

一种数字光栅无掩模光刻对准方法

唐路路^{1,2} 胡松¹ 徐峰^{1,2} 唐燕¹ 陈铭勇¹ 朱江平^{1,2}

(¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对数字微反射镜装置(DMD)无掩模光刻系统,提出并研究了一种数字光栅无掩模光刻对准方法,将硅片的微位移放大显示在数字光栅与硅片物理光栅叠加产生的叠栅条纹中。建立了基于 DMD 的数字光栅无掩模光刻对准模型,设计了对准标记以及具体的实现方案,并对模型进行了数值仿真和初步的实验验证。结果表明,采用频率可变、图像干净、具有良好周期性结构的数字光栅代替传统的真实掩模光栅,真正实现了零掩模成本;并且采用变频数字光栅可以扩大测量范围,减小位移测量误差。最终可以实现深亚微米的对准精度,满足目前无掩模光刻对准精度的要求。

关键词 光栅;数字光栅;变频光栅;无掩模光刻;对准方法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0316002

A Digital-Grating-Based Alignment Technique in Maskless Lithography

Tang Lulu^{1,2} Hu Song¹ Xu Feng^{1,2} Tang Yan¹ Chen Mingyong¹ Zhu Jiangping^{1,2}

(¹Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A digital-grating-based alignment technique is brought forward and researched for digital micromirror device (DMD) maskless lithography system. Infinitesimal displacement of a silicon chip is amplified and displayed in moiré fringes generated by digital grating and physical grating. A digital-grating-based alignment model is created in DMD-based maskless lithography system. The alignment marks as well as detailed realization program is designed. Numerical simulation and preliminary experimental test is carried out. Compared to the traditional real mask, the grating digital gating characterized with variable frequency, clear image, good periodic structure and zero mask cost will extend the measurement range and reduce the displacement measurement error. This technique can realize deep sub-micron alignment accuracy, and satisfy the requirements of maskless lithography.

Key words gratings; digital gratings; variable-frequency gratings; maskless lithography; alignment technique

OCIS codes 220.3740; 220.1140; 050.2770

1 引 言

光刻技术的快速发展,在一定程度上满足了微纳器件的特征尺度进一步缩小的要求。然而,由于产品个性化、小批量和更新周期变短所导致的掩模费用占总成本比例不断飞升的困难开始困扰着半导体行业。于是,在光刻中如何降低掩模成本,甚至发展不需要昂贵掩模的无掩模光刻技术已成为光刻业

界的热门话题^[1]。随后,无掩模光刻技术得到了迅速多样的发展,其中基于数字微反射镜装置(DMD)的无掩模光刻技术因其较强的技术延伸性和工艺兼容性得到了广泛的研究与应用。

然而无掩模光刻技术作为一种新颖的技术,在很多理论和关键技术尚需要更进一步的研究,尤其是无掩模光刻技术的发展对无掩模光刻对准技术

收稿日期: 2011-09-23; **收到修改稿日期:** 2011-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(60976077,60906049,61076100)和国家 863 计划(2009AA03Z341)资助课题。

作者简介: 唐路路(1986—),女,硕士研究生,主要从事微纳加工相关技术、光学干涉测量等方面的研究。

E-mail: tanglulubbb@163.com

导师简介: 胡松(1965—),男,博士,研究员,主要从事微电子总体专用设备方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

提出了新的要求。对准技术作为光刻系统的三大核心技术之一,一般要求对准精度为最细线宽的 $1/7 \sim 1/10$ ^[2]。早期的接近接触式光刻和投影光刻系统中,普遍采用光度型对准。CCD 视频图像对准是光度型对准的主要方法,这种对准方法的优点是简单易行,然而受到光学系统分辨力的限制,对准精度提高有限^[3,4]。随着光刻分辨力的提高,投影光刻机主要采用衍射光栅对准技术^[5~7]。比如荷兰 ASML 公司所采用的 TTL 衍射光栅同轴对准^[8]、ATHENA 离轴对准^[9,10]等。衍射光栅对准方法的信噪比较高,因此可以实现较高的对准精度,但是其对准系统结构复杂,实施较困难。贝尔实验室的 King 等^[11]最早提出了一种利用叠栅图案实现对准的方法,之后国内外在叠栅条纹对准方面进行了大量的研究^[12~14]。叠栅条纹对准方法具有可视化、结构简单、操作方便、精度高等优点。

以上诸多的对准方法主要是针对掩模和硅片上均有对准标记的情况,而基于 DMD 的无掩模光刻系统由于其无掩模的特殊性,不具备直接将掩模和硅片对准的条件。为此,本文借鉴并综合了几种对准方法的优势,利用 DMD 可以产生平滑、细腻、精确、近似无缝的图像特征,提出一种数字光栅无掩模光刻对准方法,将硅片的微位移放大显示在数字光栅与硅片上物理光栅叠加产生的叠栅条纹中。主要建立了基于 DMD 的数字光栅无掩模光刻对准模型,设计了对准标记以及具体的实现方案,并对模型进行了数值仿真和初步的实验验证。

2 数字光栅无掩模光刻对准模型

基于 DMD 的数字光栅无掩模光刻对准方法,其原理为:首先由计算机生成一幅数字光栅图,输出到 DMD,经对准光照射后发生反射,通过投影物镜将数字光栅投影到硅片上,与硅片上已有的物理光栅标记叠加,形成叠栅条纹。

该模型采用高倍的光学系统采集条纹图像,硅片极小的相对位移转化为叠栅条纹图样空间相位的强烈变化,通过提取叠栅条纹的相位作为对准信号。其对准方案如图 1 所示。

进行对准时,首先打开对准光源,对准光源波长远离曝光光源波长(假设系统采用 550 nm 的对准光源和 365 nm 的曝光光源);对准光经过分色分光镜 1(透过波长为 365 nm 的光,反射波长为 550 nm 的光)反射到 DMD 上;同时计算机控制 DMD 生成一幅数字光栅图;对准光经 DMD 反射后再经过投

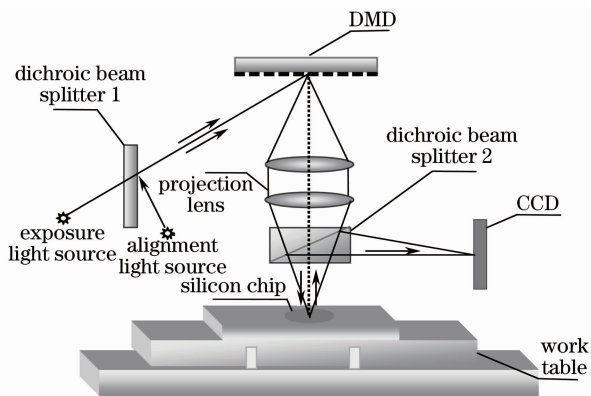


图 1 基于 DMD 的数字光栅无掩模光刻对准方案
Fig. 1 Digital-grating-based alignment technique in DMD-based maskless lithography

影物镜以及分色分光镜 2(透过波长为 365 nm 的光,半反半透波长为 550 nm 的光)透射,将数字光栅投影到硅片上,与硅片上已有的物理光栅标记相叠加;对准光被硅片反射后,再次经过分色分光镜 2,这时经分色分光镜 2 反射的对准光被 CCD 接收;此时 CCD 采集到的图像就是数字光栅与硅片上的物理光栅相叠加产生的图像。系统中 DMD、CCD 的位置始终固定不变。每次进行对准时,数字光栅的位置不变。将硅片放在工件台上,保证硅片上物理光栅标记在 CCD 视场范围内,其等价原理模型如图 2 所示。

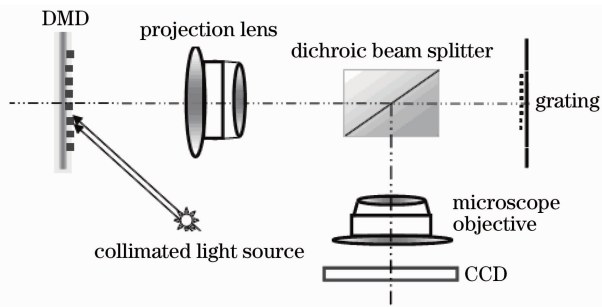


图 2 反射式对准原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of reflection alignment principle

根据叠栅条纹的产生机理,两组具有周期结构的直线簇或曲线簇重合产生叠栅条纹。而 CCD 采集到的图像正是数字光栅与物理光栅相叠加产生的图像,也即叠栅条纹图。根据 CCD 采集到的叠栅条纹图,提取其条纹的相位信息,从而求解出硅片的位移量,最后通过工件台的移动来实现对准。

假设方案中采用顺序相反的两组拼接光栅作为掩模、硅片上的对准标记,如图 3 所示。标记的上下半部分分别对准,形成两组相移或运动方向相反的

线形叠栅条纹,如图4所示。

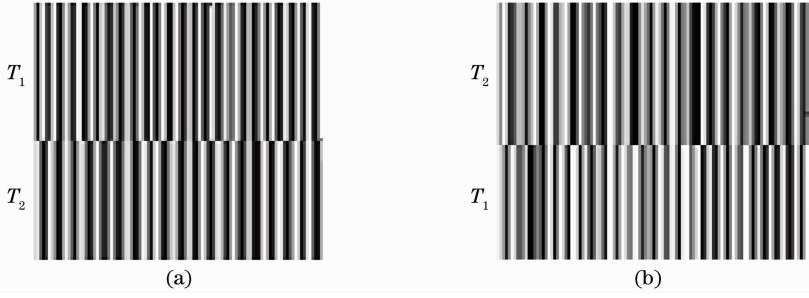


图3 对准中的两个光栅标记。(a)光栅标记1;(b)光栅标记2

Fig.3 Two grating marks in alignment program. (a) Grating mark 1; (b) grating mark 2



图4 对准过程中的叠栅条纹分布。(a)未对准;(b)完全对准

Fig.4 Distribution of moiré fringes in alignment process. (a) Misalignment; (b) completely aligned

周期为 T_1 、 T_2 的两个光栅叠加产生的叠栅条纹周期为

$$T = \frac{1}{f_1 - f_2} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

式中 f_1 、 f_2 表示两光栅的频率。叠栅条纹位移相对光栅位移的放大倍率为

$$M_0 = \frac{T_1 + T_2}{|T_1 - T_2|}. \quad (2)$$

假设 CCD 的分辨力为 η_{CCD} , 接收物镜的放大倍率为 M_1 , 则系统的分辨力为

$$\eta = \frac{\eta_{\text{CCD}}}{M_0 M_1}. \quad (3)$$

当两标记相对位移为 Δx 时上下两组条纹引入的相移分别为^[15]

$$\Delta\varphi_{\text{up}} = 2\pi f_1 \Delta x, \Delta\varphi_{\text{down}} = -2\pi f_2 \Delta x. \quad (4)$$

可见硅片运动将导致上下两组条纹相移方向相反,则两者相移差为

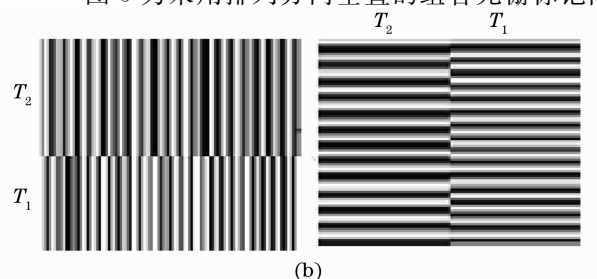
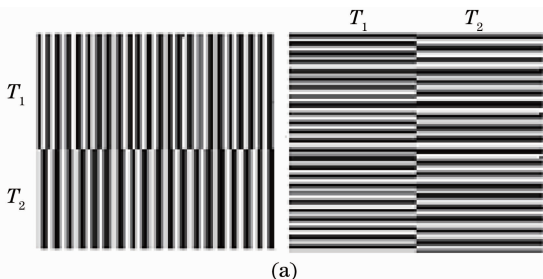


图5 组合光栅对准标记示意图。(a)数字光栅;(b)物理光栅

Fig.5 Schematic of alignment mark with combined gratings. (a) Digital grating; (b) physical grating

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{up}} + \Delta\varphi_{\text{down}} = 2\pi(f_1 + f_2)\Delta x. \quad (5)$$

采用傅里叶变换、相移法^[16]或者小波变换^[17]等方法提取上下两组条纹的相对相移 $\Delta\varphi$, 不难得出两组标记的对准位移偏差 Δx , 即

$$\Delta x = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{1}{f_1 + f_2} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{T_{\text{avg}}}{2}, \quad (6)$$

式中 $T_{\text{avg}} = 2T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$ 为两光栅的平均周期。由(6)式可以看出, 该方法的测量范围为 $1/2$ 个平均周期。当两光栅周期一定时其位移测量精度与叠栅条纹的相位提取精度呈正比。

3 仿真及实验

3.1 设计与仿真

设计投影到硅片上的数字光栅和物理光栅如图5所示。

图5为采用排列方向垂直的组合光栅标记同时

实现 x, y 方向上的对准。以 x 方向对准为例, 采用如图 5 所示的标记, 在相同光栅位移情况下, 先后采用多幅不同频率的光栅与一个固定频率的光栅叠加, 研究变频率光栅周期对位移测量精度的影响。

假设固定光栅周期 $T_1 = 6$, 变频率光栅周期 T_2 由 4 增加到 8, 间隔为 0.4, 两光栅位移统一为 1。图 6 为在相同位移情况下不同频率的光栅与固定频率的光栅相叠加产生的纯叠栅条纹图。

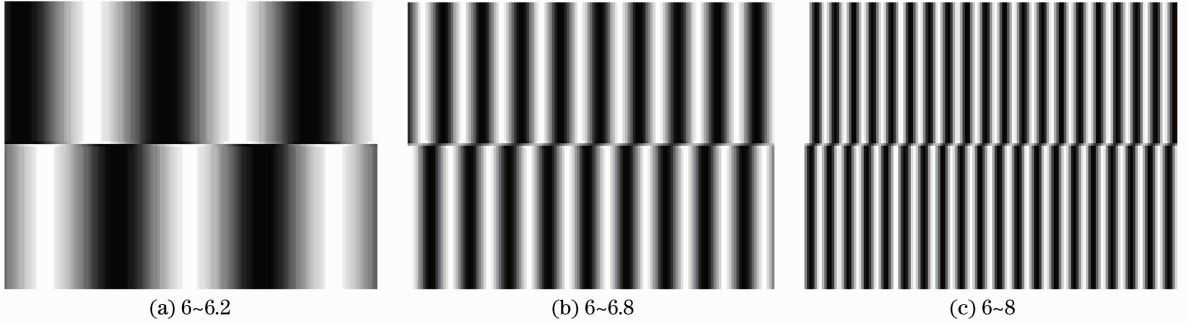


图 6 相同位移情况下, 固定频率的光栅与不同频率的光栅叠加产生的叠栅条纹图

Fig. 6 In the case of same displacement, moiré fringes generated by fixed-frequency grating and different frequencies gratings

本文采用傅里叶变换法提取上下两组条纹的相对相移 $\Delta\varphi$, 根据(6)式求解出两光栅标记的对准位移偏差为 Δx 。相应的仿真数据统计如表 1 所示。

表 1 仿真数据统计

Table 1 Statistics of simulation data

Period of the fixed-frequency grating $T_1/\mu\text{m}$	6	6	6	6	6
Period of the different frequencies gratings $T_2/\mu\text{m}$	4	4.4	4.8	5.2	5.6
The relative phase shift of stripe $\Delta\varphi/\text{rad}$	2.6159	2.4773	2.3591	2.2602	2.1755
The displacement deviation of the two gratings $\Delta x/\mu\text{m}$	0.9992	1.0008	1.0012	1.0021	1.0029
Period of the fixed-frequency grating $T_1/\mu\text{m}$	6	6	6	6	6
Period of the different frequencies gratings $T_2/\mu\text{m}$	6.4	6.8	7.2	7.6	8
The relative phase shift of stripe $\Delta\varphi/\text{rad}$	-2.0197	-1.9773	-1.9256	-1.8513	-1.8365
The displacement deviation of the two gratings $\Delta x/\mu\text{m}$	-0.9955	-1.0031	-1.003	-0.9992	-1.0021

将表 1 所得的两光栅对准位移偏差与两光栅的实际位移比较, 可得图 7 所示的误差曲线图, 其中横坐标表示两光栅周期的比值, 纵坐标表示根据傅里叶变换提取相位求得的两光栅对准位移与实际位移的误差绝对值。

由图 6, 7 以及表 1 可以看出当两光栅周期越接近时, 其叠加产生的叠栅条纹的周期越大, 叠栅条纹

周期相对光栅周期的放大倍率越大。此时, 叠栅条纹数越少, 位移探测灵敏度越高, 然而其相位提取却越困难, 差频距离零频越近, 相位提取精度降低, 最终将导致位移测量精度降低。相反, 当叠栅条纹周期越小时, 叠栅条纹周期相对光栅周期的放大倍率越小, 条纹数增多, 其位移探测灵敏度越低, 但是其相位提取精度较高, 最终的位移测量误差则较小。

为了寻求一种合适的方式来实现较高的位移探测灵敏度以及相位提取精度, 提出一种变频率数字光栅对准方法。该方法首先投影一幅与物理光栅周期接近的数字光栅到硅片上, 形成周期较大的叠栅条纹。由上面分析可得叠栅条纹周期较大时, 其位移探测灵敏度较高。因此, 可以采用周期接近的数字光栅来实现粗对准, 然后投影一幅与物理光栅周期差较大的数字光栅到硅片上, 此时产生的叠栅条纹周期较小, 相位提取精度较高。因此, 可以采用周期差较大的数字光栅以实现精对准。根据反复的仿真实验发现, 当两光栅的周期比在 1.0 到 1.2 之间时, 叠栅条

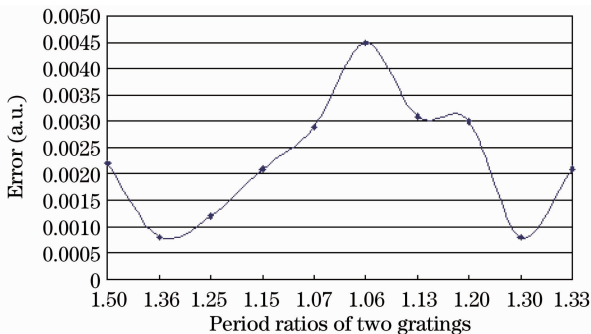


图 7 两光栅位移误差曲线图

Fig. 7 Displacement error curve of two gratings

纹周期相对原光栅周期的放大倍率较大,产生的叠栅条纹现象较明显。由图 7 可以看出,当两光栅周期比在 1.2 到 1.3 之间时其位移测量误差较小。

3.2 实验与分析

实验中采用 635 nm 的激光对准光源;0.7 inch (1 inch = 25.4 mm), 1024 pixel × 768 pixel, 13.68 μm/pixel 的 DMD; 4×、20× 的显微镜头; 8× 的接收物镜; 752 pixel × 480 pixel, 6.0 μm/pixel 的 MVC360F 的彩色 CCD。

综合考虑叠栅条纹清晰度、相位提取精度以及实验的可操作性等,设计硅片上的物理光栅周期为

6 μm, 数字光栅周期为 2 pixel、9 pixel, 依次采用 4×、20× 的显微镜头, 则对应的数字光栅周期依次为 6.84 μm、6.16 μm。

实验中首先投影周期为 6.16 μm 的数字光栅, 根据叠栅条纹图形来实现粗对准, 将硅片位移缩小到一个较小的范围; 然后再投影周期为 6.84 μm 的数字光栅, 根据叠栅条纹的相位信息来实现精对准。

采用图 1, 2 所示的装置以及图 5 所示的对准标记做初步的实验验证。以 x 方向对准为例, 在已知两标记位移为 2 μm 时, 对准过程中的叠栅条纹如图 8 所示, 其相应的实验数据如表 2 所示。

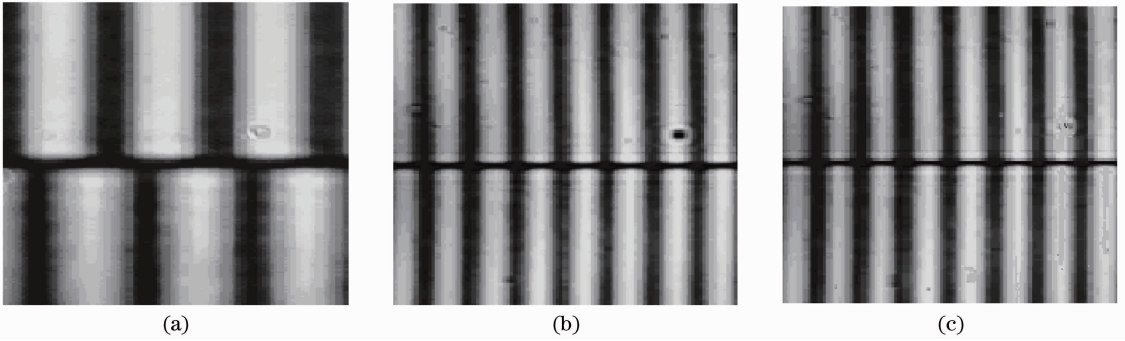


图 8 对准过程中的叠栅条纹。(a)初对准;(b)精对准;(c)完全对准

Fig. 8 Moiré fringes at alignment process. (a) Initial alignment; (b) fine alignment; (c) completely alignment

表 2 实验数据统计

Table 2 Statistics of experimental data

	Initial alignment	Fine alignment
Period of the fixed-frequency grating $T_1/\mu\text{m}$	6	6
Period of the different frequencies gratings $T_2/\mu\text{m}$	6.156	6.84
Relative phase shift of stripe $\Delta\varphi/\text{rad}$	3.7348	0.5087
Displacement deviation of the two gratings $\Delta x/\mu\text{m}$	1.8061	0.2588

则两光栅的位移为粗对准和精对准测出的位移总和, 即两光栅标记的对准位移偏差 $\Delta x = 1.8061 + 0.2588 = 2.0649 \mu\text{m}$, 而实际位移为 2 μm, 因此初步的对准位移测量精度约为 65 nm。

对于系统采用周期分别为 6 μm、6.156 μm 的光栅标记, 叠栅条纹位移相对光栅位移放大倍率为 $M = (T_1 + T_2) / |T_1 - T_2| \approx 78$, 采用 6.0 μm/pixel 的 CCD 以及 8 倍的接收物镜, 则系统的分辨力 $\eta = 6 \mu\text{m} / (78 \times 8) \approx 10 \text{ nm}$ 。在该系统的基础上再结合图像处理, 设计更高倍率的接收物镜以及较高精度的叠栅条纹相位展开算法, 系统理论精度可以达到纳米级。在缺乏精密测量与驱动, 同时存在光栅误差、镜头的成像误差等多种因素的条件下, 初步的实验对准位移测量精度约为 65 nm, 但已明显优于目前无掩模光刻中普遍采用的视频图像对准。

4 结 论

针对 DMD 无掩模光刻系统, 提出了一种数字光栅无掩模光刻对准方法, 该方法采用差动叠栅条纹实现对准, 将两光栅的相对位移放大显示在叠栅条纹中, 具有很高的位移探测灵敏度; 采用数字光栅代替传统的真实掩模光栅消除了传统掩模-硅片对准模型中的掩模制作成本, 真正实现了零掩模成本; 利用 DMD 可以产生图像干净、具有良好周期性结构的数字光栅, 减小了掩模光栅制作过程中带来的误差; 采用与硅片上物理光栅周期接近的数字光栅来实现粗对准, 周期差较大的数字光栅来实现精对准, 扩大了测量范围, 减小了测量误差。

参 考 文 献

1 Jiang Wenbo, Hu Song. Study on maskless lithography

- technology[J]. *Microfabrication Technology*, 2008, **8**(4): 1~3
 蒋文波, 胡 松. 无掩模光刻技术研究[J]. 微细加工技术, 2008, **8**(4): 1~3
- 2 姚汉民, 胡 松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006. 83~85
- 3 Wang Quandai, Duan Yugang, Lu Bingheng. Video-based alignment system in MEMS multilayer imprint [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(10): 84~88
 王权岱, 段玉岗, 卢秉恒. MEMS 多层压印工艺中的视频图像对准系统[J]. 光电工程, 2005, **32**(10): 84~88
- 4 R. E. Hughlett, K. A. Cooper. Video-based alignment system for X-ray lithography[C]. *SPIE*, 1991, **1465**: 100~110
- 5 Tadashi Nagayama, Shinichi Nakajima, Ayako Sugaya. New method to reduce alignment error caused by optical system[C]. *SPIE*, 2003, **5038**: 849~860
- 6 G. Bouwhuis, S. Wittekoek. Automatic alignment system for optical projection printing [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, **26**(4): 723~728
- 7 K. Hara, U. Yoshiyuki, T. Nomura *et al.*. An alignment technique using diffracted moiré signals [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1989, **7**(6): 1977~1979
- 8 J. H. Kwon, Y. J. Sohn, H. C. Hwang *et al.*. Chromatic aberration-free TTL alignment system for 193-nm step-and-scan exposure system by using phase conjugate waves[C]. *SPIE*, 1998, **3334**: 971~977
- 9 J. Opitz, D. Laidler. Comparison of ATHENA (TM) and TTL alignment capability on product wafers [C]. *SPIE*, 2002, **4689**: 852~862
- 10 J. Huijbregtse, R. van Haren, A. Jeunink *et al.*. Overlay performance with advanced ATHENA (TM) alignment strategies [C]. *SPIE*, 2003, **5038**: 918~928
- 11 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using moiré techniques[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1972, **11**(11): 2455~2458
- 12 E. E. Moon, Henry I. Smith. Nanometer-precision pattern registration for scanning-probe lithographies using interferometric-spatial-phase imaging[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, **24**(6): 3083~3087
- 13 N. Li, W. Wu, S. Chou. Sub-20-nm alignment in nanoimprint lithography using Moiré fringe[J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(11): 2626~2629
- 14 M. Muhlberger, I. Bergmarr, W. Schwinger *et al.*. A Moiré method for high accuracy alignment in nanoimprint lithography [J]. *Microelectron. Engng.*, 2007, **84**(5-8): 925~927
- 15 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706
 周绍林, 杨 勇, 陈旺富 等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 702~706
- 16 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67
 钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 64~67
- 17 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier-fringe patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
 翁嘉文, 钟金刚. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究 [J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 454~459

栏目编辑:何卓铭