

文章编号 1004-924X(2004)04-0426-06

# 用于 X 射线光刻对准的图像边缘增强技术

王德强, 谢常青, 叶甜春

(中国科学院 微电子研究所纳米加工与新器件集成技术实验室, 北京 100029)

**摘要:**提出了用于提高 X 射线光刻对准系统自动对准效率和对准精度的图像边缘增强技术,并进行了数值分析。采用先单个再整体的分析方法,通过三种不同的图像边缘增强技术,即索贝尔(SOBEL)算子、拉普拉斯(LAPLAC)算子以及卷积等方法对 CCD 系统采集的对准标记图像进行处理,得到了每个方法相对应的处理结果,并对于处理结果进行了比较分析。分析比较得出:采用卷积和 LAPLAC 算子相结合的方法,即先卷积,再利用 7 个算子的 LAPLAC 方法进行处理,可以将对准系统的自动对准效率提高约 50%,使得自动对准时间由原来的 20 min 缩短到 10 min 左右;系统对准精度的方差可由 0.10  $\mu\text{m}$  提高至 0.08  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**X 射线光刻;对准系统;拉普拉斯算法;索贝尔算法

**中图分类号:**TP319 **文献标识码:**A

## Image edge-enhanced technique for X-ray lithography alignment

WANG De-qiang, XIE Chang-qing, YE Tian-chun

(*Lab of Nanofabrication and Novel Devices Integration, Institute of Microelectronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** The image edge-enhanced technique was proposed to improve the automatic aligning efficiency and aligning accuracy in the X-ray lithography aligning system, and the numerical analysis was given. After analyzing individuals, and the whole view of the image edge-enhanced techniques was given, the novel method were presented. The image obtained from the CCD image system is processed with three image edge-enhanced methods, which are SOBEL operator, LAPLAC operator and convolution. Then the processed results of the novel methods were compared with each other. The conclusion is that the best method is LAPLAC operator and convolution work together, first convolution, then using LAPLAC operator. With this method automatic aligning efficiency can be improved by about 50% in aligning system. Comparing with 20 minutes for the original method, the automatic aligning time only needs 10 minutes or so with novel method, and the aligning accuracy can be improved from 0.10 microns to 0.08 microns.

**Key words:** XRL; alignment system; LAPLAC operator; SOBEL operator

## 1 引言

同步辐射 X 射线光刻 (XRL) 可用于 100 nm 及 100 nm 以下分辨率的光刻技术<sup>[1-2]</sup>。目前能够应用于 XRL 的对准方案主要有两种:一是光栅衍射的方法<sup>[3-5]</sup>,主要原理是利用 HeNe 激光束照射掩模和硅片上有规律的栅线条,激光发生衍射和反射效应,然后探测一级或多级反射和衍射光的峰值强度,通过光强变化判断对准系统的状态;二是图像处理的方法<sup>[6-8]</sup>,其原理是首先通过高精度的 CCD 相机和显微物镜,得到掩模和硅片的标记图像,传送到计算机中,然后利用图像处理程序处理对准数据,如果达到对准条件就可以光刻;如果未对准,则通过反馈系统将信息传给驱动电路,进行自动反馈调节,直到达到对准为止。虽然这种图像对准系统的分辨率极限不能超过 100 nm<sup>[9]</sup>,但是由于这种对准方案实现相对容易而且能够满足目前国内微波和毫米波器件的制作要求,所以国内 XRL 的对准方案采用这种方法<sup>[1-2]</sup>。对于这种方法,关键部分是图像处理部分。由于工艺问题,掩模和硅片标记线条的边缘不可能十分光滑和陡直,这就就会影响图像识辨。图像处理程序的功能是使线条的边缘变得更加清晰,在掩模和硅片上标记质量不是很好的情况下提高对准精度<sup>[10-12]</sup>。图像边缘增强是图像分割中的主要问题,也是计算机视觉领域低层次视觉中的主要问题,同时它又是一个经典难题<sup>[13-14]</sup>。由于问题的重要性和困难性,从 70 年代起图像边缘增强就吸引了很多研究人员为之付出了巨大的努力<sup>[17]</sup>。边缘增强是将图像正确分割和得到清晰边缘的重要手段,它主要是通过微分滤波器来实现的,但是滤波器的选择很重要<sup>[15-16]</sup>。通过一些实验发现改进后的经典 LAPLAC 算子在 XRL 图像处理中实验效果很好,通过对比实验,最终选取了适用于 XRL 对准系统的图像边缘提取方法。

## 2 XRL 对准系统基本原理

如图 1 所示,该对准系统的工作过程如下:实时地通过采集卡得到硅片和掩模的标记图形,系统中掩模是固定在卡具上不动的,硅片可以移动。首先进行粗对准,这样可以大大减少计算机对准

的时间;其次进行精对准,这一步所有工作全部自动进行,由计算机来完成。在计算机的屏幕上显示通过 CCD 同时得到的对准标记图像,左右各一个,然后利用程序进行分析处理,通过计算比较硅片和掩模的对准标记,得到在  $x, y, z$  方向上要移动硅片的距离,进行调节;若没有对准,重新进行图像采集和数据分析,然后自动调节,直到标记对准的精度达到事先设定的阈值,接下来系统在屏幕上提示对准完成,可以进行曝光处理。

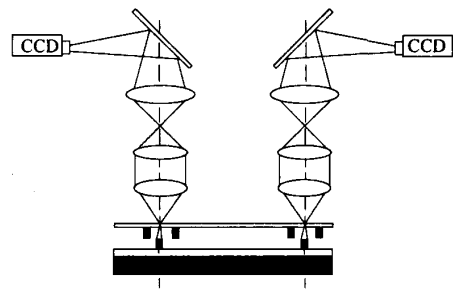


图 1 XRL 对准成像光学系统

Fig. 1 Optical system of XRL alignment equipment

## 3 图像边缘增强技术

### 3.1 SOBEL 算子的边缘增强

在边缘增强中,常用 SOBEL 算子的模板有如下两种。检测水平边缘的模板如表 1 所示,检测垂直边缘的模板如表 2 所示。

表 1 SOBEL 算子水平模板

Tab. 1 Horizontal template of SOBEL operator

- 1	- 2	- 1
0	0	0
1	2	1

表 2 SOBEL 算子垂直模板

Tab. 2 Vertical template of SOBEL operator

- 1	0	1
- 2	0	2
- 1	0	1

### 3.2 LAPLAC 增强方法

LAPLAC 算法是一种微分滤波算法。对于灰度图像  $f$ , 计算以像素  $f(i, j)$  为中心的  $3 \times 3$  区域同 LAPLAC 算子的加权和作为 LAPLAC 图像

$g$  的像素值  $g(i, j)$ 。LAPLAC 算子处理是常用的边缘增强处理算法,它是各向同性的二阶导数

$$\Delta^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2};$$

数字化之后用二阶差分近似得出:

$$\begin{aligned} \Delta^2 f = & \Delta_x^2 f(x, y) + \Delta_y^2 f(x, y) = \\ & [ - f(x+1, y-1) - f(x+1, y) - \\ & f(x+1, y+1) - f(x, y-1) - f(x, y+1) - \\ & f(x-1, y-1) - f(x-1, y) - \\ & f(x-1, y+1) ] + 8f(x, y), \quad (1) \end{aligned}$$

对于通常的 LAPLAC 算子来说要选取  $3 \times 3$  即 9 个值,如表 3 所示为 LAPLAC 算子的经典模板<sup>[3,5]</sup>。

表 3 经典 LAPLAC 算子模板

Tab. 3 Classical template of LAPLAC operator

- 1	- 1	- 1
- 1	8	- 1
- 1	- 1	- 1

表 4 常用 LAPLAC 算子模板

Tab. 4 Common template of LAPLAC operator

- 1	- 1	0
0	4	- 1
- 1	- 1	0

本系统在实验过程中最终选用 LAPLAC 边缘增强方法进行边界选取,得到了比较好的图像增强效果,对于原先不能对准的模糊图像经过处理之后,图像变得非常清晰,大大提高对准系统的对准精度。

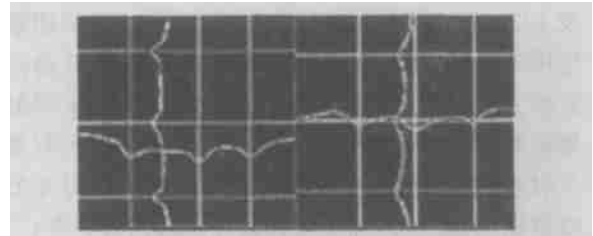
## 4 改进后的边缘增强技术及实验结果

通过 CCD 得到的未经处理的对准图像如图 2(a)所示;使用经典 SOBEL 算子对图 2(a)处理

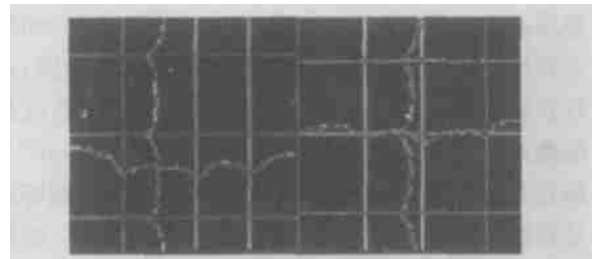


(a) 未经处理图像  
(a) Original image

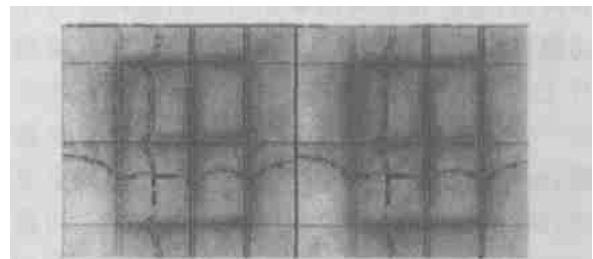
之后的结果如图 2(b)所示;使用经典 LAPLAC 算子即表 3 模板对图 2(a)处理的结果如图 2(c)所示;使用常用 LAPLAC 算子即表 4 模板对图 2(a)处理的结果如图 2(d)所示。



(b) SOBEL 算子处理结果  
(b) Result of SOBEL processing



(c) 表 3 模板处理结果  
(c) Result of Tab. 3 template processing



(d) 表 4 模板处理结果  
(d) Result of Tab. 4 template processing

图 2 SOBEL 算子和 LAPLAC 算子处理结果图

Fig. 2 SOBEL and LAPLAC operators processing results

从上面处理的结果可以看出,经典的两种算法并不能很好地被利用在这个对准系统之中,虽然使用常用的 LAPLAC 算子模板能够有明显效果,但是并不理想,所以下面将对 LAPLAC 算子模板进行改进。

### 4.1 改进方案一

由于软件的专用化,发现表 5 模板处理对准图像要优于其他算子模板,通过实验发现这种边界提取的模板效果最好,具体的分析如下:对于原

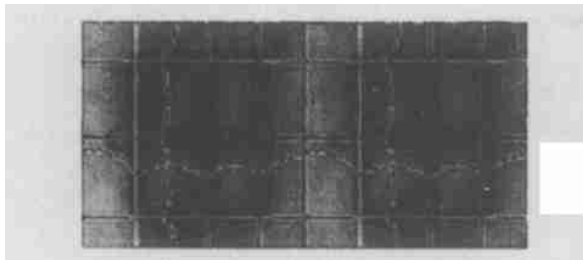
来经典的 9 个 LAPLAC 算子模板如表 3,对图 2 (a) 处理的结果如图 2 (c) 所示;对于常用的 LAPLAC 算子模板如表 4,对图 2(a)处理的结果如图 2 (d) 所示。对于改进后选择了 7 个 LAPLAC 算子模板进行计算,发现在这种情况下边缘增强效果最好,具体的边缘增强算子模板如表 5 所示。

表 5 7 个 LAPLAC 算子模板

Tab. 5 Template of 7 LAPLAC operators

- 1	- 1	- 1
0	8	- 1
0	- 1	- 1

通过 7 个 LAPLAC 算子模板得到增强图像如图 3(a)所示,然后又选择了 16 个 LAPLAC 算子得到图像如图 3 (b) 所示。



(a) 表 5 模板处理结果

(a) Result of Tab. 5 template processing



(b) 16 个 LAPLAC 算子处理结果

(b) Result of 16 LAPLAC operators processing

图 3 两类 LAPLAC 算子处理结果图

Fig. 3 Two kinds of LAPLAC operators processing results

对于图 3(a)中出现红色线条原因,由于原来图像不是完全二值图像,所以图像的颜色值经过加权平均之后可能出现各种颜色,不过这些完全可以消除,这里只是为了验证体现这种方法的有效性,加上一个判断语句就能将其去掉,可以将图像变为完全的二值图像,这些不影响本实验结果。

通过对上面模拟的边缘增强图像进行比较,发现只有在 7 个 LAPLAC 算子模板即表 5 情况

下得到的边缘增强图像最好,所以 X 射线光刻对准系统中的边缘增强算法决定采用含 7 个 LAPLAC 算子模板的边缘增强算法。

#### 4.2 改进方案二

对于应用 7 个 LAPLAC 算子模板的方法,原来图像中噪声部分没有办法去掉,因此图 3(a)不是十分的平滑,所以决定先对原来的图像进行滤波,然后再进行边缘增强。

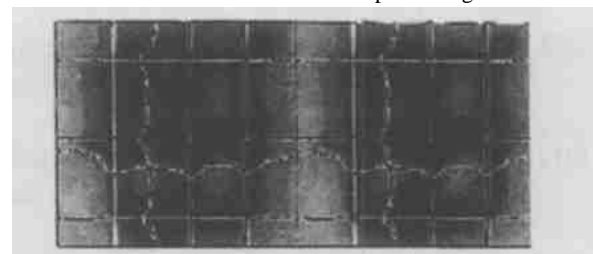
首先,对于滤波进行简单介绍。滤波本身进行了一次卷积计算。卷积是说其计算的过程,具体为 2 个矩阵进行一次数学卷积运算,其中一个矩阵就是原来的图像本身,另外一个矩阵相当于一个滤波器,它的作用是将背景淡化、平滑,使得大部分的背景值都趋于一个值,这样有利于图像的边缘提取和后面的直线拟合。算法大致思想是两个  $3 \times 3$  的矩阵,第 1 个矩阵为要处理的矩阵,第 2 个矩阵相当于一个过滤器,经过 2 个矩阵卷积之后,使得第 1 个矩阵中的元素值和中心的数值相接近,这样就能够使背景平滑。下面中间的矩阵为卷积矩阵:

$$\begin{Bmatrix} 26 & 34 & 150 \\ 31 & 28 & 29 \\ 32 & 30 & 35 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 26 & 34 & 150 \\ 31 & 42 & 29 \\ 32 & 30 & 35 \end{Bmatrix}$$



(a) 卷积处理后结果

(a) Result of convolution processing



(b) 卷积后 7 个 LAPLAC 算子处理结果

(b) Result of 7 LAPLAC operators processing after convolution

图 4 卷积和 LAPLAC 处理结果图

Fig. 4 Convolution and LAPLAC operator processing results

通过上述卷积矩阵计算可以得到如下计算结果。对于原来图像图 2(a), 经过处理之后的结果如图 4(a)。

对于图 4(a) 是经过卷积平滑之后的结果, 然后再使用 7 个算子模板的 LAPLAC 算法进行边缘增强后, 就得到图 4(b), 和图 3(b) 以及图 3(a) 相比就会看到图像变得更加清晰, 这样对于像素分辨和直线拟合更加有利。通过实验分析得到, 利用这种方法可以将对准系统的自动对准效率提高约 50%, 使得自动对准时间由原来的 20 min, 缩短到 10 min 左右; 系统对准精度的方差达到  $0.08 \mu\text{m}$ , 而原来的对准精度方差为  $0.10 \mu\text{m}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 谢常青. 下一代光学掩模制造技术[J]. 微电子技术, 2000, 28(6):1-4.  
XIE CH Q. The fabrication technique for next generation photomask[J]. *Microelectronic Technology*, 2000, 28(6):1-4. (in Chinese)
- [2] 谢常青, 叶甜春, 陈梦真. 同步辐射 X 射线光刻实验研究[J]. 微细加工技术, 1997, (3):10-14.  
XIE CH Q, YE T CH, CHEN M ZH. Study on synchrotron radiation X-ray exposure experiment[J]. *Microfabrication Technology*, 1997, (3):10-14. (in Chinese)
- [3] SCHATTEBURG M L, CHEN C. Sub-100 nm metrology using interferometrically produced fiducials[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1999, B17(6):2692-2697.
- [4] CHEN G G, KONLOLA P T. Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2001, 19(6):2335-2341.
- [5] INA H, SEWNTOKU K. Alignment mark optimization to reduce tool- and wafer-induced shift for XRA-1000[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, 38:7065-7070.
- [6] NELSON M, KREUZER J L. Design and test of a through-the-mask alignment sensor for a vertical stage X-ray aligner[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1994, 12(6):3251-3255.
- [7] SIMON K, GAVELI F. Evaluation of an advanced submicron X-ray stepper pattern transfer and alignment accuracy[J]. *Microelectronic Engineering*, 1991, 13(1-4):309-314.
- [8] HUBER H, SCHEUNEMANN U. Application of X-ray steppers using optical alignment for synchrotron based X-ray lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 1989, 9(1-4):151-154.
- [9] NISHI Y, DOERING R. Handbook of semiconductor manufacturing technology[M]. *Marcel Dekker, Inc, USN*, 2000.
- [10] 张涛. 用修正的直方图法进行实时视频图像分割[J]. 光学 精密工程, 1994, 2(5):93-97.  
ZHANG T. Video image segmentation using a modified histogram[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(5):93-97. (in Chinese)
- [11] 吕铁英, 彭嘉雄. 图像轮廓特征提取新方法研究[J]. 中国图像图形学报, 1999, 14(8):655-658.  
LU T Y, PENG J X. Novel method study of image contour extraction[J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 14(8):655-658. (in Chinese)
- [12] 罗强, 任庆利, 杨万海. 基于分形理论的图像边缘提取方法[J]. 通信报, 2001, 22(11):104-109.  
LUO Q, REN Q L, YANG W H. A method of image edge extraction based on fractal theory[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2001, 22(11):104-109. (in Chinese)
- [13] 贾晨光, 黄廉卿, 杨词银, 等. 基于区域分割的自适应反锐化掩模算法[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(2):188-192.  
JIA CH G, HUANG L Q, YANG C Y, *et al.* Adaptive unsharp masking method based on region segmentation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2):188-192. (in Chinese)
- [14] 许建华. 图像处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

## 5 结束语

通过上面的实验发现 X 射线光刻对准系统中采用 SOBEL 算子的边缘增强算法, 有很大的局限性, 实际工作之中也发现了这些不足之处。经比较分析, 并经实验验证, 采用新的图像边缘增强方案, 既先卷积, 再应用 7 个算子模板的 LAPLAC 算法进行图像边缘增强。结果表明: 该方法不仅有效地增强了图像的边缘, 而且提高了对准系统的自动对准效率, 使得自动对准时间极大地缩短; 系统对准精度同时得到提高。

- XU J H. *Image processing and analysis* [M]. Beijing: Science Prsss, 1994. (in Chinese)
- [15] 姚海根. 图像处理[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2000.
- YAO H G. *Image processing* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 傅德胜. 图形图像处理学[M]. 上海:东南大学出版社, 2001.
- FU D SH. *Graphics and image processing* [M]. Shanghai: Southeast University Press, 2001. (in Chinese)
- [17] 王靖, 田捷. 改进的多尺度顺序边缘连接检测法及在医学图像中的应用[J]. 计算机学报, 2001, 24(8): 825-829.
- WANG J, TIAN J. Improved multiresolution sequential edge linking and its application in medical image[J]. *Chinese J Computers*, 2001, 24(8): 825-829. (in Chinese)

作者简介:王德强(1978-),男,河南焦作人,中国科学院微电子研究所博士研究生,主要研究方向为 X 射线光刻对准技术研究。E-mail:deqiangwang@sohu.com