

无测试图形薄层电阻测试仪及探针定位*

刘新福 孙以材 刘东升 陈志永 张艳辉 王 静

(河北工业大学微电子技术材料与材料研究所, 天津 300130)

摘要: 研制出检测 ULSI 芯片的薄层电阻测试仪, 可用于测试无图形样片电阻率的均匀性, 用斜置的方形四探针法, 经显微镜、摄像头及通信口接入计算机, 从计算机显示器观察, 用程序及伺服电机控制平台和探针移动, 使探针处于规定的位置, 实现自动调整、测试; 对测试系统中的探针游移造成的定位误差进行分析, 推导出探针游移产生误差的计算公式, 绘制了理论及实测误差分布图; 测出无图形 100mm 样品电阻率, 并绘制成等值线 Mapping 图.

关键词: 四探针技术; 薄层电阻; 探针游移; 等值线图

PACC: 0570; 0270; 0660

中图分类号: TN307

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)02-0221-06

1 引言

随着 ULSI 的发展, 特征尺寸已经达到 $0.13\mu\text{m}$, 在不远的将来将会达到 $0.07\mu\text{m}$ ^[1,2], DRAM 达到 64Gb, MPU 和 ASIC 集成度分别达到 90M 和 40M 个晶体管/ cm^2 , 衬底晶圆直径将从目前的 300mm 逐渐发展到 400mm. 专家预测在 2010 ~ 2020 年可以实现纳米电子学中单原子存储技术. 随着硅片尺寸的增大, 片内电阻率均匀性测试已经成为迫切需要解决的问题^[3], 发展与之相适应的检测设备势在必行. 微区电阻率的检测分析, 在 ULSI 的发展中显得至关重要^[4]. 因为掺杂和电阻率不均匀性不仅影响材料, 而且影响器件的特性^[5], 用陪片的方法来片子基区、发射区的掺杂已远远不能满足要求.

四探针技术经历了几十年的发展, 其间历经范德堡法的发明, 可以应用于任何形状样品测试^[6], 但要求将触点制备在样品的边缘, 只能测试整片的电阻率. 不能直接应用于微区的测试; 扩展电阻法虽然可以分辨 $10\mu\text{m}$ 的微区电阻率, 但要求背面大面积欧姆接触, 而且要求样品是体样品, 也不适合微区

的测试; 普通直线四探针由于针距限定在毫米级, 测试微区大于 3mm, 无法测量更小的微区; 美国国家标准 NBS 推荐的测试结构, 虽然可以应用于微区薄层电阻的测试, 但要求从样品伸出四个等长臂, 在臂的末端制备四个大的金属电极以放置探针, 因此测量的微区扩大到 $200\mu\text{m}$ 以上, 并且关于臂的长宽合适比存在两种截然相反的看法^[7,8]; 其他许多关于边缘效应的修正, 都要求精确知道探针与样品的相对几何位置^[9]. 对微样品无法作这种测定, 因而达不到修正的目的.

我们采用斜置的刚性探针, 不要求等距、共线, 只要求依靠显微镜和摄像头及通信口传送到计算机显示器进行观察, 通过每个探针自带的伺服电机来调整探针, 保证探针尖在测试样品的方形四个顶点附近一定界限内, 利用推出的公式就可以计算 R_s 的值.

该方法的特点是利用斜置的四个探针, 探针的直径足够大以保证刚性, 样品面上探针间距取决于针尖半径, 因此可以用于小至 $90\mu\text{m}$ 的薄层电阻的测试^[10-14]. 该方法不需要测量探针与样品之间的相对距离, 不需要制备从微区伸出的测试臂和金属电极, 也不需要样品上光刻测试图形, 真正实现无测

* 国家自然科学基金(批准号: 69272001), 河北省自然科学基金(批准号: 602076)及天津市自然科学基金(批准号: 013602011)资助项目

刘新福 男, 1963 年出生, 副研究员, 目前从事微区薄层电阻的测试技术研究.

孙以材 男, 1939 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事微电子测试技术及敏感器件传感器技术研究.

2003-03-17 收到, 2003-07-27 定稿

试图形的测试工作, 简便、快捷、可行。

本文主要对该仪器测试系统的探针游移进行分析, 推导出了探针游移的计算公式, 并做出了误差的理论分布图; 同时进行了实际探针游移的误差测量, 做出了实际测试误差分布图, 应用该仪器完成了 100mm 硅片样品的测试, 并绘制出等值线 Mapping 图。

2 测试系统探针游移造成的误差理论分析

测试系统中探针放置的测试位置是相当重要的。在测试样品时, 设定了微区尺寸 $S \times S$ 后, 如图 1 (图中边长为 1) 所示, 为保证探针放置在方形区域的四个角区, 我们采用了显微镜和摄像头及通信口传送到计算机显示器的观测方式, 通过这套系统将被测试微区放大约 200 倍, 可以很直观地在显示器上观测, 一方面有利于实际的人工调整, 另一方面也有利于采用图像识别的方式, 利用计算机进行自动测试的调整与控制。

实际测试当中的理想位置如图 1 所示, 设每个

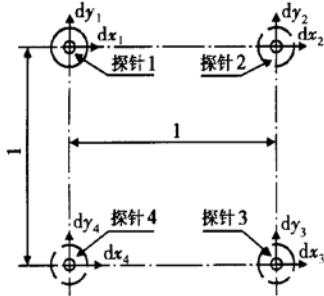


图 1 方形四探针的探针游移产生的误差计算图

Fig. 1 Calculating figure of errors for wanders of square-four-probes

探针之间的距离为 1 个单位长度, 探针分别置于正方形的四个角上, 探针 4 为注入电流点, 探针 3 为流出电流点, 而探针 1, 2 分别为样品中电势探测点, 则 1, 2 两点电势分别为:

$$\Phi_1 = \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_1} - \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_2} \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_3} - \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_4} \quad (2)$$

式中 r_1, r_2 分别为探针 1 到探针 4 和 3 的距离; r_3, r_4 分别为探针 2 到探针 4 和 3 的距离, 因此有:

$$U_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{IR_s}{2\pi} \ln 2 \quad (3)$$

$$R_s = \frac{2\pi U_{12}}{I \ln 2} \quad (4)$$

如图 1 所示, 设正方形边长为 S (原来设为 1), 探针 1 游移到 $1'$ (dx_1, dy_1), 探针 2 游移到 $2'$ (dx_2, dy_2), 探针 3 游移到 $3'$ (dx_3, dy_3), 探针 4 游移到 $4'$ (dx_4, dy_4). 探针 1 游移到 $1'$. 探针 4 游移到 $4'$ 后, $1'$ 至 $4'$ 的距离 r_1' :

$$r_1' = \sqrt{(S - dy_4 + dy_1)^2 + (dx_4 - dx_1)^2} \quad (5)$$

同理, r_2' ($1'$ 到 $3'$ 的距离), r_3' ($2'$ 到 $4'$ 的距离), r_4' ($2'$ 到 $3'$ 的距离) 分别表示如下:

$$r_2' = \sqrt{(S - dx_1 + dx_3)^2 + (S - dy_3 + dy_1)^2} \quad (6)$$

$$r_3' = \sqrt{(S - dx_4 + dx_2)^2 + (S - dy_4 + dy_2)^2} \quad (7)$$

$$r_4' = \sqrt{(S - dy_3 + dy_2)^2 + (dx_3 - dx_2)^2} \quad (8)$$

$$\Phi_1 = \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_1'} - \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_2'} \quad (9)$$

$$\Phi_2 = \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_3'} - \frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{r_4'} \quad (10)$$

代入公式, 并整理得:

$$U_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{IR_s}{4\pi} \ln \frac{[(S - dx_1 + dx_3)^2 + (S - dy_3 + dy_1)^2][(S - dx_4 + dx_2)^2 + (S - dy_4 + dy_2)^2]}{[(S - dy_4 + dy_1)^2 + (dx_4 - dx_1)^2][(S - dy_3 + dy_2)^2 + (dx_3 - dx_2)^2]} \quad (11)$$

其中, 认为测试电流 I 和微小区域的电阻 R_s 是不变的, 设 $S = 1, U^0$ 为标准的方形四探针 (各探针偏移

量为 0) 所对应的探针 1, 2 间电势差, 所以 $U^0 = IR_s \ln 2 / 2\pi$, 因此有:

$$\frac{U_{12}}{U^0} = \frac{1}{2 \ln 2} \ln \frac{[(1 - dx_1 + dx_3)^2 + (1 - dy_3 + dy_1)^2][(1 - dx_4 + dx_2)^2 + (1 - dy_4 + dy_2)^2]}{[(1 - dy_4 + dy_1)^2 + (dx_4 - dx_1)^2][(1 - dy_3 + dy_2)^2 + (dx_3 - dx_2)^2]} \quad (12)$$

令 $(dx_1, dy_1), (dx_2, dy_2), (dx_3, dy_3), (dx_4, dy_4)$ 每项分别等于第一组 $(0.1, 0), (0, 0.1), (-0.1, 0),$

$(0, -0.1)$ 和第二组 $(0.05, 0), (0, 0.05), (-0.05, 0), (0, -0.05)$, 利用编制的计算程序快速算出各对

应的值, 求出两组分别为 256 个值的结果.

由公式(4)很容易推出 $R_s'/R_s = U_{12}/U^0$, 经将两组 256 个值进行分组汇总后, 由其数据作图得到

图 2 和图 3, 其中横坐标为 R_s'/R_s 误差分布, 纵坐标为相同误差值出现的次数.

由图 2 可以看出, 大部分数据分布在 0.84~

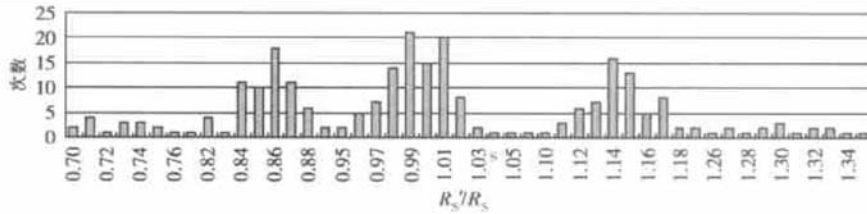


图 2 探针游移 0.1 导致的 R_s 误差分布

Fig. 2 Error distributing of sheet resistance for 10% wanders of probes

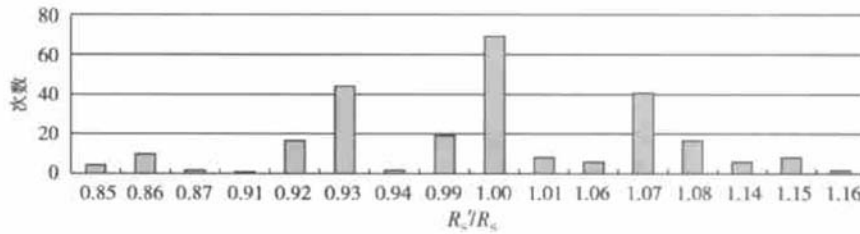


图 3 探针游移 0.05 导致的 R_s 误差分布

Fig. 3 Error distributing of sheet resistance for 5% wanders of probes

1.16 之间, 占 80.5%; 图 3 中大部分数据则分布在 0.92~ 1.08 之间, 占 87.1%, 并且分布没有呈现正态分布, 原因是假定的游移仅仅是“特例”, 而实际上游移是随机的, 并且是连续分布的. 由探针游移计算结果很容易发现, 造成探针游移最坏的两种情况所对应的探针分布图形, 如图 4 和图 5 所示. 因此, 我们可以在实际的测试过程中尽量避免图示情况的出现.

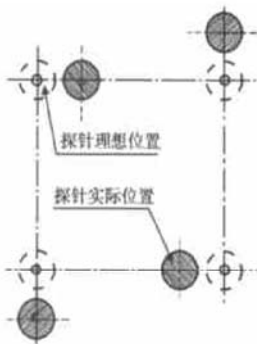


图 4 导致 R_s'/R_s 最小为 0.70 对应的方形四探针位置图

Fig. 4 Location of $R_s'/R_s = 0.70$ for wanders of probes

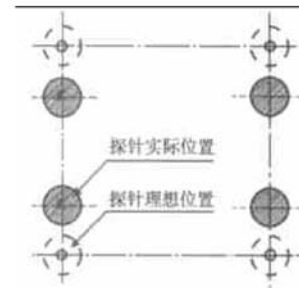


图 5 导致 R_s'/R_s 最大 1.35 对应的方形四探针位置图

Fig. 5 Location of $R_s'/R_s = 1.35$ for wanders of probes

3 测试系统探针游移造成的探针定位误差试验

探针游移试验是在我们自主开发的带有图像识别功能的四探针测试仪器上进行的. 按照测试要求探针压在硅片上, 探针的压力应以适中为宜, 应做到尽可能小^[15], 探针的位置图形通过显微镜和摄像头放大后经通信口传送至计算机显示器, 通过显示屏观测游移的大小. 对实际探针投影经过二值化处理^[16](即消除背景衬底, 使探针图像更突出明显)后的图形如图 6 所示(图中探针位置与图 1, 4, 5, 7 中

相差 45°).

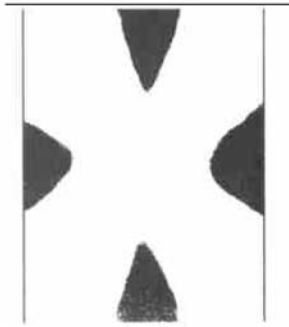


图 6 四探针二值化后的图像

Fig. 6 Binarization of four-probe image

本探针仪器由于设计结构合理, 机械结构在游动上已经对探针的自由度进行了限制, 因此其游动就限制在方形测试区域的对角十字线上, 不会游离出此对角十字线的外面, 即在结构上保证 $dx_1 = dy_1, dx_2 = dy_2, dx_3 = dy_3, dx_4 = dy_4$. 因此保证了探针游移对测试误差影响的最小化, 如图 7 所示. 选择试验的方形区域为 $350\mu\text{m}$ 见方的区域, 即 $S = 350\mu\text{m}$.

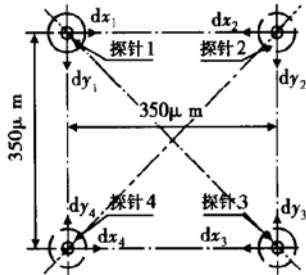


图 7 实际四探针的探针游移(将顺着对角十字线分布)

Fig. 7 Practical wanders of four probes along ret-
icicle

第一次调整后, 测试游移变化. 考察不同位置的情况进行测试, 实际测试 100 次, 得到的测量值都是该次调整后的一个固定值(探针位置调整后非常稳定), 测试结果分别如下: 探针 1(20.8, -20.8), 探针 2(-14.1, -14.1), 探针 3(-14.1, 14.1), 探针 4(-14.1, -14.1). 代入公式(12)得: $U_{12}/U^0 = 0.999674$.

第二次调整后, 按照上述同样的方式, 测试 100 次, 测试游移为: 探针 1(3.5, -3.5), 探针 2(0, 0), 探针 3(0, 0), 探针 4(0, 0). 代入公式(12)得: $U_{12}/U^0 = 0.999926$.

第三次调整后, 同样测试 100 次, 测得游移为: 探针 1(2, -2), 探针 2(-3, -3), 探针 3(-3, 3),

探针 4(3, 3). 代入公式(12)得: $U^{12}/U^0 = 0.999994$.

再次调整后, 同样测试 100 次, 测得游移为: 探针 1(18.4, -18.4), 探针 2(-15.6, -15.6), 探针 3(-15.6, 15.6), 探针 4(9.2, 9.2). 代入公式(12)得: $U^{12}/U^0 = 0.99916$.

根据 $R_s'/R_s = U_{12}/U^0$ 的原理, 得出实际测试位置误差分布, 如图 8 所示. 由于探针结构已经把探针的游移限制在一定的区域内, 能够保证游移的位置处于较理想的状态, 对测试结果的影响达到最小化. 实际测量过程中的探针游移对测试结果几乎没有影响, 说明该测试系统的合理性及限定探针自由度的有效性.

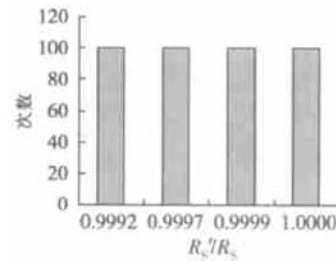


图 8 探针实际游移测量的 R_s 误差分布

Fig. 8 Error distributing of sheet resistance for
practical wanders of probes

4 应用测试结果及结论

通过用该测量仪器对国内某公司的产品进行测试, 发现原来用普通四探针测量(测 5 点)非常均匀的 100nm n 型(区熔)硅片, 经过实际多点(实际测量 1049 点)无图形测试, 测试区域(探针间距)为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$, 测试间距 1.2mm , 其中有多处并非很均匀, 如图 9 所示. 因此, 可以借助于分析测试结果对工艺进行改进, 以提高整个晶锭的质量. 同时, 该四探针测试仪器不仅具有测量的系统本身带有使测试误差达到最小化的结构上保证, 而且具有随着实际测试过程的进行, 借助于图像识别和伺服电机控制每个探针位置的调整功能. 在调整时, 需要利用控制垂直运动的伺服电机, 先抬起探针平台, 再调整平台上的四根探针, 探针最小步距为 $0.25\mu\text{m}$, 调整之后再通过软着陆的方式放下探针. 另外通过控制纵、横向伺服电机实现平台的纵、横向移动, 使硅片位置调整自动化, 并且能够做到严格控制步进的距离. 这样就可以很方便地进行无测试图形样片的检测, 来达到高精度测试微区的目标, 并且可极大地提



图9 四探针仪测得的硅片电阻率等值线分布图

Fig. 9 Equivalence contour graph of sample's specific resistivity

高测试速度. 这样, 完成大型硅片的检测将变成一件快速和方便的事情.

参考文献

- [1] Zhao Zhengping. The expected development of micro-electronic technology in the 21th century. *Semiconductor Information*, 1999, 36(1): 1 (in Chinese) [赵正平. 21 世纪初微电子技术发展展望. *半导体情报*, 1999, 36(1): 1]
- [2] Sun Yicai, Wang Jing. The development of DRAM in IC manufacture technology. *Semiconductor Technology*, 2002, 27(12): 10 (in Chinese) [孙以材, 王静. 动态随机存储器 IC 芯片制造技术的进展与展望. *半导体技术*, 2002, 27(12): 10]
- [3] Jing Tianche. Several suggestion to the technics and equipment of 90/65/50nm semiconductor in the future. *Japanese Electron Sci & Tech*, 2003, 3: 1 (in Chinese) [井田彻. 90/65/50nm 半导体工艺和设备技术以及对其未来的几点建议. *日经电子科技*, 2003, 3: 1]
- [4] Wang Jing, Sun Yicai, Liu Xinfu. Realization of Van der Pauw function's reversal development with high accuracy using a normalized method of polynomial match. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(8): 817 (in Chinese) [王静, 孙以材, 刘新福. 利用多项式拟合规范化方法实现范德堡函数的高精度反演. *半导体学报*, 2003, 24(8): 817]
- [5] Sun Yicai, Liu Xinfu, Gao Zhenbin, et al. Four-probe instrument for measuring sheet resistance of microareas and its application. *Research & Progress of SSE*, 2002, 22(1): 93 (in Chinese) [孙以材, 刘新福, 高振斌, 等. 微区薄层电阻四探针测试仪及其应用. *固体电子学研究与进展*, 2002, 22(1): 93]
- [6] Van der Pauw L J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips Research Reports*, 1958, 13(1): 1
- [7] Beuhler M G, Grant S D, Thurber W R. An experimental study of various cross sheet resistor test structures. *J Electrochem Soc*, 1978, 125(4): 645
- [8] David J M, Beuhler M G. A numerical analysis of various cross sheet resistor test structure. *Solid State Electron*, 1977, 20: 539
- [9] Smith F M. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *Bell System Tech J*, 1958, 37(7): 11
- [10] Sun Yicai, Zhang Linzai. Measurement of sheet resistance for microareas by using a modified Van der Pauw's method. *Acta Physica Sinica*, 1994, 43(4): 530 (in Chinese) [孙以材, 张林在. 用改进的 Van der Pauw 法测定方形微区的方块电阻. *物理学报*, 1994, 43(4): 530]
- [11] Sun Yicai, Shi Junsheng, Meng Qinghao. Measurement of sheet resistance of cross of microareas using a modified Van der Pauw method. *Semicond Sci Technol*, 1996, 11(5): 805
- [12] Sun Yicai. Several microfigures suitable to the measurement of sheet resistance for them. *The International Conference of Materials and Process Characterization for VLSI*, KunMing, 1994, 11: 124
- [13] Sun Xinyu, Wang Xin, Sun Yicai, et al. The application of microprocessor on measurement of microarea sheet resistance. *Semiconductor Technology*, 1998, 23(2): 18 (in Chinese) [孙新宇, 王鑫, 孙以材, 等. 微处理器在微区薄层电阻测试 Mapping 技术中的应用. *半导体技术*, 1998, 23(2): 18]
- [14] Meng Qinghao, Sun Xinyu, Sun Yicai, et al. Mapping technique for measurement of sheet resistance distribution. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1997, 18(9): 701 (in Chinese) [孟庆浩, 孙新宇, 孙以材, 等. 薄层电阻测试 Mapping 技术. *半导体学报*, 1997, 18(9): 701]
- [15] Hannoe S, Hosaka H. Electrical characteristics of micro mechanical contacts. *Microsystems Technologies*, 1996, 3: 31
- [16] Tang Liangrui, Ma Quanming, Jing Xiaojun, et al. Image processing operative technology. Beijing: Chemical Industry Publishing Company, 2002: 118 (in Chinese) [唐良瑞, 马全明, 景晓军, 等. 图像处理实用技术. 北京: 化学工业出版社, 2002: 118]

Research on Instrument for Testing Sheet Resistance Without Testing Pattern and the Orientation of Probes^{*}

Liu Xinfu, Sun Yicai, Liu Dongsheng, Chen Zhiyong, Zhang Yanhui and Wang Jing

(*Institute of Microelectronic Technology and Materials, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

Abstract: A new type of instrument for testing sheet resistance of ULSI wafers by an inclined four-point square probe is introduced. It can be used in the measurement of resistivity uniformity for a wafer specimen without testing pattern. The probes are observed on the display of a computer by a microscope and a head of pickup camera. The testing location of the probes and specimen table is regulated by the way of program control and servo engines. The affection upon measuring results arising from the wander of probes is also discussed and the calculating equation is deduced. The distributing graphs arising from the wander of probes are drawn in theory calculating and in practical testing. A wafer specimen of four inches is measured with the equipment and an equal-value line Mapping graph is drawn.

Key words: four-probe-techniques; sheet resistance; wanders of probes; equal-value line graph

PACC: 0570; 0270; 0660

Article ID: 0253-4177(2004)02-0221-06

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 69272001), Hebei Province Foundation for Natural Science(No. 602076), Tianjin Foundation for Natural Science(No. 013602011)

Liu Xinfu male, was born in 1963, associate professor. He is engaged in the research on measurement technique of microarea sheet resistance.

Sun Yicai male, was born in 1939, professor and advisor of PhD candidates. He is engaged in the research on measurement technique of microelectronics and sensor techniques.

Received 17 March 2003, revised manuscript received 27 July 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics