

调焦调平传感器增益系数工艺相关性研究

孙生生^{1,2**}, 王丹¹, 宗明成^{1,2*}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

摘要 针对先进光刻调焦调平传感器系统的增益系数工艺相关性开展理论仿真与实验研究。建立了增益系数工艺相关性理论模型, 仿真分析了调焦调平传感器增益系数与测量误差随不同光刻工艺材料膜层厚度的变化规律。在自研实验系统上对表面涂覆不同厚度 SiO₂ 薄膜的硅片样品进行了实验验证, 发现实验与理论仿真得到的增益系数与测量误差随膜层厚度的变化规律一致。仿真与实验研究结果表明, 调焦调平传感器的工艺相关性测量误差在 SiO₂ 膜层厚度为 250 nm 和 690 nm 附近时分别出现约 55.9 nm 和 36.6 nm 的误差峰值。采用表面覆盖特定膜层的硅片来标定光刻机调焦调平传感器, 可以有效减小增益系数工艺相关性的影响和测量误差。本研究结果对于光刻精密对焦控制、光刻工艺优化具有重要的参考意义。

关键词 测量; 调焦调平传感器; 增益系数; 工艺相关性; 对焦控制

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0412002

Gain Coefficient Process Dependency of Focusing and Leveling Sensor

Sun Shengsheng^{1,2**}, Wang dan¹, Zong Mingcheng^{1,2*}¹*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In this paper, the theoretical simulation and experimental investigation are carried out on the gain coefficient process dependency of the advanced lithography focusing and leveling sensor. The theoretical model of gain coefficient process dependency was established to simulate and analyze the variations in the gain coefficient and measurement error of the focusing and leveling sensor with the film thickness of different materials for lithography process. The silicon wafers coated with SiO₂ films of different thicknesses were tested in our self-developed experimental system. The experimental results of variations in the gain coefficient and the measurement error with the film thickness are consistent with the theoretical simulation results. Simulation and experimental results show that the process dependency measurement error of the focusing and leveling sensor has the peak values about 55.9 nm and 36.6 nm at the SiO₂ film thicknesses of 250 nm and 690 nm, respectively. Using the silicon wafer coated with the specific film to calibrate the focusing and leveling sensor of the lithography machine can considerably reduce the effect of the gain coefficient process dependency and its measurement error. The investigation results of this paper can be used as reference to optimize the focusing control and lithography process.

Key words measurement; focusing and leveling sensor; gain coefficient; process dependency; focusing control

1 引言

调焦调平测量传感器是光刻机精密对焦控制的核心部件, 用于对光刻曝光前硅片表面高度形貌的

分析。增益系数作为调焦调平传感器机器常数, 用于计算硅片表面测量高度。光刻机中, 通常用标准裸硅片调焦调平传感器的增益系数进行标定, 但实际测量中因硅片表面存在 IC 工艺结构而产生测量

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101006)

通信作者: *zongmingcheng@ime.ac.cn; **sunshengsheng@ime.ac.cn

误差。目前国际主流光刻机产品中调焦调平传感器一般采用精密光学测量系统,它的测量光束与硅片表面的工艺结构(光刻胶、氧化层、金属层等)相互作用,可能产生光学多光束干涉等现象,从而使硅片高度形貌测量结果出现偏差^[1]。研究调焦调平传感器测量精度与工艺相关的特性,对光刻对焦控制、调焦调平传感器的改进、光刻工艺优化等具有重要意义。1992年, van der Werf^[2]针对 PAS 型光刻机中调焦调平传感器,提出采用宽光谱光源减小测量系统对硅片高度测量结果的影响。2008年, Nikon 公司 Hidaka 等^[3]提出通过在调焦调平测量系统中加入相位掩模版进行补偿,从而减小工艺相关性误差。2012年, Smith^[4]提出了一种通过优化光源不同偏振态的光谱分布来提高测量精度的方案。2016年, 孙裕文等^[5]给出一种调焦调平测量系统的工艺相关性测量误差模型,提出通过增大入射角来减小工艺相关性测量偏差的方法。但是目前尚未见调焦调平传感器的增益系数工艺相关性的研究报道。

本文建立了调焦调平传感器的增益系数工艺相关性模型,分析了硅片表面光刻工艺材料膜层与调焦调平传感器增益系数之间的关系。针对典型的硅片表面光刻工艺膜层结构,仿真分析了增益系数随光刻工艺膜层厚度的变化规律。制备了具有 16 个 SiO₂ 薄膜厚度的硅片样品,利用自研的调焦调平测量系统实验研究平台,在不同膜层厚度区域内分别对传感器的增益系数进行测量,得到增益系数与测量误差随薄膜厚度的变化规律,并将实验与仿真结果进行对比分析。

2 增益系数工艺相关性理论模型

本文中光学三角法调焦调平测量系统采用了全反射式投影成像^[6]与空间分光技术^[7]。投影光栅经过投影成像系统后,以一定入射角度成像到硅片表面,形成探测光斑,测量光束经过测量面的反射后进入探测成像系统,在探测光路中加入分光组件以将测量光束分成空间位置相差半个周期的 O 光与 E 光,使其分别透过同一探测光栅。使用光电探测器对 O 光与 E 光的光强信号分别进行检测,计算得到硅片表面高度的中间结果为

$$h_{\text{raw}} = \frac{I_{\text{O}} - I_{\text{E}}}{I_{\text{O}} + I_{\text{E}} - 2V_{\text{offset}}}, \quad (1)$$

式中: I_{O} 、 I_{E} 分别为 O 光、E 光的光强信号; V_{offset} 为偏置电压。

代入(1)式的计算结果 h_{raw} , 计算得到硅片表面

测量高度 h_{m} 为

$$h_{\text{m}} = \sum_{i=1}^k \alpha_i h_{\text{raw}}^i, \quad (2)$$

式中: k 为多项式的拟合阶数, $k=1, 2, \dots$; α_i 为系统增益系数。

硅片表面测量高度 h_{m} 为调焦调平传感器的最终测量结果,与硅片表面真实的高度 h 往往存在偏差,该偏差即为系统测量误差。为减小系统测量误差,通过高精度传感器(本文采用激光干涉仪)监控硅片表面真实的高度 h , 然后使用 h 对 h_{m} 进行标定,获取系统增益系数 α_i 。

系统增益系数作为机器常数,在测量前需要使用标准裸硅片对其进行标定。 h_{raw} 随硅片表面高度变化的曲线为类正弦曲线^[6-7], 调焦调平传感器的高精度测量范围在该曲线线性度较好的区域。对增益系数进行标定时,采用受电容传感器或激光干涉仪控制的高精度工件台作为参考标准对其进行校准。将标准裸硅片放置到工件台上,在传感器测量范围内上下移动工件台,同时获取工件台位置数据 h 与调焦调平传感器的中间测量结果 h_{raw} 。采用最小二乘法将两者进行多项式拟合,得到的各项拟合系数即为增益系数。

调焦调平成像系统属于衍射受限系统,投影光栅经过光学投影成像系统后,在硅片位置的像是投影光栅与成像系统点扩展函数的卷积,如图 1 所示。

硅片测量表面投影光栅像的强度复振幅为

$$E(x, y, \lambda) = t_{\text{p}}(x, y) \otimes F_{\text{ps}}(x, y, \lambda), \quad (3)$$

式中: $t_{\text{p}}(x, y)$ 为投影光栅透过率; $F_{\text{ps}}(x, y, \lambda)$ 为成像系统的点扩展函数; λ 为光源波长。

硅片表面的光栅像经过硅片、探测光学系统、分光系统和探测光栅后, O 光与 E 光的复振幅分布分别为

$$E_{\text{os/op}}(x, y, \lambda) = E(x + \Delta x_1, y, \lambda) \cdot r_{\text{o, s/p}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{es/ep}}(x, y, \lambda) = E(x + \Delta x_1 - P/2, y, \lambda) \cdot r_{\text{o, s/p}}, \quad (5)$$

式中: P 为光栅周期; $\Delta x_1 = 2h \sin \theta_0$, h 为测量面高度, θ_0 为测量光束的入射角度; $r_{\text{o, s/p}}$ 为硅片表面的反射系数,下标 s、p 分别对应 s 偏振态与 p 偏振态;下标 os 和 op 分别代表测量光束 s 和 p 分量经过分光系统后在测量光 O 中的分量;下标 es 和 ep 分别代表测量光束 s 和 p 分量经过分光系统后在测量光 E 中的分量。

利用探测单元对两路光强进行探测,硅片表面高度为 h 时, O 光与 E 光的光强表达式为

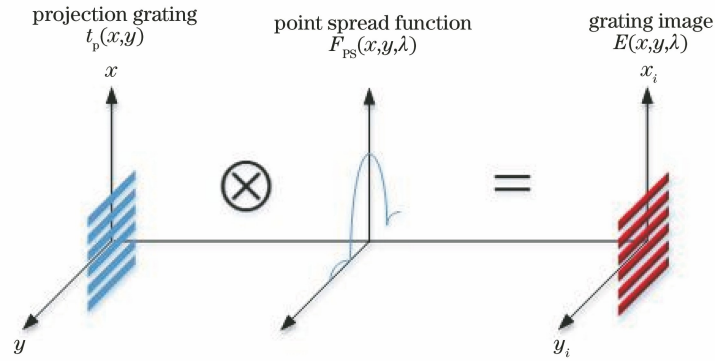


图 1 调焦调平传感器成像系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging system model of focusing and leveling sensor

$$I_o(h) = \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \int_{-NP/2}^{NP/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |E_{os} \cdot t_d(x, y)|^2 d\lambda dx dy + \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \int_{-NP/2}^{NP/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |E_{op} \cdot t_d(x, y)|^2 d\lambda dx dy, \quad (6)$$

$$I_e(h) = \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \int_{-NP/2}^{NP/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |E_{es} \cdot t_d(x, y)|^2 d\lambda dx dy + \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \int_{-NP/2}^{NP/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |E_{ep} \cdot t_d(x, y)|^2 d\lambda dx dy, \quad (7)$$

式中: $t_d(x, y)$ 为探测光栅的透过率; N 为光栅数量; P 为光栅周期; L_1 为光栅长度; λ_1 与 λ_2 分别为光源的最小波长和最大波长。

将(6)、(7)式代入(1)式中, 即可得到传感器数据 h_{raw} 。采用最小二乘法将 h_{raw} 与 h 进行多项式拟合, 从而得到采用裸硅片标定的调焦调平传感器的增益系数。

根据光刻工艺的具体需求, 实际待测硅片表面已涂有光刻胶、抗反射层等, 光刻胶下面往往还有氧

化层、金属层等结构层。硅片上不同区域的光刻胶等材料厚度也可能存在差异, 表面相对高度也不一样, 因此, 硅片表面不同的光刻工艺结构可能引起调焦调平传感器增益系数的变化。最简单、常用的工艺结构是在硅衬底材料上涂敷一层光刻胶或氧化层, 测量光束照射到硅片表面薄膜层时可能发生多次反射, 产生多光束干涉现象^[5]。结合菲涅耳公式、探测光栅处 O 光与 E 光复振幅公式[(4)式和(5)式], 可得经过硅片反射后的光场复振幅为

$$E_{os/op}(x, y, \lambda, d) = E(x + \Delta x_1, y, \lambda) \cdot r_{0,s/p} + \sum_{n=1}^{+\infty} E(x + \Delta x_1 + \Delta x_2 \cdot n, y, \lambda) \cdot r_{2,s/p} (1 - r_{0,s/p}^2) \cdot (-r_{0,s/p} r_{2,s/p})^{n-1} \exp(in\varphi), \quad (8)$$

$$E_{es,ep}(x, y, \lambda, d) = E(x + \Delta x_1 - P/2, y, \lambda) \cdot r_{0,s/p} + \sum_{n=1}^{+\infty} E(x + \Delta x_1 - P/2 + \Delta x_2 \cdot n, y, \lambda) \cdot r_{2,s/p} (1 - r_{0,s/p}^2) \cdot (-r_{0,s/p} r_{2,s/p})^{n-1} \exp(in\varphi), \quad (9)$$

式中: d 为膜层厚度; $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (2n_1 d \cos \theta_1)$, θ_1 为测量光束从空气进入硅片表面薄膜层的折射角, $\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} \sin \theta_0\right)$, n_1 为薄膜材料的折射率; $\Delta x_2 = 2d \tan \theta_1 \cos \theta_0$; r_2 为薄膜与衬底界面处的反射率。

将(8)、(9)式分别代入(6)、(7)式, 计算求得不同光刻胶/氧化物膜层厚度条件下的光强, 再将其代入(1)式得到调焦调平传感器的初步测量结果 h_{raw} ,

采用最小二乘法将 h_{raw} 与 h 进行多项式拟合, 从而得到采用工艺硅片样品标定的调焦调平传感器的增益系数。

3 仿真分析

基于增益系数工艺相关性理论模型对增益系数进行仿真。根据实验系统^[7]参数对仿真输入参数进行设置, 投影光栅和探测光栅的周期均为 $30 \mu\text{m}$, 光源光谱范围为 $600 \sim 1000 \text{ nm}$, 测量光束的入射角度为 70° 。

使用裸硅片进行标定时,采用最小二乘法对增益系数进行拟合,拟合误差与多项式拟合阶数的关系如图 2 所示。当多项式拟合阶数大于 5 时,拟合误差小于 1 nm,并且随着多项式阶数的增加,拟合误差不再减小^[8]。因此,采用 5 阶多项式拟合得到增益系数。

仿真选取 ArF193nm 光刻机中常用的 PAR870 (193)光刻胶、PI6133(193i)光刻胶、TAI7092(193i)光刻胶及工艺材料 SiO₂ 进行分析,根据柯西公式计算材料折射率,硅片表面膜层的厚度范围为 0~800 nm,硅材料基底、材料折射率与光刻胶柯西系数(N₁、N₂ 和 N₃)如表 1 所示。

表 1 模拟模型的硅材料基底、材料折射率与光刻胶柯西系数

Table 1 Silicon substrate, refractive index, and Cauchy coefficient of photoresist in simulation model

Material	Refractive index at 800 nm	Cauchy coefficient		
		N ₁	N ₂ /μm ⁻²	N ₃ /μm ⁻⁴
PAR870	1.46	1.45815	0.015861	0.000550
PI6133	1.52	1.49930	0.007264	-0.000210
TAI7092	1.50	1.49760	0.010078	0.000775
SiO ₂	1.47	—	—	—
Si	3.68	—	—	—

在自研调焦调平传感器的一 1.25~1.25 μm 高度测量范围内,各阶增益系数随膜层厚度的变化曲线如图 3 所示。仿真分析结果表明,SiO₂ 与三种光刻胶的增益系数随膜层厚度的变化趋势基本相同,其主要原因是 4 种材料在调焦调平传感器所采用的光谱范围内的折射率相近。其中增益系数奇数项 α₁、α₃、α₅ 随膜层厚度的变化趋势一致,α₂ 与 α₄ 随膜层厚度的变化趋势相反,α₄ 与奇数项的变化趋势大体上一致。由于 SiO₂ 薄膜具有较好的稳定性,且可以在同一个硅片上制备不同厚度的 SiO₂ 薄膜,因此选用 SiO₂ 膜层开展后续增益系数工艺相关性的仿真分析与实验研究。增益系数随膜层厚度出现波动是由测量光束在硅片表面 SiO₂ 膜层中多次反射引起的多光束干涉现象造成的。

调焦调平传感器的最终测量结果是根据(2)式计算得到的,增益系数的变化将引起测量误差。在一 1.25~1.25 μm 高精度测量范围内,对各阶增益系数变化引起的测量误差进行仿真分析,当对其中一个增益系数进行计算时,其余增益系数保持不变。根据图 3 中各阶增益系数的变化范围,可得测量误差的仿真结果如表 2 所示,一阶增益系数变化引起的测量误差可达 62.8 nm,其余高阶增益系数的变化引起的测量误差小于 6 nm。从仿真结果可以看出,调焦调平传感器的增益系数工艺相关性的特性

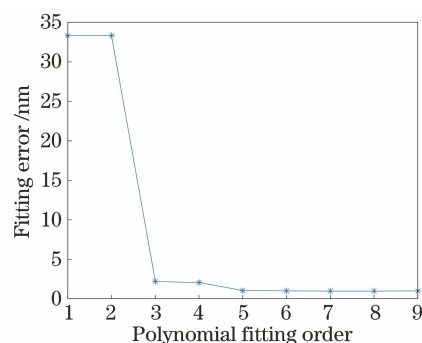


图 2 拟合误差与多项式拟合阶数的关系

Fig. 2 Relationship between fitting error and polynomial fitting order

主要由一阶增益系数决定。

表 2 各阶增益系数变化引起的测量误差

Table 2 Measurement error caused by change of each gain coefficient

Coefficient	Initial value	Change value	Measurement error /nm
α ₁	4.0014	0.1800	62.8
α ₂	-0.0013	0.0014	1.8
α ₃	1.6321	0.2000	5.3
α ₄	0.0223	0.0300	1.8
α ₅	2.2373	0.6500	1.8

从仿真分析结果(图 3)可以看出,SiO₂ 的膜层厚度为 250 nm 和 690 nm 时,增益系数 α₁、α₃、α₅ 的变化曲线出现较大波峰。当测量表面 SiO₂ 薄膜的厚度分别为 0 nm(裸硅片)、250 nm 和 690 nm 时,可以通过仿真计算得到调焦调平传感器的各阶增益系数,如表 3 所示。由此可见,当使用标准裸硅片标定调焦调平传感器的增益系数,并将其用于计算表面涂敷工艺涂层(光刻胶、SiO₂ 等)硅片的高度时将可能产生工艺相关性测量误差。

在自研调焦调平传感器的一 1.25~1.25 μm 高精度测量范围内,通过仿真得到 SiO₂ 膜层厚度在 50~800 nm 范围内,由增益系数变化引起的测量误差曲线如图 4(a)所示,在膜层厚度为 250 nm

和 690 nm 时理论仿真误差分别达到 49.8 nm 和 35.5 nm。这种工艺相关的测量误差将会影响光刻机的对焦控制性能,有必要采取相应措施消除或减小测量误差。可能的技术方案是采用表面涂

敷特定厚度 SiO₂ 或光刻胶膜层的标准硅片直接标定光刻机的调焦调平传感器增益系统,理论仿真分析结果如图 4 (b) 所示,在膜层厚度为 50 ~ 800 nm 范围内理论测量误差小于 0.05 nm。

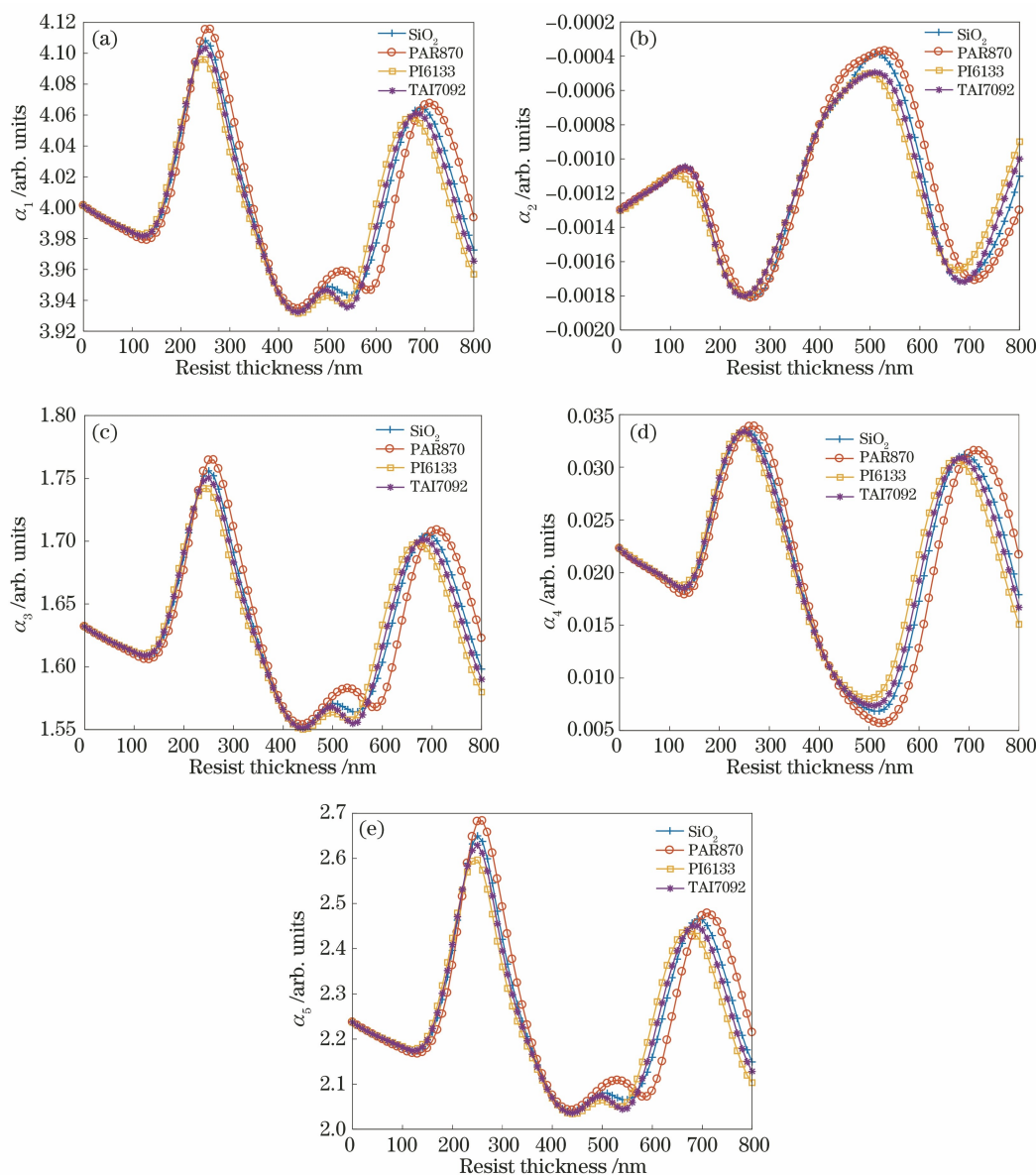


图 3 增益系数随膜层厚度的变化曲线。(a) 一阶增益系数;(b)二阶增益系数;(c)三阶增益系数;(d)四阶增益系数;(e)五阶增益系数

Fig. 3 Change of gain coefficient with film thickness. (a) First-order gain coefficient; (b) second-order gain coefficient; (c) third-order gain coefficient; (d) fourth-order gain coefficient; (e) fifth-order gain coefficient

表 3 SiO₂ 薄膜厚度分别为 0,250,690 nm 时的各阶增益系数

Table 3 Gain coefficient of each order for SiO₂ film thicknesses of 0, 250, and 690 nm

SiO ₂ film thickness /nm	Coefficient				
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
0	4.0014	-0.0013	1.6321	0.0223	2.2373
250	4.1081	-0.0018	1.7560	0.0335	2.6501
690	4.0647	-0.0017	1.7057	0.0312	2.4659

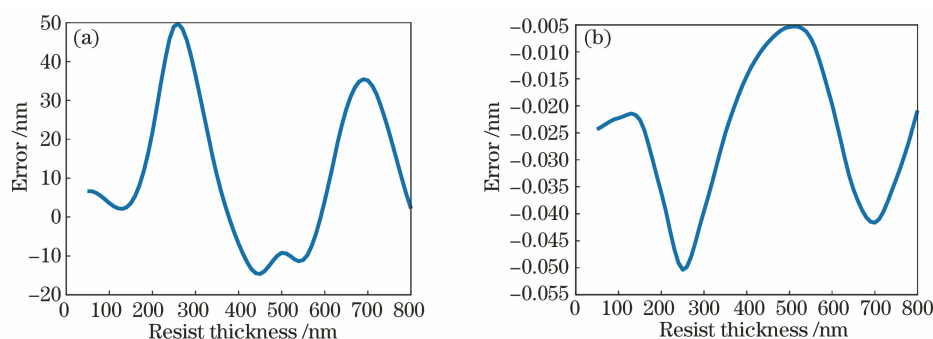


图 4 理论仿真得到的测量误差随膜层厚度的变化曲线。(a)使用标准裸硅片进行标定;
(b)使用表面带特定工艺膜层的硅片进行标定

Fig. 4 Theoretically simulated results of measurement error varying with film thickness. (a) Using standard bare silicon wafers for calibrating; (b) using silicon wafer with specific process film on surface for calibrating

4 实验验证研究

为验证上述调焦调平传感器的增益系数工艺相关性理论模型与仿真分析结果,设计制作了具有不同 SiO_2 膜层厚度的硅片样品,在自研的光刻调焦调平传感器研究平台^[7]上开展实验测试研究,并与增益系数工艺相关性仿真结果进行对比分析。

硅片选用 SUMCO 公司的 8 inch (1 inch = 2.54 cm) 双面抛光裸硅片(硅片厚度变化小于 $2 \mu\text{m}$),通过等离子体增强化学气相沉积的方式在 16 个区域制备出不同厚度的 SiO_2 薄膜,工艺样品的实物照片如图 5 所示。图中不同颜色的 SiO_2 薄膜条纹具有不同厚度,膜层厚度范围为 $50 \sim 800 \text{ nm}$,条纹宽度为 10 mm ,间隔为 10 mm ,其余区域为裸硅片。使用椭圆偏仪对 16 个区域内的 SiO_2 薄膜厚度进行测量,测量结果如表 4 中第 2 列所示。



图 5 SiO_2 膜层工艺硅片样品实物图

Fig. 5 Physical picture of silicon wafer coated with SiO_2 film

利用自行研制的调焦调平测量系统对硅片样品的高度形貌进行测量,调焦调平传感器的精测范围为 $-1.25 \sim 1.25 \mu\text{m}$,重复性精度优于 10 nm ^[7]。硅片放置在由激光干涉仪控制的 6 维运动台上,它在垂直方向的移动范围为 1 mm ,水平方向的移动范围为 300 mm ;垂直方向的运动分辨率为 0.15 nm ,

重复性精度优于 5 nm ;为避免震动对测量结果的影响,将实验平台放置在主动隔震器上;为保证测试环境温度、湿度和气压的稳定性,将整个实验平台放置在精密控制的工作环境中。

首先移动工件台,使调焦调平传感器的测量光束对准裸硅片区域,对调焦调平传感器系统的增益系数进行标定,得到与工艺无关的增益系数。然后移动工件台,使测量光束对准硅片上不同 SiO_2 膜层区域,对系统增益系数重新进行标定,得到与工艺相关的调焦调平传感器系统的各阶增益系数,其中一阶增益系数 α_1 的测量结果如表 4 中第 3 列所示。在每个标定过程中,同时存储调焦调平传感器的中间测量结果 h_{raw} 和激光干涉仪的高度监控结果 h 。将使用裸硅片标定的调焦调平传感器的增益系数和 h_{raw} 代入(2)式,通过计算得到工艺硅片的表面高度测量结果,该值与 h 的差值为工艺相关性的测量误差 1,实验结果如表 4 中第 4 列所示。将使用硅片对应膜层区域标定的调焦调平传感器的增益系数与 h_{raw} 代入(2)式,计算得到工艺硅片的表面高度测量结果,该值与 h 的差值为测量误差 2,实验结果如表 4 中第 5 列所示。

SiO_2 薄膜厚度在 $50 \sim 800 \text{ nm}$ 范围内,调焦调平传感器系统的工艺相关性测量误差的仿真与实验结果对比如图 6(a)所示。调焦调平传感器系统的工艺相关性一阶增益系数随薄膜厚度变化的仿真与实验结果对比如图 6(b)所示。从对比结果可以看出:1)实验结果与仿真结果基本一致,这验证了调焦调平传感器的增益系数工艺相关性理论仿真模型的正确性;测量误差随薄膜厚度的变化趋势与一阶增益系数随薄膜厚度的变化趋势基本一致,增益系数工艺相关性可能造成较大的测量误差;2)从图 6

(a)可以看到,如果使用裸硅片标定的增益系数计算工艺硅片的测量高度时,调焦调平传感器的工艺相关性测量误差在 SiO₂ 膜层厚度为 250 nm、690nm 附近时出现约 55.9 nm、36.6 nm 的误差峰值;3)如果使用覆盖相应 SiO₂ 膜层的硅片区域直接标定调焦调平传感器的增益系数时,在 SiO₂ 膜

层厚度为 250 nm 和 690 nm 附近的测量误差绝对值分别减小到 11.3 nm 和 4.1 nm,见表 4。因此,可以根据工艺硅片表面结构特点设计制作带有表面膜层的专用硅片,用于标定光刻机的调焦调平传感器,从而有效减小增益系数工艺相关性的影响,减小测量误差。

表 4 不同 SiO₂ 膜层厚度时最大测量误差与一阶增益系数

Table 4 Maximum measurement error and first-order gain coefficient for different SiO₂ film thickness

Experimental No.	SiO ₂ thickness /nm	α_1	Measurement error 1		Measurement error 2	
			at 1.25 μm /nm		at 1.25 μm /nm	
1	49.2	4.0109	22.9	8.7		
2	100.5	3.9709	2.8	-6.6		
3	150.3	3.9875	10.9	0.2		
4	201.2	4.1058	48.6	-7.1		
5	253.8	4.1200	55.9	-11.3		
6	305.8	4.0138	23.3	-1.1		
7	357.7	3.9712	11.6	0.5		
8	406.7	3.9607	7.7	12.6		
9	455.6	3.9485	0.7	-2.7		
10	502.8	3.9432	14.2	15.3		
11	549.3	3.9614	-2.2	-1.4		
12	592.3	3.9918	18.7	-2.7		
13	651.5	4.0274	31.2	6.6		
14	695.4	4.0618	36.6	-4.1		
15	757.8	4.0471	33.3	0.6		
16	807.6	3.9684	24.3	6.0		

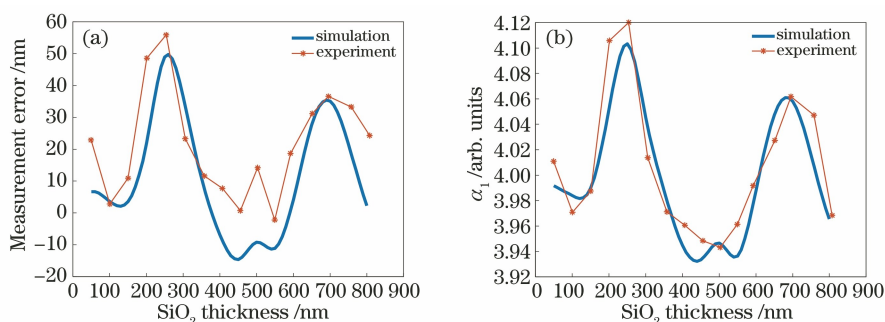


图 6 实验与仿真结果对比。(a)测量误差随膜层厚度的变化曲线;(b)一阶增益系数随膜层厚度的变化曲线

Fig. 6 Comparison of experimental and simulation results. (a) Variation of measurement error with film thickness; (b) variation of first-order gain coefficient with film thickness

5 结 论

根据调焦调平传感器测量原理,建立了调焦调平传感器的增益系数工艺相关性理论仿真模型,选取 4 种光刻工艺材料(PAR870、PI6133、TAI7092 光刻胶与 SiO₂)进行仿真分析。在自研光刻调焦调平传感器的工艺相关性实验研究平台上,对具有 16 个不同 SiO₂ 薄膜厚度的硅片样品进行测试。仿真分析结果表明:4 种光刻工艺材料的增益系数随膜

层厚度的变化趋势基本相同。调焦调平传感器的工艺相关性测量误差与一阶增益系数随膜层厚度的变化规律基本一致,在 50~800 nm 膜层厚度范围内,调焦调平传感器的增益系数变化分别在膜层厚度为 250 nm 和 690 nm 时出现较大峰值,由此引起的测量误差也比较大。实验与仿真结果基本一致,这验证了调焦调平传感器的增益系数工艺相关性理论仿真模型的正确性,调焦调平传感器的工艺相关性测量误差在 SiO₂ 膜层厚度为 250 nm 和 690 nm 附近

时分别出现约 55.9 nm 和 36.6 nm 的误差峰值,增益系数工艺相关性可能会引起较大的测量误差。

本文研究结果对光刻精密对焦控制与光刻工艺优化具有重要指导意义。在选择光刻胶、SiO₂ 等工艺层的厚度时,应尽量避免调焦调平传感器的增益系数变化较大的 250 nm 和 690 nm 等膜层厚度区域;必要时可以根据集成电路工艺硅片表面结构特点,设计制作带有表面膜层的专用硅片来标定光刻机的调焦调平传感器,以有效减小增益系数工艺相关性的影响和测量误差。

参 考 文 献

- [1] de Boeij W P, Pieternella R, Bouchoms I, et al. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8683: 86831L.
- [2] van der Werf J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1992, 10(2): 735-740.
- [3] Hidaka Y, Uchikawa K, Smith D G. Error analysis and compensation method of focus detection in exposure apparatus [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 26(1): 10-18.
- [4] Smith D G. Wafer thin film effects in lithographic focus detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8550: 85503L.
- [5] 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.
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.
- [6] Sun S S, Wang D, Qi Y J, et al. Design of reflective projection optics used in lithographic focusing and leveling system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1522002.
孙生生, 王丹, 齐月静, 等. 用于光刻调焦调平的反射式投影光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1522002.
- [7] Sun Y W, Li S G, Zong M C. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0512002.
孙裕文, 李世光, 宗明成. 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0512002.
- [8] Duan C. The investigation of lithographic focus control technology [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 64-70.
段晨. 光刻对焦控制技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 64-70.