

用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法 测定微区的方块电阻^{*}

刘新福 孙以材 张艳辉 陈志永

(河北工业大学微电子技术材料与材料研究所, 天津 300130)

(2003 年 5 月 29 日收到, 2003 年 11 月 13 日收到修改稿)

提出用改进的 Rymaszewski 公式并使用方形四探针法测试无图形大型硅片微区薄层电阻的方法, 从理论上推导出方形四探针产生游移时的 Rymaszewski 改进公式, 讨论探针游移对测试结果的影响, 制定出可操作的测试方法, 对实际样品进行测试验证, 并绘制了等值线图.

关键词: 四探针技术, 方形四探针, 微区电阻, 探针游移

PACC: 0750, 0270, 0660

1. 引 言

半导体电阻率的常规直线四探针测试方法^[1]和 Rymaszewski 法^[2](有的称为双电法)均要求四根探针成一直线, 而实际上探针在测量的样品上产生游移即横向或纵向的移动是难以避免的, 尽管 Rymaszewski 法抑制偏移或游移的能力在一定程度上优于传统四探针法, 但仍然存在横向(任意)游移的影响问题. 改进的范德堡法^[3,4]是在规定了测试图形的样品内进行的, 优点是测试的微区尺寸比直线四探针方法小, 但不能超出图形的边界测量, 而且对所测样品需要专门制备光刻图形. 为此, 我们专门研究了用方形四探针法解决大型硅片无图形情况下样品中微区电阻率的测试问题. 这对于分析样品的均匀性以及微区的电特性有重要意义, 同时与最终器件的性能密切相关^[5,6]. 我们推导出方形四探针产生游移后微区电阻的计算公式, 还对探针游移导致的误差分布进行了量化与图示分析. 基于这些分析, 我们提出了可行的测试方案, 对样品进行了测试验证.

2. 基本原理

Rymaszewski^[2]曾对无穷大样品直线四探针法提出用两次测量法, 得出下列公式:

$$\exp\left(-\frac{2\pi V_1}{IR_s}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi V_2}{IR_s}\right) = 1, \quad (1)$$

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

式中 R_s 为样品的薄层电阻, V_1 和 V_2 分别是在 A, B, C, D 四个探针顺序排成直线的情况下, 两次测量中的 C, D 和 B, C 探针间的电压, I 为两次测量过程中探针 A, B 和探针 A, D 分别注入测试样品的电流, $f(V_1/V_2)$ 是范德堡函数^[7]. 文献^[8]考虑了四

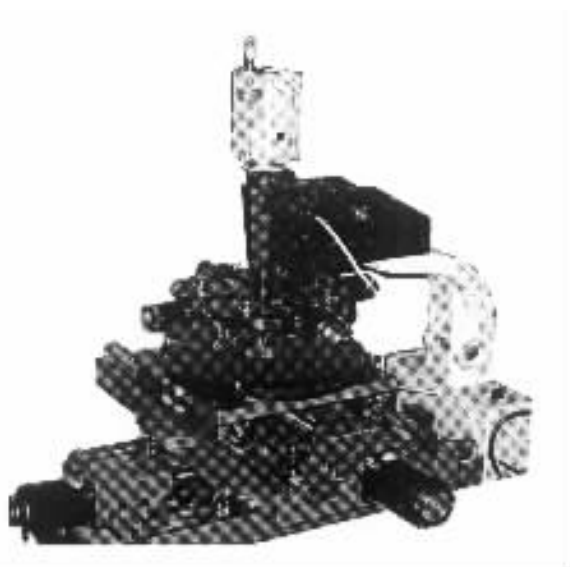


图 1 斜置式方形四探针自动测试仪

^{*} 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)和天津市自然科学基金(批准号 013602011)资助的课题.

根探针不等距,但仍然认为在四根探针完全成一直线的情况下,也可推导出上述公式.而事实上,基于探针组架的零件加工与装配及硅片平面度等多种原因,探针不可能组成非常完美的直线,产生一定的横向游移是难以避免的.直线四探针中探针的横向游移偏离矩形样品中心线对结果的影响更大^[9],因此我们提出方形四探针法,在探针无游移时 Rymaszewski 的上述公式也同样成立.我们推导出当探针在任何方向有一定游移情况下的计算方法,并且已制成斜置式方形四探针自动测试仪(图1).该测试仪针距可任意调整,样品平台可作 x - y 方向平移(并能够手动转动,且带有刻度盘),探针位置用摄像头监视.

2.1. 改进的 Rymaszewski 公式的理论计算

有游移情况下对于无穷大样品的方形四探针测量如图2所示.图2中四个探针游移后分别由原来的1234位置游移到对应的1'2'3'4'位置.按照 Rymaszewski 公式推导过程中四个探针测试顺序的要求进行,首先考虑当探针4'注入电流 I ,探针1'流出电流 I 时,探针3'、探针2'的电势分别为 Φ_3 、 Φ_2 ,

$$\Phi_3 = \frac{IR'_s}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_5}\right), \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \frac{IR'_s}{2\pi} \ln\left(\frac{r_6}{r_3}\right). \quad (4)$$

则探针3'2'两点的电势差 V_{32} 为

$$V_{32} = \frac{IR'_s}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_5 r_6}\right). \quad (5)$$

同理,再次考虑当探针2'注入电流 I ,探针1'流出电流 I 时,探针3'、探针4'两点的电势差 V_{34} 为

$$V_{34} = \frac{IR'_s}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4}\right). \quad (6)$$

将(5)(6)式代入 Rymaszewski 公式(1)的等号左端(式中 V_{32} 相当于 V_1 , V_{34} 相当于 V_2)得

$$\begin{aligned} & \exp\left(-\frac{2\pi V_{32}}{IR'_s}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi V_{34}}{IR'_s}\right) \\ &= \frac{r_5 r_6}{r_2 r_3} + \frac{r_1 r_4}{r_2 r_3} = \frac{r_1 r_4 + r_5 r_6}{r_2 r_3}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(S - dy_4 + dy_1)^2 + (dx_4 - dx_1)^2}, \\ r_2 &= \sqrt{(S - dx_1 + dx_3)^2 + (S - dy_3 + dy_1)^2}, \\ r_3 &= \sqrt{(S - dx_4 + dx_2)^2 + (S - dy_4 + dy_2)^2}, \\ r_4 &= \sqrt{(S - dy_3 + dy_2)^2 + (dx_3 - dx_2)^2}, \\ r_5 &= \sqrt{(dy_4 - dy_3)^2 + (S - dx_4 + dx_3)^2}, \\ r_6 &= \sqrt{(dy_2 - dy_1)^2 + (S - dx_1 + dx_2)^2}, \end{aligned}$$

其中 S 为无游移的方形四探针的针间距(即边长)(图2中 $S=1$), r_1 — r_6 分别为游移后各探针之间的距离, R'_s 为样品的薄层电阻(dx_1, dy_1), (dx_2, dy_2), (dx_3, dy_3), (dx_4, dy_4) 分别为四个探针在 x, y 坐标轴的独立游移量.

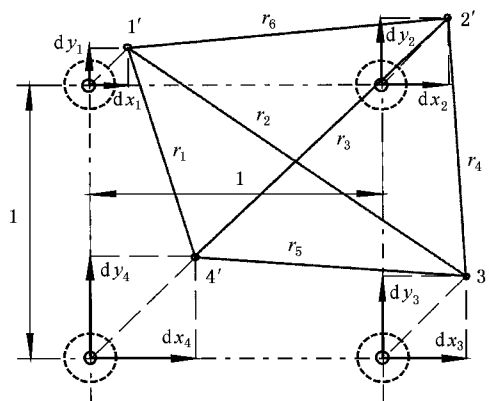


图2 方形四探针中的探针游移产生的误差计算图

当各游移量为零时(7)式的值等于1,即说明没有游移的条件下,原来的 Rymaszewski 公式适用,而有游移之后(7)式的值便不等于1,即 Rymaszewski 公式不适用了.为此,对(7)式进行如下的变换:对方程(7)的两边同时除以方程右端的式子,则方程右端等于1.经变换后得

$$\begin{aligned} & \exp\left[-\frac{2\pi V_{12}}{IR'_s} + \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right)\right] \\ &+ \exp\left[-\frac{2\pi V_{41}}{IR'_s} + \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right)\right] = 1. \end{aligned} \quad (8)$$

解方程(8),可以得到改进的 Rymaszewski 公式如下:

$$\begin{aligned} R'_s &= \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V_{32} + V_{34}}{I} \right) \frac{1}{\ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right)} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V_{32} + V_{34}}{I} \right) F\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right), \quad (9) \\ & \quad \quad \quad \frac{1}{\ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right)} = \frac{1}{\ln 2} \left[\frac{V_{32} - \left[IR'_s \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right) \right] / 2\pi}{V_{34} - \left[IR'_s \ln\left(\frac{r_2 r_3}{r_1 r_4 + r_5 r_6}\right) \right] / 2\pi} \right] + \frac{1}{\ln 2} \end{aligned}$$

式中 $f(V_{32}/V_{34})$ 为改进 Rymaszewski 公式的修正函数. 将 (5) , (6) 式代入 $f(V_{32}/V_{34})$ 函数内的范德堡函数

$$f\left(\frac{V_{32}-\left[IR'_s\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)\right]/2\pi}{V_{34}-\left[IR'_s\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)\right]/2\pi}\right)$$

中 , 化简后得

$$f\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right)=\frac{1}{\frac{1}{f\left(\frac{V_{32}-\left[IR'_s\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)\right]/2\pi}{V_{34}-\left[IR'_s\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)\right]/2\pi}\right)}+\frac{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)}{\ln 2}}=\frac{1}{\frac{1}{f\left(\frac{\ln\left(\frac{r_1r_4+r_5r_6}{r_5r_6}\right)}{\ln\left(\frac{r_1r_4+r_5r_6}{r_1r_4}\right)}\right)}+\frac{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)}{\ln 2}}$$

2.2. 实际应用测试公式

实际测试过程中 , 能够测得的数据为 V_{32} , V_{34} 和电流 I , 实际测试过程中应用下式来计算 :

$$R_s=\frac{\pi}{\ln 2}\left(\frac{V_{32}+V_{34}}{I}\right)f\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right), \tag{10}$$

式中 R_s 为测得样品的薄层电阻.

将 V_{32} 和 V_{34} 的计算值代入 (10) 式的范德堡函数 $f(V_{32}/V_{34})$ 得

$$f\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right)=f\left(\frac{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_5r_6}\right)}{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4}\right)}\right).$$

考虑特殊情况下 , 当各探针无游移时 $dx_1=dy_1=dx_2=dy_2=dx_3=dy_3=dx_4=dy_4=0$, $r_1=r_4=r_5$

$=r_6=1$, $r_2=r_3=\sqrt{2}$, 因此有

$$V_{32}+V_{34}=\frac{IR_s}{2\pi}\left(\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_5r_6}\right)+\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4}\right)\right)$$
$$=\frac{IR_s}{\pi}\ln 2. \tag{11}$$

由 (11) 式得

$$R_s=\frac{\pi}{\ln 2}\frac{V_{32}+V_{34}}{I}. \tag{12}$$

(12) 式相当于 (10) 式中 $f(V_{32}/V_{34})=1$, 即 $V_{32}=V_{34}$ 的特例 , 这也是改进 Rymaszewski 公式的一种特例 ((9) 式中的 $f(V_{32}/V_{34})=1$). 在这种情况下 , 四个探针位置为严格的方形 , 没有任何游移产生 . 这是理想的情况 , 也是我们测试时力图达到的目标 .

由 (10) 和 (9) 式可得

$$\frac{R_s}{R'_s}=\frac{f\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right)}{F\left(\frac{V_{32}}{V_{34}}\right)}=\frac{f\left(\frac{\ln((r_2r_3)(r_5r_6))}{\ln((r_2r_3)(r_1r_4))}\right)}{1/f\left(\frac{\ln((r_1r_4+r_5r_6)(r_5r_6))}{\ln((r_1r_4+r_5r_6)(r_1r_4))}\right)+\frac{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4+r_5r_6}\right)}{\ln 2}}. \tag{13}$$

设

$$\frac{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_5r_6}\right)}{\ln\left(\frac{r_2r_3}{r_1r_4}\right)}=\beta_1,$$
$$\frac{\ln\left(\frac{r_1r_4+r_5r_6}{r_5r_6}\right)}{\ln\left(\frac{r_1r_4+r_5r_6}{r_1r_4}\right)}=\beta_2,$$

当 $\beta_i>1$ 时 取 $f(\beta_i)$; 当 $\beta_i<1$ 时 取 $f(1/\beta_i)$.

$$f(\beta_i)=1+0.03237715\beta_i-0.04037679\beta_i^2$$

$$+0.00857882\beta_i^3-0.00077693\beta_i^4$$
$$+0.00002604\beta_i^5+0.00017171. \tag{14}$$

$f(\beta_i)$ ($i=1, 2$) 为 (14) 式表示的范德堡函数 , 该式为我们研究所得范德堡函数的显函数表达式^[10] , 经实际验算与范德堡函数的查表值或其隐函数计算值完全一致 . (14) 式的图形形式表示如图 3 所示 , 与文献 [1] 中的范德堡函数图形完全一致 .

因此 , 我们就可以在给定误差游移的情况下 , 利用 (13) 和 (14) 式计算游移导致电阻率的变化 .

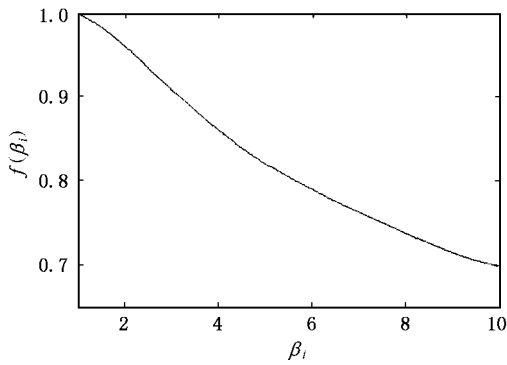


图 3 范德堡函数曲线

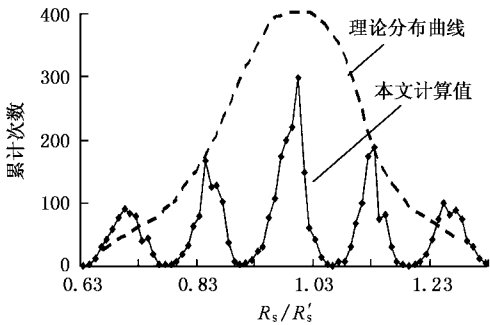


图 4 方形四探针边长产生 $\pm 10\%$ 游移导致的电阻率变化分布图

3. 理论计算数据及测试方案

3.1. 探针产生游移后的电阻变化率分布

下面讨论游移变化造成的(13)式中 R_s/R'_s 分布情况. 设 $S=1$, 使各游移 $(dx_1, dy_1) \dots (dx_4, dy_4)$ 分别产生对应游移量 $(0.1, 0), (0.1, -0.1), (0, -0.1), (-0.1, -0.1), (-0.1, 0), (-0.1, 0.1), (0, 0.1), (0.1, 0.1)$ 的变化(即让正方形边长产生 $\pm 10\%$ 的游移量), 将 $r_1 \sim r_6$ 及游移值代入(11)式经计算机计算可得到 4096 个(次数)对应的 R_s/R'_s 值, 经过对相同比例的误差变化的值(次数)汇总并整理后, 得到不同 R_s/R'_s 比值的次数分布曲线(图 4).

由图 4 计算所得的分布曲线结果容易看出, 虽然在 $R_s/R'_s = 1$ 附近测试值较多, 但变化量是较大的, 最大的误差已经超过 30% (R_s/R'_s 比值最小为 0.63, 最大为 1.34), 不能满足测试的误差要求. 图 4 中虚线为在任意方向产生游移的概率分布(符合正态分布). 因为实际计算仅为 4096 次, 并且是人为设定的位置, 所以计算分布曲线没有出现正态分布的形状. 这说明方形四探针当边长产生任意方向 $\pm 10\%$ 的游移时, 所测试的结果可能与实际值之间存在较大的误差.

3.2. 测试方案

由图 4 可知, 在有 $\pm 10\%$ 游移的情况下测定电阻有可能会带来较大的测试误差, 我们必须限制游移在最小的情况下测定电阻, 才能满足图 4 中 R_s/R'_s 接近于 1 的分布(如设定误差不大于 $\pm 2\%$),

即去掉正态分布曲线中两边的曲线, 只取 $R_s/R'_s = 1$ 附近的分布曲线. 因此, 我们采用下面的测试方案: 在利用斜置式四探针仪测试过程中, 首先通过仪器上方的视场在显示器中观察探针尖位置, 先将四个探针置于测试区的四个角点, 试测 V_{32}, V_{34} , 计算其比值, 当 $V_{32}/V_{34} = 1 \pm 0.15$ (或根据需要设定更小的误差值), 由(14)式或图 3 可知此时 $f(V_{32}/V_{34}) = 1 \pm 0.005$, 因此有 $0.995 \leq R_s/R'_s \leq 1.005$. 也可以在设定 R_s/R'_s 精度的前提下, 通过计算和查表反推出 V_{32}/V_{34} 的范围, 最后再利用(10)式计算. 这样就保证了测试的准确性. 在测试过程中, 一方面通过图像处理手段保证四探针测试位置的准确, 另一方面用测试电压比值的方法使 V_{32}/V_{34} 的值在一定区域内, 以保证测试结果的准确(不产生游移). 这样就使得测试电阻值均处于图 4 所示正态分布曲线 $0.995 \leq R_s/R'_s \leq 1.005$ 附近区域.

4. 测试结果及结论

在实际测量过程中, 探针位置的准确定位是通过斜置式方形四探针自动测试仪进行的. 该仪器带有物镜及摄像头, 测试区可通过计算机显示器进行观察, 探针位置的调整可通过鼠标点击控制每个探针自带的伺服电机来完成, 探针的移动最小步长为 $2.5 \mu\text{m}$, 这种调整方式操作起来方便、快捷. 在探针定位时则可通过仪器本身带有的机构确保探针游移的最小化, 同时对电压的检测限定在 $V_{32}/V_{34} = 1 \pm 0.15$ 范围内, 从而保证测试数据的准确性($R_s/R'_s = 1 \pm 0.005$), 使最终测试误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内. 当然, 也可根据实际测试的要求来设定误差的范围.

所测硅片为 p 型, 直径为 75 mm, 测试微区确定为 $366 \mu\text{m} \times 366 \mu\text{m}$, 测量是从硅片的中线进行的. 从

离开边缘一定长度的距离(大于 6 倍的探针间距)开始逐行测试,最后得到 600 余个测量电阻值,对结果均进行了厚度修正.表 1 为实际测得硅片沿径向分布的电阻值,测试间距为 1.87 mm,对应位置:左边

缘—中心—右边.图 5 为实测所得硅片径向电阻值变化情况.由图 5 可看出,硅片径向电阻值呈现边缘处较大、中间较小的对称变化.这与已知硅片电阻值的分布是一致的.

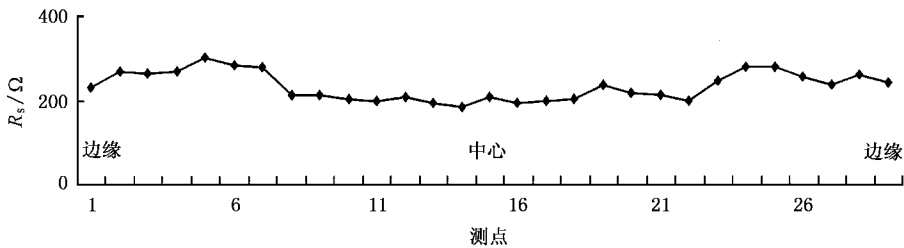


图 5 实测所得硅片电阻值径向分布(测点间距 1.87 mm)

表 1 实际测试硅片径向电阻值

测试序号	R_s/Ω	测试序号	R_s/Ω
1	230.6	16	194.5
2	270.2	17	198.8
3	264.7	18	204.5
4	270.1	19	237.1
5	299.1	20	215.5
6	282.6	21	211.3
7	279.4	22	198.0
8	211.6	23	245.4
9	209.7	24	275.6
10	201.1	25	275.7
11	198.0	26	253.7
12	205.7	27	233.9
13	191.6	28	260.5
14	182.2	29	238.2
15	209.4		

注:实际测试过程是沿径向从硅片左边缘到中心再到右边缘进行的.

经实际整片测试,将测试结果做出的等值线图如图 6 所示.

测试过程中应该注意:由于当探针的位置处于菱形的情况下也可能满足 $V_{32}/V_{34} = 1 \pm 0.15$ 的条件,因此为确保测试的正确,依靠仪器自身携带的物镜及摄像头通过显示器观察是十分必要的,这样可以判定四个探针是否在测试区的角点上.

经过理论计算,推导出有游移情况下的改进

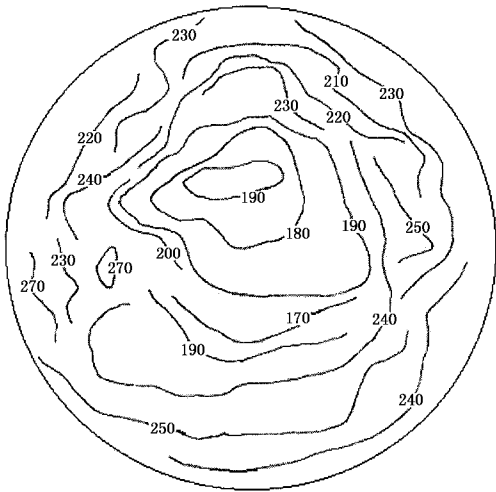


图 6 实测硅片整片薄层电阻分布(电阻值单位为 Ω)

Rymaszewski 公式((9)式).为保证实际测量电阻值的准确,讨论了 Rymaszewski 公式与实际应用公式的两个修正函数即 $f(V_{32}/V_{34})$ 和 $F(V_{32}/V_{34})$ 的关系,进而通过该图形关系拟定出控制误差的测试方案.实际采用的测试公式是有游移情况下改进的 Rymaszewski 公式的一个特例,这在方形四探针测试方法中很容易实现,并达到精确测量目标.即先检测 V_{32}/V_{34} ,在 $V_{32}/V_{34} = 1$ 的条件下,则 $f(V_{32}/V_{34}) = 1$,即 $F(V_{32}/V_{34}) = 1$ 再使用改进的 Rymaszewski 公式就可以计算了.如随意地测量 V_{32}/V_{34} ,就去查范德堡函数 $f(V_{32}/V_{34})$,那样误差就会较大.通过应用本文的方法对样品进行了测试验证,结果与实际情况能相符.

- [1] Sun Y C 1984 *Semiconductor Testing Techniques* (Beijing Metallurgy Industry Publishing House) pp13—25 , 139 (in Chinese) [孙以材 1984 半导体测试技术(北京 : 冶金工业出版社) 第 13—25 , 139 页]
- [2] Rymaszewski R 1967 *Electron . Lett .* **3** 57
- [3] Sun Y C , Shi J S , Meng Q H 1996 *Semicond . Sci . Techn .* **11** 805
- [4] Sun Y C , Zhang L Z 1994 *Acta Phys . Sin .* **43** 530 (in Chinese) [孙以材、张林在 1994 物理学报 **43** 530]
- [5] Ren H X , Hao Y , Xu D G 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1241 (in Chinese) [任红霞、郝 跃、许冬岗 2000 物理学报 **49** 1241]
- [6] Ren H X , Hao Y 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1684 (in Chinese) [任红霞、郝 跃 2000 物理学报 **49** 1684]
- [7] Van Der Pauw L J 1958 *J . Philips Res . Rep .* **13** 1
- [8] Su C H 1979 *Acta Phys . Sin .* **28** 759 (in Chinese) [宿昌厚 1979 物理学报 **28** 759]
- [9] Sun Y C , Shi J S 1995 *Acta Phys . Sin .* **44** 1869 (in Chinese) [孙以材、石俊生 1995 物理学报 **44** 1869]
- [10] Wang J , Sun Y C , Liu X F 2003 *Chin . J . Semicond .* **24** 817 (in Chinese) [王 静、孙以材、刘新福 2003 半导体学报 **24** 817]

The measurement of square resistance for microarea by square four-probe techniques and using a modified Rymaszewski 's formula *

Liu Xin-Fu Sun Yi-Cai Zhang Yan-Hui Chen Zhi-Yong

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

(Received 29 May 2003 ; revised manuscript received 13 November 2003)

Abstract

The sheet resistance for a microarea in a large silicon wafers was measured by using a modified Rymaszewski 's formulas for a square four-point probe technique. An improved Rymaszewski 's formulas was deduced taking into account the shift of probes in square four-point probe measurement. The equation of resistivity for square four-point probe measurement when there were shifts of the probes and there was no shift of the probes was deduced theoretically. A possible error produced by the shift of the probes was analyzed in theory and expressed with graphs. The effect upon measuring results arising from the shift of probes was also discussed. Practical measurement of a specimen has been tested using a self-established equipment of square four-point probes. An equal-value-line graph was plotted for the measurement results.

Keywords : probe techniques , square four-point probes , sheet resistance for microarea , the shift of probes

PACC : 0750 , 0270 , 0660

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