

双电测组合法测试半导体电阻率的研究*

宿昌厚¹ 鲁效明²

(1 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

(2 中国计量科学研究院集成电路室, 北京 100013)

摘要: 对双电测组合四探针法测试方块电阻(R_s)和体电阻率(ρ)进行了研究, 从理论和实践上揭示三种组合模式的共同优点: 测量结果与探针间距无关, 可使用不等距探针头; 具有自动修正边界影响的功能, 不必寻找修正因子; 不移动探针头即可得知均匀性。推导出用于体电阻率时的厚度函数。论述了 R_s 、 ρ 、大小样片及边界附近的测试原理, 给出了 R_s 和 ρ 的计算公式。

关键词: 双电测组合四探针法; 方块电阻; 电阻率

EEACC: 7110; 2520; 2550

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)03-0298-09

1 引言

双电测组合(亦称双位组合)四探针法测试电阻率是半导体测试领域的新进展之一, 有关的研究和报道不多。宿昌厚在文献[1]中提出并论述了该方法中的模式之一(Mode2)且仅限于薄层电阻(R_s)的测量; 之后他对有关的 F 函数曲线做了扩展和改进, 推出全域直观表达式^[2]; 国外有代表性的是 Perloff^[3]把双位组合法的 Mode1 用于体电阻率(ρ)测量, 但由于没有考虑厚度的影响, 致使误差较大, 实用困难。

迄今尚未见到对该方法较为详细的论述。本文以双电测组合方法中的三种组合模式作为整体进行了全面系统的理论和实验研究, 并对其相互比较, 揭示出明显优于传统四探针法的特点; 并且研究如何解决测体电阻率时的厚度函数问题。双电测组合法及其一整套 R_s 和 ρ 的计算式, 革新了传统四探针法, 为提高测量准确度和设计建立新的测试系统创造了有利条件。

2 方块电阻的测量

传统四探针方法的原理如图 1 所示, 局限于 $I_{14} V_{23}$ 单一状态, 它要求探针间距相等, 被测物较小或探针在边界附近, 需做几何测量继而进行边界修正, 造成不便且有时难以保证准确度。这种方法只是

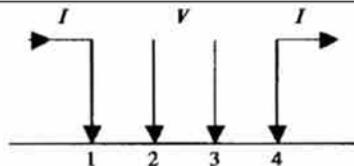


图 1 常规四探针方法

Fig. 1 Normal four point probes

普遍规律中的一个特例^[1], 并非四探针技术之全貌。所谓双电测是指让电流先后通过不同的探针对, 测量相应另外两针间电压, 进行组合, 按相关的公式求出电阻值。这时几何影响消失, 针距和边界的负面效应将不存在, 四探针将实现“自我修正”, 误差减小。双电测法共有三种组合模式, 即 Mode1、Mode2、

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69346002)

宿昌厚 男, 教授, 主要从事半导体材料检测和微电子学研究。

鲁效明 男, 高工, 主要从事半导体标准计量学研究。

2002-05-28 收到, 2002-08-20 定稿

©2003 中国电子学会

Mode3, 见图2. 我们先分析方块电阻的测量原理, 然后引伸至体电阻率.

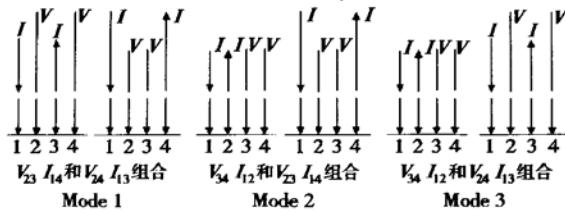


图2 双电测组合四探针法的三种组合模式

Fig. 2 Three mode dual electrotesting configuration for four-point probes

2.1 样片无穷大, 探针头处在某一位置

先以 Mode1 为例, 根据物理基础和电学原理, 当电流通过 1.3 探针时, 2 和 4 探针的电位分别为:

$$\begin{aligned}\phi_2 &= \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_2}{S_1} \\ \phi_4 &= \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3}\end{aligned}$$

2 和 4 探针间电压为:

$$V_{24} = \phi_2 - \phi_4 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (1)$$

$$\text{令 } R_3 = \frac{V_{24}}{I_{13}} = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3}$$

或写成下式:

$$\exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (2)$$

当电流通过 1.4 探针时, 同理有:

$$V_{23} = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \ln \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (3)$$

$$\text{令 } R_2 = \frac{V_{23}}{I_{14}} = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3}$$

或写成下式:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) = \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (4)$$

(4) - (2) 式:

$$\begin{aligned}&\exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) - \exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) \\ &= \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} - \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \\ &= \frac{S_1 S_2 + S_2^2 + S_1 S_3 + S_2 S_3 - S_1 S_2 - S_2^2 - S_2 S_3}{S_1 S_3} \\ &= 1\end{aligned}$$

得到具有关键意义的理论式:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) - \exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = 1 \quad (5)$$

该式说明 R_s 只取决于 R_2 和 R_3 , 与探针间距无关. 针距相等与否对 R_s 的结果不产生任何影响.

关于 Mode2 双电测法, 当电流通过 1.2 探针时有:

$$V_{43} = \frac{R_s I_{12}}{2\pi} \ln \frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_2(S_1 + S_2 + S_3)} \quad (6)$$

令 $R_1 = \frac{V_{43}}{I_{12}}$, 得到:

$$\exp\left(-\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) = \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)} \quad (7)$$

当电流通过 1.4 探针时有 V_{23} 如(3)式, 但与(4)式不同, 我们现在取其负指数形式如下:

$$\exp\left(-\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) = \frac{S_1 S_3}{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)} \quad (8)$$

取(7)与(8)二式之和得到:

$$\exp\left(-\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) = 1 \quad (9)$$

关于 Mode3 双电测法, 当电流通过 1.2 探针时, 根据(6)式我们取其正指数, 有:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) = \frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_2(S_1 + S_2 + S_3)} \quad (10)$$

当电流通过 1.3 探针时, 由(1)式取其负指数得到:

$$\exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = \frac{S_1 S_3}{S_2(S_1 + S_2 + S_3)} \quad (11)$$

(10) - (11) 式, 则有:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) - \exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = 1 \quad (12)$$

(5)、(9) 和(12) 式代表了双电测组合四探针技术的基本原理, 具有普遍规律的属性, 即对于圆形或矩形小尺寸样片或探针靠近较大样片边界时, 它们都成立. 它们的突出特点是与几何因素无关, 只要测出 V_{ij} ($i, j = 2, 3, 4$) 就能计算出 R_s .

2.2 探针靠近边界

先考虑圆片 Mode1, 探针头沿半径偏向于样片

某一侧边界如图 3 所示。

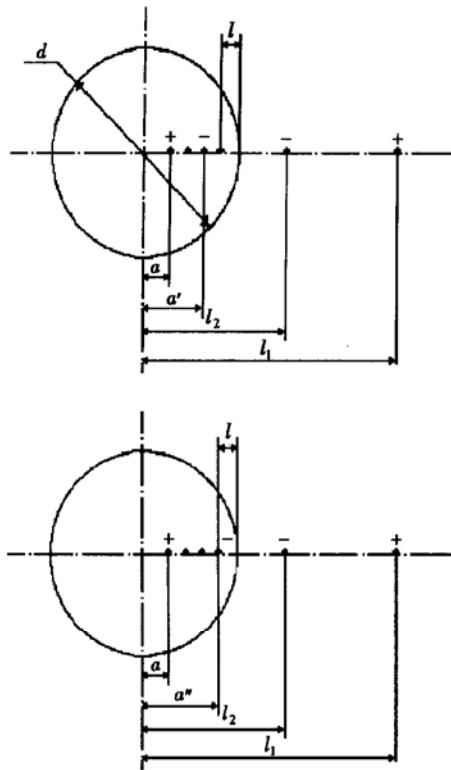


图 3 探针靠近圆片边界

Fig. 3 Probes near the edge of circular slice

设样片直径为 d , 最外一个探针距边缘为 l , 若用 r 表示半径, 则 $a = r - (S_1 + S_2 + S_3 + l)$, $a' = r - (S_3 + l)$, $a'' = r - l$, 于是:

$$l_1 = \frac{d^2}{4a} = \frac{r^2}{r - S_1 - S_2 - S_3 - l}$$

$$l_2 = \frac{d^2}{4a'} = \frac{r^2}{r - S_3 - l}$$

$$l_3 = \frac{d^2}{4a''} = \frac{r^2}{r - l}$$

当电流通过 1.3 探针时, 2.4 针电位分别为:

$$\Psi_2 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \left[\ln \frac{S_2}{S_1} + \ln \frac{l_2 - r + S_2 + S_3 + l}{l_1 - r + S_2 + S_3 + l} \right]$$

$$\Psi_4 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \left[\ln \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} + \ln \frac{l_2 - r + l}{l_1 - r + l} \right]$$

2.4 探针间的电压:

$$V_{24} = \Psi_2 - \Psi_4 =$$

$$\begin{aligned} & \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \left[\frac{S_2(l_2 - r + S_2 + S_3 + l)(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \right. \\ & \quad \times \left. \frac{(l_1 - r + l)}{S_3(l_2 - r + l)} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \exp\left(\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = \\ & \frac{S_2(l_2 - r + S_2 + S_3 + l)(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \\ & \times \frac{(l_1 - r + l)}{S_3(l_2 - r + l)} \end{aligned} \quad (13)$$

当电流通过 1.4 探针时, 2.3 针电位是:

$$\Psi_2 = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \left[\ln \frac{S_2 + S_3}{S_1} + \ln \frac{l_3 - r + S_2 + S_3 + l}{l_1 - r + S_2 + S_3 + l} \right]$$

$$\Psi_3 = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \left[\ln \frac{S_3}{S_1 + S_2} + \ln \frac{l_3 - r + S_3 + l}{l_1 - r + S_3 + l} \right]$$

同理 $V_{23} = \Psi_2 - \Psi_3$, 经整理后得:

$$\begin{aligned} & \exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) = \frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \\ & \times \frac{(l_3 - r + S_2 + S_3 + l)(l_1 - r + S_3 + l)}{S_3(l_3 - r + S_3 + l)} \end{aligned} \quad (14)$$

完成(14)式-(13)式后得到:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) = 1 \quad (5)$$

可见探针在圆片边界时(5)式仍然成立, 用同样的步骤施加于 Mode2 和 Mode3, 结果与(9)式和(12)式相同。

如果探针是在直线边界附近, 且探针连线垂直于边界线, 如图 4 所示, 对三种双电测模式仍然得到:

$$\exp\left(\pm \frac{2\pi R_i}{R_s}\right) \mp \exp\left(\pm \frac{2\pi R_j}{R_s}\right) = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (15)$$

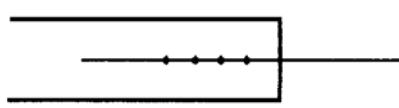


图 4 探针靠近直边界

Fig. 4 Probes near the straight edge

2.3 小样片

矩形长 a 宽 d , 探针放在中心位置, 样片周围介质为空气, 为满足电场边界条件, 用无限镜像阵列原

理分析后得到:

Mode1

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) &= Y_1 \\ = 1 + \frac{(1+2Aa)[M\sinh A(S_2+S_3)\sinh A(S_1+S_2) - R\sinh AS_2\sinh A(S_1+S_2+S_3)]}{2Aae^{2Aa}\sinh AS_1\sinh AS_3} \end{aligned}$$

Mode2

$$\begin{aligned} \exp\left(-\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) + \exp\left(-\frac{2\pi R_2}{R_s}\right) &= Y_2 \\ = 1 + \frac{(1+2Aa)[L\sinh A(S_1+S_2+S_3)\sinh AS_2 - M\sinh AS_1\sinh AS_3]}{2Aae^{2Aa}\sinh A(S_2+S_3)\sinh A(S_1+S_2)} \end{aligned}$$

Mode3

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{2\pi R_1}{R_s}\right) - \exp\left(-\frac{2\pi R_3}{R_s}\right) &= Y_3 \\ = 1 + \frac{(1+2Aa)[R\sinh AS_1\sinh AS_3 - L\sinh A(S_2+S_3)\sinh A(S_1+S_2)]}{2Aae^{2Aa}\sinh A(S_1+S_2+S_3)\sinh AS_2} \end{aligned}$$

式中 $A = \pi/d$

$$L = \operatorname{ch} 2AS_1 + \operatorname{ch} 2AS_3 - \operatorname{ch} 2A(S_1 - S_3) - 1$$

$$\begin{aligned} M &= \operatorname{ch} 2A(S_2 + S_3) + \operatorname{ch} 2A(S_1 + S_2) \\ &- \operatorname{ch} 2AS_3 - \operatorname{ch} 2AS_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \operatorname{ch} 2A(S_2 + S_3) + \operatorname{ch} 2A(S_1 + S_2) \\ &- \operatorname{ch} 2A(S_1 - S_3) - 1 \end{aligned}$$

演算结果是:

$$Y_i = 1 \quad (i = 1, 2, 3)$$

并用计算机进行了运算, 取一系列不同的 S_1, S_2, S_3 和 a, d 值 (S_1, S_2, S_3 可相等或不相等, $a \times d$ 最小为 $4\text{mm} \times 3\text{mm}$ 或 $5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 等) 代入上述三式, 结果得到 $Y_i - 1 = 0$, (15) 式仍成立。双电测组合四探针法对小矩形片也适用。无限镜像阵列原理是常规法中计算小片边界修正因子的基本理论, 周围介质不同, 镜像分布也各异, 介电常数均不出现在最终计算式。 $Y_i - 1 = 0$ 证明该理论用于双电测法是成功的。必须指出, 有限元计算法与无限镜像原理结论相同^[4], 根本不存在文献[5]中所谓的“不一致”。

对于小圆片, 设探针头位于中心, 可以证明(15)式也是成立的。当双电测组合四探针法用于测试小圆形或矩形片时, 更能显示出其优越性, 不必像常规法那样测几何尺寸和查找修正因子了。

直接用(5)、(9)和(12)式求 R_s 很困难, 通过数学上的变换得出以下三个实用计算式:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2}(R_2 + R_3)f_1\left(\frac{R_2}{R_3}\right) \quad (16)$$

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2}(R_1 + R_2)f_2\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (17)$$

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2}(R_3 - R_1)f_3\left(\frac{R_3}{R_1}\right) \quad (18)$$

式中 $f_1(R_2/R_3), f_2(R_1/R_2)$ 和 $f_3(R_3/R_1)$ 是辅

助函数, 其理论表达式如下:

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{\frac{\ln 2}{f_1} + \operatorname{arsh}\left[2^{\left(\frac{1}{f_1}-1\right)}\right]}{\frac{\ln 2}{f_1} - \operatorname{arsh}\left[2^{\left(\frac{1}{f_1}-1\right)}\right]} \quad (19)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{\ln 2}{f_2} - |\operatorname{arch}\left[2^{\left(\frac{1}{f_2}-1\right)}\right]|}{\frac{\ln 2}{f_2} + |\operatorname{arch}\left[2^{\left(\frac{1}{f_2}-1\right)}\right]|} \quad (20)$$

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{\operatorname{arsh}\left[2^{\left(\frac{1}{f_3}-1\right)}\right] + \frac{\ln 2}{f_3}}{\operatorname{arsh}\left[2^{\left(\frac{1}{f_3}-1\right)}\right] - \frac{\ln 2}{f_3}} \quad (21)$$

(19)、(20)和(21)式是超越函数, 很难直接运用, 可以用计算机得出相应的拟合多项式如下:

$$\begin{aligned} f_1(R_2/R_3) &= -9.08825(R_2/R_3)^4 \\ &+ 46.9213(R_2/R_3)^3 - 91.5654(R_2/R_3)^2 \\ &+ 80.8353(R_2/R_3) - 26.8805 \end{aligned} \quad (22)$$

适用于 $R_2/R_3 = 1.1 \sim 1.34$ 范围内。

$$\begin{aligned} f_2(R_1/R_2) &= -0.520363(R_1/R_2)^4 \\ &+ 1.71445(R_1/R_2)^3 - 2.28207(R_1/R_2)^2 \\ &+ 1.47523(R_1/R_2) + 0.611468 \end{aligned} \quad (23)$$

适用于 $R_1/R_2 = 0.32 \sim 1.0$ 之间。

$$\begin{aligned} f_3(R_3/R_1) &= -22.638(R_3/R_1)^4 \\ &+ 25.7198(R_3/R_1)^3 - 12.4497(R_3/R_1)^2 \\ &+ 3.49637(R_3/R_1) + 0.450827 \end{aligned} \quad (24)$$

适用于 $R_3/R_1 = 0.1 \sim 0.317$ 范围。

$$\begin{aligned} f_3(R_3/R_1) = & 0.00839689(R_3/R_1)^4 \\ & - 0.172288(R_3/R_1)^3 + 1.37302(R_3/R_1)^2 \\ & - 5.20806(R_3/R_1) + 9.38396 \end{aligned} \quad (25)$$

适用于 $R_3/R_1 = 5.44 \sim 3.25$ 之间.

$$\begin{aligned} f_3(R_3/R_1) = & -0.35007(R_3/R_1)^3 \\ & + 3.46619(R_3/R_1)^2 - 12.0921(R_3/R_1) \\ & + 16.6842 \end{aligned} \quad (26)$$

适用于 $R_3/R_1 = 3.22 \sim 2.27$ 之间.

与理论式(19)、(20)、(21)相比, 这些多项式给出的 f 函数, 数据误差小于万分之一. 其精确度远超过文献[1]中的 F_2 曲线和文献[2]中的直观表达式, 也可以按理论式预先计算出三个 f 函数数据表存入电脑中随时调用.

总之, 不论采用哪一种 Mode, 只要测量出 R_i 和 R_j ($i, j = 1, 2, 3$) 就能直接得到 R_s 值.

2.4 双电测组合四探针法突出优点

(1) 测试结果 R_s 与探针距离 S_1, S_2, S_3 无关, 能克服探针间距不等及难以避免的针尖横向游移的影响, 允许使用不等距探针头.

(2) 对小尺寸的圆形、矩形被测片, 或探针位于较大样片边缘附近可直接使用上述各式, 不需做几何测量和边界修正, 减小了误差.

(3) 对于某一测试点, 不动探针头同时应用三种组合模式进行测量, 能即刻得知测试部位的 R_s 均匀性, 而用常规四探针法探测不换位置是办不到的.

2.5 双电测组合法三种 Mode 的相互比较

(1) 只要测出 V_{ij} ($i, j = 2, 3, 4$) 就可求得电阻值, 与其他因素无关, 这个共同点把三种 Mode 联接成一个整体;

(2) 探针头在某一位置不动, 使用三种 Mode 所得到的是不同点的电阻值. Mode1 给出的主要是探针 2 附近的电阻值; Mode2 是探针 3 附近的电阻值; 而 Mode3 则反映探针 4 附近的电阻值, 若样片电阻很均匀, 则三者相等, 如果均匀度不好, 则三个数据有差异, 均匀度越差, 差异越大, 正是利用这一事实计算被测部位的均匀性.

(3) 实验证明, 不论用等距或不等距探针头在样片上做多点测试(含边缘附近), 对数据做统计运算, 就方差和标准偏差而言, 多数情况下 Mode2 和 Mode3 小于 Mode1, 当然三种 Mode 双电测法的方

差和标准偏差值都远小于常规四探针法.

(4) 一般情况下 $V_{23}(I_{14}) > V_{24}(I_{13}) > V_{43}(I_{12})$, $V_{24} = (0.7 \sim 0.9) V_{23}$, $V_{43} = (0.1 \sim 0.2) V_{23}$, 样片尺寸减小到接近 \bar{S} 时 V_{43} 可能更低, 三种组合状态中 Mode2 自动修正能力最强.

3 测量体电阻率

为测试体电阻率, 按常规四探针法利用薄层原理, 当厚度 W 远小于平均探针间距 \bar{S} 时有

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_{23}}{I_{14}} W \quad (27)$$

随着 W 增加, 电场与电流线分布图像偏离无限薄层时的状态, 必须引入厚度函数 $f_4(W/S)$, 即

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_{23}}{I_{14}} W f_4(W/S) \quad (28)$$

$f_4(W/S)$ 实质上是为消除厚度影响对 V_{23} 所做的修正, 其式如下:

$$\begin{aligned} f_4(W/S) = & 2 \ln 2 \frac{S}{W} [1 + \\ & 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{(2nW/S)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{(2nW/S)^2 + 4}} \right)]^{-1} \end{aligned} \quad (29)$$

双电测组合四探针完全可用于薄片体电阻率测量. 但这时单纯用 $f_4(W/S)$ 对表观测试值做厚度修正远远不够, 将造成很大误差, 特别是 $W \gg \bar{S}$ 时. 关于双电测组合四探针法用于体电阻率测量时, 如何解决厚度函数问题, 国内外无人研究过.

欲解决这个问题, 主要应当求出 $I_{12} V_{34}$ 状态时对 V_{34} 的厚度函数和 $I_{13} V_{24}$ 状态时对 V_{24} 的厚度函数. 研究这个问题的原则是: 对一定厚度的薄片, 从薄层原理出发测出的体电阻率值应当等于从体原理出发时求得的体电阻率值. 为此先从体原理理论导出对相应电压的厚度函数, 然后把它移植到薄层理论中去.

3.1 $I_{12} V_{43}$ 状态时 V_{43} 的厚度函数 $f_5(W/S)$

为了简化先考虑等距探针, 当电流通过 1.2 探针时求 V_{43} , 因样片并非无限厚, 在其上下空间应设置无数对镜像电流源(图 5)以补偿电场分布的畸变, 由物理和电学原理知道, 电流真源和全部像源对 4.3 针间形成的电压是:

$$V_{43} = \frac{\rho I_{12}}{2\pi} \left[\frac{1}{3S} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\sqrt{(2nW)^2 + (3S)^2}} - \frac{4}{\sqrt{(2nW)^2 + (2S)^2}} + \frac{2}{\sqrt{(2nW)^2 + S^2}} \right) \right]$$

整理以后为:

$$V_{43} = \frac{\rho I_{12}}{6\pi S} F_{su}\left(\frac{W}{S}\right)$$

而

$$F_{su}\left[\frac{W}{S}\right] = 1 + 6 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{(2nW/S)^2 + 9}} + \frac{1}{\sqrt{(2nW/S)^2 + 1}} - \frac{2}{\sqrt{(2nW/S)^2 + 4}} \right) \quad (30)$$

$$\rho = \frac{V_{43}}{I_{12}} 6\pi S \frac{1}{F_{su}\left(\frac{W}{S}\right)}$$

$W/S \rightarrow \infty, F_{su}(W/S) \rightarrow 1$

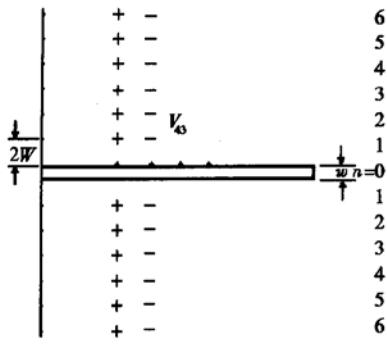


图 5 样片上、下有无数对镜像电流源

Fig. 5 Array of current mirror images upper and under slice to compensate field fluctuation

薄层原理中的厚度函数 $f_5(W/S)$: 电流流过 1, 2 针时测 3, 4 针间电压, 薄层电阻为:

$$R_s = \frac{V_{43}}{I_{12}} \times \frac{2\pi}{\ln \frac{4}{3}} \quad (\text{等距探针})$$

体电阻率 ρ 为:

$$\rho = \frac{V_{43}}{I_{12}} \times \frac{2\pi}{\ln \frac{4}{3}} W f_5(W/S) =$$

—(薄层原理)—

$$\frac{V_{43}}{I_{12}} 6\pi S \frac{1}{F_{su}\left(\frac{W}{S}\right)}$$

—(体原理)—

由此得出 $f_5(W/S)$ 如下:

$$f_5(W/S) = \frac{3(S/W)\ln(4/3)}{F_{su}(W/S)} \quad (31)$$

当 W 很小时 $f_5(W/S) \rightarrow 1$

3.2 用类似步骤求 $I_{13} V_{24}$ 状态时 V_{24} 的厚度函数 $f_6(W/S)$

$$f_6(W/S) = \frac{(3/2)(S/W)\ln 3}{F_{per}(W/S)} \quad (32)$$

而

$$F_{per}(W/S) = 1 + 3 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{(2SW/S)^2 + 1}} - \left(\frac{1}{\sqrt{(2SW/S)^2 + 9}} \right) \right) \quad (33)$$

当 W 很小时 $f_6(W/S) \rightarrow 1$

以上理论是针对等距探针推导, 若实际使用的探针距离不相等则用其平均间距 \bar{S} 代入也是完全可以的, 专用不等距探针头用于双电测组合法测量体电阻率的大量结果对此提供了佐证.

3.3 体电阻率的计算式

3.3.1 Mode1

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_{23}f_4(W/S) + V_{24}f_6(W/S)}{I} \times f_1\left(\frac{V_{23}f_4(W/S)}{V_{24}f_6(W/S)}\right) W \quad (34)$$

3.3.2 Mode2

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_{23}f_4(W/S) + V_{34}f_5(W/S)}{I} \times f_2\left(\frac{V_{34}f_5(W/S)}{V_{23}f_4(W/S)}\right) W \quad (35)$$

3.3.3 Mode3

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V_{24}f_6(W/S) - V_{34}f_5(W/S)}{I} \times f_3\left(\frac{V_{24}f_6(W/S)}{V_{34}f_5(W/S)}\right) W \quad (36)$$

式中电流 $I = I_{14} = I_{12} = I_{13}$, 实际测量时对三种 Mode 取一样的电流, 被测片不应太厚, 一般 $W/S \leq 4 \sim 5$ 为宜.

3.4 对 Perloff 计算式的评价

Perloff 给出 Mode1 的计算式为^[3]:

$R_s = K_a R_a$, 而 $K_a = -14.7 + 25.173(R_a/R_b) - 7.872(R_a/R_b)^2$, R_a/R_b 在 $1.2 \sim 1.32$ 之间, 其 R_a 就是我们的 R_2 , R_b 是 R_3 , 测体电阻率时,

$$\rho = K_a R_a W f_4(\frac{W}{S}) \quad (37)$$

声称只用于圆片, 限于等距探针。利用该式计算电阻率存在问题, 因为它没有对 K_a 中的 R_a 和 R_b 做厚度修正, 引来较大误差, $W=1\text{mm}$ 时误差已达 $3\% \sim 5\%$, $W=1.3\text{mm}$ 时已高达 8% 。只有把(37)式改造成

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} f_4(W/S) K'_a W \quad (38)$$

而

$$K'_a = -14.7 + 25.173 \left(\frac{V_{23} f_4(W/S)}{V_{24} f_6(W/S)} \right) - 7.872 \left(\frac{V_{23} f_4(W/S)}{V_{24} f_6(W/S)} \right)^2 \quad (39)$$

才能消除厚度增大带来的影响, 测试结果才更准确, 与(34)式相同。

双电测法也要求四根针成一线。实际上探针有时偏离直线或有纵向游移。曾用已不符合标准旧探针头和仪器测量部分 Si 片, 然后再用 Fell 探针在精密仪器上测量, 结果在允许误差范围内一致, 说明双电测法抑制此种偏离或游移影响的能力较强, 至少优于传统方法。

4 实测验证

为了验证, 我们特意制做了两个不等距四探针头。

1号:

$$S_1 = 0.782\text{mm}$$

$$S_2 = 1.007\text{mm}$$

$$S_3 = 1.191\text{mm}$$

$$\text{平均间距 } \bar{S} = 0.9933\text{mm}$$

2号:

$$S_1 = 1.014\text{mm}$$

$$S_2 = 1.288\text{mm}$$

$$S_3 = 1.593\text{mm}$$

$$\text{平均间距 } \bar{S} = 1.2983\text{mm}$$

与精密 Fell 探针头和普及型探针头一起, 用双电测法和常规法进行了大量测试, 证明上述理论正确, 部分结果摘选如下:

4.1 双电测法与探针间距无关(表 1)

表 1 双电测法与探针间距无关

Table 1 Independent of probe spacings for dual electrotesting configuration

W / mm	直径 / mm	电流 / mA	$R_s / (\Omega \cdot \square^{-1})$		相对误差 /%
			常规 Fell 探针法	1号不等距 双电测 2	
0.36	40	0.05	1241.764	1242.793	0.08
0.67	56	0.1	966.052	966.743	0.07
0.46	50	1.0	38821.34	38951.31	0.33
0.64	51	0.02	3033.79	3016.39	0.57

W / mm	直径 / mm	电流 / mA	$\rho / (\Omega \cdot \text{cm})$		相对误差 /%
			常规 Fell 探针法	1号不等距 双电测 2	
0.64	51	30	0.09472	0.09518	0.485
0.64	51	3.0	1.03505	1.04399	0.864
1.00	40	0.1	104.232	104.168	0.061
1.30	40	0.1	92.1905	92.5201	0.357

4.2 双电测法不需边界修正

4.2.1 探针靠近边界(表 2)

表 2 探针靠近边界

Table 2 Probes near the edge

W / mm	直径或 边长 / mm	电流 / mA	$R_s / (\Omega \cdot \square^{-1})$			L / mm
			2号不等距 双电测 2	常规法 (不修正)	常规法 (修正)	
0.46	50	5	407.65	428.40	404.41	1.8
0.67	56	0.11	965.673	1015.19	965.01	2.0
0.65	36	0.30	117.642	125.781	116.83	1.3
0.33	42	2.0	8.5171	9.0794	8.367	1.0

W / mm	直径或 边长 / mm	电流 / mA	$\rho / (\Omega \cdot \text{cm})$			L / mm
			2号不等距 双电测 2	常规法 (不修正)	常规法 (修正)	
0.64	40	0.02	257.153	290.923	257.87	0.8
0.68	56	0.11	64.937	67.567	64.227	2.0
0.42	10×10	2.0	0.2491	0.2728	0.2503	1.0

注: 常规法 Fell 探针头不修正时误差达($5\sim 13\%$), 修正后为($0.8\sim 1.7\%$)

4.2.2 小尺寸矩形样片(表 3)

表 3 小尺寸矩形样片

Table 3 Small rectangle slice

W / mm	尺寸 $a \times d$ / mm	电流 / mA	$R_s / (\Omega \cdot \square^{-1})$		
			1号不等距 双电测 2	常规法 (不修正)	常规法 (修正)
0.3	5×5	2.0	189.593	240.679	188.971
0.3	5×5	2.0	233.369	300.948	236.292
0.3	5×5	2.0	201.582	257.699	202.334
0.3	5×10	2.0	227.399	260.044	232.187

续表3

W /mm	尺寸 $a \times d$ /mm	电流 /mA	$\rho / (\Omega \cdot \text{cm})$		
			1号不等距 双电测 2	常规法 (不修正)	常规法 (修正)
0.42	10×10	2.0	0.1865	0.2019	0.1884
0.42	10×10	2.0	0.2491	0.2728	0.2503
0.35	5×5	0.1	7.049	9.165	7.157
0.445	5×20	0.1	8.419	9.677	8.855

注：常规法 Fell 探针头不修正时误差达(8~15)%甚至30%，修正后为(0.5~2)%， R_s 是用精度较低的仪器测出。

4.3 双电测法可同时给出不均匀度(表4)

表4 双电测法同时给出不均匀度

Table 4 Homogeneity can be obtained by dual-configuration methods simultaneously

硅片	W /mm	直径 /mm	电流 /mA	$\rho / (\Omega \cdot \text{cm})$			不均匀度/%
				测法1	测法2	测法3	
高阻	0.63	50	0.01	1807.116	1695.612	1659.519	8.52
硅片	0.63	51	0.01	1983.228	1870.780	1833.663	7.34
标准片	1.03	50	0.01	2053.221	1963.343	1933.720	6.00
标准片	0.73	50	0.01	1602.053	1554.294	1535.853	4.22
标准片	0.636	51	6.5	8.6×10^{-3}	8.66×10^{-3}	8.67×10^{-3}	0.687
标准片	0.631	51	0.04	68.5415	68.5666	68.5695	0.04
标准片	0.633	51	3.0	1.0775	1.0773	1.0773	0.018
标准片	0.637	51	0.02	189.4571	189.4814	189.4762	0.13

4.4 阻值变化曲线

标称值为 $1.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 的标准硅片，在其中心位置上测量 10 次，每次转动 36° 角， ρ 值变化及标准偏

差值(SV)见图6。双电测法的曲线起伏远小于常规四探针法。

立足于本文双电测原理，我国已制成了 SDY-VI 电阻率测试仪和 D41-10 多功能高精密可绘图的全新测试系统。

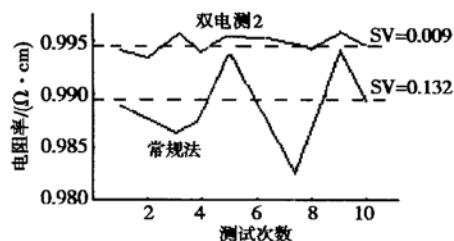


图6 阻值变化曲线

Fig. 6 Curve of resistivity change

参考文献

- [1] Su Changhou. Acta Physica Sinica, 1979, 28(6): 759[宿昌厚. 物理学报, 1979, 28(6): 759]
- [2] Su Changhou. Semiconductor Technology, 1987, 3: 41 [宿昌厚. 半导体技术, 1987, 3: 41]
- [3] Perloff. Solid State Technol, 1981, 24: 112
- [4] Su Changhou. Collection of National Conference on Silicon Material, 1996[宿昌厚. 全国硅材料学术会议文集, 1996]
- [5] Sun Yicai, et al. Acta Physica Sinica, 1995, 44(12): 1869[孙以才, 等. 物理学报, 1995, 44(12): 1869]

Study of Measuring Semiconductor Resistivity by Three Mode Dual Electro-Testing Configuration with Four Point Probes^{*}

Su Changhou¹ and Lu Xiaoming²

(1 Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

(2 National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: A complete research of dual electro-testing configuration technique with three modes for measuring sheet resistance and wafer resistivity of a semiconductor is introduced. This new method can automatically eliminate errors caused by geometrical factors and improve measuring accuracy. Here are the outstanding advantages: The measuring results do not depend on the spacing of probes. Neither the mechanical drifting of probes nor the uneven distance between them has any effect on outcome. Therefore unevenly spaced probes can be used. No edge rectification is necessary for the small circle or rectangle sample and for the probes located near the edge. Homogeneity within a small range can be simultaneously obtained using the three modes of configuration without move of probes. But it is impossible for classical method. This study also initially solved the problem of thickness function for calculating wafer resistivity with dual electro-testing configuration. The systematic theoretical demonstration and a lot of experimental data are given. A group of expressions for calculating R_s and ρ is shown. The dual electro-testing configuration technique is significantly better than traditional four-point probes method. It is an innovation.

Key words: dual electro-testing configuration four-point probes; sheet resistance; resistivity

EEACC: 7110; 2520; 2550

Article ID: 0253-4177(2003)03-0298-09

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 69346002)

Su Changhou male, was born in 1935, professor. He is engaged in the research on semiconductor materials and microelectronics.

Lu Xiaoming male, was born in 1942, senior engineer. He is engaged in the research on the standard metrology for semiconductor.

Received 28 May 2002, revised manuscript received 20 August 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics