

斜置式方形探针测量单晶断面电阻率 分布 mapping 技术*

张艳辉 孙以材 刘新福 陈志永

(河北工业大学微电子所, 天津 300130)

摘要: 介绍了一种应用斜置式方形探针测量单晶断面电阻率的测试方法, 将 Rymaszewski 直线探针测试方法引入到方形探针测试, 并对测试过程中产生的游移以及图像监控问题进行了讨论. 应用此测试方法得到了 75mm 的全片电阻率分布的 mapping 图, 测试结果表明该方法可以在测量区域明显减小的同时保证测量的精确性, 是一种行之有效的测量方法.

关键词: 四探针技术; 电阻率测量; 游移; Rymaszewski 测试法

PACC: 0750; 0270; 0660

中图分类号: TN307 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)06-0682-05

1 引言

受晶体生长时微观生长速率变化、固液界面形状等影响, 单晶的径向电阻率分布往往是不均匀的^[1], 呈螺旋阶梯分布, 称为电阻率条纹^[2]. 电阻率的均匀性直接影响着器件的性能、可靠性和成品率. 四探针技术是目前半导体工业检测电阻率最为广泛的测试手段之一.

随着器件集成度的不断提高, 对基片微区性能的要求也越来越高, 国内外许多工作者都开展了这方面的工作, 但都是使用直线四探针法的 mapping 技术^[3]. 普通直线四探针测试的分辨率(3 倍针距, 可测约 3mm 范围以上的均匀性) 已不能满足测试的需要. 使用斜置式方形探针测量单晶断面电阻率分布, 可以使针距控制在 0.5mm 以内, 则分辨率降到约 0.5mm 范围左右, 所得 mapping 图^[6] 将能更精确地表示片子的微区特性. 而且斜置式方形探针针距可调到 0.5mm 以下, 探针构成方形受边缘影响较小. 直线四探针一般测量样品边缘部分时, 无论是美

国 ASTM 标准^[1], 还是国标都要求与边缘平行, 而不是垂直, 并且要求距离边缘 6mm 以上, 即使对于 Rymaszewski 法, 证明探针排与圆边界垂直时, 边界效应无影响, 也不能断言平行时也无影响.

2 方形探针测试原理

2.1 测试原理

普通直线四探针法测量时要求探针间距严格相等, 且不能有沿直线方向以及横向的游移. Rymaszewski 提出的测试方法能解决纵向游移以及探针不等距的影响, 但是横向游移对测量精度的影响尚需进一步探讨. 因为纵向游移不影响测量结果, 所以探针的游移不影响测量结果. 由于探针是限制在探针孔中的, 其游移方向是随机的, 横向、纵向的游移都可能出现.

Rymaszewski^[3] 曾对直线四探针测量无穷大样品提出下列公式:

$$\exp(-2\pi V_1/IR_S) + \exp(-2\pi V_2/IR_S) = 1 \quad (1)$$

* 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

张艳辉 硕士研究生, 从事半导体测试技术研究.

孙以材 教授, 博士生导师, 从事半导体测量与传感器研究.

2003-06-02 收到, 2003-09-22 定稿

由(1)式得:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V_1 + V_2}{I} \right) f \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2)$$

其中 V_1 和 V_2 分别是两次测量中 2, 3 和 3, 4 探针之间的电压; $f \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$ 是 Van der Pauw^[4] 函数. 从定性角度看, 探针发生纵向游移时, V_1, V_2 便偏离无游移值, 但通过 Van der Pauw 函数的变化, R_s 值保持不变. 本文正是利用这一优点, 而将直线四探针 Rymaszewski 法移植到方形探针中. 这样既保持了斜置式方形探针可测小微区的优点, 又将探针游移对测量的影响控制在了较小的范围内.

对于方形四探针, 当其严格呈正方形时, 如图 1 所示, 根据物理基础和电学原理可知:

当电流 I 通过 1, 2 探针流经样品时, 3, 4 探针的电位分别为

$$\varphi_3 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\varphi_4 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{2}}$$

3, 4 探针间的电压为 $V_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln 2$, 所以 $\frac{-V_{34}}{I} = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{1}{2}$, 则有 $\exp \left(\frac{-2\pi V_{34}}{I R_s} \right) = \frac{1}{2}$.

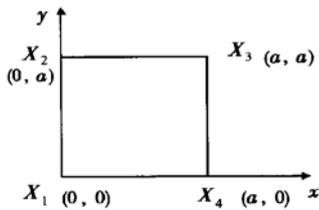


图 1 方形探针测试图

Fig. 1 Square probe testing map

同理当电流 I 通过 2, 3 探针时, 4, 1 探针之间的

电压为: $\varphi_4 - \varphi_1 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln 2$.

可得 $\exp \left(\frac{-2\pi V_{41}}{I R_s} \right) = \frac{1}{2}$. 令 $V_{34} = V_1, V_{41} = V_2$,

于是(1)式成立, 因而(2)式也同时成立. 所以当探针呈正方形结构时, 我们可应用公式(2)来计算被测样品的方块电阻.

2.2 游移对测试结果的影响

以上已证明对于探针严格呈正方形的情况, 公

式(1)和(2)是成立的, 可是由于斜置探针在下放时常常会发生微小的游移, 下面我们看一下当探针发生游移时应用公式(2)计算方块电阻的误差情况. 探针游移后如图 2 所示, 其沿 x, y 方向的游移分别为 x_1, x_2, x_3, x_4 以及 y_1, y_2, y_3, y_4 . 为计算其对测量的影响, 假设其值都为正方形边长的 $1/10$ 或 0 .

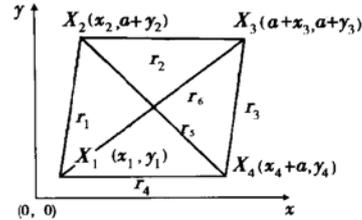


图 2 游移后的探针测试图

Fig. 2 Wandered probe testing map

此时当电流 I 通过 1, 2 探针时, 3, 4 探针的电位分别为

$$\varphi_3 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{r_6}{r_2}, \quad \varphi_4 = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_5}$$

所以, $V_{34} = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{r_5 r_6}{r_2 r_4}$

同理可求当 2, 3 探针通电流时, 4, 1 探针之间的电压 $V_{41} = \frac{R_s I}{2\pi} \ln \frac{r_5 r_6}{r_1 r_3}$. 由此可得

$$\exp \left(-\frac{2\pi V_{34}}{I R_s} \right) + \exp \left(-\frac{2\pi V_{41}}{I R_s} \right) = \frac{r_1 r_3 + r_2 r_4}{r_5 r_6}$$

也就是说, (1) 式和(2) 式在非方形探针情况下不再成立. 但是本文要阐明: 当探针游移不大时, (2) 式仍近似成立, 可用于计算样品的方块电阻. 下面我们来研究一下, 应用(2) 式计算样品的方块电阻会带来多大的误差. 这里的 R_s^* 不是样品的真实方块电阻 R_s , 因当探针游移时, (1), (2) 式不再成立, 故加一星号以示区别. 即有

$$R_s^* = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_1 + V_2}{I} f \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (3)$$

其中 V_1 即 V_{34} ; V_2 即 V_{41} . 将 V_1, V_2 的值代入得

$$V_1 + V_2 = \frac{I R_s}{2\pi} \left(\ln \frac{r_5 r_6}{r_2 r_4} + \ln \frac{r_5 r_6}{r_1 r_3} \right) \quad (4)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \ln \frac{r_5 r_6 / \ln \frac{r_5 r_6}{r_2 r_4}}{r_1 r_3} \quad (5)$$

注意: 探针有游移时, (4), (5) 式仍然成立, 因此 V_1, V_2 是真实值, R_s 也是样品实际方块电阻值.

将(4), (5) 式代入(3) 式得,

$$R_s^* = \frac{R_s}{2\ln 2} \ln \frac{r_5 r_6 r_5 r_6}{r_1 r_2 r_3 r_4} f\left(\ln \frac{r_5 r_6}{r_2 r_4} / \ln \frac{r_5 r_6}{r_1 r_3}\right)$$

所以有,

$$\frac{R_s^*}{R_s} = \frac{1}{2\ln 2} \ln \frac{r_5 r_6 r_5 r_6}{r_1 r_2 r_3 r_4} f\left(\ln \frac{r_5 r_6}{r_2 r_4} / \ln \frac{r_5 r_6}{r_1 r_3}\right) \quad (6)$$

其中 r_1, r_2, r_3, r_4 以及 r_5, r_6 的物理意义如图 2 所示.

令 $p = \frac{V_1}{V_2}, r_s = \frac{1}{2\ln 2} \ln \frac{r_5 r_6 r_5 r_6}{r_1 r_2 r_3 r_4}, f = f\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ 和 $t = \frac{R_s^*}{R_s}$. 设 $a = 1$, 则 x_1, x_2, x_3, x_4 以及 y_1, y_2, y_3, y_4 分别等于 ± 0.1 和 0 时, 表示正方形严重畸变的情况(基本可代表可能严重游移的各种情况), 依其组合, 可计算出 6561 个 t 值. t 以及 r_s 的分布情况如图 3 所示.

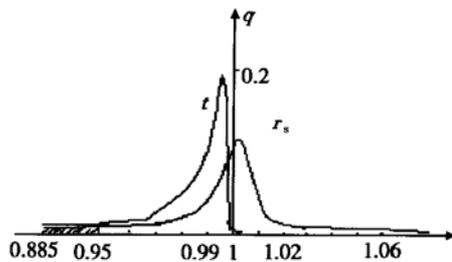


图 3 r_s 及 t 的几率分布

Fig. 3 Probability distribution of r_s and t

分析计算所得 6561 个数据, 我们得到超出 $\frac{R_s^*}{R_s}$ 误差范围(5%)的全部数据, 它们分布在图 3 所示的阴影区, 占总面积的 2.6%, 其中一部分对应的 $r_5 - r_6, p, r_s, f$ 以及 t 的值如表 1 所示.

表 1 超出误差范围全部项对应的 $r_5 - r_6, p, r_s, f$ 以及 t 的值
Table 1 Values of $r_5 - r_6, p, r_s, f$ and t corresponding to all items overstepped the error range

$r_5 - r_6$	p	r_s	f	t
0.4164	1.3496	0.9504	0.9889	0.9399
- 0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
- 0.4164	1.3496	0.9504	0.9889	0.9399
- 0.5657	1	0.8847	1	0.8847
- 0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222
0.4164	1.3496	0.9504	0.9889	0.9399
0.4307	1.3507	0.9325	0.9889	0.9222

部分误差在允许范围的项对应的 p, r_s, f 以及 t 的值如表 2 所示.

表 2 在误差范围内部分项对应的 $r_5 - r_6, p, r_s, f$ 以及 t 的值
Table 2 Values of $r_5 - r_6, p, r_s, f$ and t corresponding to some of items in the error range

$r_5 - r_6$	p	r_s	f	t
0	1	1.0002	1	1.0002
0.2828	1	0.9719	1	0.9719
0	1.0086	1	0.9998	0.9998
- 0.2814	1.0551	0.9699	0.9986	0.9685
0.1493	1.3247	0.9962	0.9899	0.9861
- 0.1478	1.392	0.9957	0.9874	0.9831
- 0.1478	1.4208	1.0077	0.9863	0.9938
0.2548	1.7794	1.0087	0.9709	0.9794
0	1.8658	1.0337	0.9669	0.9995
0.1616	2.3875	1.0539	0.9408	0.9916

对比表 1 和表 2 可以看出, 当 $r_s > 1.01$ 时, 应用 Rymaszewski 法, 乘上 Van der Pauw 函数后, t 值更接近于 1, 说明采用 Rymaszewski 法后对测试结果有所改善. 但表 1 中的数据显示, 当 $r_s < 1$ 时, 再乘上 Van der Pauw 函数后, 反而使 t 比 r_s 更小了, 使测试产生更大的误差. 但总体说来, 乘上 Van der Pauw 函数后, 使误差在 $\pm 1\%$ 以内的数据比例有所提高, 这点通过图 3 也可以看到. 由表 2 可以看出, 仅从 p (即 V_1/V_2) 的值是无法判定测试结果是否落在允许测试误差 $\pm 5\%$ 之内. 而通过对所有计算结果的分析, 可得出以下结论: (1) 不能依靠 p 值的大小来决定最后结果的取舍; (2) 凡 t 值超出误差范围的, 其对应 $|r_5 - r_6|$ 都超过边长的 0.35 倍, 使正方形产生严重畸变. 根据以上两点结论, 我们觉得有必要在测试过程中, 对探针尖位置进行监控, 虽然超出测试误差 5% 的几率只有 2.6%, 但我们不能让这种误差处于不可控、不可检查的状态. 所以我们在自行研制的测试系统中引入了探针尖位置的图像监控部分, 以保证 $|r_5 - r_6|$ 不超过边长的 0.35 倍, 此时 $\exp\left(-\frac{2\pi V_{34}}{IR_s}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi V_{41}}{IR_s}\right) = \frac{r_1 r_3 + r_2 r_4}{r_5 r_6}$ 的值落在 $[1, 1.03)$ 的区间中.

2.3 图像监控在四探针定位的应用

为了让测试结果的误差可以控制, 保证它不超过一定的误差范围, 我们将图像监控引入到测试系统, 实时采集测试过程中的探针位置图像. 对于探针游移使得探针的方形结构严重变形(即 1, 3 和 2, 4 探针的距离差, 也就是对角线的距离差超过边长的 0.4 倍)的情况, 我们可以通过对探针图像的识别、计算, 并在必要的情况下控制探针的移动, 以保证测

试不会在 1, 3 和 2, 4 探针的针距差超过边长的 0.4 倍的情况下进行, 从而不会出现表 1 的情况.

图 4 和 5 是我们应用置于斜置式四探针仪上方的摄像头构成的图像监控系统, 对不满足测试要求的测试图形结构进行处理的结果.

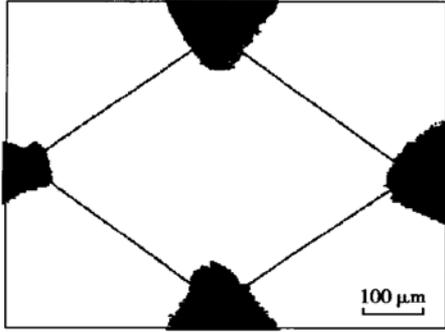


图 4 处理前的探针尖位置图像

Fig. 4 Probe tip positions before image treatment

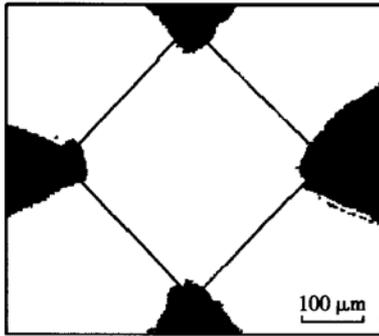


图 5 处理后的探针尖位置图像

Fig. 5 Probe tip positions after image treatment

从以上两个图形我们可以看出, 用图像监测手段, 完全可以将探针游移后的位置控制在我们希望得到的范围内, 从而使测量结果可信.

3 mapping 技术测量结果

我们在自行研制的全可动斜置式四探针仪上进行测量, 针距可任意调整, 并可在计算机监视器上观察探针的分布以及游移情况, 测量过程可保证两对角线距离差小于 0.1 倍边长, 使测量误差最小. 为避免边缘效应的影响(另文深入讨论), 测试到离硅片边缘 3~ 4mm 处停止, 下一行重新开始测试, 逐行进行并记录, 直到结束.

图 6 是我们用这种测试方法测得的 75mm 硅片的全片电阻率分布的 mapping 图(单位 Ω·cm). 方形

测试探针的间距为 360μm, 样品面 x, y 方向测试间隔为 1mm, 所用恒流源为 75μA(选用这样小的测试电流, 据文献[7]理论分析, 可以保证少子牵引半径远小于探针间距), 共得有效测试数据 598 组. 得到全片方块电阻平均值为:

$$R_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{Si} = 218.4(\Omega) \quad (N = 598)$$

$$\rho = 8R_s$$

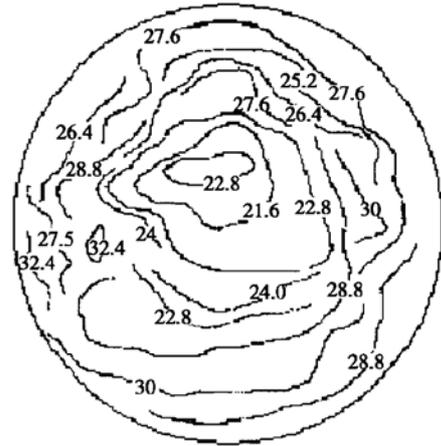


图 6 电阻率的等值线 mapping 图(单位: Ω·cm)

Fig. 6 Isoline mapping image of resistivity

从图中我们可观察到片子的电阻率分布情况, 并计算出整个片子的不均匀度, 从而判定片子的质量, 并可对工艺的改进提供参考. 本测试片的不均匀度

$$E = \frac{\rho_{大} - \rho_{小}}{\frac{1}{2}(\rho_{大} + \rho_{小})} = \frac{32.4 - 20.4}{\frac{1}{2}(32.4 + 20.4)} = 45\%$$

可见应用本方法后, 检测出的电阻率不均匀度比一般常规四探针法检测出的不均匀度(一般 < 20%) 高, 显示出本方法的优点和能力.

4 结论

使用斜置式方形探针测量单晶断面电阻率分布, 可以在测量区域明显减小的同时, 保证测量的精确性, 是一种行之有效的测量方法. 随着对基片微区性能及均匀度要求的提高, 本法也必将得到更加广泛的应用.

参考文献

[1] Sun Yicai. Semiconductor testing technology. Beijing: Metallurgy In-

- dustry Publishing Company, 1984: 92(in Chinese) [孙以材. 半导体测试技术. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 92]
- [2] Keller S R. Semiconductor materials and their measurement. Beijing: Metallurgy Industry Publishing Company, 1986: 247 (in Chinese) [Keller S R. 半导体材料及其测量. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 247]
- [3] Rymaszewski R. Empirical method of calibrating a 4-point microarray for measuring thin-film sheet resistance. *Electron Lett*, 1962, 3(2): 57
- [4] Van der Pauw L J. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape. *J Philips Research Reports*, 1958, 13 (1): 1
- [5] Zhou Quande. Monitoring ion implantation in IC process by contour mapping of sheet resistance. *Microelectronics*, 2000, 30(6): 410(in Chinese) [周全德. IC 离子注入工艺的薄层电阻等值图监控. 微电子学, 2000, 30(6): 410]
- [6] 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]
- [7] 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. 固体电子学研究进展, 2002, 22(1): 93]

Mapping Technique for Resistivity Distribution Measurement on Cross-Section of Original Silicon Monocrystal Using Inclined-Placed Square-Probe*

Zhang Yanhui, Sun Yicai, Liu Xinfu and Chen Zhiyong

(Institute of Microelectronics, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A measuring method of the resistivity distribution for original Si mono crystal wafer using an inclined-placed square-probe is introduced and Rymaszewski linear probe measurement is introduced into square probe testing fields. The probe problem occurring in the testing process and how to inspect and control the positions of the probe tips by using image and graph processing are all discussed. A mapping of an original Si crystal wafer is obtained by this method. It is proved by the results that the accuracy can be ensured as the testing area is diminished obviously, and this method is an effective testing method.

Key words: four-point probe technique; resistivity measurement; probe wander; Rymaszewski method

PACC: 0750; 0270; 0660

Article ID: 0253-4177(2004)06-0682-05

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

Zhang Yanhui graduate student. He is engaged in the research on the semiconductor measurement technology.

Sun Yicai professor. He is engaged in the research on the semiconductor measurement and sensor.

Received 2 June 2003, revised manuscript received 22 September 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics