

激光与光电子学进展

光刻技术中的聚焦控制

李世光^{1,2,3*†}, 郭磊^{1,2,3**†}, 曾海峰^{1,2,3}, 戢逸云^{1,2,3}, 王寅^{1,2,3}, 肖燕青³

¹中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049;

²中国科学院微电子研究所成果转化部, 北京 100029;

³江苏影速集成电路装备股份有限公司, 江苏 徐州 221300

摘要 光刻技术中的聚焦控制对曝光质量有直接的影响。曝光过程中,为保证良率,曝光区域需要时刻处于焦深范围内。通过建立数学模型,探讨了光刻机系统总离焦量与产品良率的关系,而光刻机的总离焦量又是多种离焦误差共同作用的结果。研究了先进的双工件台光刻系统和应用于掩模板制造的数字微反射镜装置光刻系统的工作流程,分析了与聚焦控制密切相关的若干离焦误差。在诸多误差因素当中,调焦调平传感器对总离焦量有着重要影响,光刻机的聚焦控制很大程度依赖于调焦调平传感器的准确测量。对 Canon、Nikon 和 ASML 的调焦调平传感器进行了调研,对比研究各自的传感器原理和结构,为光刻机的聚焦控制分析提供参考。

关键词 光刻; 焦深; 聚焦控制; 良率; 离焦误差; 调焦调平

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922016

Focus Control in Optical Lithography

Li Shiguang^{1,2,3*†}, Guo Lei^{1,2,3**†}, Zeng Haifeng^{1,2,3}, Ji Yiyun^{1,2,3}, Wang Yin^{1,2,3},
Xiao Yanqing³

¹School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Achievement Transfer Department, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³Jiangsu Yingsu Integrated Circuit Equipment Co., Ltd., Xuzhou 221300, Jiangsu, China

Abstract Focus control plays important impact on the exposure quality in optical lithography. In order to ensure yield, exposure field needs to be in depth of focus all the time in the exposure process. The relationship between the total defocus of lithography system and yield is discussed by establishing a mathematical model, while the total defocus of lithography is the result of many defocus errors. This paper focuses on the focus control process of advanced dual-stage lithography system and digital micro-mirror device lithography system used for mask manufacturing, then analyzes their main defocus errors. Among the error factors, the focusing and leveling sensor has an important influence on the total defocus, since the focus control of lithography greatly depends on the accurate measurement of the focusing and leveling sensor. In this paper, the focusing and leveling sensors of Canon, Nikon, ASML, etc. are investigated. The working principles and structures of focusing and leveling sensors are compared.

Key words lithography; depth of focus; focus control; yield; defocus error; focusing and leveling

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-13; 录用日期: 2022-03-30

资助项目: 江苏省科技成果转化专项资金 (BA2021033)

通信作者: *lishiguang@tsinghua.org.cn; **guolei@ime.ac.cn

†共同第一作者

1 引言

工艺窗口(process window)是光刻工艺中的一个重要参数。在光刻机中,工艺窗口指保证某关键特征尺寸(CD)在 $\pm 10\%$ 误差范围内的相关变量的允许范围。在传统的投影式光刻机中,相关变量为离焦量(焦深,DOF)和曝光剂量^[1],在数字光刻机中,还有减线宽值、扫描速度等^[2-3]。对于包含多种图形的版图,工艺窗口为所有图形的工艺窗口的交集,该交集对应的焦深为有效焦深。在曝光系统中,焦深与曝光波长成正比,与数值孔径(NA)的平方成反比。随着集成电路技术节点不断向下延伸,曝光波长逐渐减小,NA逐渐增大,焦深随之减小。例如,KrF光源的深紫外(DUV)光刻机的焦深约为 $0.7\ \mu\text{m}$,而ArF光源干式光刻机的焦深只有 $0.4\ \mu\text{m}$ 左右,极紫外(EUV)光刻机的焦深则进一步缩小至 $120\ \text{nm}$,荷兰ASML公司首台High NA EUV光刻机预计将于2023年完成交付,其NA从0.33提升至0.55^[4],焦深随之缩小至 $40\ \text{nm}$ 附近。焦深缩小使得聚焦的准确度要求越来越高,技术达到 $10\ \text{nm}$ 之后,聚焦控制已经成为确保曝光质量的关键因素。

聚焦控制精度最终影响的是产品良率。在先进光刻机和光刻工艺中,与聚焦控制相关的影响因素极其复杂,通过合适的方式将这些因素一一梳理出来,并将它们与产品良率建立起联系,是保证系统满足客户需求的必要条件。但很遗憾,在已有文献中,零星可见一些局部的与聚焦控制相关的研究^[5],例如三星电子Jang等^[6]将光刻机中的聚焦控制指标表示为焦点偏移量和变化量的函数,IBM的Ausschnitt等^[7]将整个工艺流程中可能影响聚焦控制的因素自底向上进行分类,包括照明、掩模、扫描曝光、衬底及各种工艺等,英特尔的Lee等^[8]研究了EUV系统中不同照明设置下的焦深大小,ASML研究透镜热效应导致的焦点漂移^[9]等,暂未发现从产品良率这一终极的用户需求出发,将这个需求渗透进光刻研发过程,从而转化为对光刻机中各子系统、模块和光刻工艺需求的研究。本文通过深入分析先进的双工件台光刻系统和应用于掩模板制作的数字光刻系统的聚焦控制过程,逐步梳理出在该过程中影响聚焦控制精度的因素,通过统计学方法将这些因素与系统总的离焦量建立联系,并按照用户需求将系统总离焦量与产品良率建立联系。这对合理制定和把握光刻系统底层指标,开发出满足

客户需求的曝光工具具有重要的意义。最后对与聚焦控制紧密相关的关键子系统——调焦调平传感器进行了综述,比较了国外代表性机构的几种传感器的工作原理和结构,并对传感器的工艺适应性进行了探讨。

2 离焦与良率

作为一台精密的加工设备,光刻机几乎所有参数均与产品良率存在直接或间接的关系,各项指标最终由期望的产品良率决定。例如,光源的重复频率误差将引起曝光狭缝 slit 内接收的激光脉冲数发生变化,而激光脉冲数的变化与激光产生的量子噪声有关,量子噪声则直接引起曝光剂量的变化,从而引起线条关键尺寸的变化,导致良率问题;例如,工件台的MA(moving average)使曝光点 (x, y, z) 不在期望的位置,产生套刻和聚焦误差,造成产品报废。由于非常多的因素会引起产品良率问题,因此在设计光刻机时,会对各种因素进行分解,给出某种因素导致的良率预算(budget)。假设光刻机内各种因素对良率的影响相互独立且出现的概率相同,则系统总的良率为所有单独良率的乘积。考虑到集成电路(IC)的层数为几十甚至上百层,则其良率为单层良率的 n 次方,其中 n 为层数。例如,设光刻过程中有10种显著的良率贡献项,该IC共12层,每种因素对单层良率的预算为 99.73% ($\pm 3\sigma$, σ 为标准偏差值),则IC单层的总良率为 97.33% ,12层的总良率为 72.29% 。显然最终的良率过低,因此通常在单层工艺步骤结束后进行检测,将不合格品剔除,再进行下一道工艺;也会进行过程中检测,及时发现不合格品,进行返工(rework),尽可能减少基材的报废。同时为了保证产品良率,IC生产厂家会在生产过程中对关键参数进行监控,称为SPC(statistical process control),其中一个关键的监测参数就是离焦量。

理想状态下,光刻机在曝光过程中,曝光的所有区域均在焦深范围内,确切说光阻(photoresist)厚度范围在焦深内。在曝光系统中,焦深为

$$D = \frac{k_2 \lambda}{NA^2}, \quad (1)$$

式中: k_2 为工艺参数; λ 为曝光波长;NA为曝光系统的数值孔径。

但光刻曝光是个动态过程,光阻的高度在时间及空间维度上均存在变化,先进节点时还要考虑焦深的变化,因此光阻与焦深的相对关系是个不断变

化的物理量。作为一个变化的相对关系,人们只能要求光阻在一定概率范围内处于焦深范围。设在机器整个运行期间,单独受离焦影响的产品良率预算为 99.73%,这个良率以可重复的独立单元的某层来计算,这个独立单元的单位为“片(piece)”,芯片上为 die。只要某片上有一处及以上的位置超出焦深范围,则该片报废。99.73%良率的另一种说法是:在 10000 片产品层里,受离焦影响产生的报废最多为 27 片。

简要而言,离焦与良率的关系是:

1) 离焦概率的统计时间为机器整个运行期间(机器寿命);

2) 记录 1 片内所有的离焦量,如果所有离焦量小于焦深,则该片计入良品;如果有 1 处及以上离焦量大于焦深,则该片计入次品;

3) 暂不考虑其余影响良率的因素,统计良品率,应大于等于 99.73%(或其他期望值)。

这是研发光刻机的顶层需求之一,它将决定光刻机厂家如何精确控制离焦量、优化控制流程,也会影响人们对各种离焦误差的分析方式。

3 离焦误差的累加

假设人们已梳理出各种离焦误差,需要将这些离焦误差与产品良率联系起来。为此,要建立两个数学关系:1)各种离焦误差与系统总离焦量之间的关系;2)系统总离焦量与产品良率的关系。

3.1 离焦误差与系统总离焦量的关系

在机器工作的某一时刻,在目标硅片(或其他基材)的某个点上的总离焦量为

$$E(x, y, t) = \sum_{i=1}^m E_i(x, y, t), \quad (2)$$

式中: m 为误差数量; x, y 为硅片上位置; t 为机器运行时刻。对于以机器寿命为周期的变化量,所有离焦误差服从统计分布,用平均值(M)和标准偏差值(σ)来表征。系统总的平均离焦量为

$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^m M_i. \quad (3)$$

对于一个好的光刻系统,离焦误差应在最佳曝光面附近对称分布,即它的统计平均值 M_i 为 0。假设 $M_i \neq 0$,则该平均误差将被视为系统误差,通过标定方式将它置为 0,此时该误差分解为两项:残余误差和标定误差,这两项误差平均值为 0,因此以下分析不考虑平均误差,但会考虑标定误差。

系统总的标准偏差为

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m k \times \sigma_i^2}, \quad (4)$$

式中, k 为误差出现的次数。式(4)成立需满足以下条件:

1) 所有误差不相关。如果误差间存在相关性,需要找到两个误差源的相关系数,并把它体现在该等式里;如果同一误差内各采样点之间有相关性,需要加大采样间距,使采样点之间不相关。

2) 每种误差采样点数足够多。如果误差数据较少,则该等式存在偏差。仿真表明,对于正态分布误差,误差采样数 $m' \geq 2000$ 时,根据有限采样数计算的标准偏差与实际的标准偏差基本吻合。

3) 当采样数较小时,人们习惯用误差范围值(R_E)代替 σ 。仿真表明,这种代替存在偏差。 R_E/σ 的比值依赖于采样数 m' 和数据概率分布。对于正态分布误差,随着 m' 的增加, R_E/σ 持续增加,没有趋近值。但当 $m' < 10$ 时, $\sigma \approx R_E/\sqrt{m'}$, 例如 m' 为 9 左右时, $R_E \approx 3\sigma$ 。对于均匀分布数据,例如倾斜误差,随着 m 的增加, R_E/σ 趋于固定值 $2\sqrt{3}$, 一般 $m' = 200$, 即可准确得到均匀分布的 σ 值。

4) k 次出现的同一误差没有相关性,且均对总离焦量产生贡献。

5) 误差值必须全部以离焦量表征,而不是倾斜、弯曲等其他量纲。如有,需转换为离焦量,再计算 σ , 代入式(4)。

6) 有些误差是可重复的,但重复的特点不同,例如吸盘(chuck)起伏,它在整个硅片范围内随机,不同硅片之间可重复;例如成像面偏移(IPD)误差,在一个狭缝内随机,狭缝间可重复;例如标定误差,在某个时间段内重复,但不同标定次数间随机。这种误差不必考虑其重复性,将足够多的随机采样点的 σ 代入式(4)即可。

7) 对于某一小段时间(例如两次标定期间),或不同位置(例如硅片边缘和中间),误差数值和分布规律不同, σ 会有所不同。

8) 对于不同产品,如果尺寸不同,误差会有所不同。在进行误差分析时,按产品最大尺寸分析。对于芯片,最大的尺寸为一个曝光场(field)。

3.2 系统总的离焦量与产品良率的关系

先进光刻机的曝光场尺寸为 26 mm × 33 mm, 设狭缝内成像面起伏的相关长度为 2 mm, 可选取 13 个无关采样点, 硅片上高度起伏的相关长度为 5 mm, 可选取 7 个无关采样点, 一个曝光场总的采样点数为 91。仿真分析系统总的离焦量与产品良率的关系。分两种情形:1)系统总的离焦量为正态

分布;2)系统总的离焦量为非正态分布。

1) 系统总的离焦量为正态分布

设两个正态分布随机量 $\sigma_1=15\text{ nm}$, $\sigma_2=25\text{ nm}$, 其总的离焦量仍为正态分布,按式(4)得 $\sigma_{\text{total}}=29\text{ nm}$ 。同时按式(2)仿真每个点的总离焦量,得到这种离焦分布下每个场最大的总离焦量绝对值。共仿真 10000 个场,得到 10000 个场的最大离焦值。各个场最大离焦值从小到大排列,第 9973 个最大离焦值为 121 nm。按照第 2 节要求,该值必须小于等于 $D/2$ (焦深为正负对称)。据此建立 σ_{total} 与 D 的关系:

$$k\sigma_{\text{total}} \leq D/2. \quad (5)$$

仿真重复 4 次, k 在 8.2~8.4 之间变化。改变 σ_1, σ_2 对 k 值没有影响。注意,此时 $k \neq 6$,也就是假设系统的 $D=90\text{ nm}$, 为保证 99.73% 的产品良率, $\sigma_{\text{total}} \leq 90/8.4=10.7\text{ nm}$ (取 $k=8.4$)。将 σ_{total} 代入式(4), 后续用于平衡分配各误差值 σ_i 。

2) 系统总的离焦量为非正态分布

系统中存在大量不是直接用离焦量表征的离焦误差,例如倾斜、场曲等,如图 1 所示。即使它们在本量纲下为正态分布,但当它们转换为离焦量时,其离焦量的统计分布为非正态分布,因此总的离焦量也不是正态分布。这种情况下,式(5)是否成立应根据具体情况另作讨论。

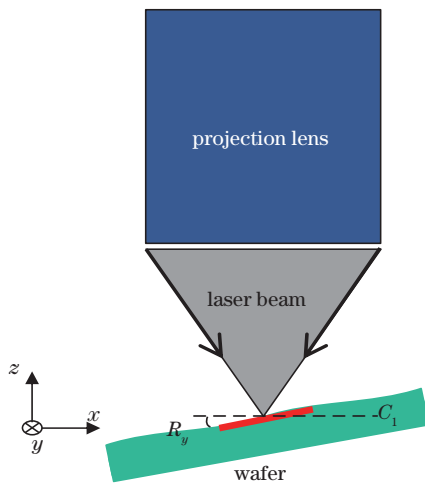


图 1 R_y 示意图

Fig. 1 Illustration of R_y

设扫描过程中硅片上表面相对最佳曝光面存在一个沿扫描方向 y 向旋转的倾斜误差 R_y ,如图 1 所示,虚线 C_1 为最佳曝光平面, R_y 的统计分布为正态分布, $\sigma_{R_y}=3\text{ }\mu\text{rad}$,该倾斜误差转化为 z 向离焦量误差后,其统计分布如图 2 的实线 ① 所示,不再为正态分布,该概率分布的 $\sigma_{R_y,z}$ 值为 22.4 nm。另一

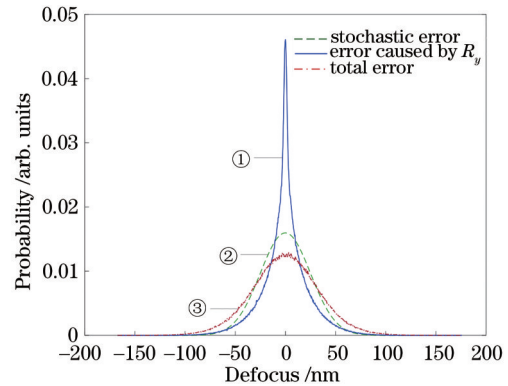


图 2 非正态分布误差(R_y 导致)与正态分布误差(随机误差)相加的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of the sum of non-normal distribution error (caused by R_y) and normal distribution error (stochastic error)

个误差为正态分布的随机误差 $\sigma_{\text{sto}}=25\text{ nm}$,如图 2 虚线 ② 所示。总的离焦分布如图 2 虚线 ③ 所示。

根据式(4), $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{(\sigma_{R_y,z})^2 + (\sigma_{\text{sto}})^2} = 33.6\text{ nm}$ 。按上述步骤计算 10000 个场的最大离焦量,并从小到大排列,第 9973 个最大值为 118 nm。仿真重复 4 次,根据式(5), k 在 9.6~10 之间变化。在只有 R_y 的极端情况下, k 在 11.4~12 之间变化;在只有随机误差的情况下, k 在 8.2~8.4 之间变化,与 3.2 节 1) 部分相同。可见随着倾斜误差占比的增加, k 值逐渐增加,即在相同的 D 情况下,对离焦误差的 σ_{total} 要求更严格。

在进行分析时,为了得到全局的有意义的统计数据,有时会排除掉少量局部结构上明显偏离统计分布的数据。然而,他们对产品良率确实产生贡献,而产品良率才是客户真正关心的评价指标。因此,机器运行时的 99.73% 产品良率和系统分析时的 99.73% 良率可能不相等,它们的差值包含那些不可预见的局部效应的信息。同时以上分析均基于误差为大量数据统计分布,且平均值为 0 的情形。有时这种前提不成立,例如:仅统计一段时间的良率或某误差的平均值不为 0,此时良率会有所变化;有时人们将可返工的报废排除在外,因为返工件可以再利用,因此不认为是废品,这些在机器运行时要注意区分。

4 聚焦控制过程及离焦误差

光刻时系统总的离焦量是多种离焦误差共同作用的结果,这些误差对总离焦量的影响与聚焦控

制过程密切相关。以下简述两种典型光刻机的聚焦控制过程,通过梳理控制过程,得到与聚焦控制精度密切相关的离焦误差。

4.1 双工件台步进扫描式光刻机

4.1.1 双工件台光刻机的结构与工作流程

目前最先进的光刻机采用双工件台步进扫描

方式,其结构如图 3 所示(源自 ASML 公司网站 <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>)。对于这种类型的光刻机,采用先测量后聚焦曝光的方法,将两个原本串行的流程并行,大幅提高了工作效率,但同时也对光刻机的设计与开发提出了更高的要求。

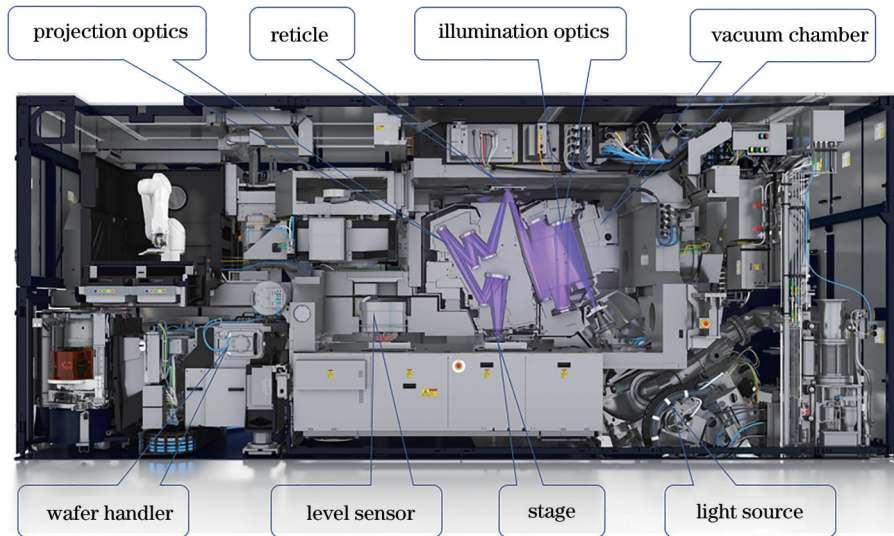


图 3 先进光刻机结构简图

Fig. 3 Schematic diagram of the advanced lithographic architecture

在工件台聚焦的过程中,保证测量的硅片表面离焦量所在位置是待曝光位置至关重要,即 x, y, z 三轴都在正确的位置, xy 平面的位置是在对准这一步实现的,因此,光刻过程中的聚焦通常与对准结合进行,保证待曝光点在空间坐标系中的位置正确。

当硅片在测量位置时,通过遍历整个硅片表面

得到并存储其相对于基准面的高度起伏,当硅片被换到曝光位置时,调用存储好的硅片表面高度信息,从而得到硅片表面相对于最佳曝光面的高度变化并进行补偿。在这个过程中,需保证测量位的基准面与曝光位的最佳曝光面对应。

双工件台的简要聚焦/对准工作流程如图 4 所

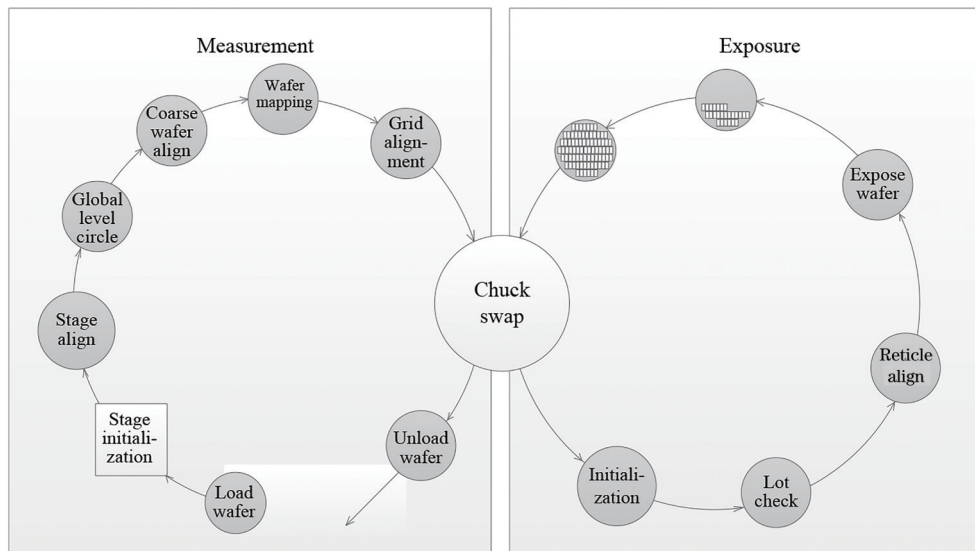


图 4 双工件台光刻系统聚焦流程图^[10]

Fig. 4 Focus control workflow of dual-stage lithographic system^[10]

示,主要分为测量和曝光两大步骤。首先用硅片手将硅片放置在测量侧的工件台上;之后初始化工件台,并将其移到初始位置,干涉仪置零;接着进行工件台对准,测量工件台上的基准点/面,即透射像传感器(TIS)平面,得到参考点/面的高度、长度和旋转等参考参数;然后进行全局调平圆的操作,测量硅片边缘得到硅片相对于参考基准面的整体高度和 R_x 、 R_y 倾斜;之后进行粗对准,测量初步对准标记的位置,计算硅片相对于干涉仪坐标系的全局方位、硅片旋转以及涨缩;然后通过调焦调平传感器测量工件台 xy 位置处的硅片高度 z -map,在曝光侧与测量侧互换之前,还要确定die坐标系相对于chuck坐标系的关系,称为网格(grid)对准。

当测量结束后工件台从测量侧交换至曝光侧,进行工件台初始化;然后用每个批次(lot)的第一片硅片校正该批次中各种照明条件下的像差,尤其是畸变和场曲;接着进行掩模对准,在两个TIS平面上用TIS传感器测量掩模的空间像,调整工件台,使TIS表面处于最佳曝光面位置;同时将硅片的 z -map根据曝光场的数目分割成若干段,用于后期控制,保证该场在焦深内;完成曝光的操作后,工件台将硅片从曝光侧移至测量侧,通过硅片手完成对硅片的卸载工作。

4.1.2 误差分析

光刻机的聚焦控制精度是光刻机内外多方面因素综合作用的结果,包括且不限于^[11]:

a) 光源的波长、带宽和偏振态、照明系统的均匀性、照明设置和相干因子等变化将引起最佳曝光面和焦深的变化;

b) 掩模图形布局(layout)、三维效应、吸收层的厚度和材料、掩模受热变形、掩模板的高度、平整度、上下表面平行度、掩模台吸附平整度、掩模台上颗粒污染等将引起最佳曝光面的起伏;

c) 投影系统的各种像差,尤其是场曲、像散、球差、彗差,会使最佳曝光面偏离理想位置,镜头的机械漂移、热效应则使最佳曝光面随时间的变化而产生不确定性,曝光系统的杂散光导致工艺窗口严重减小;

d) 在工件台进行动态聚焦控制过程中,调焦调平传感器测量精度、干涉仪/光栅尺的测量精度、工件台/掩模台的聚焦控制精度和同步性、工件台/掩模台 xy 向运动过程中产生的 z 向偏移、工件台/掩模台的倾斜、硅片/掩模板的装夹变形、掩模台上 z

向传感器测量精度、 z 向干涉仪反射镜面型精度、硅片上颗粒污染、标准面(TIS面)稳定性、各种算法精度等均会对动态聚焦效果产生影响;

e) 温度、湿度、振动、噪声、洁净度等影响光刻机内各个系统工作的环境因素。

除此以外,在光刻机的非主体部分,也有若干因素对聚焦控制精度产生影响,例如:

f) 机器装调时的最佳曝光面的确定精度;

g) 各种在线、离线测试评估设备的测试精度;

h) 硅片面型控制,尤其是硅片边缘的面型控制;

i) 光刻胶厚度。

4.2 数字光刻机

4.2.1 数字光刻机的结构与工作流程

这类光刻机也常被称为无掩模光刻机、激光直接成像(laser direct imaging,LDI)曝光机,还有人将它与激光直写光刻机^[12-13]相混淆。该光刻机的典型特征是采用空间光调制器替代传统投影式光刻机中的掩模板进行曝光,其他结构与传统光刻机基本相同。空间光调制器是一种由大量独立控制单元构成的用于调整光强分布的光电器件,可以根据需要进行编程,得到待复制图形,该调制器在此可看作为数字化掩模板,因此该类光刻机称为数字光刻机更为准确。数字光刻常见的空间光调制器有两种,一种是液晶显示器件(LCD),另一种是数字微反射镜装置(DMD),其中DMD相较于LCD而言,它的分辨率、对比度、亮度更高,因此获得广泛应用,基于DMD的光刻系统如图5所示^[2-3]。目前这种光刻机主要应用在印刷电路板(PCB)、泛半导体和掩模板制造等领域,本节介绍用于掩模板制造的数字光刻机的聚焦控制方式。

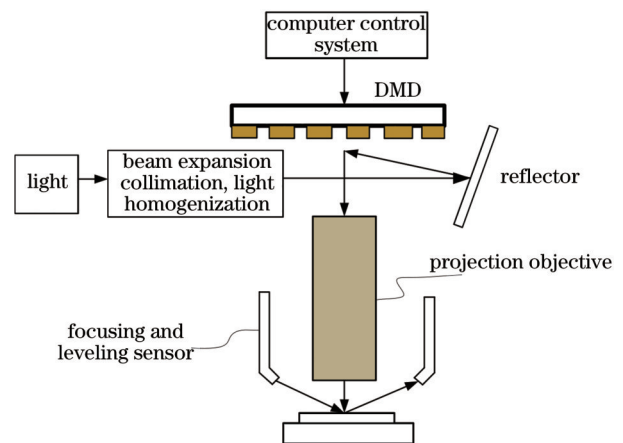


图5 DMD光刻系统

Fig. 5 DMD lithography system

这类光刻机的聚焦控制方式与双工件台光刻系统相比,很大一部分是互通的,尤其是误差因素基本相同,即定位系统、曝光系统、调焦调平传感器以及系统在进行运算和处理等过程产生的误差等。不同之处主要在于:1)双工件台系统是测量与曝光相互独立,聚焦控制通过对工件台进行 z 方向和 R_y 倾斜调节实现,而数字光刻系统的测量与曝光是在同一工件台上完成的,且聚焦控制通过对曝光镜头进行 z 方向调节来实现,同时由于曝光面积较小,忽略了 R_y 的倾斜调整。虽然两者在数学上等效,但调节对象的不同注定会造成控制精度和同步性等问题,且由于不配备 R_y 调整机构,因此如果 R_y 倾斜度过大,数字光刻系统可能会产生不可忽略的失焦问题,这要求工件台相对于最佳曝光面的倾斜误差足够小。2)双工件台系统中调焦调平传感器与 z 向干涉仪共同工作,确定曝光镜头与工件台上表面的相对高度关系,调焦调平传感器的参考零位与曝光镜头的最佳曝光面只要关系固定即可,不一定一致,而数字光刻系统中镜头与工件台的相对关系仅依靠调焦调平传感器的测量结果,因此镜头上下调节过程中,调焦调平传感器零位必须与镜头的最佳曝光面同时运动且严格保持一致。3)双工件台系统中,掩模台与工件台的动态同步性是保证曝光精度的关键因素,而数字光刻

系统没有运动的掩模板,因此不存在运动同步性问题,但存在数字图像刷新与工件台的同步性问题。4)双工件台系统在曝光过程中对准、调焦调平和曝光三者同时进行,而数字光刻系统在进行掩模板制造时,由于掩模板的变形较小,因此曝光过程中不进行实时的对准调整,而是事先对工件台的运动轨迹进行标定,在曝光过程中补偿一下工件台运动的变化即可,这要求工件台的扫描重复性较好。

图 6 为数字光刻机制备掩模板时的聚焦控制过程。装机调试阶段,利用测试板调整镜头,使最佳曝光面与掩模板上表面一致,该曝光面同时设置为调焦调平传感器的参考零位;移动镜头/传感器零位,标定传感器测量信号与掩模板上表面偏离最佳曝光面的距离之间的函数关系。若无需重新标定或调试,则上述工作均为一次性工作。机台运行阶段,系统输入某料号,镜头/传感器零位根据该料号中的名义掩模板厚,上移该板厚距离。将待曝光的掩模板放在平台上,传感器测量掩模板上表面相对于参考零位的差值,系统将该差值反馈给镜头的执行机构,镜头/传感器零位 z 向移动补偿该差值,再进行掩模板曝光。曝光完成后,掩模板移动至下一待曝光区域,反复执行测量-调整-曝光操作,直至掩模板整体曝光完成。

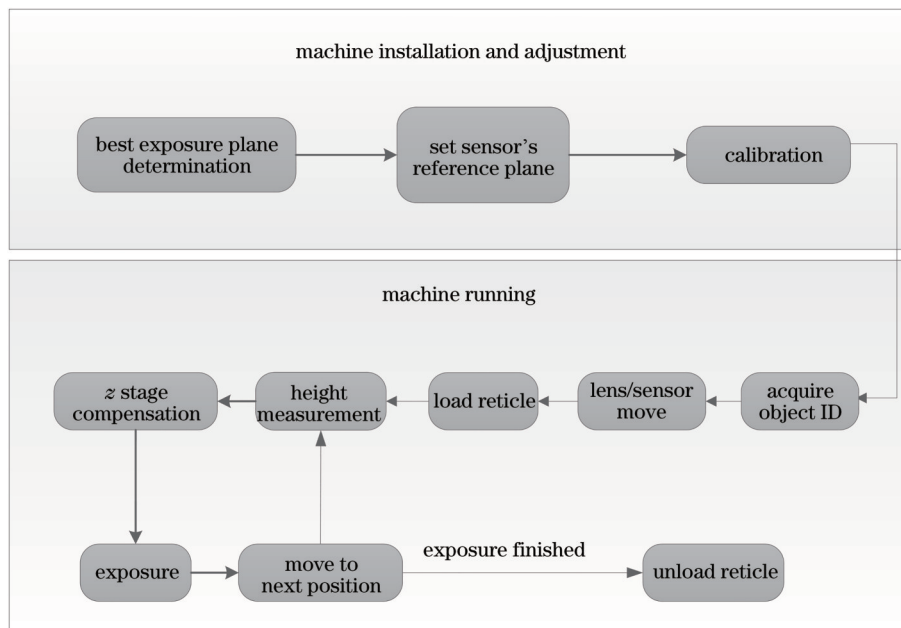


图 6 掩模板制造过程中与聚焦控制相关的工作流程

Fig. 6 Work flow related to focus control in mask manufacturing process

4.2.2 误差分析

该光刻系统与双工件台系统的误差绝大部分相同,但由于该光刻系统曝光面积较小,因此在控

制方面进行了简化,有些误差没有进行控制。例如该系统的干涉仪只有 x 、 y 两个方向,需要考虑如何保证工件台运动过程中产生的倾斜或局部高度

变化不会产生不可忽略的离焦误差;例如调焦调平传感器零位随镜头的上下而变化,需要考虑传感器零位与最佳曝光面的标定精度、曝光过程中传感器零位与镜头最佳曝光面的一致性、以及镜头的 z 向位置反馈控制精度和同步性等问题;还有镜头、DMD 和调焦调平传感器的位置需要保持恒定等。

5 调焦调平传感器

调焦调平传感器是光刻机的重要组成部分,它的作用是在曝光过程中测量硅片的表面高度起伏和水平倾斜度,通常与配套的执行设备构成负反馈,组成一个功能完善的测量-调节系统。通过测量结果精确调整硅片高度并保持严格的水平,保证硅片上的曝光区域始终不超出焦深范围,确保光刻的准确性。它的测量精度是影响聚焦控制精度的关键因素之一,本节简要介绍国外代表性机构的几种调焦调平传感器的工作原理和结构,并探讨传感器的工艺适应性及其对聚焦控制精度的影响。

光学三角法是调焦调平传感器中最常用的测量方法,如图 7 所示。一束光倾斜入射到硅片表面,经硅片反射后进入接收探测器。若入射角为 α ,当硅片表面高度变化为 h 时,接收端接收到的反射光会发生偏移,根据反射光偏移量 Δx 可以计算出高度的偏移量:

$$h = \frac{\Delta x}{2 \sin \alpha} \quad (6)$$

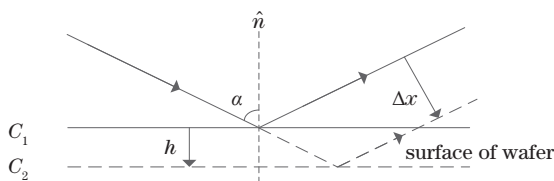


图 7 光学三角法测硅片表面高度原理图

Fig. 7 Illustration of wafer surface measurement with optical triangulation method

目前全球主流的光刻机大多用此法进行测量,并在此基础上对调焦调平传感器的光学部分和检测部分作了大量的修改和优化。

5.1 Canon 公司的调焦调平传感器

Canon 公司早期用于重复投影光刻机的调焦调平传感器如图 8 所示。三组 LED 光源的波长不同,经过透镜、狭缝和准直透镜后,经折转棱镜聚合为一束光,大角度倾斜入射硅片表面,反射光束经探

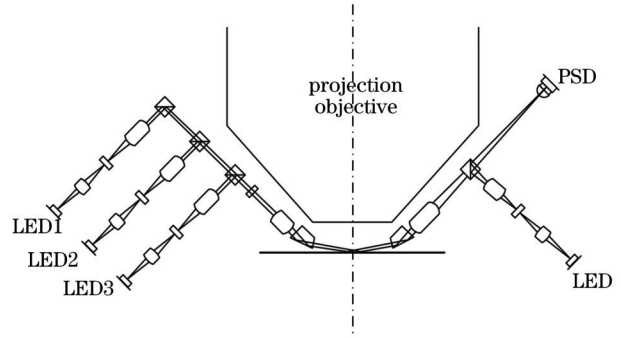


图 8 Canon 早期的调焦调平传感器^[14]

Fig. 8 Canon's early focusing and leveling sensor^[14]

测光路被位置敏感探测器(PSD)接收,反射端一侧的 LED 起到校正中心位置漂移的作用。采用 3 束不同波长的光,能减弱硅片表面光刻胶层引起的多光束干涉的影响。该系统的精度能达到亚微米级。

随着技术的进步,Canon 公司推出了如图 9 所示的调焦调平装置^[15]:光源 70 采用相干光源,经准直透镜 71 后变为平行光,72 是一个光栅器件,将平行光分束为 9 束光,经过双远心光学系统 73 后,再经反射镜 74 倾斜入射到硅片表面。74、75 均为反射镜,可以调节入射角度和相应的反射光接收角度,76 为双远心光学系统,携带硅片表面高度信息的光束经过 76 后,再被校正光学系统 77 接收,最后送达光电转换器 78。

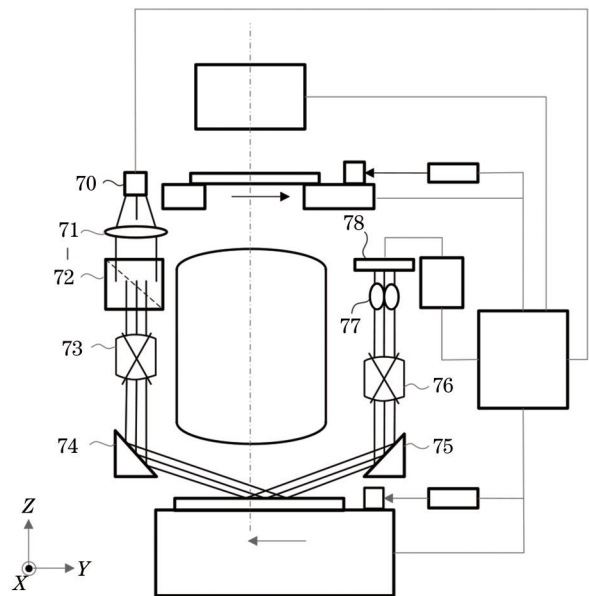


图 9 Canon 公司的另一种调焦调平传感器^[15]

Fig. 9 Another Canon's focusing and leveling sensor^[15]

图 10 为检测光束与硅片表面测量位置的对应关系图。校正光学系统 77 上安装有 9 个透镜,可独

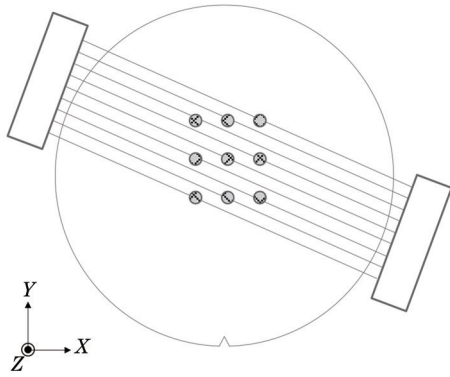
图 10 检测光束与硅片表面位置的光斑^[15]

Fig. 10 Detecting beams and optical spots on the wafer surface^[15]

立接收 9 束光携带的信息,光电转换器 78 也同样拥有 9 个光学转换元件。该调焦调平传感器能计算每个测量位置的高度和待测区域的倾斜角,并根据倾斜角修正每个点的高度误差,实现高精度调焦调平测量。

5.2 Nikon 公司的调焦调平传感器

Nikon 公司早期研发的调焦调平传感器^[16]如图 11 所示。利用光学三角法,将检测光束位置偏移转化为电路中相同比例的电压偏差,以此来测量硅片的表面高度和倾斜度。

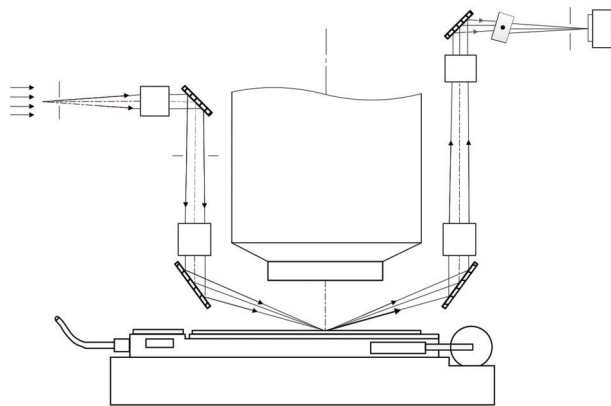
图 11 Nikon 的调焦调平传感器^[16]

Fig. 11 Nikon's focusing and leveling sensor^[16]

这款调焦调平传感器诞生于 2002 年^[17],此时的调焦调平方式已由整场调平转变为逐场调平。在该系统中,检测方法与单一狭缝的光学三角法相同,但 Nikon 采用 9×5 的狭缝阵列替代了原有的单一狭缝(图 12),在检测过程中,可根据需要在 45 个狭缝中选择 9 个狭缝检测其光斑,并根据 9 个光斑的平均高度计算曝光区域的平均高度和倾斜度。因此精度也高于单一狭缝检测,狭缝阵列的检测区

域大于曝光面积。在步进扫描的过程中,当前狭缝阵列的检测结果可用于预测和修正下一曝光场的硅片高度分布。

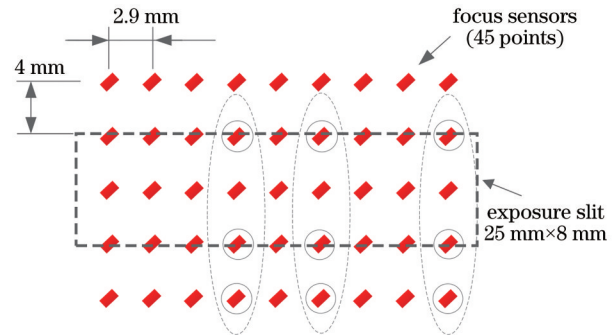
图 12 Nikon 调焦调平传感器狭缝产生的阵列^[17]

Fig. 12 Light spot array produced through slits in Nikon's focusing and leveling sensor^[17]

在随后的技术发展中,Nikon 在调焦调平的光路上做了进一步的修改^[18],使用反射棱镜代替反射镜面,避免了反射镜之间的角度偏转带来的误差(图 13)。

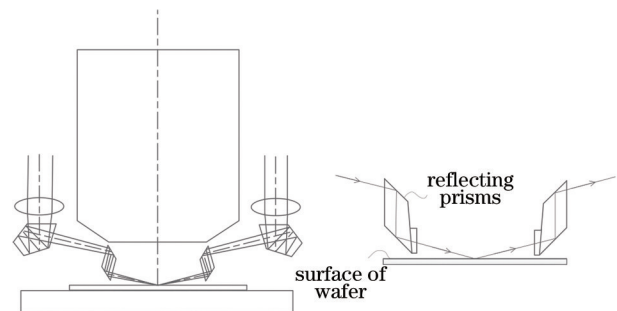
图 13 Nikon 利用反射棱镜的调焦调平传感器^[18]

Fig. 13 Nikon's focusing and leveling sensor equipped with reflecting prism^[18]

光的干涉原理广泛用于系统测微功能。图 14 为 Nikon 公司 2019 年发布的专利^[19],图 14(a)为光刻机结构示意图,图 14(b)为调焦调平传感器原理图。利用干涉测微的方法检测硅片表面高度变化。检测光倾斜入射,硅片正上方放置了一个参考反射器 328,检测光经光栅后,仅剩 +1 级衍射光 412 和 -1 级衍射光 414 向前传播,空间滤波器 450 起到分光作用,将两束 ±1 级衍射光在空间上分离开,使其产生位置差异,+1 级衍射光经过硅片表面反射形成样本光束,-1 级衍射光经过参考反射面 328 后反射形成参考光束,两束光发生干涉后,光束组合器 420 将之聚集,于接收端 CCD 形成明暗条纹,而条纹所确定的干涉相位能直接反映出参考反射面与

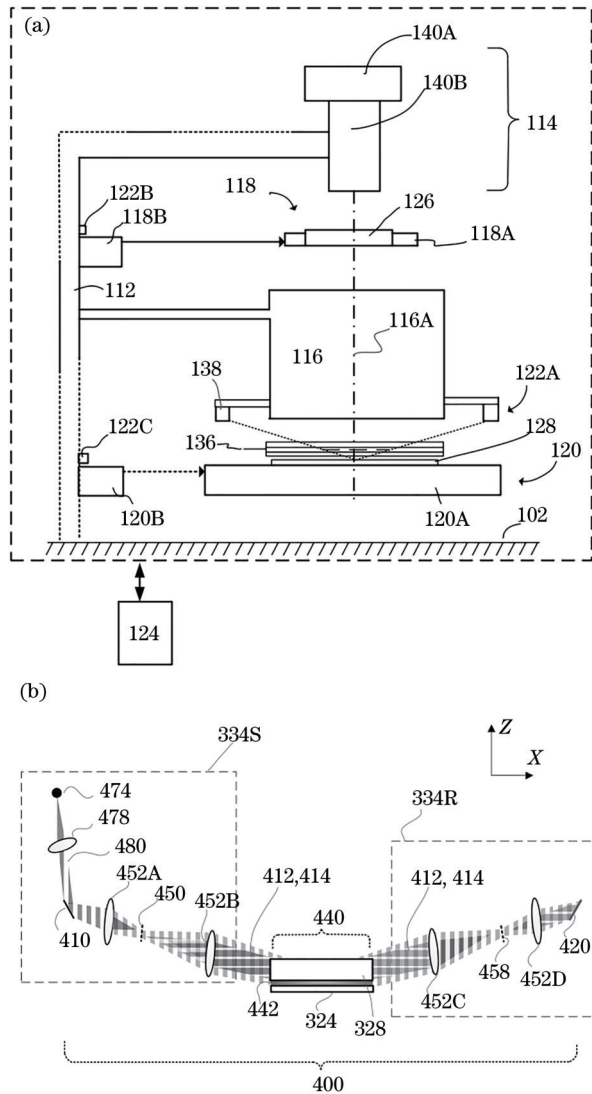


图 14 Nikon 公司光刻机。(a) 示意图; (b) 倾斜干涉调焦调平传感器

Fig. 14 Lithography of Nikon. (a) Illustration; (b) corresponding focusing and leveling sensor based on tilting interference

样本平面的形貌差异。这种方法与相关技术中的调焦调平方法相比,精度提升了 22 倍。

5.3 ASML 公司的调焦调平传感器

ASML 公司的众多调焦调平方法中,光学手段依然是主流检测方法,在传统光学检测方法日趋完善的同时,基于气压计检测、超声波检测的高精度调焦调平设备也层出不穷。以下列举了几种 ASML 不同类型的调焦调平传感器。

ASML 的调焦调平传感器^[20]采用光学三角法测量硅片表面高度变化(图 15),不同的是,该系统的投影光路和探测光路为反射式。一束光经过投影光栅 PGR 和光学系统 PO 后,从硅片表面反射,

该反射光束 BE2 透过检测光栅 DGR 后被引导进入分光光学元件 SPO,与此同时反射光束 BE2 被检测光栅拆分成 BE2-1 和 BE2-2,最终到达检测器。在检测硅片表面的高度时,表面高度的变化会导致反射光 BE2 的偏移,在经过检测光栅后,改变的将是 BE2-1 和 BE2-2 两束光的分布,在探测器上,得到两束光强度 I_{BE2-1} 和 I_{BE2-2} 的变化。其中,高度变化 H 与之对应的关系为

$$H \propto \frac{I_{BE2-1} - I_{BE2-2}}{I_{BE2-1} + I_{BE2-2}} \quad (7)$$

根据 I_{BE2-1} 和 I_{BE2-2} 的变化即可得到硅片表面高度的变化,ASML 将此调焦调平测量方法成功应用于双工件台系统^[21]。

上述系统分光光学元件 SPO 设计复杂、体积较大,且光损失高达 50%。为克服以上缺点,ASML 用集成光学元件 SIE 替代了原来的分光光学元件^[20]。图 16 中,COL 为准直透镜,检测光束经硅片表面反射后,经探测光路引导后进入右侧的集成光学元件,它包括投影单元、检测单元和处理单元。衬底的不同高度会使经过投影光栅的光束位置发生偏移,经集成光学元件反射表面 RSF 反射至检测器 DET-1 和 DET-2 时,光的分布会发生变化,进而达到检测硅片高度的功能。在该专利中,若采用曲面 RSF,可对检测光束进行聚焦,进而可使用较小的检测器。ASML 将反射光路后的所有功能集成于一体,并且在集成光学元件中加入了透明材料 BL,不仅安装使用灵活方便,还有效降低了光损失,提升了信噪比。

ASML 还通过用高精度传感器标定低精度传感器的方法进行高精度调焦^[22]。图 17 中,采用准确度极高的传感器作为校准传感器 208,将其测量值等价于真实值,通过校准传感器 208 标定两个二次控制传感器 204 和 206(精度较低)。对硅片上表面 112 每个区域进行模拟曝光,即随着硅片的 z 向位移,三个传感器测量每一位置的高度值。把三个传感器的测量结果和测量的坐标存入一个表格,这个过程就是标定。表格记录了每个坐标点的高低精度传感器的测量值之差以及调节方法。在实际曝光过程中,主聚焦系统进行聚焦时,由于控制传感器 104、106 和 204、206 精度相同,由 104、106 测得高度值,对比 104、106 与 204、206 的偏差,再根据在坐标位置查表并调节,直到主控制传感器与表中存储的相应测量值相同。这种聚焦控制方法兼备了高速度和高精度的优点,可用作下一代光刻机的调焦控制。

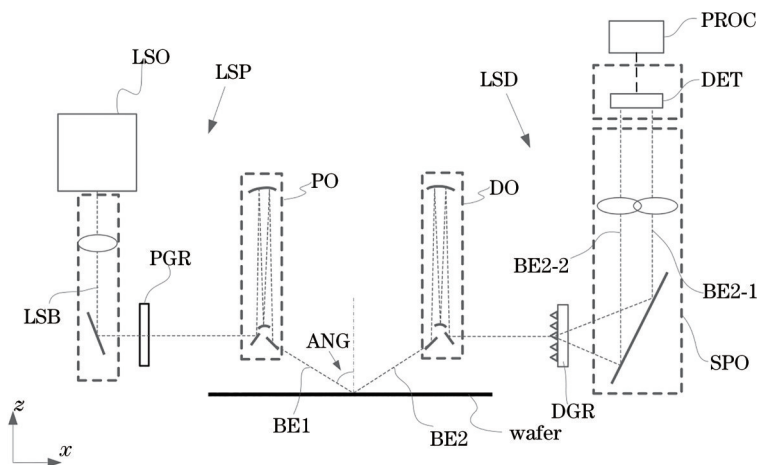


图 15 ASML 公司原有的调焦调平传感器^[20]

Fig. 15 ASML's original focusing and leveling sensor^[20]

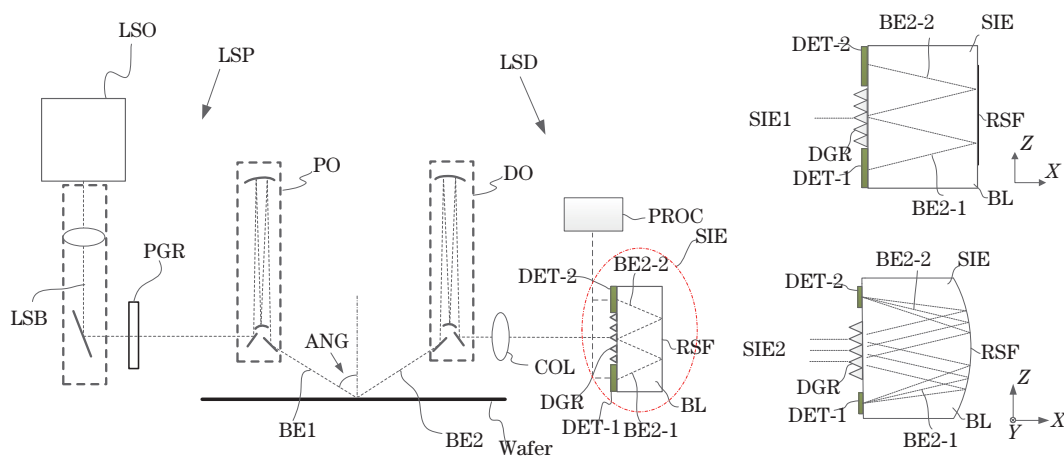


图 16 ASML 改进后的调焦调平传感器^[20]

Fig. 16 ASML's improved focusing and leveling sensor^[20]

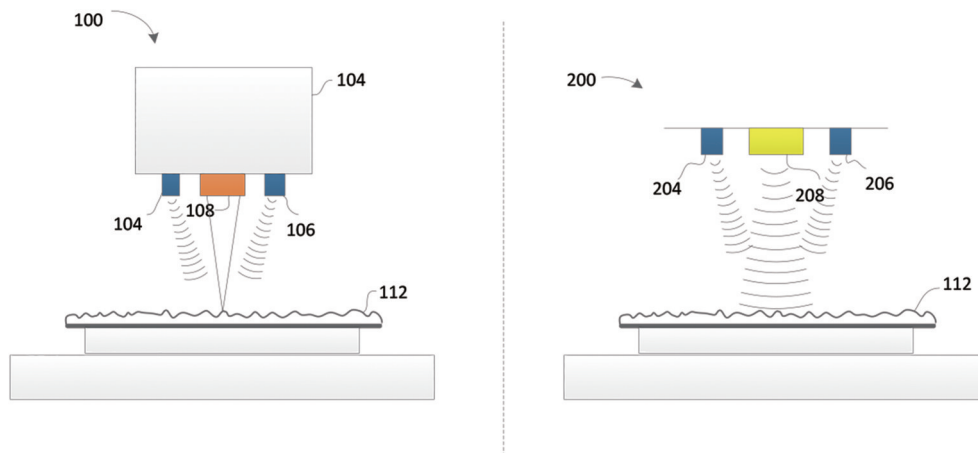


图 17 主聚焦系统 100(左): 曝光透镜 108, 控制传感器 104 和 106, 晶圆上表面 112; 校准子系统 200 (右): 校准传感器 208, 二次控制传感器 204 和 206^[22]

Fig. 17 Primary focus system 100 (left): exposure lens 108, control sensors 104 and 106, upper surface of a wafer 112; calibration subsystem 200 (right): calibration sensor 208, secondary control sensors 204 and 206^[22]

5.4 台积电公司聚焦控制方法

以上利用调焦调平传感器进行聚焦控制的方法均只能在一个镜头狭缝内进行整体的高度和倾斜调整。事实上,由于硅片上的工艺复杂,一个狭缝内也存在局部高度起伏。随着工艺节点到纳米级别,这些局部起伏也成为影响曝光质量的因素。台积电 (tsmc) 于 2020 年研发的调焦装置利用液晶分子做透镜进行同一高度的多点调焦^[23]。跟传统的曝光装置用固定的焦距在给定的曝光场进行曝光不同,该投影透镜用于曝光过程中提供多个焦距。

图 18 中 140 为投影透镜,其上有多个投影像素单元 142,每个投影像素单元 142 的内部是液晶分子,两端接有透明电极。由透明电极通过电场控制中间的液晶分子 151,在电极间给定一个电压,液晶分子就会按照电场的方向运动和排布,形成聚焦需要的焦距,最终模拟成一个理想透镜。每个投影像素单元的电极可以独立给定电压,因此每个投影像素单元可以独立聚焦。投影透镜 140 虽然高度值一定,但通过 142 内部液晶分子的灵活变焦,使得每一子区域焦距不同,能在同一高度上对多个不同焦距的点同时曝光(图 19)。

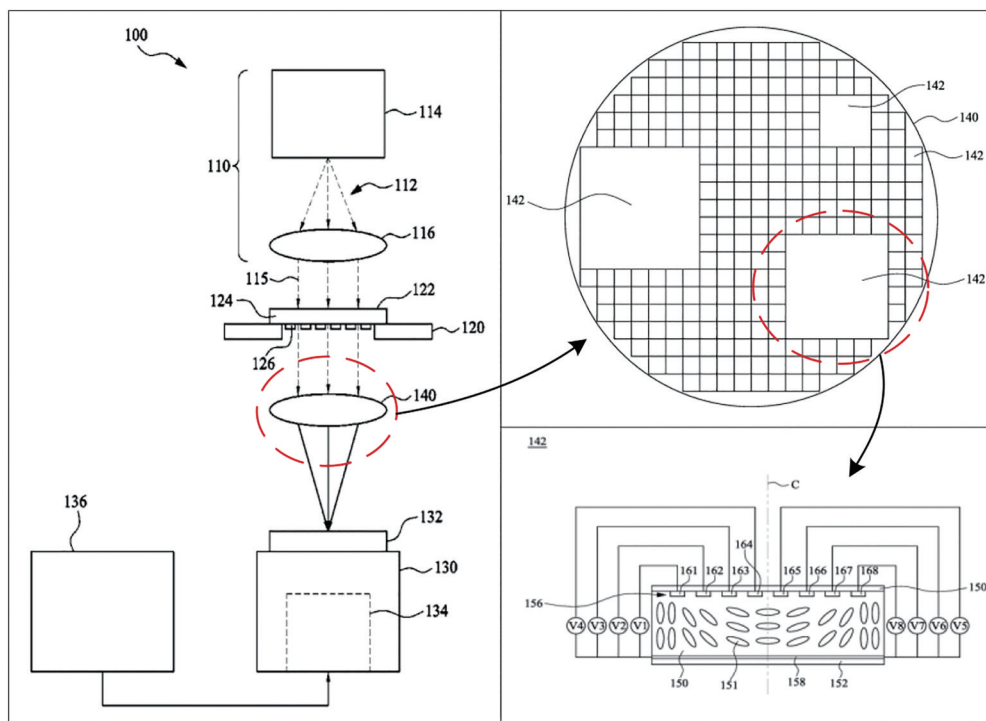


图 18 台积电研发的聚焦控制系统^[23]

Fig. 18 Focus control system developed by tsmc^[23]

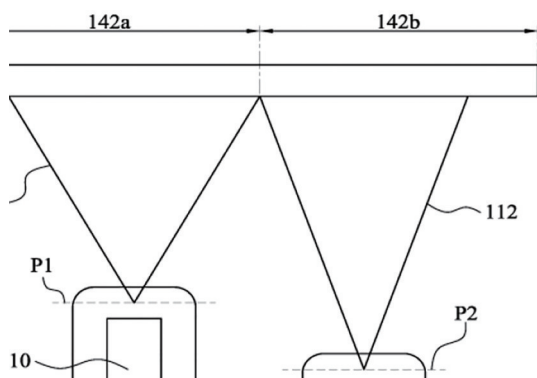


图 19 聚焦控制系统对不同高度的点同时曝光^[23]

Fig. 19 Focus control system exposes at different heights simultaneously^[23]

5.5 调焦调平传感器的工艺适应性问题

在芯片生产过程中,原本光滑的硅片表面会产生大量图形,例如沟槽、接触孔,也会被涂上各种膜层结构,例如光刻胶。当检测光束照射在这些图形或薄膜上时,反射光斑的光强、相位、偏振态等会受到干扰。如果这些干扰无法有效排除或减小,或将产生较大的测量误差,最终影响聚焦控制精度,无法保证曝光表面处于镜头的有效焦深范围,影响产品良率。

ASML 的一种解决方案是采用非光学方法进行测量。图 20 是 ASML 公司的一款气压计调焦调平传感器^[24],其中 R 是参考表面,GR 是参考间隙,

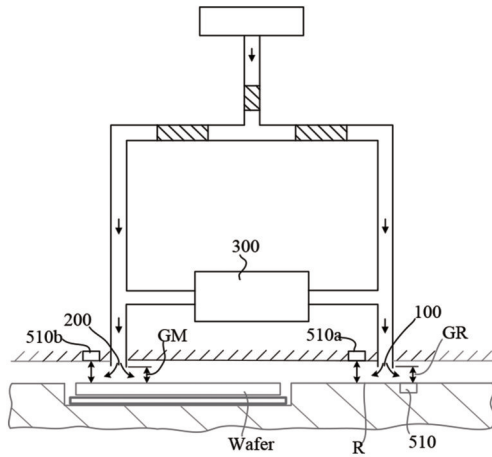


图 20 ASML 公司基于气压计测量的调焦调平传感器^[24]
 Fig. 20 ASML's focusing and leveling sensor based on barometer measurement^[24]

GM 是待测间隙。100 是气体的参考出口, 200 是测量出口。当参考间隙与待测间隙存在差值时, 两条通道的压强差会被传感器 300 检测到, 并被送入控制器, 系统计算间隙高度和压强差的对应关系, 进而得到表面高度分布。510、510a、510b 是三个温度传感器, 通过对温度的测量, 进一步将温度对压强差的影响进行修正, 提高了硅片高度信息的准确度, 可以达到纳米甚至亚纳米级别。

ASML 还利用压力波对硅片表面进行检测^[25], 图 21 中发射器 10 产生的压力波 100 在硅片和投影系统 PS 之间反射, 最终被接收器 11 接收。通过处理器测得压力波 (声速) 传播时间、倾斜角度等, 计算硅片的高度信息。并通过同一位置高度的多次独立测量, 能将 z 向误差降低至 $0.15 \mu\text{m}$; 在浸没式光刻机中, 使用更高频的压力波, 能进一步降低误差到 23 nm 。

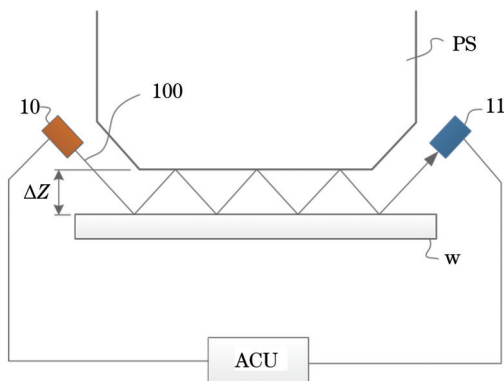


图 21 ASML 公司基于压力波测量的调焦调平传感器^[25]
 Fig. 21 ASML's focusing and leveling sensor based on pressure wave measurement^[25]

由于上述非光学传感器存在测量速度较慢、量程内线性度差等问题, 因此仍无法替代光学式调焦调平传感器。ASML 深入分析了光在工艺膜层例如光刻胶和传感器内反射元件传播产生的古斯-汉钦位移 (Goos-Hänchen shift), 以及它对测量精度的影响, 并在一项基于反射式检测光路的专利^[26]中, 采用对镜或介质反射镜对传感器内的古斯-汉钦位移进行了修正或消除, 保证了调焦调平传感器之间的视在表面凹陷 (apparent surface depression) 为最小, 这种改善有助于提升机器间的匹配性。图 22 为 ASML 公司的一款消古斯-汉钦位移的调焦调平传感器。在入射侧和出射侧采用对镜引导光束, 入射侧一对, 出射侧一对 (复杂光路的反射镜对数会更多), 每一对反射镜的两片金属镜具有相同厚度的涂层, 金属镜的古斯-汉钦位移大小相等方向相反。这样, 每一对镜的古斯-汉钦位移能在内部相互抵消。除此之外, ASML 还通过该方法补偿光在硅片上的工艺膜层结构中产生的古斯-汉钦位移, 即不改变光路中反射镜数量, 仅调整这两侧反射镜的涂层厚度和反射角, 使得由入射侧反射镜产生的古斯-汉钦位移经过硅片表面反射后, 依然能恰巧被出射侧金属镜的古斯-汉钦位移抵消。通过金属镜表面涂层厚度的精确把握, 硅片表面高度测量误差能控制在 $\pm 40 \text{ nm}$ 。ASML 现在使用的调焦调平传感器采用紫外光做光源, 减小测量光穿透光刻胶的厚度, 更有效地减小了工艺结构对测量精度的影响。

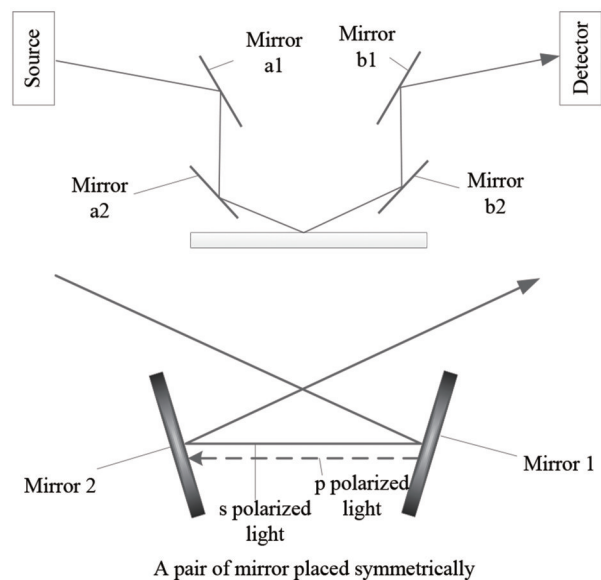


图 22 ASML 公司消古斯-汉钦位移的调焦调平传感器^[26]
 Fig. 22 ASML's focusing and leveling sensor with Goos-Hänchen shift eliminating function^[26]

为消除古斯-汉钦位移对调焦调平测量精度的影响, Nikon 公司成功研发了针对古斯-汉钦位移的补偿装置^[27], 如图 23 所示, 该补偿装置可运用模拟和数字两种补偿方法, 根据不同光谱的检测光在给定硅片表面产生的古斯-汉钦位移不同这一特点, 采

用不同波长和偏振态的检测光对硅片表面进行检测, 在探测端再由不同的检测元件接收, 通过对每一种光谱的古斯-汉钦位移进行线性组合, 通过最小二乘法赋予不同的权重, 使硅片表面的古斯-汉钦位移达到极小。

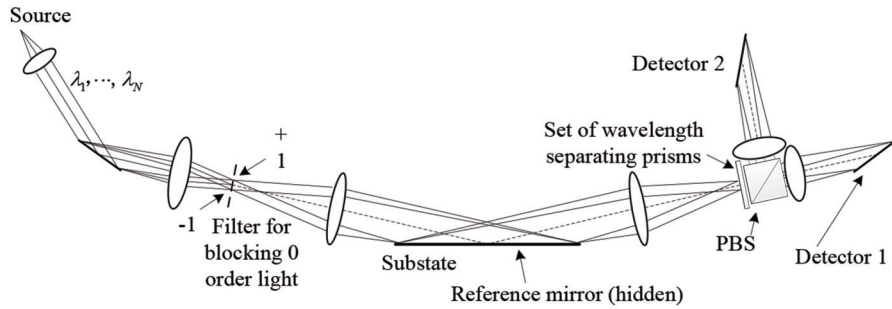


图 23 Nikon 公司具备古斯-汉钦位移补偿的调焦调平传感器^[27]

Fig. 23 Nikon's focusing and leveling sensor with Goos-Hänchen shift compensation function^[27]

孙裕文等^[28]对光刻胶对调焦调平传感器测量精度的影响进行了深入研究(图 24), 研究表明, 工艺相关性误差主要来源于测量光在光刻胶涂层内部的多次反射。不同光刻胶的工艺相关性误差随

光刻胶厚度的变化趋势相同, 随测量光入射角的增大而减小, 因此调焦调平传感器的测量光有必要采用大入射角度, 同时提高光刻胶的涂胶均匀性, 以减少工艺相关性误差。

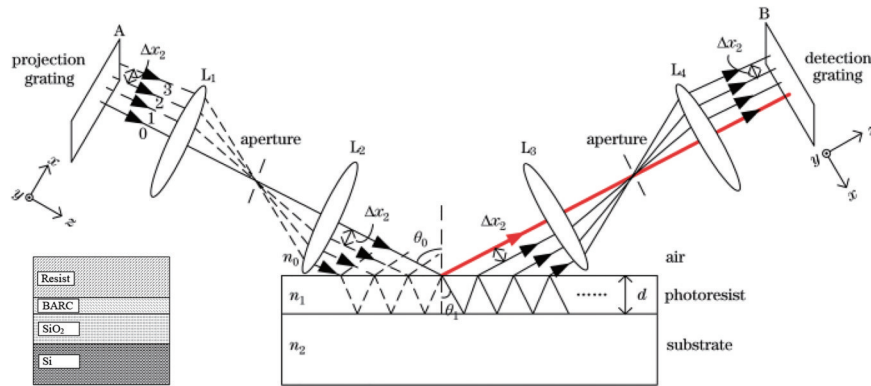


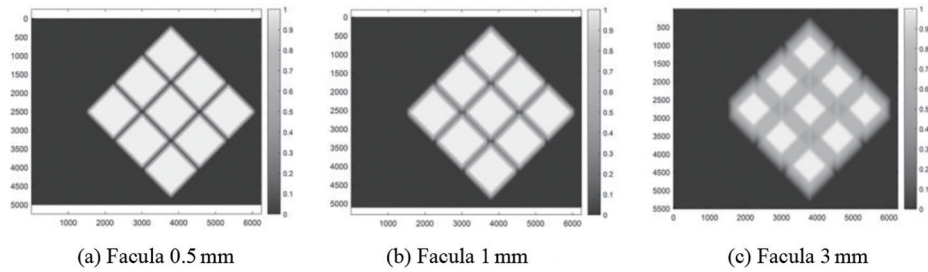
图 24 IC 工艺结构影响调焦调平测量精度原理图, 小图: 硅片上的叠层结构^[28]

Fig. 24 Basic principle of leveling and focusing measurement accuracy affected by IC structure. Inset: stacked structure of processed silicon wafer^[28]

蓝科等^[29]经过实验论证提出: 增加光斑宽度和长度, 能保证光斑部分落入沟槽, 反射光的能量仍能被探测器接收; 增加光斑个数, 可以降低光斑同时落入沟槽的可能性, 使得对待曝光区域的表面高度测量更加可靠, 提高复杂工艺结构下的聚焦控制精度, 如图 25 所示。

反射, 这些多次折反射的光进入探测器, 形成测量干扰。因此解决工艺相关性的最佳解决方案是采用对光刻胶完全反射、至少吸收很强的探测光, 减少、最好消除进入光刻胶的光重新进入探测器的比例, 这点与 ASML 的紫外光调焦调平传感器思路相同。对于剩余的测量光干扰, 应用光在膜层中传播的理论, 通过调节入射光波长、入射角度、偏振态等, 设法将光刻胶匹配成为一个类减反膜结构, 减小出射的干扰光。也可以调整光谱, 使不同波长的入射光在光刻胶层干涉叠加, 在探测器

从以上可以看出, 调焦调平传感器的工艺相关性来源于硅片上光刻胶对探测光的非完全镜面反射, 其中一部分光进入光刻胶内甚至下面的图形上, 从而在光刻胶的上下两个界面形成多次折

图 25 不同长度的光斑在沟槽晶圆表面滑动的仿真结果^[29]Fig. 25 Simulation of different lengths of faculae sliding on wafer's surface with trench^[29]

处形成一个较为均匀的背景光,该均匀背景光对测量精度的影响可通过信号差分的方式加以减小或消除,Nikon和ASML均考虑了这点并做了相关工作,但光谱调整必然带来系统的色差问题。ASML的调焦调平传感器为全反射结构,从根本上杜绝了色差对测量精度的影响,而Nikon的透射式结构则对光谱变化的适应性较差。ASML和Nikon的调焦调平传感器内部均有反射元件,入射光在其上也会产生干涉,其干涉原理与在光刻胶上相同,因此也会影响测量光。如果不对这些干涉进行严格控制,则不同调焦调平传感器测量同一硅片结构时将产生不同的测量结果,从而影响机器间的匹配性,这点ASML进行了充分考虑和补偿,而Nikon未见报道。

6 讨 论

聚焦控制精度是光刻机中随技术节点的降低,其重要性显著提升的四大核心指标之一,在浸没式和EUV光刻机中与套刻指标的重要性几乎相同,在中、低端光刻机中影响则不那么显著。这是因为,随着技术节点的降低,曝光系统的 NA 逐步提高,根据式(1),系统焦深以 NA 的平方的速度降低。随着浸没光刻机中多次曝光的应用,硅片上某一层经过 p 次曝光完成,总的良率为单层良率的 p 次方。为了使 p 次曝光后的产品良率与原单次曝光良率相当,必须提高单层曝光时的聚焦控制精度。重复曝光次数越多,聚焦控制精度要求越高,另外,曝光波长的逐渐减小也使焦深逐渐减小。目前浸没光刻机聚焦控制精度要求已达60 nm及以下,EUV的控制精度要求已达40 nm。而与此相反,最先进的浸没光刻机的分辨力一直保持在38 nm,并不随曝光次数的增加而变化,这对先进光刻机的聚焦控制提出了挑战。

另一方面,由4.1.2节误差分析可见,影响光刻聚焦控制精度的因素极其复杂,这些因素不仅存在

于光刻机内部,还存在于光刻工艺、装机过程中,甚至一些离线测试设备也将影响有效的聚焦控制。这些因素通过式(2)~(4)叠加在一起。如要保证总体聚焦精度达到纳米级别,每一项必须进行认真评估并严格控制,而精确分析每一项因素与离焦误差的关系,评估这些因素对聚焦控制精度的影响,进一步将这些因素限制在允许的范围内又是一项非常繁重的工作。可以说,4.1.2节误差分析中的很多因素都可以作为一个独立的课题进行研究,比如:研究它的产生机理、时间和空间变化特点;研究它与聚焦控制精度的定量关系;研究它与其他误差、子系统的相关性;研究减小该误差的方案和技术;甚至研发评估这些影响的设备。本文难以赘述每一项研究成果,这需要深厚的知识体系支撑和对现象本质的认识能力。仅罗列这些技术挑战,并以调焦调平传感器为例,说明这些研究的深入细致程度——深入到分析镜片的镀膜厚度对测量精度的影响程度。同时,由于光刻性能各影响因素的强耦合关系,各种因素对聚焦控制精度的影响在很多情况下难以采用独立的测试平台单独评估,必须与整机单位相互配合,这对整机单位及其性能的认识能力和组织协调能力也提出了极高的要求。可以说,尽管芯片越来越小,但研究制造芯片的设备所需要的知识和能力则越来越丰富和深刻,进行这些研究的人员的联系也越来越紧密。

在控制聚焦精度的过程中,严格以单个die的良率为控制核心至关重要,这有助于对各项研究提出合理要求。例如控制曝光镜头与工件台的相对关系,当人们理解到只需要保证在曝光一个die的时间间隔内它们的相对关系比较严格时,就可以避免对镜头和工件台的稳定性提出过于苛刻的要求,并设法通过其他手段降低两者的稳定性对产品良率的影响;例如设计聚焦控制指标,只有当人们认识到良率以整个die上的所有位置不能超出焦深范围,而不是

整个硅片的所有区域或者所有硅片的 99.73% 区域为判断标准这个事实,并将其转换为聚焦控制的顶层数学公式,才能进行科学的指标分解。

根据聚焦控制过程提出并理解各项指标的含义和适用范围、深刻理解各项随机误差的特点也非常重要。例如硅片表面起伏,尽管其为随机误差,但硅片表面为低频起伏,进行误差分析时必须选择合适的相关长度,才能得到符合实际的结果;例如工件台的定位精度,假设在整个聚焦控制流程中,工件台的影响出现多次,且均与聚焦控制指标相关,那么其与只影响一次的聚焦流程相比,显然多次出现的流程,其影响权重较高,需对其进行更加严格的限制,其影响通过式(3)和(4)体现。

7 结 论

随着超大规模集成电路技术节点达到纳米量级,光刻机的有效焦深也达到纳米量级,光刻过程中的精确聚焦控制成为影响曝光质量的关键因素。通过建立数学关系,探讨了各种离焦误差与系统总离焦量、以及系统总离焦量与产品良率的关系。其中,某一点某一时刻所有离焦误差的代数和决定了该点的瞬时总离焦量。对于以机器寿命为周期的变量而言,离焦误差服从统计分布,其分布可以用均值和标准差来表示。暂不考虑其他良率影响因素的情况下,当系统总离焦量为正态分布时,系统总的离焦标准差 σ_{total} 需要小于系统焦深的 1/8,才能保证产品良率达到 99.73%。当总离焦量不是正态分布时,情况更为复杂,往往非正态分布误差占比越多,对 σ_{total} 要求越严格。

全面、系统地梳理光刻机中的各项离焦误差是进行误差分析的基本条件,而这些误差的产生及对总离焦量的贡献与光刻聚焦控制过程密不可分。研究了先进的双工件台光刻系统和应用于掩模板制造的 DMD 光刻系统的聚焦控制过程,梳理出相关的离焦误差。其中,双工件台光刻系统中的离焦误差包括且不限于:光源的波长、带宽和偏振态;照明系统的均匀性、照明设置和相干因子;掩模图形布局、三维效应、吸收层的厚度和材料、掩模受热变形、掩模板的高度、平整度、上下表面平行度、掩模台吸附平整度、掩模台上颗粒污染;投影系统像差、机械漂移、热效应、杂散光;调焦调平传感器测量精度、干涉仪/光栅尺的测量精度、工件台/掩模台的聚焦控制精度和同步性、工件台/掩模台 xy 向运动

过程中产生的 z 向偏移、工件台/掩模台的倾斜、硅片/掩模板的装夹变形、掩模台上 z 向传感器测量精度、 z 向干涉仪反射镜面型精度、硅片上颗粒污染、标准面(TIS面)稳定性、各种算法精度;保证光刻机内各个系统正常工作的环境因素,例如温度、湿度、振动、噪声;机器装调时的最佳曝光面的确定精度;各种在线、离线测试评估设备的测试精度;硅片面型;光刻胶等。对于制备掩模板的数字光刻系统,由于调焦调平传感器与曝光镜头同时移动,需要考虑调焦调平传感器的参考零位与最佳曝光面的标定精度、曝光过程中传感器零位与镜头最佳曝光面的一致性等问题。同时,这类光刻机一般不进行倾斜调整,需要在进行结构设计时保证曝光过程中最佳曝光面与掩模板上表面的倾斜误差可以忽略。

在以上影响聚焦控制精度的因素中,调焦调平传感器起着非常重要的作用。目前调焦调平传感器主要采用光学的检测方法,测量硅片表面的高度和硅片的倾斜度,控制工件台对硅片位置进行调整,使曝光区域始终处于焦深范围内。调研了 Canon, Nikon, ASML 和台积电的调焦调平传感器和聚焦控制系统,并对传感器的工艺适应性进行了探讨。各家公司和单位的光刻设备不同,调焦调平传感器也各有特点,调焦调平的方式也在不断改进,从早期整场调平转变为逐场调平,检测光路逐渐复杂,测量精度、效率和工艺适应性不断提高,保证了聚焦控制的准确性。

最后对光刻机的聚焦控制精度提出了一些分析和见解,供抛砖引玉。

参 考 文 献

- [1] 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.
Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 梁庆九. 基于 365 nm LED 光源的无掩模数字光刻特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017: 4-6.
Liang Q J. Research of characters of maskless digital lithography based on 365 nm LED light source[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017: 4-6.
- [3] 刘志涛. PCB 数字光刻投影光学设计及其扫描与控制技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015: 1-3.
Liu Z T. Research on PCB digital lithography projection optics design as well as scanning and its control technology[D]. Guangzhou: Guangdong University

- of Technology, 2015: 1-3.
- [4] ASML. What's next after EUV NXE? Reaching High-NA[EB/OL]. [2021-05-06]. <https://www.asml.com>.
- [5] 钟志坚. 先进光刻中曝光系统对聚焦控制性能的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 22-33.
Zhong Z J. Impact of exposure system on focus control performance in advanced lithography[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 22-33.
- [6] 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.
- [7] Ausschnitt C P, Brunner T A. Distinguishing dose, focus, and blur for lithography characterization and control[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65200M.
- [8] Lee S H, Zhang Z Y. Process window study with various illuminations for EUV lithography applications [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6517: 65172P.
- [9] Ho G H, Cheng A, Chen C J, et al. Lens heating-induced focus drift of I-line step and scan: correction and control in a manufacturing environment[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4344: 289-296.
- [10] Bakshi V. EUV lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2018: 627-631.
- [11] 钟志坚, 李琛毅, 李世光, 等. 先进光刻中的聚焦控制预算 (I): 光路部分 [J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1104-1119.
Zhong Z J, Li C Y, Li S G, et al. Budget analysis of focus control in advanced lithography(I): optical path [J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1104-1119.
- [12] 周国尊, 何敏菲, 杨臻垚, 等. 基于边缘光抑制技术的双光束激光直写纳米光刻系统 [J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202001.
Zhou G Z, He M F, Yang Z Y, et al. Dual-beam laser direct writing nano-lithography system based on peripheral photoinhibition technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202001.
- [13] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用 [J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823018.
Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823018.
- [14] Suzuki A, Yabu S, Ookubo M. Intelligent optical system of a new stepper[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 0772: 58-65.
- [15] Satoru O, Hideki I. Lithography apparatus, lithography method, and method of manufacturing article: US10488764[P]. 2019-12-26.
- [16] Imai Y, Tanaka Y, Wakamoto S. Method of and apparatus for detecting plane position: US5502311 [P]. 1996-03-26.
- [17] Hagiwara T, Hamatani M, Tashiro H, et al. Wafer edge-shot algorithm for wafer scanners[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4691: 790-801.
- [18] Hidaka Y, Nagayama T. Surface position detection apparatus, exposure apparatus, and exposure method: US9069261[P]. 2015-06-30.
- [19] Goodwin E P, Smith D G. Interferometric level sensor: US20160025480A1[P]. 2016-01-28.
- [20] Simon R H, Marinus P R. Level sensor and lithographic apparatus: NL2022732A[P]. 2019-10-16.
- [21] Jasper J C M, Loopstra E R, Modderman T M, et al. Off-axis levelling in lithographic projection apparatus: EP1037117A2[P]. 2000-09-20.
- [22] Nelson M L, Kreuzer J L, Filosi P L, et al. Method and system for improving focus accuracy in a lithography system: EP1253471A2[P]. 2002-10-30.
- [23] Liao C H, Wu M C. Lithography apparatus and method using the same: US10775706[P]. 2020-09-15.
- [24] Ruud H M J B, Johan G C K, Joseph H L, et al. Level sensor and lithographic apparatus incorporating a level sensor: NL2023704A[P]. 2019-08-26.
- [25] Bruinsma A J A, Staals F, Wijk R J V, et al. Level sensor, lithographic apparatus and device manufacturing method: US20060138347A1[P]. 2006-06-29.
- [26] Teunissen P A A, Broodbakker P J M, Queens R M G J. Level sensor for lithographic apparatus: EP1439428A2[P]. 2004-07-21.
- [27] Smith D G, Goodwin E P. Compensation for Goos-Hanchen error in autofocus systems: US2011071784 A1[P]. 2011-03-24.
- [28] 孙裕文, 李世光, 叶甜春, 等. 纳米光刻中调焦调平测量系统的工艺相关性 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812001.
Sun Y W, Li S G, Ye T C, et al. Process dependency of focusing and leveling measurement system in nanoscale lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812001.
- [29] 蓝科, 陈雪影, 刘道. 沟槽晶圆调焦调平测量工艺适应性分析 [J]. 中国设备工程, 2021(13): 125-127.
Lan K, Chen X Y, Liu X. Adaptability analysis of measurement technology of Groove Wafer focusing and leveling[J]. China Plant Engineering, 2021(13): 125-127.