

多层冷压印光刻中超高精度对正的研究

王 莉, 卢秉恒, 崔东印, 丁玉成, 刘红忠

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为满足多层冷压印光刻中套刻的超高精度要求,提出了基于斜纹结构光栅的对正技术.利用光电接收器件阵列组合接收光栅产生莫尔条纹的零级光,得到条纹平面内 X 、 Y 方向的对正误差信号.通过调整光栅副的间隙来提高误差信号的对比度.利用高对比度和灵敏度的误差信号作为控制系统的驱动信号,对承片台进行宏微两级驱动控制,并由激光干涉仪作为控制系统的反馈环节在驱动过程中进行全程监测,实现自动对正.最终使在 X 、 Y 方向上的重复对正精度达到了 ± 20 nm,满足了 100 nm 特征尺寸压印光刻的对正精度要求.

关键词: 压印光刻;结构光栅;莫尔条纹;超高精度;对正

中图分类号: TH112; TH11311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)09 - 0895 - 05

Ultra2Precision Alignment for Room2Temperature Multi2Layer Imprint Lithography

Wang Li, Lu Bingheng, Cui Dongyin, Ding Yucheng, Liu Hongzhong

(School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: An ultra2precision alignment technique adopting a pair of special slant gratings was presented for room2temperature imprint lithography. The 0th2order beams of moir ésignals generated by the gratings were received by a photo2electric detector array, and then the misalignment errors in X - Y directions were obtained, respectively. The contrast of moir ésignals was improved via adjusting the grating gaps, thus the improved signals were chosen to control the alignment of a $X2Y$ stage by means of coarse2fine positioning system. The laser interferometers were considered as the feedback elements of the control system to monitor the process. Finally, the repeatable alignment accuracy (± 20 nm) ensures to meet the requirement of alignment accuracy for sub2100nm imprint lithography.

Key words: imprint lithography; grating; moir ésignal; ultra2precision; alignment

在集成电路制造中,随着对更小特征尺寸的不断追求,对光刻设备精度的要求也越来越高,但由于光学透镜极限的制约,使投影光刻很难实现 100 nm 以下特征尺寸的图形转移^[1].因此,寻求新的工艺路线是现在集成电路研究的主要方向.冷压印光刻(RL)是一种高分辨率、无需昂贵的投影光学系统就可在室温下制造出特征尺寸小于 100 nm 集成电路(IC)的图形复型技术^[2-7].与传统光刻相比,虽然压

印光刻具有优势,但多层压印光刻的分步压印对正问题仍是 RIL 工艺的瓶颈.对于 100 nm 及以下特征尺寸的 IC 图形,套刻重复对正精度须在 30 nm 以内^[8-11].由于在传统光刻工艺的对正方式中,暗场照明的光度式已不能适用于套刻层数多的情况,而摄像机扫描积分的自动对正方式对承片台的运动平稳性要求高且数据运算量大,因此难以实现高速对正.基于莫尔衍射的对正方式自从 King和Ber2

收稿日期: 2003 - 03 - 08. 作者简介: 王 莉(1973~),女,博士生;卢秉恒(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275118);国家高技术研究发展计划重点资助项目(2002AA420050);国家重点基础研究发展规划资助项目(2003CB716202).

ry^[12]首先提出以来,目前已经取得了很大的发展,其原理是将掩模和晶片上的对正标记做成光栅类周期性结构,在激光等单色光的垂直照射下,因衍射效应产生莫尔条纹,由放置在条纹平面内的光电探测器的输出信号为对正依据来实现对正. 因为此方法得到的信号灵敏度和对比度都很高,所以很适合多层套刻. 为满足分步式多层压印工艺中的高精度对正要求,本系统利用衍射产生的莫尔条纹来实现冷压印光刻中超高精度的对正.

1 理论分析

超高精度对正是多层分步式压印光刻工艺中的关键问题. 在光刻工艺中,由于常用的简单光栅式对正方式所设计的对正标记简单,一般一个标记只能进行一个方向上的对正,所以即使实现一个压印区的多自由度对正也需设计多个对正标记. 由于对正标记会占用大量的晶片空间,从而降低晶片的使用效率,因此本文在多层分步式冷压印光刻技术中,采用基于斜纹结构光栅的自动对正系统.

1.1 基本莫尔条纹方程

为实现纳米级的对正精度,本文采用了游标莫尔条纹技术. 莫尔条纹可依据光按直线传播的原理,利用光栅栅线的遮光效应来解释. 设 x_0oy_0 平面为光栅栅线所在平面,2 块长光栅 $G_1、G_2$ 的光栅面平行,光栅栅距(即光栅的空间周期)分别为 p_1 及 p_2 ($p_1 < p_2$),2 块光栅栅线的交角为 α ,在直角坐标系中取 G_1 的任一栅线为 y_0 轴,与其垂直的方向取为 x_0 轴,根据遮光效应,莫尔条纹的表达式为

$$y_0 = x_0 \left[1 - \frac{p_2}{p_1 \cos \alpha} \right] \cot \alpha - \frac{kp_2}{\sin \alpha} \quad (1)$$

式(1)是一直线方程簇,其中 k 为整数,每个 k 值对应着一条莫尔条纹. 由式(1)可知条纹的间距为

$$W = \frac{p_2}{\left[\sin^2 \alpha + \left(\cos \alpha - p_2/p_1 \right)^2 \right]^{1/2}} = \frac{p_1 p_2}{(p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \alpha)^{1/2}} \quad (2)$$

由式(2)可知,2 块光栅叠合时所形成的莫尔条纹由 W 的平行线簇组成. 当 $p_1 = p_2, \alpha = 0$ 时,莫尔条纹称为游标莫尔条纹,其间距表达式为

$$W_v = \frac{p_1 p_2}{(p_2 - p_1)} \quad (3)$$

1.2 双光栅叠合时的透光特性分析

因 $G_1、G_2$ 的空间周期为 $p_1、p_2$ ($p_1 < p_2$),则空间频率为 $v_1 = 1/p_1, v_2 = 1/p_2$. 现设 G_1 绕垂直光栅

自身平面的轴转动 α_1 角, G_2 绕垂直于光栅自身平面的轴转动 α_2 角,同时 G_2 又沿 x_0 轴位移 x ,则这样的 2 只光栅在理想状况下,其透光特性的傅里叶表达式分别为

$$T_1(x_0, y_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi n(x_0 v_1 \cos \alpha_1 + y_0 v_1 \sin \alpha_1)) \quad (4)$$

$$T_2(x_0 - x, y_0) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \exp(i2\pi m((x_0 - x) v_2 \cos \alpha_2 + y_0 v_2 \sin \alpha_2)) \quad (5)$$

式中 $A_n、B_m$ 为傅里叶系数; $n、m$ 为整数. 当这 2 只光栅叠合,且光栅组间隙很小时,则透光特性为

$$T = T_1(x_0, y_0) T_2(x_0 - x, y_0) \quad (6)$$

设投射到光栅上的入射光束的光强为 $I_0(x_0, y_0)$,则入射光经过光栅副后,出射光强分布为 $I_0(x_0, y_0) T$. 当 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0, v_1 = v_2$ 时,游标莫尔条纹的光强分布为

$$I(x_0 - x, y_0) = I_0(x_0, y_0) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_n B_m \exp(i2\pi n x_0 v_1) \exp(i2\pi m(x_0 - x) v_2) \quad (7)$$

1.3 两光栅的间隙变化和衍射光强的关系

游标莫尔条纹的对比度随两光栅间隙的增加而在菲涅耳区作周期变化,当入射光透过 G_1 在间隙为 mp_1^2/λ (m 为整数, λ 为照明光的波长)处的衍射光具有极大值时,从 G_2 透出来的第 N 级衍射光由夫琅和费^[13]公式给出

$$f_N(l) = \int_{-l+p_2/4}^{l-p_2/4} (x_0, z) \exp\left(\frac{i2\pi N x}{p_2}\right) dx_0 \quad (8)$$

式中: (x_0, z) 是 G_1 在 G_2 处的菲涅耳衍射图形; l 是两光栅的相对位移. 由计算得到的莫尔信号同以间隙为参数的零级光相对应,根据这一原理,将 G_2 放置在 G_1 的菲涅耳区,用光电器件接收 G_2 的零级夫琅和费衍射图形的强度变化,使图形的信号对比度高,其间隙的微小变化也不会引起对正系统的误差.

2 对正标记及光强传感器布置的设计

本文所用的结构光栅标记的设计分为 4 个区域,如图 1 所示. 其中,栅线与水平基线的夹角为 45° ,栅孔比为 1:2,通过每个区中心的栅线具有相同的相位关系. 在结构光栅副中, G_1 的 α_1 区栅距为 $50 \mu\text{m}$, β_1 区栅距为 $5215 \mu\text{m}$, G_2 的 α_2 区栅距

为 $5215 \mu\text{m}$, 区栅距为 $50 \mu\text{m}$. 由式(3)可知,当 G_1 、 G_2 叠合时形成的 $W_v = 1050 \mu\text{m}$, 是光栅栅距的 20 倍.

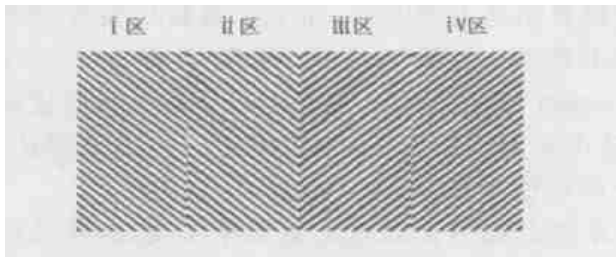


图1 结构的光栅标记

为实现 X 、 Y 对正,用对应于结构光栅的光电阵列来接收一个条纹宽度的游标莫尔条纹信号,并检测平面内在 X 、 Y 方向的相对位移 x 、 y (即对正误差),设计如图 2 所示.通过图 2 中的 I、II 区对图 1 中 I 区的莫尔信号进行两细分接收,如果 G_1 相对 G_2 移动,可以得到如图 3 所示的莫尔信号.同理,结构光栅其他 3 个区的莫尔信号被光电接收器件阵列中的对应区分别进行两细分接收后,可得到 3 对相差为 180° 的莫尔信号,它们的大小在光栅副作相对位移经过对正位置 q 时相同,在 q 处的莫尔信号差为 0. q 被作为正确对正的位置 (即 $x = 0$, $y = 0$),其附近是一个斜率较大的线性区,所以对正的灵敏度很高.光电接收器件阵列在现有的实验条件下可感知 $1 \mu\text{m}$ 的位移,游标莫尔条纹在被接收前被光学放大了 14 倍,加上结构光栅本身的空间放大作用,可以把光栅标记处 10 nm 左右的位移误差放大到近 $3 \mu\text{m}$,所以此系统可以达到纳米级的对正精度.根据运动的分解原理,可知 x 、 y 和光电接收器件阵列所接收信号的对应关系为:在 X 方向对正误差的光强信号 $f(x)$ 等于 I、II 区的光强之和与 III、IV 区光强之和的相减之差;在 Y 方向对正误差的 $f(y)$ 等于 I、III 区的光强之和与 II、IV 区光强之和的相减之差.



图2 光电接收器件阵列示意图

当 $f(x) = 0, f(y) = 0$ 时, $x = 0, y = 0$ 即为对正状态.当光栅副处于对正状态时,产生的莫尔条纹信号如图 4 所示.在实际装置中,以 $f(x)$ 、

$f(y)$ 为采样信号,并进行采样分析处理后输出相应的步进驱动信号,对承片台进行闭环控制,直至达到所追求的对正状态.

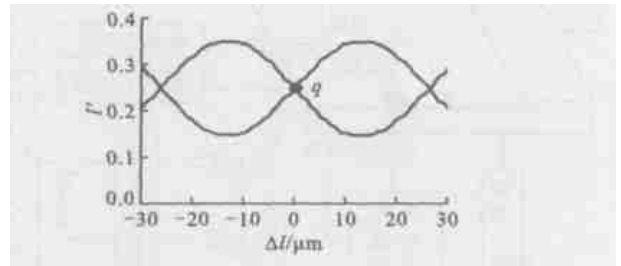


图3 相位差为 180° 的莫尔条纹

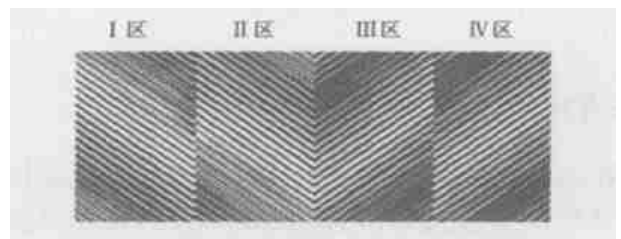


图4 对正状态下的莫尔条纹

3 实验装置

实验装置的示意图如图 5 所示.激光器发出的激光使模板上的对正标记形成莫尔条纹信号,由物镜组被光电接收器件接收,经过放大、滤波后,按照对正误差和信号间的对应关系进行运算,所得模拟信号由 12 位的 A/D 采集卡转换为数字信号,输入计算机进行处理,并产生相应的驱动信号来控制压印工作台的运动,从而实现了自动对正.

在对正系统的驱动环节中,采用宏微两级驱动.宏驱动采用 120 mm 行程的直线电机,分辨率为 $0.11 \mu\text{m}$,重复定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$,满行程直线度为 $1 \mu\text{m}$.微驱动采用 $30 \mu\text{m}$ 行程 PZT (PieZoelectric Transducer) 的分辨率为 0.13 nm ,重复定位精度为 $\pm 1 \text{ nm}$.驱动过程中由德国 SIOS 公司的激光干涉仪实行全程检测,并与控制系统一起构成闭环系统.当 $t = 10 \text{ s}$ 时,激光干涉仪在有外界干扰情况下的误差小于 5 nm ,而系统对正控制过程所需的时间仅为几秒.最终系统误差由机构误差、精对准光栅误差、信号噪声误差和激光干涉仪的误差等构成.在控制系统中,宏微两级驱动的动态切换控制是由 PID (Proportional Integral Derivative) 和 EMM (Exact Model Matching) 控制算法实现的.

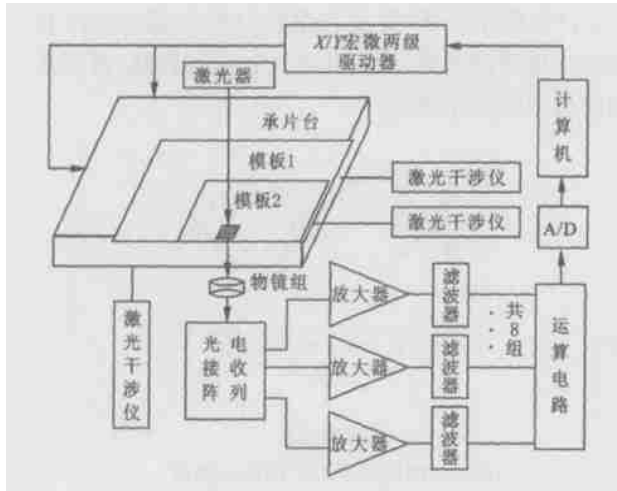


图5 实验装置示意图

4 结果与分析

在上述实验装置条件下,得到的光栅副间隙与信号对比度的关系、光栅相对位移与莫尔条纹光强的关系分别如图6、图7所示。本文采用波长为650 nm的激光,光栅副分别为50、5215 μm的栅距,推算出光栅副的间隙约为3 846~4 240 μm时,绝大部分能量集中在零级光束,且莫尔条纹对比度较高。由图6可知:当光栅副间隙 g 在318 mm附近时,对比度 C 有一个极大值,这与理论计算结果相一致;当 g 小于014 mm时,信号对比度很高,它大于

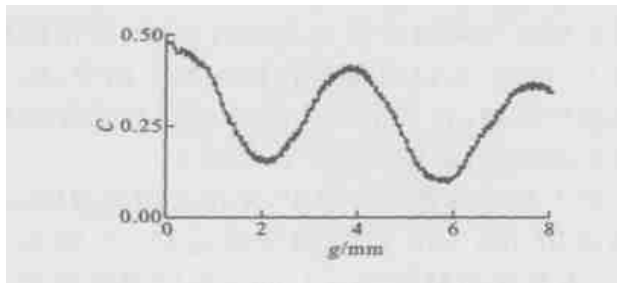


图6 光栅间隙和信号对比度的关系

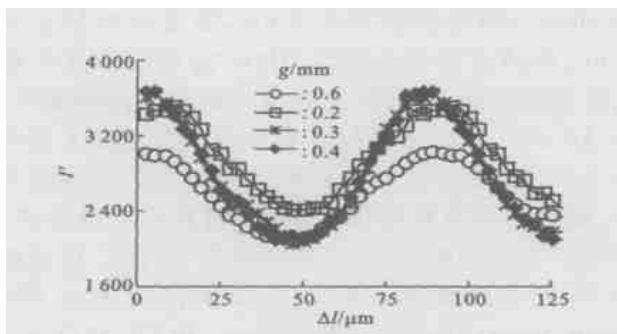


图7 光栅相对位移和莫尔条纹光强的关系

g 在318 mm附近时的对比度,这是因为光程短和光能损失少的原因所致。因此,当光栅栅距较大时,衍射现象不是主要因素,而莫尔条纹应按光的直线传播来解释。由图7可知,实际测得 g 在013~014 mm时,光强保持相对稳定且莫尔条纹对比度较高。这个实测结果为实际应用提供了一个参考值,本文 g 的取值为013~014 mm。

系统的相对正通过宏驱动来实现,由实验得到在 $X、Y$ 方向上的对正精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$,且在精对正标记的捕捉范围内。在粗对正的基础上,通过微驱动进行精对正,最终得到的重复对正精度为 $\pm 20 \text{nm}$ 。

5 结论

本文从理论出发,分析并设计了基于斜纹结构光栅的对正标记,使用相应的光电接收阵列对对正标记产生的莫尔条纹零级光进行组合接收,得到了在 $X、Y$ 方向上的对正误差信号。本文通过调整光栅副的间隙来提高误差信号的对比度,利用高质量的误差信号作为控制系统的驱动信号,对承片台进行宏微两级驱动控制,并由激光干涉仪作为控制系统的反馈环节对驱动过程实行全程监测,实现了自动对正。最终实现的在 $X、Y$ 方向上的重复对正精度为 $\pm 20 \text{nm}$,从而满足了100 nm特征尺寸压印光刻的对正精度要求。

参考文献:

- [1] 王阳元,康晋锋. 硅集成电路光刻技术的发展与挑战[J]. 半导体学报, 2002, 23(3): 225 - 237.
- [2] Schiff H, Jaszewski R W, David C, et al. Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by hot embossing lithography [J]. Microelectronic Engineering, 1999, 46(1 - 4): 121 - 124.
- [3] Chou S Y, Chris K. Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon[J]. Nature, 2002, 417(20): 835 - 838.
- [4] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint lithography with 25 - nanometer resolution [J]. Science, 1996, 272(5 258): 85 - 87.
- [5] Heyderman L J, Schiff H. Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2000, 54(3 - 4): 229 - 245.
- [6] Heyderman L J, Schiff H, David C. Nanofabrication using hot embossing lithography and electroforming[A]. Microelectronic Engineering[C]. Jena: Elsevier Science B V, 2001. 375 - 380.
- [7] Otto M. Characterization and application of a UV2based im2

- print technique[A]. Microelectronic Engineering[C]. Jena: Elsevier Science B V, 2001. 361 - 366.
- [8] Ito T, Okazaki S. Pushing the limits of lithography[J]. Science, 2000, 406(1): 1 027 - 1 031.
- [9] Lee C W, Kim S W. An ultra-precision stage for alignment of wafers in advanced micro-lithography[J]. Precision Engineering, 1997(21): 113 - 122.
- [10] Park H J, Lee D S, Park J H. Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation[J]. Machine Tools and Manufacturing, 2001, 41(1): 51 - 63.
- [11] Yang Y M, Matsushima K. Basic research of micro robot structure and control[J]. Robot, 1988, 2(4): 13 - 16.
- [12] King M C, Berry D H. Photographic mask alignment using moiré techniques[J]. Applied Optics, 1972, 11(11): 2 455 - 2 459.
- [13] Kodate K, Kamiya T, Kamiyama M. Double diffraction in the fresnel region [J]. Japanese Journal Applied Physics, 1971, 10(8): 1 040 - 1 045.

(编辑 管咏梅)

(上接第 894 页)

5 结束语

贝叶斯诊断网络为诊断问题的求解提供了另一种有效的途径和方法. 网络的建立和推理计算是贝叶斯诊断网络的 2 个基本问题, 不同的诊断问题涉及特定的诊断对象, 并且需要建立相应的贝叶斯诊断网络. 因此, 开发贝叶斯诊断网络的通用平台显得尤为重要. 为此, 本文讨论了贝叶斯诊断网络平台的开发与实现, 并阐述了在该平台的开发中, 网络数字化、网络拓扑顺序的确定等几个关键技术的实现. 对于该平台, 本文给出了一个实际的贝叶斯诊断网络例子, 并用于天津石化炼油厂的一台烟机的故障诊断中. 应用实例表明, 该平台提供了贝叶斯诊断网络的基本功能, 能够用于实际诊断对象的贝叶斯诊断网络的构建和推理.

参考文献:

- [1] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference[M]. California: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1988. 116 - 131.
- [2] David H. Bayesian networks for data mining [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1997(1): 79 - 119.
- [3] Zweig G. Bayesian network structures and inference techniques for automatic speech recognition [J]. Computer Speech and Language, 2003, 17(2 - 3): 173 - 193.
- [4] Kahn C E Jr, Roberts L M, Shaffer K A, et al. Construction of a Bayesian network for mammographic diagnosis of breast cancer [J]. Computation of Biology Medicine, 1997, 27(1): 19 - 29.
- [5] 胡兆勇, 屈梁生. 一种贝叶斯诊断网络的拓扑结构[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1 115 - 1 118.
- [6] Agre G. Diagnostic Bayesian networks [J]. Computers and Artificial Intelligence, 1997, 16(1): 47 - 67.
- [7] 胡兆勇, 屈梁生. 贝叶斯网络推理的一种仿真算法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 286 - 288, 301.

(编辑 管咏梅)