

浸没式光刻机对焦控制技术研究

段晨^{1,2,3**}, 宗明成^{1,2,3*}, 范伟^{1,2,3}, 孟璐璐^{1,3}

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中国科学院微电子研究所微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029

摘要 随着大规模集成电路芯片制造步入十几纳米技术节点时代, 光刻机的对焦控制变得越来越困难, 其精度需要达到几十纳米。基于实际的光刻机对焦控制系统架构和光刻对焦原理, 开展了浸没光刻对焦控制统计分析方法研究。根据系统结构分析出一系列误差源, 研究了这些误差对总离焦误差的贡献方式及其与总离焦误差的关系。研究表明: 由于光刻对焦误差中存在非正态分布的误差贡献项, 常规正态统计分布使用的 3σ 原则就无法满足 99.7% 的对焦成功率要求; 在 28.14,7 nm 技术节点集成电路芯片制造过程中, 采用 3σ 和 4σ 原则得到的浸没光刻工艺总对焦成功率之差分别为 28.4%、55.1%、62.9%。为了达到 99.7% 的对焦成功率, 浸没式光刻机对焦控制应采用 4σ 原则。

关键词 光学设计; 浸没光刻; 对焦控制; 误差; 集成电路

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0912002

Focus Control Technology in Immersion Lithography

Duan Chen^{1,2,3**}, Zong Mingcheng^{1,2,3*}, Fan Wei^{1,2,3}, Meng Lulu^{1,3}

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

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

³Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract As large-scale integrated circuit chips manufacturing steps into the era of tens of nanometers technology node, the focus control of the lithography machine becomes more and more difficult with the precision of several tens of nanometers. In this paper, a statistical analysis method of immersion lithography focusing control is studied based on the architecture and lithography focusing principle of actual lithography machine focusing control system. A series of error sources are obtained based on the system structure, and their contribution way and relationship to the total defocus error are investigated. The results show that due to the non-normal distribution error contribution term in lithography focusing error, the 3σ principle used in the normal statistical distribution can not meet the 99.7% focusing success rate requirement. In the manufacturing process of 28,14,7 nm technology node integrated circuit chips, the difference of the total focusing success rates of immersion lithography can be as high as 28.4%, 55.1% and 62.9%, when 3σ and 4σ principles are used respectively. In order to reach 99.7% focusing success rate, the 4σ principle should be used in the focus control of immersion lithography.

Key words optical design; immersion lithography; focus control; error; integrated circuit

OCIS codes 220.3740; 120.3940; 120.4120

1 引 言

浸没式光刻机是大规模集成电路(IC)芯片制造的核心设备,它的性能决定着大规模集成电路制造的技术水平^[1]。对焦控制是先进光刻机的顶层关键

功能之一,是保障光刻机成像质量、大规模集成电路光刻工艺窗口和产品良率的重要技术。随着大规模集成电路制造技术的不断发展,IC 关键线宽不断缩小,二次成像(DP)光刻工艺应用越来越多,对光刻机的对焦性能提出了越来越苛刻的要求。目前,浸

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-04

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101006-003)

* E-mail: zongmingcheng@ime.ac.cn; ** E-mail: duanchen@ime.ac.cn

浸式光刻技术是 45 nm 及以下分辨率 IC 芯片量产的首选光刻技术。相比于干式光刻机,浸式光刻机的焦深范围更小,需要更高的对焦控制精度。在允许的离焦误差越来越小的情况下,需要研究各种对焦误差源及其统计分析方法,从而确定合理的光刻机对焦精度要求和实现技术路线,这对先进浸式光刻机的研发极其重要^[2]。

为适应 IC 光刻工艺的发展需求,2014 年国际先进光刻国际会议在美国召开期间,ASML 和 Nikon 公司各自发布了浸式光刻机技术发展路线图,并给出了浸式光刻机的主要性能指标。随着大规模集成电路芯片制造步入十几纳米技术节点时代,光刻机的对焦控制精度必须达到 60~80 nm^[3]。西门子公司开发了一个二维模型来模拟整个曝光区域和整个硅片上的焦点误差,用 3σ (指 $\pm 3\sigma$) 值来描述离焦误差的总范围^[4]。为减小对焦误差、提高关键层的对焦控制精度,Jang 等^[5]提出了自顶向下和自底向上的方法来评测对焦控制指标。李金龙等^[6]针对光刻机中采用的焦面控制技术,基于平面拟合、最小二乘法及坐标变换公式推导了曝光狭缝内离焦量的计算公式。李小平等^[7]建立了硅片调焦调平测量系统单个测量点的测量模型,推导了基于多个测量点的曝光场高度和倾斜测量的数学模型。

本文在调研分析国际主流浸式光刻机产品对焦系统架构的基础上,根据光刻对焦原理,研究了浸式光刻对焦控制技术的统计分析方法。从浸式光刻机对焦控制系统的架构出发,分析了一系列影响光刻对焦性能的误差源,并研究了这些误差源对系统总离焦误差贡献的统计特性和贡献量,重点分析了非正态分布误差源对总体对焦误差影响的统计特性,根据 IC 制造对产品良率的要求,提出了一种更准确的浸式光刻机对焦控制技术方法和原则。

2 浸式光刻机对焦控制系统架构

在光刻机中,投影物镜曝光区域所在的焦平面被称为最佳焦平面(BF)。焦深(DOF)是指在满足一定分辨率的情况下,实际成像面能够偏离最佳焦平面的范围。离焦误差是指实际成像面相对于最佳焦平面的偏移,如图 1 所示的偏移量 δ 。焦深的表达式为

$$V_{\text{DOF}} = k \times \frac{\lambda}{(NA)^2}, \quad (1)$$

式中: k 为工艺参数; λ 为曝光光源波长; NA 为投影物镜数值孔径。

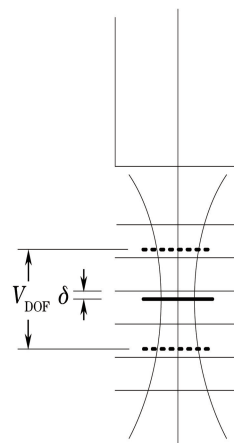


图 1 离焦误差示意图

Fig. 1 Schematic of defocus error

为了提高光刻机的成像分辨率,通常采用缩短曝光光源波长和增大投影物镜数值孔径两种方法。从(1)式可以看出,这两种方法均会导致可用焦深明显减小。为了保证硅片在有效的焦深范围内曝光,必须采用精密对焦控制技术。

浸式双工件台光刻机对焦控制系统架构如图 2 所示。影响光刻机对焦控制性能的部件主要包括 ArF 光源、掩模、掩模台、电容传感器、投影物镜、镜头热效应、像面偏差、浸液系统、工件台、干涉仪、TIS 传感器、调焦调平传感器、硅片等。

在光刻曝光工艺过程中,光源照射在掩模上,掩模上的图形通过投影物镜成像在硅片表面。在扫描光刻机中,当硅片以 600 mm/s 以上的速度快速运动时,光刻机的对焦控制系统要实时保证硅片表面能够清晰成像。在浸式光刻机中,曝光场的尺寸为 26 mm × 33 mm,曝光狭缝的尺寸为 26 mm × 5.5 mm。

3 浸式光刻机对焦控制误差的统计分析方法

为了保证光刻的成像质量,在曝光过程中,光刻机对焦控制系统控制硅片表面处于投影物镜的焦深范围内。为满足 IC 制造的技术要求,一般要求光刻机对焦控制成功率为 99.7%,即硅片表面每个 IC 工艺层内至少有 99.7% 的芯片裸片在焦深范围内有效曝光。在实际 IC 制造中,芯片裸片尺寸是可以变化的,但最大尺寸为曝光场的尺寸(26 mm × 33 mm)。芯片裸片的尺寸越大,对光刻机对焦控制性能的要求就越高。在本研究的对焦控制技术分析中,假设芯片裸片的尺寸等于曝光场的尺寸。

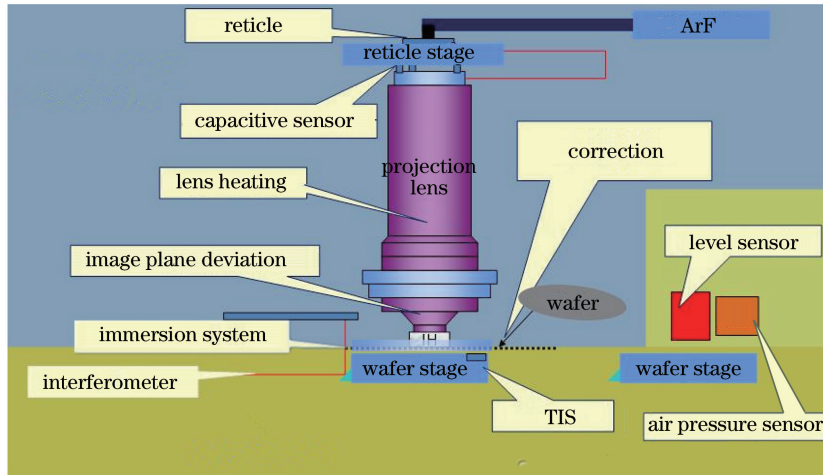


图 2 浸没式光刻机对焦控制系统架构示意图

Fig. 2 Schematic of focus control system architecture of immersion lithography machine

3.1 误差源

从图 2 浸没式光刻机对焦控制系统的架构出发分析影响光刻机对焦性能的误差源,并研究这些误差源对总误差的贡献方式及与总误差的关系,从而建立浸没式光刻机对焦误差的统计分析方法。

设在某一时刻某个曝光场内,离焦量在曝光场上

的分布如图 3(a)所示。它是一个不规则的 z 向高度误差分布,由若干误差源决定。根据各误差源产生误差的几何特征以及对总离焦量的贡献方式,将误差分为焦距偏移误差、 y 方向倾斜误差、 x 方向倾斜误差、 y 方向场曲误差、 x 方向场曲误差、沟槽型误差、起伏型误差、线性横摇误差、扭曲误差,如图 3(b)~(j)所示。

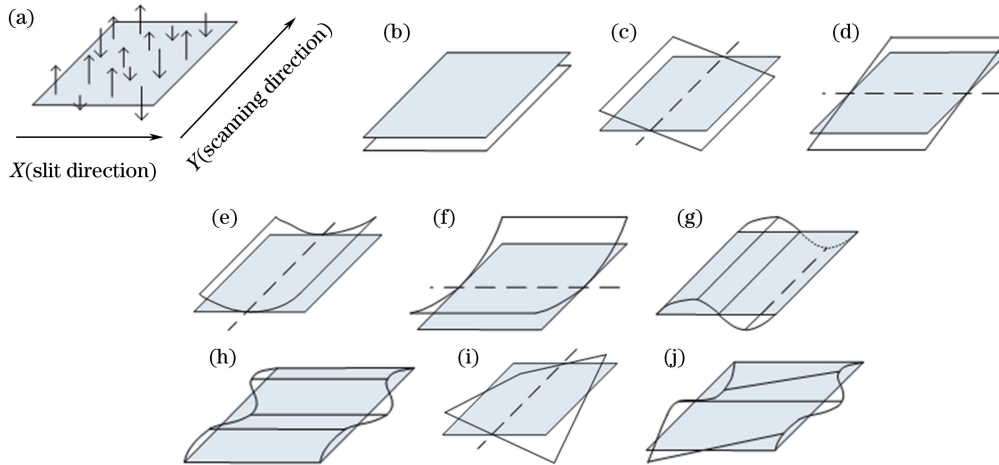


图 3 对焦误差分布及分解示意图。(a)总误差;(b)焦距偏移误差;(c) y 方向倾斜误差 R_y ;(d) x 方向倾斜误差 R_x ;

(e) y 方向场曲误差 C_y ;(f) x 方向场曲误差 C_x ;(g)沟槽型误差;(h)起伏型误差;(i)线性横摇误差;(j)扭曲误差

Fig. 3 Focus error distribution and decomposition diagrams. (a) Total error; (b) focal length offset error; (c) y direction tilt error R_y ; (d) x direction tilt error R_x ; (e) y direction field curvature error C_y ; (f) x direction field curvature error C_x ; (g) groove type error; (h) undulating type error; (i) linear yaw error; (j) distortion error

以上误差加上一个不可校正的随机误差 N ,即可得到在任意时刻任意产品的任意硅片上任意点处的总离焦表达式:

$$z(x, y, t) = F(t) + x \times R_y(t) + y \times R_x(t) + x^2 \times C_y(t) + y^2 \times C_x(t) + G(x, t) + B(y, t) + xy \times L(t) + x \times W(y, t) + N(x, y, t), \quad (2)$$

式中: x, y 为曝光场内各点的坐标; t 为时间; F 为焦距偏移误差,在整个曝光场内为常数; R_y 为 y 方向倾斜误差,在整个曝光场内为常数,但由其导致的 z 向误差线性依赖于 x ; R_x 为 x 方向的倾斜误差,在整个曝光场内为常数,但由其导致的 z 向误差线性依赖于 y ; C_y 为 y 方向场曲误差,在整个曝光场内为常数,但由其导致的 z 向误差线性依赖于 x^2 ;

C_x 为 x 方向场曲误差,在整个曝光场内为常数,但由其导致的 z 向误差线性依赖于 y^2 ; G 为沟槽型误差,在整个曝光场内仅随 x 而变化; B 为起伏型误差,在整个曝光场内仅随 y 而变化; L 为线性横摇误差,在整个曝光场内为常量,但由其导致的 z 向误差具有一些特性,即当 x 固定时, z 向误差线性依赖于 y , 当 y 固定时, z 向误差线性依赖于 x ; W 为扭曲误差,在整个曝光场内随 y 而变化,但当 y 固定时, z 向误差线性依赖于 x 。

3.2 误差统计特性

在处理各误差项,进行误差合并,并最终确定总误差的过程中,正态统计分布扮演着重要角色。这是因为当误差项及采样点足够多且相互独立时,如果这些误差具有一定的数学期望和方差,根据李雅普诺夫定理,总的误差分布就会趋向于正态分布。然而,在光刻机各种类型的误差源中,部分误差源引起的 z 方向离焦误差为非正态统计分布,下面进行具体分析。

以 y 方向倾斜误差 R_y 造成的 z 向离焦误差为例,说明非正态统计分布误差对总体误差统计特性的影响。

设系统包含 y 方向倾斜误差 R_y ,则曝光场内各点对应的 z 向误差为

$$z = x \times R_y, \quad (3)$$

式中: x 为曝光场内各点的横坐标。

当 y 方向倾斜误差 R_y 为一个常量时,由常量 R_y 引起的 z 向误差服从均匀概率分布。然而在实际情况下, R_y 往往服从某种随机分布,这时需要对其进行一定的处理。下面考虑 R_y 服从正态分布的情况,则其概率密度函数为

$$P(R_y) = \frac{1}{\sigma_{R_y} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{R_y^2}{2\sigma_{R_y}^2}\right), \quad (4)$$

式中: σ_{R_y} 为浸没式光刻机的典型值,为 $4 \mu\text{rad}$ 。

由 MATLAB 仿真分析 y 方向倾斜误差 R_y 造成的 z 向误差的概率密度函数,仿真流程图如图 4 所示。

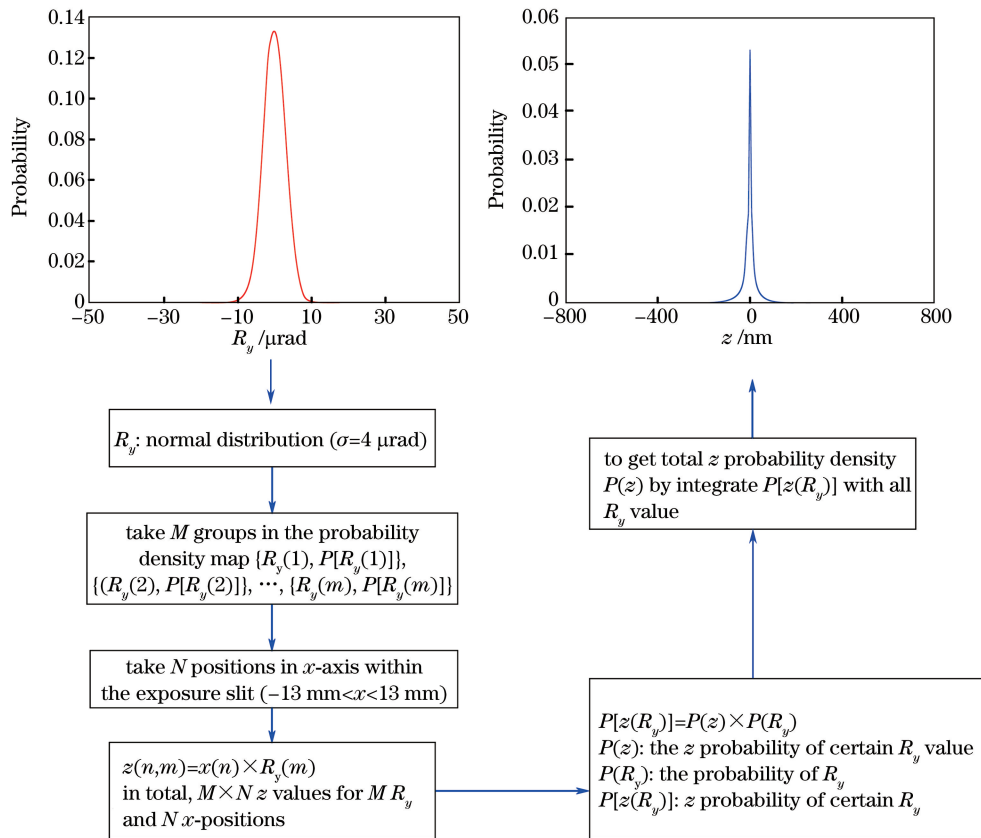


图 4 由 y 方向倾斜误差 R_y 造成的 z 向误差的仿真流程图

Fig. 4 Simulation flow chart of z direction error caused by y direction tilt error R_y

尽管以上仿真是针对多个曝光狭缝进行的,但由于在整个曝光场内 R_y 相同,因此以上仿真结果与多个曝光场上因 R_y 造成的 z 向离焦误差概率分布一致。

由上述仿真结果可以看到, y 方向倾斜误差 R_y 造成的 z 向误差已明显偏离正态分布。在对所有的误差源进行类似的分析后发现,除了焦距偏移误差、沟槽型误差、起伏型误差引起的 z 向误差分布依然

保持正态分布外,其他的 z 向误差分布均已偏离正态统计分布,如图 5 所示。图 5 中,实线为各误差项

造成的 z 向误差的实际分布,虚线为正态统计分布。

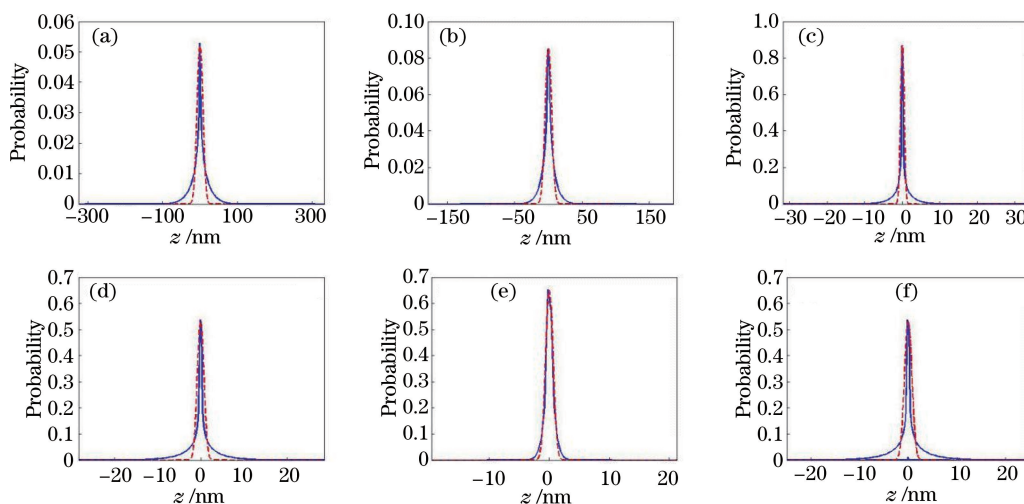


图 5 非正态分布误差造成的 z 向误差分布。(a) y 方向倾斜误差 R_y ;

(b) x 方向倾斜误差 R_x ; (c) y 方向场曲误差 C_y ; (d) x 方向场曲误差 C_x ; (e) 扭曲误差; (f) 线性横摇误差

Fig. 5 z -direction error distribution caused by non-normal distribution errors. (a) y direction tilt error R_y ;

(b) x direction tilt error R_x ; (c) y direction field curvature error C_y ; (d) x direction field curvature error C_x ;

(e) distortion error; (f) linear yaw error

3.3 合并非正态误差对总离焦误差的影响

对于常见的正态统计误差分布, 3σ 误差范围对应 99.7% 的置信区间。3.2 节的分析结果表明, 浸没式光刻机中的一些误差源引起的 z 向(对焦)误差 不遵循正态统计分布。当非正态分布误差与正态分布误差结合时, 总的离焦误差也将偏离正态分布。所以, 常见的正态统计 3σ 误差范围无法保证 99.7% 的光刻对焦成功率。

将所有误差源造成的 z 向(对焦)误差相加后, 总误差在一个曝光场上的分布图如图 6 所示。取一个曝光场内总误差的最大值为该曝光场的离焦误差。

研究表明, 当统计的曝光场达到 100000 个时, 离

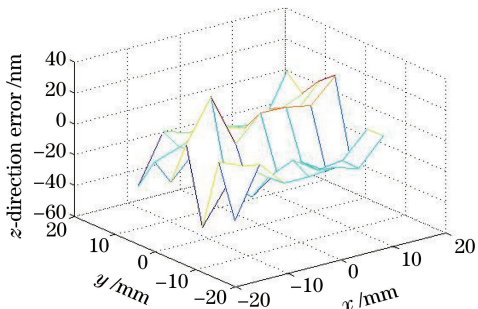


图 6 所有误差源造成的 z 向(对焦)误差相加后的总误差在一个曝光场上的分布

Fig. 6 Distribution of the total error of z -direction

(focus) errors caused by all sources of error on one exposure field

焦误差值的分布趋于稳定。分别仿真 100000 个曝光场的离焦误差及其概率密度, 结果如图 7、8 所示。

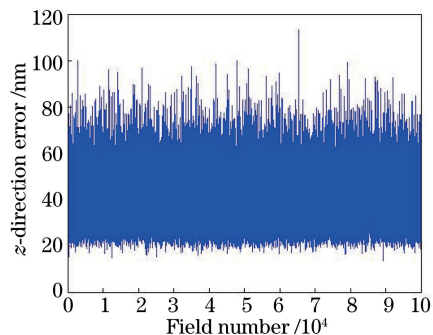


图 7 100000 个曝光场的离焦误差

Fig. 7 Defocus error in 100000 exposure fields

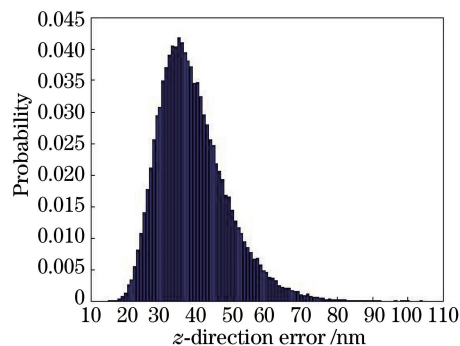


图 8 100000 个曝光场的离焦误差概率密度

Fig. 8 Probability density of defocus error in 100000 exposure fields

由仿真数据可知,99.7%对焦成功率的离焦误差为76.0 nm,大于其 3σ 值58.9 nm。当 $n=3.87$ 时, $n\sigma$ 可满足99.7%的对焦成功率要求。取 n 为整数4,采用 4σ 的数值作为总的离焦误差范围可以保证对焦成功率大于99.7%。

由仿真结果得知,如果仍使用 3σ 的数值58.9 nm作为总的离焦误差控制值,则只能满足95.9%的对焦成功率,无法达到对角成功率大于99.7%的要求。

表1 不同IC技术节点中浸没光刻工艺的总对焦成功率

Table 1 Total focusing success rate of immersion lithography technology at various IC technology nodes

| Item | Total focusing success rate /% | | | |
|--|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Single immersion exposure | 28 nm node (9 immersion exposures) | 14 nm node (23 immersion exposures) | 7 nm node (>30 immersion exposures) |
| 3σ | 95.9 | 68.6 | 38.2 | 28.5 |
| 4σ | >99.7 | >97.0 | >93.3 | >91.4 |
| Difference between the focusing success rate | >3.8 | >28.4 | >55.1 | >62.9 |

4 结 论

在浸没式光刻机对焦控制系统架构的基础上,分析了影响光刻对焦控制精度的误差源,并依据贡献方式对其进行分类,对浸没式光刻机对焦控制统计分析方法进行研究。分析了各种误差源对对焦误差贡献的统计特性,研究了非正态分布误差对总体误差统计特性的影响,以及合并非正态误差对总离焦误差的影响。仿真分析结果表明:由于非正态分布误差贡献项的影响,若使用 3σ 原则,单次曝光只能达到95.9%的对焦成功率要求;在28,14,7 nm IC工艺节点中,总的对焦成功率分别为68.6%、38.2%、28.5%,与使用 4σ 原则得到的对焦成功率之差分别为28.4%、55.1%、62.9%。因此,为了达到用户希望的99.7%的对焦成功率,浸没式光刻机的对焦控制应采用 4σ 原则。

参 考 文 献

- [1] Yuan Q Y, Wang X Z, Shi W J, *et al.* Development of immersion lithography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(8): 13-20.
袁琼雁, 王向朝, 施伟杰, 等. 浸没式光刻技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(8): 13-20.

在IC制造的完整流程中,需要进行很多次光刻,随着技术节点的不断缩小,浸没光刻曝光次数逐渐增多,这会导致对焦成功率的差别逐渐累积,使得对最终成品对焦成功率的影响不断扩大。当 n 为整数4时,表1列出了总离焦误差取 3σ 和 4σ 时,各技术节点对应的总对焦成功率(不考虑硅片返工及其他步骤的影响)。可以看出,当曝光次数为9次、23次及超过30次时,总对焦成功率之差分别高达28.4%、55.1%、62.9%。

- [2] Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI [M]. Beijing: Science Press, 2016: 6-10.
韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 6-10.
- [3] Bouchoms I, Leenders M, Graaf R D, *et al.* Extending 1.35 NA immersion lithography down to 1x nm production nodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8326: 83260L.
- [4] Mih R D. How focus budgets are spent: limitations of advanced i-line lithography [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2726: 386-397.
- [5] Jang J H, Park T, Park K D, *et al.* Focus control budget analysis for critical layers of flash devices [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9050: 90502F.
- [6] Li J L, Hu S, Zhao L X. Control technique of wafer surface in dual-stage lithographic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1223002.
李金龙, 胡松, 赵立新. 双工件台光刻机中的焦面控制技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1223002.
- [7] Li X P, Chen F B. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1987-1991.
李小平, 陈飞彪. 投影光刻机硅片调焦调平测量模型[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1987-1991.