

## 基于线阵 CCD 的高速光刻检焦技术

陈昌龙<sup>1,2</sup>, 邱成良<sup>1,2</sup>, 唐小萍<sup>1</sup>, 胡松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 随着光学投影光刻分辨力的提高, 投影物镜的焦深在逐渐缩短。为充分利用物镜有限的焦深, 一般采用调焦技术来调整硅片位置。作为调焦的关键, 检焦技术的研究尤为热门。现有的检焦方法多采用四象限探测器或者面阵 CCD 采集携带有硅片离焦量信息的光强信号, 并在计算机上进行图像处理完成检焦。该方法处理速度慢, 难以满足实时调焦的要求。鉴于此, 提出了一种用线阵 CCD 采集图像, 以 FPGA 为处理器的检焦方法。该方法利用线阵 CCD 的高速性和 FPGA 的并行性, 结合多项式插值的亚像素边缘检测算法, 能够高速实时检测硅片离焦量; 同时, FPGA 通过驱动电机控制工件台运动对离焦量进行补偿, 形成一个实时闭环的调焦系统, 减少了原有的计算机环节, 具有高速度、高分辨率、低功耗、低成本的特点。

**关键词:** 光刻; 检焦; FPGA; 线阵 CCD

**中图分类号:** TB96   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2389-06

## High-speed focusing technique for lithography based on line scan CCD

Chen Changlong<sup>1,2</sup>, Di Chengliang<sup>1,2</sup>, Tang Xiaoping<sup>1</sup>, Hu song<sup>1</sup>

(1. Institute of Optic and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the improvement of lithograph resolution, the depth of focus (DOF) of lithographic projection objective is decreasing. In order to take full advantages of the restricted DOF, focusing is commonly used to adjust the wafer onto the ideal focal plane. As the key point of focusing, research on focus detection becomes very popular. The present focus method is based on four-quadrant detector or array CCD to grab light signal, which carries the defocusing amount information of the wafer, and then process image on computer. This method is slow and cannot satisfy the real-time requirement for focusing. Therefore, a focus detection method, which was based on line scan CCD for image grabbing and FPGA for image processing, was provided. This method can detect the defocusing amount in high-speed by utilizing the high-speed of line scan CCD and FPGA's parallelism, combining with sub-pixel boundary detection algorithm based on polynomial interpolation. In order to compensate the defocusing

收稿日期: 2014-08-13; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61274108)

作者简介: 陈昌龙(1988-), 男, 硕士生, 主要从事嵌入式系统设计与信号处理方面的研究。Email: chenchanglong2013@163.com

导师简介: 唐小萍(1963-), 女, 研究员, 主要从事光刻设备控制系统方面的研究。Email: xptang@ioe.ac.cn

amount, FPGA directly control the motor to drive the wafer stage up and down, making the focusing system a real-time closed loop. Due to reducing the computer links, this design has high-speed, high-resolution, low power consumption and low-cost characters.

**Key words:** lithography; focus; FPGA; line scan CCD

## 0 引言

集成电路产业发展迅速,特征线宽按照摩尔定律不断减小。2013 年底,Intel 已经开始采用 14 nm 工艺,并计划在 2015 年进入 10 nm 阶段。同时,为了提高生产率,硅片尺寸也越来越大,Intel 与 ASML 合作已经开始研发  $\varphi 450$  mm 技术。而当今在超大规模集成电路制造生产线上的主流光刻技术依旧是光学投影光刻。

$$R = k_1 \lambda / NA \quad (1)$$

$$DOF = k_2 \lambda / NA^2 \quad (2)$$

根据瑞利公式(1)和焦深公式(2)可知,光学投影光刻分辨率  $R$  的提高可通过增大光刻物镜数值孔径  $NA$  和缩短曝光波长  $\lambda$  实现,但伴随而来的是投影物镜焦深  $DOF$  的急剧缩短。如果硅片曝光视场内的某些区域不在有效焦深之内,将严重影响曝光线条质量和集成电路生产的成品率。为了将掩模板上的图像精确清晰的转移到硅片上,必须采用精确的检焦技术,以充分利用有限的焦深。同时,由于曝光场面积和硅片尺寸的进一步增大,逐场调焦将花费更多时间。如果能减少调焦的时间,将进一步提高集成电路的生产率。因此,高速精确的焦面检测技术对投影光刻来说意义重大<sup>[1]</sup>。

现有焦面检测技术较为简单的有狭缝光度式焦面检测,主要利用三角光路测量原理,将硅片台的上下移动转化成光强信号在面阵 CCD 或者四象限探测仪上的位移,可以满足亚微米量级精度要求的场合;而对于纳米量级的焦面检测,目前主流的精检焦仍采用光弹调制的检焦方法,此外,又发展有激光干涉检焦技术<sup>[2]</sup>、基于光栅叠栅条纹的纳米检焦方法<sup>[3]</sup>等。

文中首先讨论狭缝光度式检焦的基本原理,针对现有的方法中要等到面阵 CCD 采集完一帧图像并计算出离焦量后才进行离焦量的补偿和传输环节过多等缺点,提出一种利用线阵 CCD 和 FPGA 的检

焦方法。该方法在线阵 CCD 每采集一行图像就进行离焦量计算,对离焦量进行补偿,并且减少了与计算机的传输环节,能够满足调焦的实时性要求,具有高速、高分辨率、低功耗和低成本的特点。

## 1 狭缝光度式检焦基本原理

狭缝光度式检焦的基本原理<sup>[1]</sup>及过程如图 1 所示:光源 1 发出的光经聚光镜 2、滤光片 3、传导光纤 4、照明狭缝 5,狭缝被成像镜组 6 成像在硅片 7 表面上。从硅片表面反射的光束继续由透镜组 8 放大到面阵 CCD 9 上,这样,硅片在  $Z$  方向上的位移  $\Delta Z$  将反映在 CCD 上亮条纹的位移  $\Delta X$ 。在 CCD 靶面上标记出最佳焦面的坐标,通过图像采集卡 10 采集 CCD 靶面图像,通过 USB 传输给计算机 11,用图像处理算法就能通过检测亮条纹的坐标得到离焦量,传输给运动控制卡 12。再根据离焦量,由运动控制卡控制工件台  $Z$  向电机运动进行调焦。

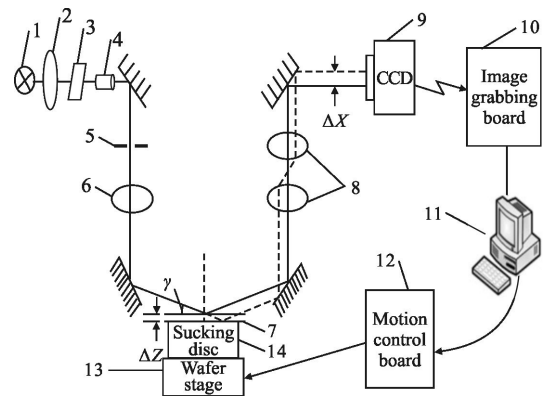


图 1 检焦原理图

Fig.1 Focusing schematic

该方法传输处理环节冗余,同时由于图像来源于面阵 CCD,其每一帧图像数据量大,计算机串行指令的图像处理算法并不能提供很好的实时性,并且成本较高。文中针对现有系统,对光学结构之后的环节进行了优化,如图 2 所示。

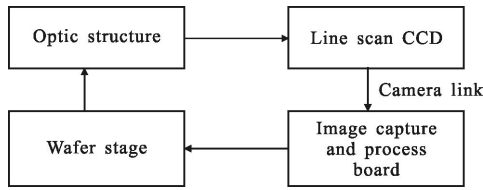


图 2 优化后的结构框图

Fig.2 Modified structure diagram

其中,光学结构同图 1 中 1~8 相同,后续环节中  
将面阵 CCD9 替换成了线阵 CCD,具有最高行频  
11.8 kHz,通过 Camera Link 传输线与图像采集处理  
板卡通信。图像采集处理板卡替代了图 1 中 10~12  
的结构,集图像采集、图像处理和电机控制于一体,  
直接控制工件台运动,改变光路,形成一个闭环的检  
焦调焦系统。下面就该系统的硬件设计和算法思想  
进行介绍。

## 2 硬件设计

### 2.1 线扫描相机

由于不需要彩色图像,系统采用奥特梅尔公司  
的 S1 系列黑白线扫描 CCD 工业数字相机,具有高  
灵敏度及低噪声的特点。该系列产品采用了 Camera  
Link Base 标准协议接口方式,具有高速稳定的特  
点。线扫描相机具有 2 048 个独立像素,像素大小  
14 μm×14 μm,最大数据频率 25 MHz,最高行频达到  
11.8 kHz。相机工作原理如图 3 所示。

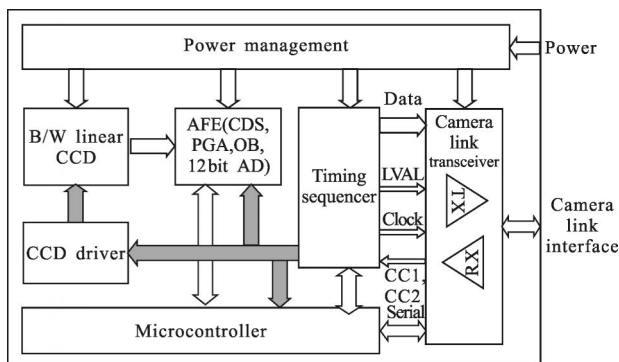


图 3 相机工作原理图

Fig.3 Camera working principle schematic

S1 系列相机采用基于单沟道输出结构的黑白  
线扫描 CCD 传感器,内部采用单路模拟通道 AFE  
进行信号处理和数字化转换。AFE 模块中包含 CDS  
相关双采样、PGA 可编程增益控制、OB 可编程偏置

控制和 12bit AD 采样器。时序发生器及主控制器均  
由 FPGA 设计,时序控制器为 CCD 驱动及 AFE 模块  
提供高精度和高速的时序脉冲,同时完成奇偶通道  
的数据合并,并与 Camera Link 收发器完成接口时  
序;主控制器进行 AFE 的可编程控制,对时序控制  
器的时序编程控制和与 Camera Link 收发器内的串  
行接口完成相机与外界通讯控制<sup>[4]</sup>。

原来的面阵 CCD 得到的是在垂直方向有一条  
亮条纹的二维灰度图像,亮条纹的水平宽度约为 40  
个像素。在每一行均要计算其灰度值的波峰,最后  
在把所有行的波峰坐标再进行拟合求最终的离焦量。  
每得到一个离焦量才进行一次调焦,图像帧率 25 Hz,  
在 1 s 内只可以进行 25 次调焦。采用线阵 CCD 后,  
其图像是一个 2 048×1 的一维图像,达到了 11.8 kHz  
的行频,通过检测一行中的灰度值波峰就可得到离  
焦量,马上进行调焦,理论上可达最高 11.8 kHz,可  
以提高整个调焦系统的实时性。

### 2.2 图像采集处理卡

图像采集处理卡集图像采集、图像处理和电机  
控制于一体,是优化的核心。因为线扫描相机传输  
过来的图像是 2 048×1 的灰度图像,可以用 FPGA  
进行图像采集并直接运行图像处理算法。

图像采集处理卡设计框图如图 4 所示。采用主  
芯片为 Xilinx 公司 Spartan-3 系列产品 XC3S200,其系  
统门数 200 000,具有 30 kB 的分布式 RAM 和 216 kB  
的块 RAM 容量,能够满足每行 2 048 灰度字节的存  
储和计算。使用的标准 Camera Link Base 规范由一个  
Channel Link 接收器、4 路控制信号(CC1-CC4\_ 和 2

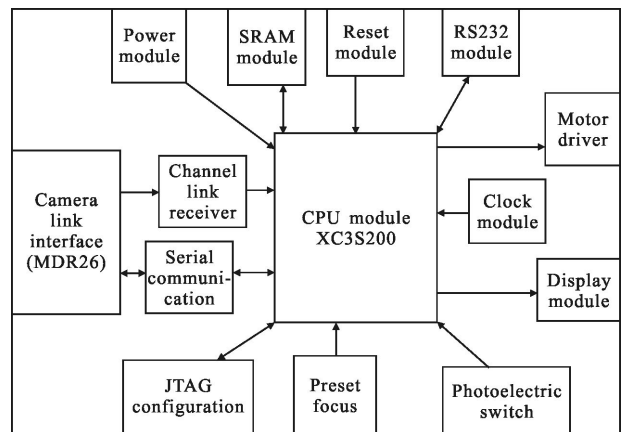


图 4 图像采集处理卡设计框图

Fig.4 Image capture and process card diagram

路串行通信信号(SerTFG, SerTC)组成,用一个MDR26接头与 camera link 传输线相连。Channel Link 接收器芯片采用德州仪器的 DS90CR288, 可以接收 4 路低压差分(LVDS)串行信号和 1 路 LVDS 时钟信号,并将 4 路 LVDS 信号按 1:7 的比例转换成 28 位并行数据(其中 24 bit 数据位,帧有效信号 FVAL,行有效信号 LVAL,数据有效信号 DVAL 和空闲信号 spare),LVDS 时钟信号直接转换成 1 路 TTL 时钟信号<sup>[5]</sup>。用德州仪器公司的 DS90LV031 作为 4 路控制信号发送器,DS90LV019 作为串行通信芯片。

预设焦面模块是一组 11 位的拨码开关,可以表示 0~2047 的整数,用来标定最佳焦面的坐标。显示模块由两个 4 位 7 段数码管分别表示预设的最佳焦面值和当时的亮纹波峰坐标值。FPGA 得到离焦量后直接发送控制信号到电机驱动器,控制电机 Z 向运动,对离焦量进行补偿,直到离焦量符合要求。为防止上电后的扫描超过 Z 向行程,造成机械损伤,用光电开关作为限位开关。

### 3 算法思想

基于线阵 CCD 的图像处理算法在检测技术中主要用到边缘检测和像点定位。图像边缘对应梯度图像的峰值位置,通过求两边缘的中点作为检焦亮条纹的中心,可以得到像素级的分辨率。如果再使用内插细分算法,整个 CCD 测量系统分辨率可以达到亚像素以及超亚像素级<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 高斯平滑滤波

通过对灰度图像求导可以得到梯度图像,求导运算对噪声很敏感,因此在进行求导之前要进行平滑滤波,减少噪声的影响。高斯滤波器根据高斯函数的形状来选择权值进行平滑滤波,是十分有效的低通滤波器,对服从正态分布的噪声抑制效果很好。高斯滤波器用像素相邻域的加权平均值来代替该点的灰度值,而加权值服从正态分布,避免了平滑运算造成的图像失真。用杨辉三角形的第 5 行 1、4、6、4、1 作为高斯滤波器的一个 5 点逼近,与图像进行卷积便可以实现平滑滤波的作用。

#### 3.2 像素级边缘检测

图像边缘点位于灰度图像梯度的最大值处,梯度图像通过对灰度图像求导得到。在数字图像处理中,对灰度图像的求导用差分运算代替。设经过高斯

滤波后的图像灰度函数为  $f(i)$ ,其中  $i=0,1,2,\dots,2047$ 。则梯度图像  $R(i)$ 为:

$$R(i)=|f(i+1)-f(i)| \quad (3)$$

式中: $i=0,1,2,\dots,2046$ 。边缘位于梯度图像的极大值处,求点  $i$  半径为 2 的邻域的极大值:

$$\begin{cases} R(i)>R(i+1)\geq R(i+2) \\ R(i)<R(i-1)\geq R(i-2) \end{cases} \quad (4)$$

用离散函数  $E(i)$ 表示边缘信息:

$$E(i)=\begin{cases} R(i), & \text{if (4) is true} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i=2,3,\dots,2045$ ,线阵 CCD 阵列两端的 2 个像素就不在测量范围内了。选择  $E(i)$ 中最大的两点做为边界点,求其均值作为亮条纹中心位置。通过该方法可以将图像边缘精确得到 1 个像素。

#### 3.3 二次插值亚像素边缘检测算法

由于 CCD 光敏元间距  $W$  在加工时已经固定,像素级的边缘检测都是以边缘点所在像素的中心作为边缘所在位置。其分辨率误差约为 1 个光敏元间距  $W$ 。

为提高系统的测量分辨率,可用二次插值算法对梯度图像进行细分,其具体过程如下<sup>[7-8]</sup>:

步骤 S1 利用 3.2 节中的方法找到像素级的边缘信息函数  $W$ ,取最大的两点  $j,k$  作为前后两个边缘点位置。

步骤 S2 对梯度图像  $R(i)$ 取 3 点  $R(j-1),R(j),R(j+1)$ ,进行二次多项式插值。插值函数  $P(x)$ 可表示为:

$$P(x)=\frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}R(j-1)+\frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}R(j)+\frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}R(j+1) \quad (6)$$

式中: $x_0=j-W, x_1=j, x_2=j+W, W$  为光敏元间距。同时,对  $R(k)$ 进行相同处理,得到  $k$  点插值函数  $Q(x)$ 。

步骤 S3 对插值后的函数  $P(x)$ 求导,并令导数为 0,可以解得:

$$e_j=j+\frac{R(j-1)-R(j+1)}{R(j-1)-2R(j)+R(j+1)}\cdot\frac{W}{2} \quad (7)$$

$e_j$  即为  $j$  点插值细分后得到的亚像素级边缘位置。同理可以对  $Q(x)$ 求导,令导数等于 0,可以求得  $k$  点的亚像素级边缘位置  $e_k$ 。

步骤 S4 亮条纹中心在线阵 CCD 上的亚像素级坐标可以表示为:

$$n = \frac{e_j + e_k}{2} \quad (8)$$

如果  $n$  与预设的理想焦面坐标之差 (离焦量) 满足误差要求, 则完成检焦调焦过程; 否则控制电机运动, 直到离焦量满足误差要求。图像处理整个算法流程图如图 5 所示。

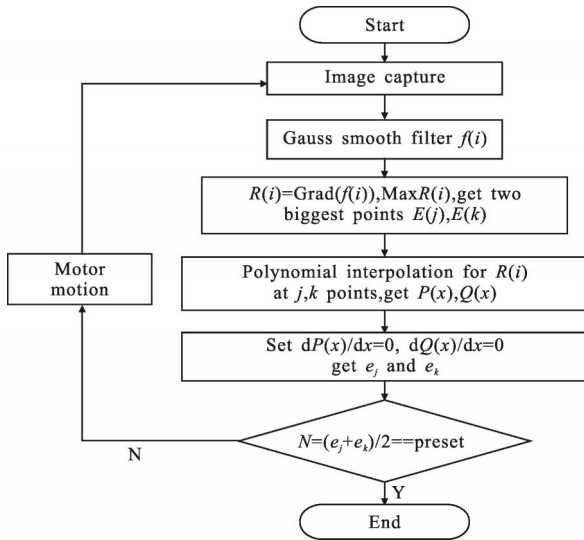


图 5 图像处理流程图

Fig.5 Image processing flow

### 3.4 测量分辨率分析

由图 1 可知, 亮条纹在 CCD 靶面上的移动是由工件台载动硅片在 Z 方向上运动产生的。条纹的移动位移  $\Delta X$  和硅片位移  $\Delta Z$  满足:

$$\Delta X = 2a\Delta Z \cos \gamma \quad (9)$$

式中:  $a$  为透镜组 8 的放大倍率;  $\gamma$  为入射角的余角。通常, 放大倍率  $a=20$ ,  $\gamma=15^\circ$ , 线阵 CCD 的像元间距  $W=14 \mu\text{m}$ , 像元个数  $n=2048$ , 则对应的像素级测量分辨率  $Re$  和量程  $S$  为:

$$\frac{Re}{W} = \frac{\Delta Z}{\Delta X} \Rightarrow Re = \frac{W}{\frac{\Delta X}{\Delta Z}} = \frac{W}{2a \cos \gamma} \approx 0.36 \mu\text{m}$$

$$S = \text{MAX} \Delta Z = \frac{\text{MAX} \Delta X}{2a \cos \gamma} = \frac{nW}{2a \cos \gamma} \approx 742 \mu\text{m} \quad (10)$$

进行插值细分后, 测量分辨率可进一步提高。亚像素级边缘位置检测误差  $de_j$  可以由公式(7)计算求得:

$$de_j = \frac{\partial e_j}{\partial R_{-1}} dR_{-1} + \frac{\partial e_j}{\partial R_0} dR_0 + \frac{\partial e_j}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial e_j}{\partial W} dW$$

$$de_j = \frac{W}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \left[ \frac{R_{-1} - R_1}{2W} dW + \frac{(R_1 - R_0)dR_{-1} + (R_{-1} - R_1)dR_0 + (R_0 - R_{-1})dR_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \right]$$

因为公式(4)有

$$|R_{-1} - 2R_0 + R_1| > |R_{-1} - R_1|$$

$$|R_{-1} - 2R_0 + R_1| > |R_1 - R_0|$$

$$|R_{-1} - 2R_0 + R_1| > |R_0 - R_{-1}|$$

所以

$$|de_j| < \frac{W}{|R_{-1} - 2R_0 + R_1|} (|dR_{-1}| + |dR_0| + |dR_1|) + \frac{1}{2} |dW|$$

因为是由图像灰度值得到的梯度,  $R$  为整数, 再根据公式(4)有

$$|R_{-1} - 2R_0 + R_1| = |R_{-1} - R_0 + R_1 - R_0| \geq 2$$

则有

$$|de_j| < \frac{3W|dR_0|}{2} + \frac{1}{2} |dW| \quad (11)$$

同理可得到  $de_k$  等于  $de_j$ , 进一步可得到  $dn$  等于  $de_j$ :

$$|dn| = |de_j| < \frac{3W|dR_0|}{2} + \frac{1}{2} |dW| \quad (12)$$

采用的线扫描相机的 8 位 A/D 有  $\pm 1$  个 LSB 的误差, CCD 的制造精度为百分之一像素间距, 代入公式(12), 得:

$$|dn| = 3 \times W \times \frac{2}{256} \times \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{W}{100} = 0.0167 W \approx 0.23 \mu\text{m} \quad (13)$$

分辨率可以达到:

$$Re = \frac{|dn|}{\frac{\Delta X}{\Delta Z}} = \frac{|dn|}{2a \cos \gamma} \approx 0.006 \mu\text{m} \quad (14)$$

## 4 实验结果

由于真空吸附会对硅片造成微米到亚微米级的形变, 实验中利用电感测微仪 TT80 (分辨率为  $0.01 \mu\text{m}$ ) 对硅片不同曝光场中心进行位移标定。然后通过工件台将硅片重新置于已经标定的坐标处, 用文中提出的检焦系统进行检测, 结果见表 1。

表 1 实验结果(单位:  $\mu\text{m}$ )

Tab.1 Experimental results(Unit: $\mu\text{m}$ )			
Field	TT80	Pixel level	Subpixel level
1	0.50	0.36	0.51
2	0.60	0.72	0.60
3	0.70	0.72	0.71
4	0.80	0.72	0.81
5	0.90	1.08	0.92
...	...	...	...
20	2.40	2.52	2.46

统计结果表明,像素级边缘检测能达到微米级的测量分辨率,而亚像素级的边缘检测分辨率能达到  $0.1\ \mu\text{m}$  级。由于工作环境的震动、电机重复定位精度、系统内部热噪声等因素,亚像素边缘检测的分辨率大大低于理论值。但是作为投影光刻机中的粗检焦部分,该设计能够满足要求。

## 5 结 论

文中改进了一套检焦调焦系统,将原系统的面阵扫描相机改成了线扫描相机。这样就不必等到采集完一幅二维图像再进行处理调焦,可以在每一行采集完就进行处理调焦。同时,缩减了与计算机相关的传输处理环节,用高集成度的 FPGA 作为采集处理器,利用其高速并行的特点,进一步提高了系统的实时性。图像处理算法采用基于多项式插值的亚像素边缘检测算法,提高了原来的分辨率,能够稳定地达到亚微米级,从而得到了一个高速度、高分辨率、低功耗、低成本的检焦系统。

## 参考文献:

- [1] Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Nanofabrication Technology of Optic Projection Exposure [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. (in Chinese)  
姚汉明, 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.
- [2] Masahiro Watanabe. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry [C]//SPIE, 1994, 2197: 809-989.
- [3] Yan Wei, Li Yanli, Chen Mingyong, et al. Moiré fringe-based focusing-test scheme for optical projection lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0805001-1-0805001-5. (in Chinese)  
严伟, 李艳丽, 陈铭勇, 等. 基于光栅叠栅条纹的纳米检焦方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0805001-1-0805001-5.
- [4] S1 series line scan CCD cameras user manual [Z]. Tianjin: Auto-measurement & Vision Technology Co., Ltd., 2013. (in Chinese)  
S1 系列线扫描 CCD 工业相机用户手册 [Z]. 天津: 奥特梅尔光电科技有限公司, 2013.
- [5] AIA. Specifications of the camera link interface standard for digital cameras and frame grabbers v2.0 [S]. 2000.
- [6] Yang Boxiong. CCD subdivision technology and its application research [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2005. (in Chinese)  
杨博雄. CCD 细分技术及其应用研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
- [7] Wu Xiaobo, Zhong Xianxin, Liu Houquan. Improve the resolution of array CCD measurement by polynomial interpolation function [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1996, 17(2): 154-159. (in Chinese)  
吴晓波, 钟先信, 刘厚权. 应用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨率 [J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(2): 154-159.
- [8] Gu Lin, Hu Xiaodong, Chen Liangyi, et al. Linear CCD subpixel edge detection SOC based on FPGA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 617-621. (in Chinese)  
谷林, 胡晓东, 陈良益, 等. 基于 FPGA 的线阵 CCD 亚像素边缘检测片上系统 [J]. 光子学报, 2004, 33(5): 617-621.