

标记非对称变形导致的对准误差修正方法及其在套刻测量中的应用

杜聚有^{1,2}, 戴凤钊^{1,2**}, 王向朝^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 硅片对准标记经过光刻工艺后产生的非对称变形会导致对准测量误差, 目前普遍采用工艺验证的方法修正此对准测量误差, 但该方法存在一定的工艺适应性问题。针对该对准测量误差, 提出了一种新的修正方法, 即利用非对称变形对准标记在不同照明波长和偏振态情况下的对准位置差异, 修正对准标记非对称变形导致的对准误差, 提高了对准的工艺适应性。并将该方法拓展应用于套刻测量误差修正, 提高了套刻测量的工艺适应性。

关键词 测量; 光刻; 套刻; 对准; 对准标记; 非对称变形

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704004

Calibration Method for Alignment Error Caused by Asymmetric Deformation of Mark and Its Application in Overlay Measurement

Du Juyou^{1,2}, Dai Fengzhao^{1,2**}, Wang Xiangzhao^{1,2*}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The asymmetric deformation of silicon wafer alignment mark after lithography process causes an alignment error. Currently, such errors are typically calibrated via process verification; however, this method is challenged by its lack of process adaptability. Herein, we present a new calibration method which uses the differences in alignment positions of the asymmetrically deformed wafer alignment marks under illuminations with different wavelengths and polarizations to calibrate the alignment error, and the proposed method exhibits good process adaptability. Additionally, the proposed calibration method is extended to calibrate the overlay measurement error, improving the process adaptability of overlay measurement.

Key words measurement; lithography; overlay; alignment; alignment mark; asymmetric deformation

OCIS codes 120.3180; 050.1950; 020.1670

1 引言

集成电路是信息产业的核心, 光刻机是大规模集成电路制造的关键装备。目前 193 nm 浸没式投影光刻机与多重图形技术结合已经实现 10 nm 乃至 7 nm 节点集成电路的量产^[1-4]。套刻精度是光刻机的三大性能指标之一, 集成电路工艺节点的

持续缩小对套刻精度(即两层曝光图形间的相对位置精度)提出了越来越高的要求, 对于 10 nm 工艺节点, 套刻精度要求在 3 nm 以下^[5-7]。两层曝光图形之间的纳米精度套刻要求以亚纳米精度测量硅片位置^[4], 在光刻机中硅片位置的测量是通过硅片对准系统实现的, 其测量精度是保障套刻精度的关键。由于硅片对准中用到的对准标记制作在硅片上, 对

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-25; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61405210, 61474129)

* E-mail: wxz26267@siom.ac.cn; ** E-mail: fzdai@siom.ac.cn

准位置测量精度容易受到光刻工艺的影响,因此提高硅片对准的工艺适应性显得尤为重要。当前,高端光刻机中的主流硅片对准技术是自参考干涉仪智能对准传感器混合(SMASH)对准技术实现的,采用的硅片对准标记是相位衍射光栅^[8-10]。硅片对准标记经过化学机械抛光等工艺后会产生非对称变形,这种非对称变形会引入硅片位置测量误差。

目前,降低对准标记非对称变形导致的位置测量误差的主要方法是工艺验证方法,对已完成的包含两层图形的硅片,该方法采用扫描电子显微镜(SEM)精确测量实际的套刻误差,根据测量结果,在相同的工艺中修正对准测量位置误差,以提高套刻精度^[9,11-12]。然而,即使在相同的批次或相同的光刻工艺中,甚至在硅片不同的曝光场之间,对准标记非对称变形程度也会不一致,从而使得工艺验证方法存在一定误差,因此工艺验证方法存在一定的工艺适应性问题。另外,工艺验证方法也存在耗时且价格昂贵等问题^[5,11]。

在 SMASH 对准技术中,一般采用多种波长和偏振态的照明光束。采用不同波长和偏振态的照明光束照明对准标记非对称变形时,对准位置的测量结果存在差异。利用这种差异,本文提出了一种新的修正对准标记非对称变形导致的对准位置测量误差的方法,与工艺验证方法相比,所提方法具有较高的工艺适应性,并可在对准过程中进行实时修正。

由于对准标记和套刻测量标记在集成电路制造的前道工艺中经过了相同的工艺流程,因此两者的非对称变形存在一定的关联。本文进一步利用不同波长和偏振态照明情况下的对准位置差异来修正套刻测量标记非对称变形导致的套刻测量误差,从而提高套刻测量的工艺适应性。

2 标记非对称变形对对准精度的影响

SMASH 对准技术原理如图 1 所示,对准标记一般采用周期性相位衍射光栅,波长为 λ 的准直激光光束垂直于对准标记照射后,产生的衍射光束(n 级和 $-n$ 级)经过透镜和自参考干涉仪后,在对准系统光瞳面上发生干涉形成对准信号。自参考干涉仪将对准标记的衍射光束在对准系统光瞳面上进行分束和 $\pm 90^\circ$ 旋转,即 n 级衍射光束经过自参考干涉仪后分为 n' 和 n'' 光束, $-n$ 级衍射光束经过自参考干涉仪后分为 $-n'$ 和 $-n''$ 光束,经过自参考干涉仪后 n' 和 $-n''$ 、 $-n'$ 和 n'' 光束分别干涉形成对准信号。当对准标记相对对准系统发生移动时,正负衍射级次的相位发生变化,因此干涉形成的对准信号强度随对准标记的位置移动呈周期性变化,对准标记位置通过测量对准信号强度的变化得到。为了提高对准位置测量的工艺适应性,在对准过程中的对准标记照明光源一般采用 4 种波长: 532, 632.8, 775, 850 nm, 同时采用不同的照明偏振态^[9]。

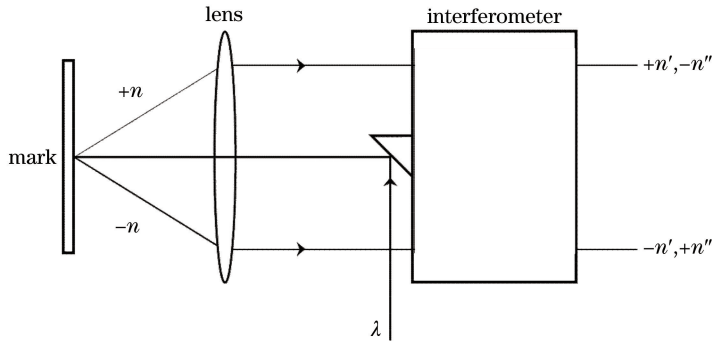


图 1 SMASH 对准技术原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of SMASH alignment technique

图 2(a)~(b)分别为对称和非对称变形对准标记的光束衍射示意图。图中, A_n 和 A_{-n} 分别为对准标记 n 和 $-n$ 级衍射光束的振幅, A_0 为入射光束的振幅。在相同的对准标记位置,相对结构对称的对准标记,非对称对准标记的正负衍射级次之间会产生一个额外的相位差 β , β 会造成对准标记的位置测量误差, β 的大小与对准标记非对称变形的形状、程度相关。

当对准标记结构对称时,对准信号强度 I 可表示为

$$I = 2A^2 \left[1 + \cos\left(\frac{4n\pi x}{P}\right) \right], \quad (1)$$

式中: A 为对准标记衍射光束的振幅; n 为对准标记的衍射级次; x 为对准标记的位置; P 为对准标记的光栅周期。

对准标记位置可表示为

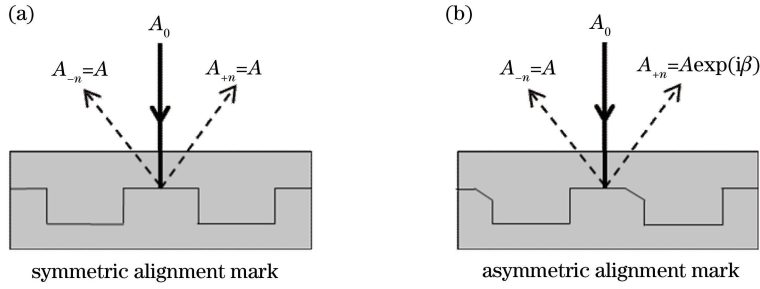


图 2 不同对准标记的光束衍射示意图。(a)对称对准标记;(b)非对称对准标记

Fig. 2 Beam diffraction diagrams of different alignment marks. (a) Symmetric alignment mark; (b) asymmetric alignment mark

$$x = \frac{P}{4n\pi} \arccos\left(\frac{I}{2A^2} - 1\right). \quad (2)$$

当对准标记发生非对称变形时,对准信号强度 I 可表示为

$$I = 2A^2 \left[1 + \cos\left(\frac{4n\pi x}{P} + \beta\right) \right], \quad (3)$$

对准标记位置可表示为

$$x = \frac{P}{4n\pi} \left[\arccos\left(\frac{I}{2A^2} - 1\right) - \beta \right]. \quad (4)$$

由(2)、(4)式可以得到由对准标记非对称变形引入的对准误差为 $\beta P / (4n\pi)$ 。

3 对准测量误差仿真及修正方法

由上述分析可知,对准标记的非对称变形会引入衍射光束的相位变化,从而带来对准位置测量误差。本节通过仿真软件 COMSOL 模拟在不同波长和偏振态照明情况下,对准标记衍射光束的相位,得到对准测量误差与对准标记非对称变形的形状、变形量的关系,并根据仿真数据修正对准标记非对称变形引入的对准测量误差。

仿真模型如图 3 所示,组成对准标记的相位衍射光栅周期 P 设置为 $16 \mu\text{m}$,准直照明光束垂直于

对准标记照射,波长分别为 $532, 632.8, 775, 850 \text{ nm}$,偏振态分别为横电(TE)和横磁(TM)。对准标记的材料为硅(Si),并覆盖一层厚度 $T = 120 \text{ nm}$ 的二氧化硅(SiO_2),光栅槽深 $H = 108 \text{ nm}$ (照明波长为 632.8 nm 时,对准标记在此槽深下的衍射效率最优),组成对准标记的相位衍射光栅的占空比为 $1:1$ 。光栅模型左右两侧设置为周期性边界条件(PBC),并在光栅底部设置完美匹配层(PML),用以完全吸收光栅底面的反射。模型的最大细分单元设置为照明波长的 $1/20$ 。

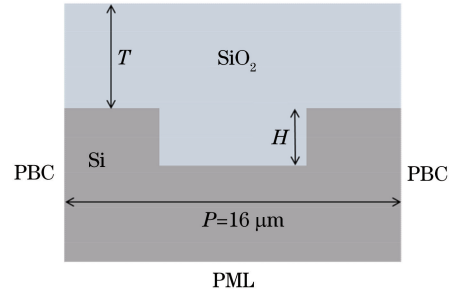


图 3 对准标记仿真模型

Fig. 3 Simulation model of alignment mark

仿真用到的材料(Si 和 SiO_2)的折射率如表 1 所示^[13]。

表 1 不同波长下对准标记材料的折射率

Table 1 Refractive indexes with alignment mark materials under different wavelengths

Material	Refractive index			
	532 nm	632.8 nm	775 nm	850 nm
Si	$4.1520 + 0.05179i$	$3.8823 + 0.01959i$	$3.7139 + 0.00799i$	$3.6730 + 0.00500i$
SiO_2	1.4607	1.4570	1.4541	1.4525

对准标记产生的非对称变形形状随光刻工艺的不同而变化^[11,14-15],为了简化仿真模型,一般采用圆角和楔角两种形状的非对称变形形状^[16-17],其结构分别如图 4(a)~(b)所示。其中圆角非对称变形对准标记的变形量用圆角的曲率半径 R 来衡量,楔角非对称变形对准标记的变形量用楔角的两个边长

C, B 来衡量。

通常用对准标记的 $\pm 1, \pm 3, \pm 5$ 和 ± 7 级衍射光束测量对准标记的位置,对于周期为 $16 \mu\text{m}$ 的光栅对准标记,这 4 组衍射光束形成的对准信号与由对准标记非对称变形引入的对准误差相近^[14],下面以对准标记 ± 3 级衍射光束形成的对准信号为例进

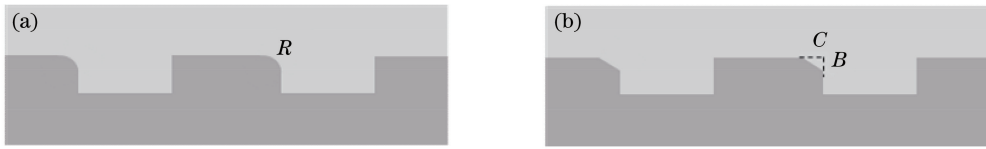


图 4 不同形状的非对称对准标记。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 4 Asymmetric alignment marks with different shapes. (a) Round shape; (b) wedge shape

行对准测量误差分析。在不同的波长和偏振态照明时,圆角和楔角形状的非对称变形对准标记引入的对准测量误差的仿真结果分别如图 5(a)~(b)所示。由图 5 可以看出:对准标记非对称变形引入的对准测量误差随对准标记非对称变形程度的增加而增大;对于圆角非对称变形,在 $R = 50 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 、TE 偏振态照明情况下,对准测量误差达

到了 18 nm ;而对于楔角非对称变形,在 $C = 30 \text{ nm}$ 、 $B = 100 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、TE 偏振态照明情况下,对准测量误差达到了 54 nm 。同时可以看出,在非对称变形量相同时,不同波长和偏振态照明情况下,对准标记非对称变形引入的对准测量误差不同,这种差异可以用于修正对准标记非对称变形导致的对准测量误差。

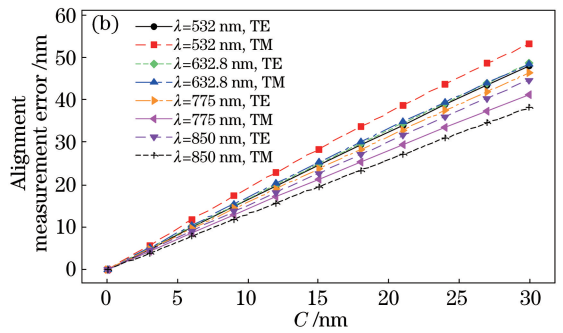
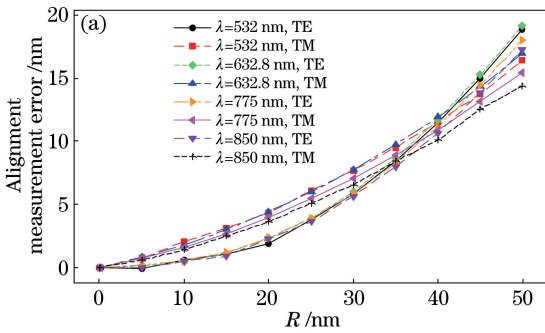


图 5 不同波长和偏振态照明情况下,对准测量误差与不同非对称对准标记变形量间的关系。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 5 Alignment measurement errors as functions of deformations of different asymmetric alignment marks under illuminations with different wavelengths and polarizations. (a) Round shape; (b) wedge shape

为获得较高的对准测量误差来修正灵敏度,可以选取对准测量误差差异较大的两个测量通道进行对准测量误差的修正。为便于分析,将 632.8 nm 照明波长、TE 偏振态时圆角非对称变形引入的对准测量误差表示为 R_a ,将 850 nm 照明波长、TM 偏振态时圆角非对称变形引入的对准测量误差表示为

R_b 。 R_a 与 R_b 之间具有较大差异, $R_a - R_b$ 与 R_b 的关系如图 6(a)所示。同样,将 532 nm 照明波长、TE 偏振态时楔角非对称变形引入的对准测量误差表示为 W_a ,将 850 nm 照明波长、TM 偏振态时楔角非对称变形引入的对准测量误差表示为 W_b , W_a 与 W_b 有较大差异, $W_a - W_b$ 与 W_b 的关系如图 6(b)所示。

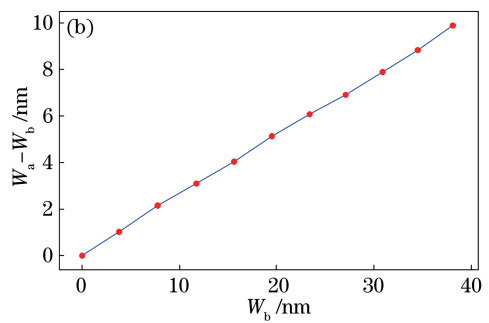
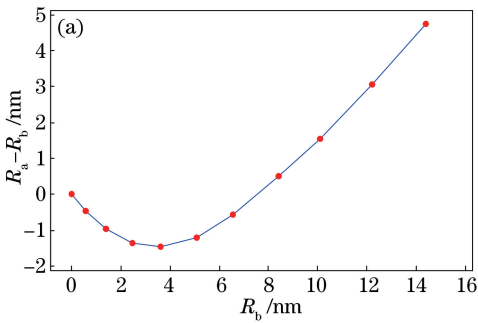


图 6 仿真结果。(a) $R_a - R_b$ 与 R_b 的关系;(b) $W_a - W_b$ 与 W_b 的关系

Fig. 6 Simulation results. (a) $R_a - R_b$ as a function of R_b ; (b) $W_a - W_b$ as a function of W_b

根据图 6 中的关系,可以利用两个通道对准信号测量数据的差异来修正由对准标记非对称变形引

入的对准测量误差,从而提高对准标记的工艺适应性。考虑到在实际光刻工艺中,对准标记的槽深和

占空比会发生一定的变化,同时为了验证该修正方法的工艺适应性,假定对准标记在实际光刻工艺中的槽深浮动分别为 $\pm 2\text{ nm}$ 和 $\pm 4\text{ nm}$,槽宽浮动分

别为 $\pm 40\text{ nm}$ 和 $\pm 80\text{ nm}$ 。在此情况下,对于不同的对准标记非对称变形量,该方法修正后的对准测量误差仿真结果如图7所示。

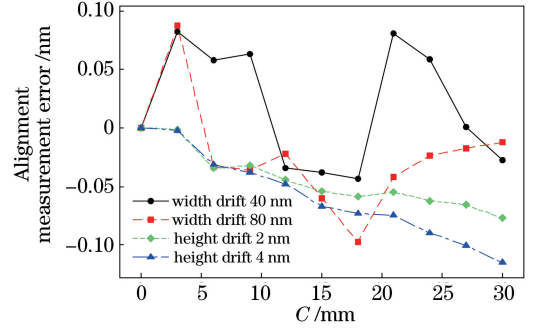
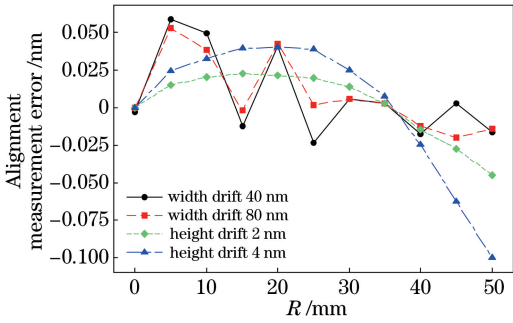


图7 不同形状非对称对准标记下修正后的对准测量误差。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 7 Alignment measurement errors caused by asymmetric alignment marks with different shapes after calibration.

(a) Round shape; (b) wedge shape

从图7(a)中可以看出,在对称标记非对称变形为圆角形、变形量 R 为 $0\sim 50\text{ nm}$ 、对准标记槽宽变化 80 nm 和槽深变化 4 nm 的情况下,利用该方法修正后的对准测量误差小于 0.10 nm 。同样,从图7(b)中可以看出,在对称标记非对称变形为楔角形、变形量 C 为 $0\sim 50\text{ nm}$ 、 $B=100\text{ nm}$ 、对准标记槽宽变化 80 nm 和槽深变化 4 nm 的情况下,利用该方法修正后的对准测量误差小于 0.13 nm 。说明本文提出的对准标记非对称变形引入的对准测量误差修正方法具有较好的工艺适应性。

这种复杂形状的标记,本方法同样适用。可以采用SEM等手段获得实际标记的具体参数,然后将获得的标记参数代入该方法的仿真模型中进行计算。同时,为了提高对准测量误差的修正精度,可以同时利用多个照明波长和偏振态、多个衍射级次形成的对准测量信号进行修正。

4 在套刻测量中的应用

套刻测量的目的是用来判断两层不同工艺层中集成电路图形的相对位置偏差,即测量实际光刻工艺的套刻精度。套刻测量是用来监控光刻工艺的实际套刻精度,并进行工艺改善,以提高套刻精度的重要方法。基于衍射的套刻测量(DBO)技术是主流的套刻测量技术^[18-19],图8所示为DBO技术测量套刻精度的原理,当两工艺层中的光栅存在相对错位,即套刻误差 e_{overlay} 不为0时,套刻标记的正负级次衍射能量不再相等,通过套刻标记的正负级次衍射能量差异与两光栅的相对错位大小之间的关系来测量套刻精度。

以周期为 $16\text{ }\mu\text{m}$ 的相位衍射光栅作为对准标记,以 ± 3 级衍射光束形成的对准信号为例对提出的修正方法进行验证,但该方法也适用于其他的光栅周期和衍射级次,而且对于将细分型等其他形式的相位衍射光栅作为对准标记的情况也依然适用。假定对准标记的非对称变形为圆角和楔角两种形状,并且变形只发生在对准标记光栅的栅线一侧。在实际的光刻工艺中,标记形状变化比较复杂,对于

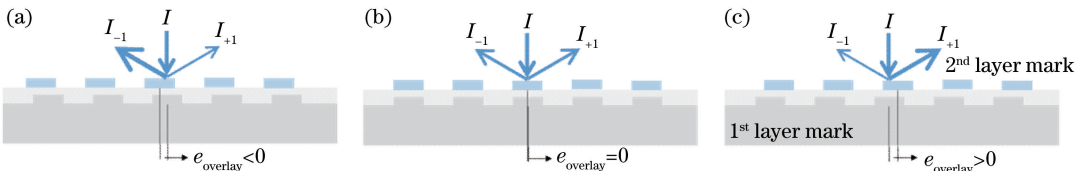


图8 基于DBO技术测量套刻精度的原理图。(a) $e_{\text{overlay}} < 0$; (b) $e_{\text{overlay}} = 0$; (c) $e_{\text{overlay}} > 0$

Fig. 8 Principle diagrams of overlay precision measurement based on DBO technique.

(a) $e_{\text{overlay}} < 0$; (b) $e_{\text{overlay}} = 0$; (c) $e_{\text{overlay}} > 0$

e_{overlay} 可表示为^[19]

$$e_{\text{overlay}} = \frac{P}{2\pi} \arcsin\left(\frac{D}{k}\right), \quad (5)$$

式中: k 为工艺因子,可由已知套刻误差得到; D 为套刻标记 ± 1 级衍射光束之间的能量差, $D = (I_1 - I_{-1}) / (I_1 + I_{-1})$, I_1 和 I_{-1} 分别为套刻标记1级和

-1 级衍射光束的衍射能量。

与对准标记经过光刻工艺后会产生非对称变形相似,作为套刻标记的相位衍射光栅经过相同的光刻工艺后也会产生非对称变形。当套刻标记中的光栅产生非对称变形时,即使套刻误差为 0,套刻标记的正负级次衍射光束的能量也不再相等,并因此带来套刻测量误差。如图 9 所示,套刻标记的非对称变形会引起曲线 D/k 的偏移,导致套刻测量误差。

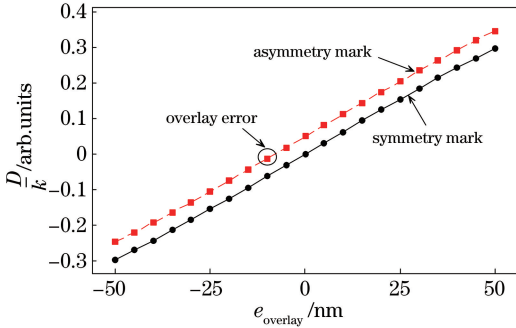


图 9 套刻标记非对称变形导致的套刻测量误差

Fig. 9 Overlay measurement error caused by asymmetric deformation of overlay mark

以图 10 所示的套刻标记结构进行仿真建模,组成套刻标记的光栅周期为 $1 \mu\text{m}$,准直照明光束垂直于套刻标记照射,波长分别为 400, 500, 600, 700 nm,偏振态分别为 TE 和 TM,组成套刻标记的第一层(上层)光栅的材料为光刻胶,第二层(下层)光栅的材料为 Si,两光栅中间层为 SiO_2 。光栅槽深 $H = 108 \text{ nm}$,光栅占空比为 1:1, SiO_2 厚度 $T = 120 \text{ nm}$ 。套刻标记模型左右两侧的边界条件设置为 PBC,底部的边界条件设置为 PML。模型的最大细分单元设置为照明波长的 $1/20$ 。

仿真用到的材料折射率如表 2 所示^[13]。

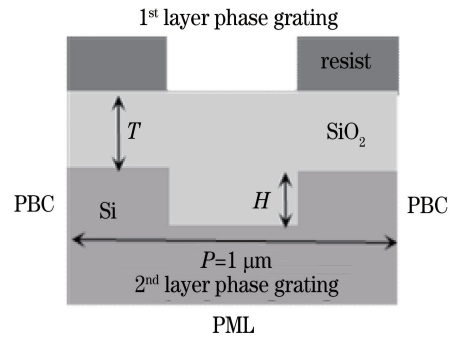


图 10 套刻标记仿真模型

Fig. 10 Simulation model of overlay mark

表 2 不同波长下套刻标记材料的折射率

Table 2 Refractive indexes of overlay mark materials under different wavelengths

Material	Refractive index			
	400 nm	500 nm	600 nm	700 nm
Si	$5.5674 + 0.3860i$	$4.2992 + 0.0704i$	$3.9485 + 0.0274i$	$3.6730 + 0.0122i$
Copolymer resist	1.4961	1.4864	1.4827	1.4809
SiO_2	1.4701	1.4623	1.4580	1.4553

套刻标记非对称变形导致的套刻测量误差的仿真结果如图 11 所示,可以看出:套刻标记非对称变形引入的套刻测量误差随着非对称变形程度的增加而增大;当照明波长为 600 nm、TE 偏振态、 $R =$

50 nm 时,由套刻标记非对称变形引入的套刻测量误差达到了 58 nm。同时,在不同波长和偏振态照明情况下,相同的非对称变形量导致的套刻测量误差不同。

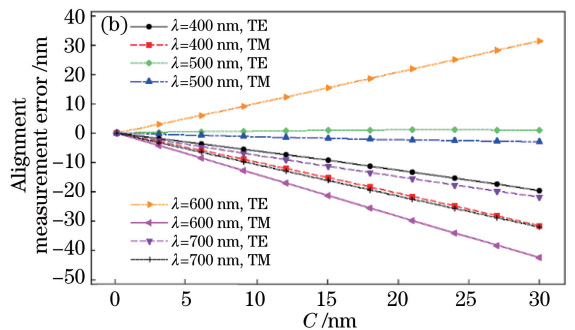
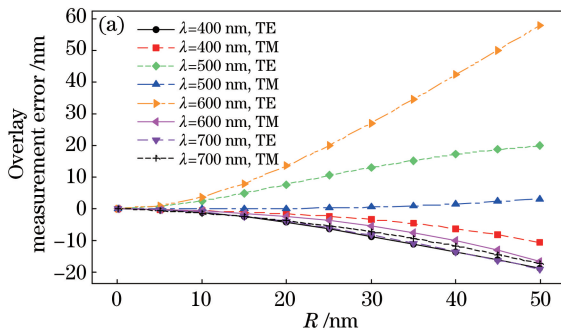


图 11 不同波长和偏振态照明情况下,套刻测量误差与不同非对称套刻标记变形量间的关系。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 11 Overlay measurement error as a function of deformation of different asymmetric overlay marks under illuminations with different wavelengths and polarizations. (a) Round shape; (b) wedge shape

由套刻标记非对称变形引入的套刻测量误差同样可以利用对准标记非对称变形对应的多通道对准测量信息差异进行校正。假定对准标记和套刻标记在同一曝光场,并经过相同的光刻工艺,非对称变形量相同,可以选择图 11 中套刻测量误差对非对称变形量不敏感的照明波长和偏振态测量信息,例如,利用照明波长为 500 nm、TM 偏振态

照明时的套刻测量信息与图 6 中两个通道对准信号的对准位置偏差关系进行套刻测量误差的修正,套刻测量误差与对准测量误差间的关系如图 12 所示,其中图 12(a)为圆角非对称变形引入的套刻测量误差与对准测量误差 $R_a - R_b$ 的关系,图 12(b)为楔角非对称变形引入的套刻测量误差与对准测量误差 $W_a - W_b$ 的关系。

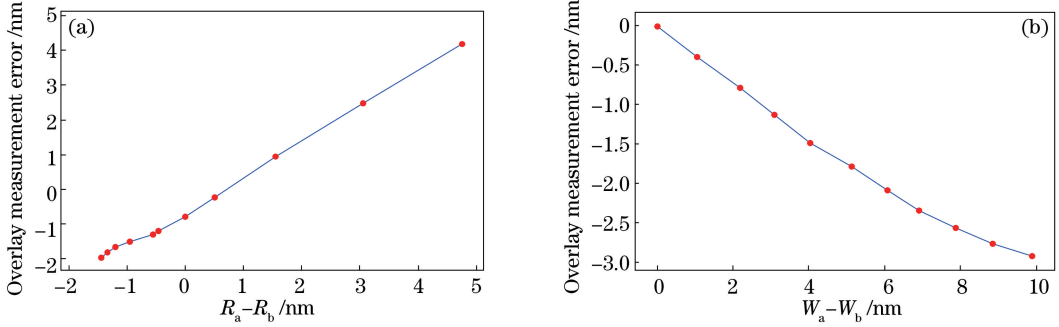


图 12 不同非对称变形引入的套刻测量误差与对准测量误差间的关系。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 12 Overlay measurement error as a function of alignment measurement error caused by different asymmetric deformations. (a) Round shape; (b) wedge shape

在对准标记槽深分别变化 2 nm 和 4 nm、槽宽分别变化 40 nm 和 80 nm 的情况下,由标记非对称变形引入的套刻测量误差修正后的仿真结果如图

13 所示,其中图 13(a)为圆角形状套刻标记非对称变形的仿真结果,图 13(b)为楔角形状套刻标记非对称变形的仿真结果。

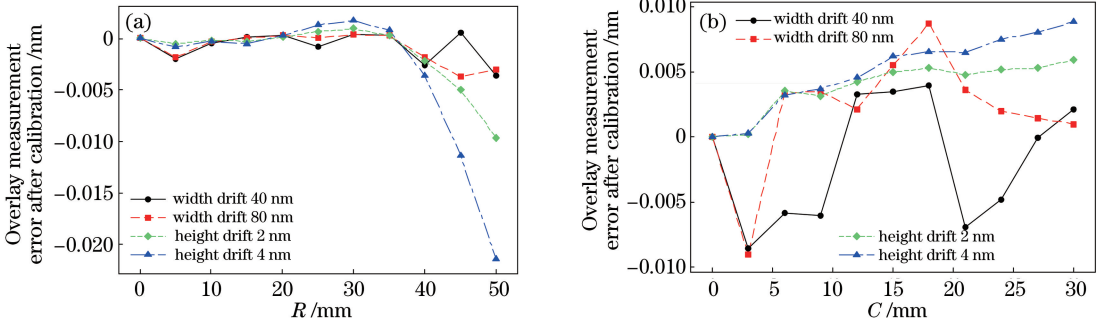


图 13 不同形状非对称套刻标记下修正后的套刻测量误差仿真结果。(a)圆角形状;(b)楔角形状

Fig. 13 Simulation results of overlay measurement errors caused by asymmetric overlay marks with different shapes after calibration. (a) Round shape; (b) wedge shape

从图 13(a)中可以看出,在套刻标记非对称变形为圆角形、变形量 R 为 0~50 nm、对准标记槽宽变化 80 nm 和槽深变化 4 nm 的情况下,利用所提方法修正后的套刻标记非对称变形引入的套刻误差小于 0.022 nm。同样,从图 13(b)中可以看出,在套刻标记非对称变形为楔角形状、变形量 C 为 0~50 nm, $B=100$ nm、对准标记槽宽变化 80 nm 和槽深变化 4 nm 的情况下,利用所提方法修正后的套刻误差小于 0.01 nm。套刻标记非对称变形引入的套刻测量误差修正后可以忽略,说明所提方法具有较好的工艺适应性。

同样,考虑到对准光栅标记和套刻光栅标记的光栅周期不同,相同的光刻工艺引入的非对称变形量会有所差异,此套刻误差修正方法也可以根据实际测量得到的对准标记和套刻标记之间对应的非对称变形量关系,对套刻测量误差进行修正。

5 结 论

本文提出了一种针对对准标记非对称变形引起的对准测量误差进行修正的方法,其原理是利用非对称变形对准标记的对准位置与照明波长、偏振态的相关性,修正由对准标记非对称变形带来的对准

测量误差。仿真结果表明,在槽深受光刻工艺影响分别变化 4 nm 和 80 nm 的情况下,当对准标记产生圆角和楔角形状非对称变形时,利用所提方法修正后的由对准标记非对称变形引入的对准测量误差小于 0.13 nm,说明了所提方法具有较好的工艺适应性。

研究了该方法在套刻标记非对称变形导致的套刻测量误差修正中的应用,仿真结果表明,在考虑对准标记槽深和槽宽受光刻工艺影响分别变化 4 nm 和 80 nm 的情况下,当对准标记和套刻标记发生圆角和楔角形状非对称变形时,利用所提方法修正后的由套刻标记非对称变形引入的套刻测量误差小于 0.022 nm,可以忽略不计。

参 考 文 献

- [1] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, *et al.* High-order aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0412003.
诸波尔, 王向朝, 李思坤, 等. 超高 NA 光刻投影物镜高阶波像差检测方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0412003.
- [2] Oyama K, Yamauchi S, Hara A, *et al.* Sustainability and applicability of spacer-related patterning towards 7 nm node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9425: 942514.
- [3] Gao W M, Ciofi I, Saad Y, *et al.* Rigorous assessment of patterning solution of metal layer in 7 nm technology node[J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, 15(1): 013505.
- [4] Graaf R D, Weichselbaum S, Droste R, *et al.* NXT: 1980Di immersion scanner for 7 nm production nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 978011.
- [5] Verstappen L, Mos E, Wardenier P, *et al.* Holistic overlay control for multi-patterning process layers at the 10 nm and 7 nm nodes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97781Y.
- [6] Gorhad K, Sharoni O, Dmitriev V, *et al.* Co-optimization of RegC and TWINSCAN corrections to improve the intra-field on-product overlay performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97783D.
- [7] Mulkens J, Hinnen P, Kubis M, *et al.* Holistic optimization architecture enabling sub-14-nm projection lithography[J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2014, 13(1): 011006.
- [8] Boef A J, Hoogerland M, Gajdeezko B. Alignment system and method: US7564534[P/OL]. 2009-07-21 [2019-01-05]. <https://patents.google.com/patent/US7564534B2/en?q=us7564534>.
- [9] Menchtchikov B, Socha R, Raghunathan A, *et al.* Computational scanner wafer mark alignment[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10147: 10147C.
- [10] Du J Y, Dai F Z, Bu Y, *et al.* Alignment technique using Moire fringes based on self-coherence in lithographic tools[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204006.
杜聚有, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于自相干叠栅条纹的光刻机对准技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204006.
- [11] Leray P, Jehoul C, Socha R, *et al.* Improving scanner wafer alignment performance by target optimization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9778: 97782M.
- [12] Menchtchikov B, Socha R, Zheng C M. Reduction in overlay error from mark asymmetry using simulation ORION and alignment models[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10587: 105870C.
- [13] Refractive index [OL]. [2019-01-05]. <http://refractiveindex.info/>.
- [14] Cui Y T, Goodwin F, van Haren R. Segmented alignment mark optimization and signal strength enhancement for deep trench process[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5375: 1265-1277.
- [15] Morgana N, Gavrillin D, Grenier A, *et al.* Rigorous wafer topography simulation for investigating wafer alignment quality and robustness[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9426: 94260S.
- [16] Pistor T V, Socha R J. Rigorous electromagnetic simulation of stepper alignment[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4689: 1045-1056.
- [17] Neijzen J H M, Morton R D, Dirksen P, *et al.* Improved wafer stepper alignment performance using an enhanced phase grating alignment system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3677: 382-394.
- [18] Blancquaert Y, Dezauzier C. Diffraction based overlay and image based overlay on production flow for advanced technology node[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8681: 86812O.
- [19] Bischoff J, Brunner R, Bauer J J, *et al.* Light-diffraction-based overlay measurement [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4344: 222-233.