

# 纳米级精度的线宽测量仪

王云庆 李庆祥 薛实福 周兆英

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要** 在大规模集成电路生产中, 对掩模版与硅片刻线宽度的在线检测是保证质量的重要手段。本文介绍了一种高精度, 自动化的线宽测量仪。阐述了其原理, 构成及设计中有关问题。经实验表明: 该仪器的重复测量精度 $\leq \pm 0.005\mu\text{m}$ ; 测量精度为 $\pm 0.02\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 线宽测量; 显微镜; 图像采集; 微机处理

## 1 引言

目前, 集成电路的生产进入了超大规模集成电路 (VLSI) 和超高速集成电路 (VHSIC) 的时代。随着集成度的提高, 电路图形日趋复杂, 线条宽度越来越细 (已达到  $1\mu\text{m}$  以下)。为了保证器件质量、提高生产效率, 必须严格监控各道工艺流程的工艺参数, 这就对检测设备提出了更高的要求。在 LSI 生产工艺中, 掩模版与硅片刻线宽度的检测是质量控制的关键一环, 它直接影响着成品率的高低。

近年来, 国际上线宽测量仪发展很快, 如: 美国 ITP 公司的 ITP 802 型, 德国 Leitz 公司的 MPVCD 型线宽测量仪等, 其重复测量精度可达  $\pm 0.005\mu\text{m}$ , 绝对测量精度可达  $\pm 0.05 \sim \pm 0.01\mu\text{m}$ 。本文介绍一种清华大学研制的用于 LSI 在线检测的线宽测量仪, 测量过程自动化, 各项指标已达到国际先进水平, 已通过鉴定并在生产线上使用。

## 2 仪器的测量原理

线宽测量系统采用显微系统—电视摄像—图像采集—微机处理的测量方案。测量原理见图 1。

被测样品置于 X—Y 精密工作台上, 由自动调焦系统实现自动调焦, 被测线条经显微放大后的光学图像, 由摄像机进行光电转换, 得到具有不同灰度的视频信号, 图像采集电路将整幅图像采集并送入计算机内存中, 同时在监视器上显示。为了能够任意选择测量部位, 在监视

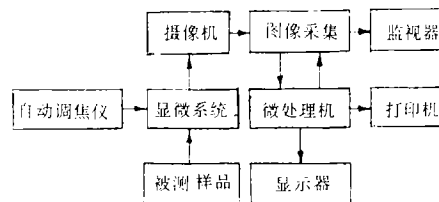


图 1 线宽测量原理框图

器上产生一可移动方框（见图 2），当将方框移至待测线条上时，根据测量要求，对此图像通过软件进行处理，在监视器上显示出被测线条的轮廓和测量结果，并打印输出，实现了自动测量。

### 3 仪器的主要构成

#### 3.1 显微系统

本仪器光学系统原理图见图 3。

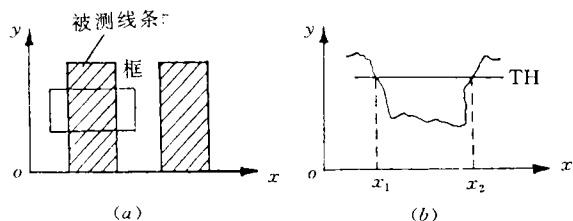


图 2 线宽测量

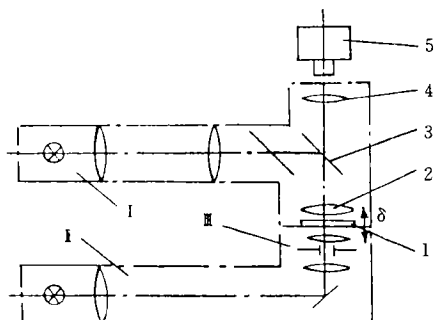
被测图形 1 放在筒长无穷远的显微物镜 2 的焦平面上，经显微物镜后成像在无穷远，再经辅助物镜 4 成像在摄像机的靶面 5 上，并显示于监视器上。系统的放大倍率  $\Gamma$  为：

$$\Gamma = \beta_1' \cdot \beta_2 = - (f_2' / f_1') \cdot \beta_2 \quad (1)$$

式中  $\beta_1 = - f_2' / f_1'$  — 光学系统放大倍率， $f_1'$ ， $f_2'$  分别为显微物镜和辅助物镜的焦距； $\beta_2$ — 摄像系统放大倍率。本系统  $\Gamma_{\max}$  为 3200 $\times$ 。

由于采用筒长无穷远的显微物镜，在显微物镜与辅助物镜之间形成平行光路，两物镜之间的距离可根据仪器设计的要求任意选取，这给机械设计提供了方便。为保证更换物镜使物面位置不变，采用齐焦物镜。

系统的分辨率主要取决于显微物镜的分辨率，本系统采用摄像机的靶面为光电接收器，其分辨率  $\sigma$  为：



1—反射照明系统；II—透射照明系统；  
III—显微镜

1—被测样品；2—显微镜；3—析光镜；  
4—辅助物镜；5—电视摄像机

图 3 光学成像系统

$$\sigma = \frac{0.526\lambda}{NA} \quad (2)$$

式中： $\lambda$ —波长； $NA$  显微物镜的数值孔径。

清晰的像质与显微物镜消像差情况有关。显微物镜的特点是典型大孔径小视场的光学系统，大孔径将产生高级球差和高级色差，小视场可用初级像差理论描述轴外点的成像情况，因此校正初级像差是必要和充分条件。本系统采用平均消色差物镜，即主要校正球差、慧差、轴向色差和象散，尽可能考虑球差的改

善，同时校正了场。为保证全视场像质的一致性，透反射照明采用柯勒照明方式。

#### 3.2 光电转换及图像采集系统

被测微细图形经光学显微系统成像在摄像机靶面上后，分离成具有不同灰度的象素信息，

构成待测图形的再现信号函数  $V(x, y)$ ：

$$V(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} T(X, Y) \cdot I(x - X, y - Y) dX dY \quad (3)$$

其中： $T(X, Y)$  — 转换器图像平面孔径函数； $I(x, y)$  图像光强分布函数。

由于摄像机的图像平面孔径函数较好地近似为高斯分布，且测量为一维，则：

$$T(X) \int_{-\infty}^{+\infty} T(X, Y) dY = (2\pi\sigma^2)^{-0.5} \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (3) 式，得：

$$V(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi\sigma^2)^{-0.5} \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I(x - X) dX \quad (5)$$

式中： $\sigma$ —分布宽度函数，取决于放大倍数和摄像机。

为了获得待测图形的大信息量，需进行图像采集，将摄像机转换的整幅图像信号都存入计算机中，便于进行多功能测试。 $A/D$  转换器将 CCD 摄像机输出的视频信号转换成数字量，并临时存入图像存储器中，图像存储器内的图像数据同时经输出视频查找表变换，送入  $D/A$  转换器，并合成电视信号送电视监视器进行实时显示；图像存储器内任意大小，任意位置的数据均可与计算机进行快速数据交换。

### 3.3 自动调焦系统

自动调焦系统是保证实现高精度，自动化的重要条件。显微系统除本身光学系统成像质量的优劣直接影响测量精度外，调焦精度往往会很大程度地影响测量精度。显微物镜的焦深  $\Delta Z$  为：

$$\Delta Z = \pm \frac{\lambda}{2(NA)^2} \quad (6)$$

可见，显微物镜的焦深与数值孔径的平方成反比，随分辨率的提高，焦深急剧变小，故需采用自动调焦。

本仪器采用偏心光束能自动调焦系统，其原理见图 4。半导体激光器发出的激光经准直后，以偏心  $S$  进入显微物镜，成像于  $M$  点，经被测物面反射后，再经显微物镜和辅助物镜成像于硅光电池的  $M'$  点。当被测表面偏离焦平面  $\pm\delta$  时， $M'$  点在象面上的位移  $\pm\Delta$  为：

$$\Delta = \pm 2\beta \frac{S}{f'_1} \delta \quad (7)$$

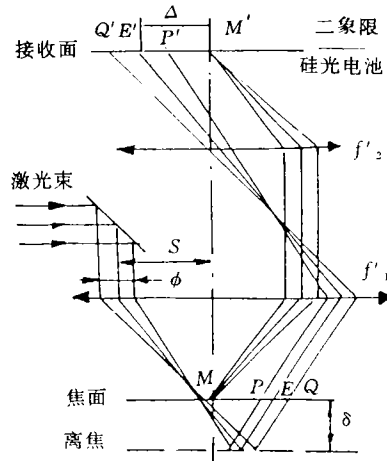


图 4 自动调焦原理

式中： $\beta$ —光学系统放大率； $f'_1$ —显微物镜的焦距。

由于光斑随离焦量的变化在象面上发生横向位移，则二象限硅光电池接收到离焦信号，正焦时输出为零，焦后、焦前分别输出正、负信号。该离焦信号经放大，A/D 转换送入计算机，由计算机输出一补偿信号，在 D/A 转换，功率放大之后，驱动直流电机，拖动微动工作台进行高焦量的补偿，从而实现实时自动跟踪，保证图像清晰。

### 3.4 线宽测量中数据处理的理论及算法：

为了对光电信号进行测量，首要的问题是要确定线宽的平均轮廓曲线。当被测线条的倾斜度  $\text{th}\theta$  小于允许值  $\epsilon$  时，要得到正确的线条轮廓曲线，则应对沿线条倾斜方向的单元求平均值。

线宽测量中，需求出轮廓曲线与阈值的交点坐标。为保证阈值与轮廓曲线的正确对应关系，我们采用自动阈值方案。自动阈值  $TH$  为：

$$TH = (a + b)x\% \tag{8}$$

式中： $a, b$ —分别是原始轮廓曲线中的最大、最小灰度值； $x$ —标定归一化的数值。

尽管光源的照明光强发生变化时，会引起原始轮廓曲线的形状和位置相应变化，采用自动阈值方法后，使得阈值总处于轮廓曲线的一个固定百分比数值上，这样即可得到准确的测量结果。

视频图像信号经图像采焦后，所得到的线条轮廓只是离散点的集合。为了提高测量精度和分辨率，需采用最小二乘法曲线拟合方法来进行处理，将离散的数据点拟合成一连续曲线。计算中，要求拟合曲线  $y = S(x)$  在各采集点  $(x_j, y_j)$  上的误差平方和最小。因被测轮廓曲线在两个边缘过滤区阈值附近曲线为线性的，故采用线性拟合，拟合曲线为：

$$S(x) = a_0 + a_1 \cdot x \tag{9}$$

直线  $S(x)$  与阈值直线  $y(x) = TH$  的交点为： $x_1 = |TH - a_0| / a_1$ ，同理，可求出另一交点  $x_2$ ，则线宽值  $A$  为：

$$A = (x_2 - x_1) / d \tag{10}$$

式中： $d$ —标定系数。

## 4 线宽测量实验

### 4.1 光电转换的非线性及其校正

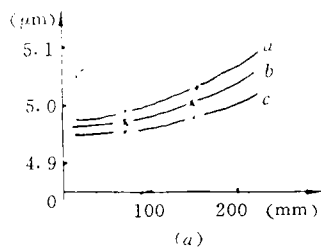
光电转换中的非线性，会在不同区域测量中得到不同的结果。将测量区分成 9 个小区，用  $100\times, 5\mu\text{m}$  铬版黑线在 9 个小区中分别测量，则得到图 5(a) 中所示曲线，其最大误差  $\Delta_{\text{max}} = 0.197\mu\text{m}$ ，相对误差  $\delta_{\text{max}} = 4\%$ ，这是不允许的。本系统中，采用校正函数  $f(l)$ ，通过软件

对全测量区进行校正，达到了全测量区域的一致性。

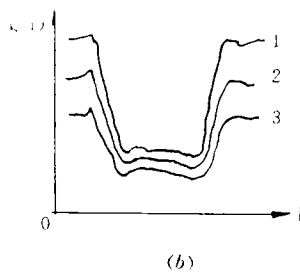
### 4.2 光强区域均匀性判断

线宽测量中，照明的均匀性是一个重要的问题。若全视场内照明不均匀，将会引起测量误差。尽管在设计时采取了措施来保证光强区域均匀性，但实际工作中往往由于光源位置调整不当而产生误差。本系统在测量前，由软件进行测试，不合格，测应调整照明系统，直至符合要求。

### 4.3 照明条件的影响



(a) 光电转换非线性曲线



1—5V; 2—4V; 3—3V

(b) 照明光源光强波动对轮廓曲线的影响

图 5

采用显微光学系统将被测图形通过光电转换进行测量，其原理是基于对象素灰度的检测，故照明系统的光强波动将会引起轮廓曲线的变化，直接影响测量精度。图 5 (b) 所，采用 40×物镜，照明光源电压分别为 3V，4V，5V 时，对 20μm 铬掩膜版黑线条进行测量，得到不同的轮廓曲线。由图可见，光强由弱变强时，轮廓曲线明显变陡，黑线条的灰度值基本不变而白线条的灰度值测明显提高。在照明较暗时，线条边缘过滤圆滑，照明较亮时则相反。为克服光强波动对测量精度的影响，本系统采取两个措施：①采用高稳定度的电压，专门设计了稳定度为±5%的稳压电源；

②采用自动阈值的方法跟踪光强的波动。这样，就得到了良好的测量结果。

### 4.4 线条竖直性判断

由于测量是通过行扫描来实现的，故要求被测线条应垂直于行扫描方向。其倾斜度  $\text{tg}\theta$  应小于允差  $\epsilon$ 。本系统在测量前，通过软件实现线条竖直性判断，不合格则应再进行调整。

### 4.5 实验结果

测试条件：100×物镜；掩膜版（中国计量科学院标定）；硅片（878厂提供）。

同 4.1 中所述，将全测量区分为 9 个小区，分别测量 9 个分区内的同一条线，测量完毕后，计算实测平均值  $\bar{x}$ ，重复测量精度  $\sigma_1$  及绝对测量精度  $\sigma_2$ ，其计算公式为：

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \\ \sigma_2 = |\bar{x} - A| \quad (A \text{ 标算值}) \end{cases} \quad (11)$$

测试结果:

重复精度:  $\sigma_1$  全区  $\leq \pm 0.005\mu\text{m}$

中心区  $\leq \pm 0.003\mu\text{m}$

测量精度:  $\sigma_2$  中心区  $2\sim 4\mu\text{m}$  铬版黑线

$\sigma_{2\text{max}} = 0.016\mu\text{m}$

硅片  $\sigma_2 = 0.007\mu\text{m}$

## 5 结 束 语

(1) 本仪器采用电视摄像扫描的方法,并具有快速、精密的自动调焦功能,方案先进,结构合理,功能齐全。实验结果表明:仪器重复精度  $\leq \pm 0.005\mu\text{m}$ ,测量精度  $< \pm 0.02\mu\text{m}$ 。

(2) 该仪器可检测掩膜版,硅片的线条宽度,并能在监视器上显示出样品的表面状况。测量精度高,图像清晰,工作稳定可靠,实现了自动测量,可满足大规模集成电路生产线上在线检测的需要。

### 参 考 文 献

- [1] 薛实福,李庆祥编,《精密仪器设计》.清华大学出版社,1991
- [2] 薛实福,李庆祥等,显微干涉系统测量微细图形台阶高度.清华大学学报,1990,30(5)
- [3] 李庆祥,薛实福,王伯雄,汪春庆,用于显微测量的自动调焦系统.仪器仪表学报,1991,12(1)

## A Linewidth Measuring Instrument with Nanometer Accuracy

Wang Yunqing, Li Qingxiang, Xue Shifu and Zhou Zhaoying

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

### Abstract

In LSI production, an important means of guaranteeing quality is to test the linewidth of photomasks and wafers on line. This paper introduces an automatic linewidth measuring instrument with high accuracy, elaborates its principle, constitution and some problems in design. The tests show: its repeatability is up to  $\pm 0.005\mu\text{m}$ , accuracy is  $\pm 0.02\mu\text{m}$ .

**Key Words:** Linewidth measurement, Microscope, Image collection, Microcomputer processing