化策略,但每种优化策略都能保证三个剂量控制参量中有两个确定,只有另一个参量可调。因此,对于任意给定的某个剂量需求值,只需要首先判断它处于哪个有效剂量区间之内,然后根据相应的优化策略确定三个剂量控制参量中的两个,另一个参量通过(6)式计算。具体算法流程如图 1 所示。

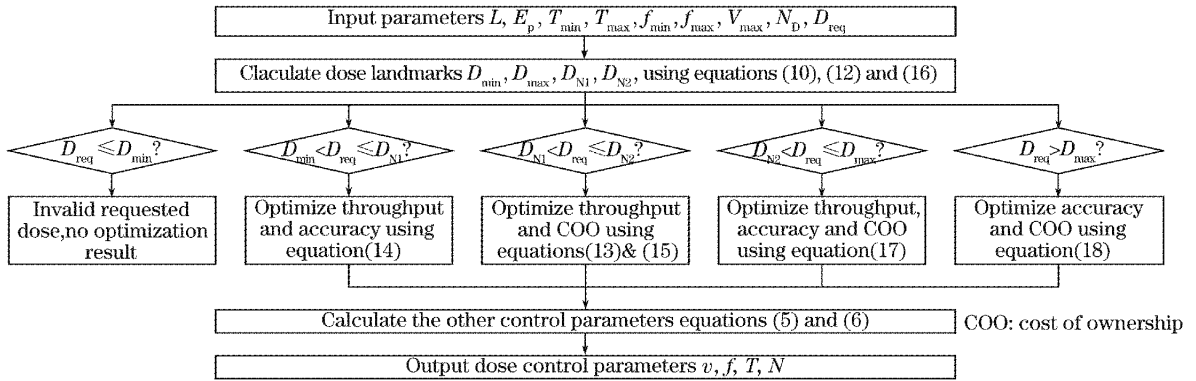


图 1 剂量控制参量优化新算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the new optimization algorithm for dose control parameters

### 4 算法模拟与结果分析

为了直观比较新算法和原算法的差异,对两种算法编制了相应的程序,并对某 100 nm 分辨力步进扫描投影光刻机进行了模拟计算。该光刻机装有 193 nm 波长 ArF 准分子激光器,标称脉冲能量 5 mJ,最大重复频率 4 kHz,功率 20 W。模拟计算的有关输入参量如表 1 所示,与实际扫描曝光过程的参量完全一致。

据表 1,采用上述新算法和原算法分别计算出剂量关键点及其对应的剂量控制参量,结果见表 2。其中,关键点 a、b、c、d 分别表示新算法获得的  $D_{\min}$ 、 $D_{N1}$ 、 $D_{N2}$  和  $D_{\max}$  所对应的节点,这 4 个节点将有效剂量划分为 4 个子区间  $[D_{\min}, D_{N1}]$ 、 $[D_{N1}, D_{N2}]$ 、 $[D_{N2}, D_{\max}]$  和  $[D_{\max}, \infty)$ ;关键点 e 和 f 则分别表示原算法获得的  $D_{\min}$  和  $D_{\max}$  所对应的节点,这 2 个节点将有效剂量范围划分为 2 个子区间  $[D_{\min}, D_{\max}]$  和  $[D_{\max}, \infty)$ 。

从表 2 可以看出,关键点 d 和关键点 f 重合,表明新算法和原算法计算出的剂量上限  $D_{\max}$  相同,都是 106 mJ/cm<sup>2</sup>,此时扫描速度  $v$ 、激光器频率  $f$  和衰减片透射率  $T$  都取得最大值,狭缝内脉冲个数  $N$  则都为 84.8;此后若要曝光更大的剂量,只能减小扫描速度并增大脉冲个数。

表 1 算法模拟的光刻机输入参量

Table 1 Input lithographic parameters for algorithm simulation

Input parameters	Value
Frequency range: $f$ /Hz	100~4000
Pulse energy density: $E_p$ /(mJ/cm <sup>2</sup> )	1.25
Effective number of pulses: $N_D$	30
Maximum scan speed: $v_{\max}$ /(mm/s)	250
Effective slit width: $L$ /mm	5.3
Transmission range: $T$ /%	5~100

从表 2 中还可以发现,原算法计算出的剂量下限只能达到 e 点的 5.3 mJ/cm<sup>2</sup>,这是因为原算法将激光器重复频率始终固定在最大频率 4000 Hz。新算法中频率是可变的,剂量下限可以达到 a 点的 0.133 mJ/cm<sup>2</sup>,接近于 0,因此理论上可以认为新算法适用于所有剂量。但实际上从 a 点一直到 b 点,狭缝内脉冲个数都小于有效脉冲个数 30,即不能满足剂量控制精度的基本要求,所以真正有效的剂量下限应该是 b 点的 1.875 mJ/cm<sup>2</sup>。对于任何大于 b 点的剂量,脉冲个数都能保证在有效脉冲个数 30 以上。b 点与 e 点相比,在有效剂量范围的拓展方面,新算法有相当大的改进,这对于要求曝光小剂量的情况尤其有利。

表 2 模拟计算获得的剂量控制参量

Table 1 Simulated results of dose control parameters

Algorithm	Landmark	$D$ (mJ/cm <sup>2</sup> )	$v$ /(mm/s)	$f$ /Hz	$T$	$N$
New version	a	0.133	250	100	0.05	2.12
	b	1.875	250	1415	0.05	30
	c	37.5	250	1415	1.00	30
	d	106	250	4000	1.00	84.8
Old version	e	5.3	250	4000	0.05	84.8
	f	106	250	4000	1.00	84.8

图 2 显示了计算出的剂量控制参量  $v$ ,  $T$ ,  $f$  和  $N$  随给定剂量  $D_{\text{req}}$  的变化曲线,同时给出了新算法

和原算法的计算结果,可以直观反映两种算法的不同优化策略。

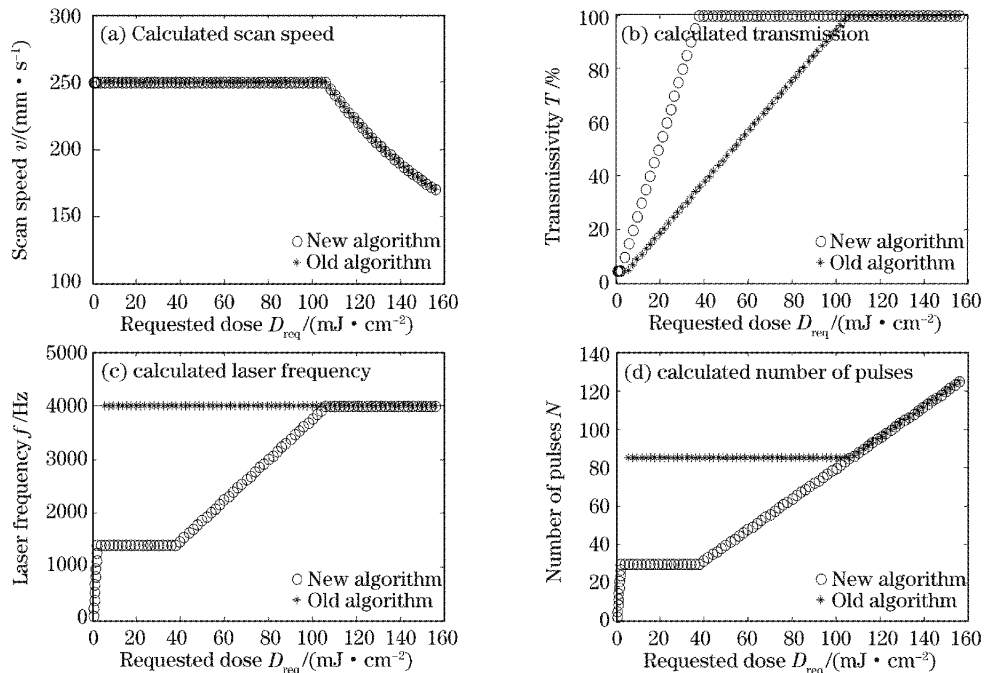


图 2 计算的剂量控制参量与剂量之间的关系。(a) 扫描速度,(b) 透射率,(c) 激光器频率,(d) 脉冲个数

Fig. 2 Calculated dose control parameters as function of requested dose. (a) Scan speed, (b) transmissivity, (c) laser repetition frequency, (d) number of pulses

图 2(a)显示了计算的扫描速度随剂量的变化曲线,新算法和原算法获得的曲线重合,表明新算法和原算法在考虑生产率时具有相同的优化策略,即原算法将生产率优化作为首要目标,其结果已经是最优的,新算法则维持了这种优化结果。

如图 2(b)和图 2(c)所示,原算法获得的激光器重复频率一直固定为最大频率 4000 Hz,在衰减片透射率取最小值 5%时获得剂量下限 5.3 mJ/cm<sup>2</sup>,在透射率取最大值 100%时获得剂量上限 106 mJ/cm<sup>2</sup>,在该区间内脉冲个数固定为 84.8,透射率则随剂量增大而增大。与之不同,新算法获得的激光器频率在剂量上限 106 mJ/cm<sup>2</sup> 之前并不是固定的,在透射率取最小值 5%时获得有效剂量下限  $D_{N1} = 1.875$  mJ/cm<sup>2</sup>,在透射率取最大值 100%时获得剂

量  $D_{N2} = 37.5$  mJ/cm<sup>2</sup>,在此区间  $[D_{N1}, D_{N2}]$  内激光器频率固定为 1415 Hz,对应的脉冲个数固定为有效脉冲个数 30,透射率则随剂量增大而增大;随着剂量超过  $D_{N2} = 37.5$  mJ/cm<sup>2</sup>,透射率固定为最大值 100%,激光器频率和脉冲个数都随剂量增大而增大,直至达到与原算法相同的剂量上限  $D_{\text{max}} = 106$  mJ/cm<sup>2</sup>。此后若要曝光更高剂量,新算法和原算法的优化策略相同,都只能依靠不断提高脉冲个数,同时不断降低扫描速度。

如图 2(d)所示,在小于剂量上限  $D_{\text{max}} = 106$  mJ/cm<sup>2</sup> 时,在相同的剂量需求值下,新算法需要的狭缝内脉冲个数总是比原算法少,相应地图 2(c)中激光器重复频率也比原算法要小,而图 2(b)中衰减片透射率则比原算法要大,这表明新算法使单个脉

冲能量的利用率得到了提高,从而降低了激光器使用成本,提高了激光器使用效率。

需要特别说明的是,在新算法优化策略下,存在一个剂量区间 $[D_{N2}, D_{max}]$ ,即图 2 中所示剂量为  $37.5 \text{ mJ/cm}^2$  至  $106 \text{ mJ/cm}^2$  的区间。在该区间内,扫描速度和衰减片透射率同时达到了最大值,且脉冲个数也大于有效脉冲个数,即同时实现了生产率、激光器使用成本和剂量精度的最优化。这个区间可称为最佳曝光剂量范围,在光刻机工艺应用时,应尽可能将剂量需求值设定在这个范围内。原算法中根本不存在此区间,这从另一个侧面再次体现了新算法的优越性。

## 5 结 论

综上所述,可以总结结论如下:

1) 由于原算法的策略是尽可能采用最大的脉冲个数,以获得最佳的剂量精度,因而激光器重复频率始终固定为最大频率,且不得不采用衰减片来衰减单脉冲能量,从而制约了激光器的使用效率。提出的新算法充分考虑了激光器成本优化问题,通过将激光器重复频率作为可调参量并引入有效脉冲个数的概念,既保证了满意的剂量精度,又在尽可能减少脉冲个数的基础上提高单脉冲能量利用效率,因而显著地降低了激光器使用成本。

2) 新算法和原算法在考虑生产率时具有相同的优化策略,即原算法将生产率优化作为首要目标,其获得的扫描速度已经是最优的,新算法则完全保持了这种优化结果。

3) 新算法获得的有效剂量下限取决于激光器最小频率,比原算法由激光器最大频率所决定的取值要小很多。从而在有效剂量范围拓展方面,新算法有相当大的改进,理论上几乎适合任何剂量需求,这对于要求曝光小剂量的情况尤其有利。

4) 新算法将有效剂量划分为四个区间,其中一区间确定了光刻机的最佳曝光剂量范围,即扫描速度和衰减片透射率同时达到最大值,且脉冲个数也大于有效脉冲个数,从而同时实现了生产率、激光器使用成本和剂量精度的最优化。而原算法只将有效剂量分为两个区间,不存在此最佳曝光剂量范围。

## 参 考 文 献

- 1 Das P. Excimer laser as a total light source solution for DUV microlithography[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4184**: 323~329
  - 2 Levinson H J. *Principles of Lithography* [M]. Washington: SPIE Press, 2001
  - 3 Kivenzor G J. Self-sustaining dose control system; ways to improve the exposure process[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4000**: 835~842
  - 4 Brink M, Jasper H, Slonaker S *et al.*. Step-and-scan and step-and-repeat, a technology comparison[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2726**: 734~753
  - 5 Colon D J. New lithography excimer light source technology for ArF (193-nm) semiconductor manufacturing [C]. *Proc. of IEEE/SEMI Advanced Manufacturing Conference*, 2003. 304~309
  - 6 Govorkov S V, Wiessner A O, Hua G *et al.*. Sub-0.25- $\mu\text{m}$  50-W amplified excimer laser system for 193-nm lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5377**: 1787~1796
  - 7 Liu Siyuan, Wu Xiaojian. Real-time exposure dose control algorithm for DUV excimer lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 878~884(in Chinese)
- 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